

# SISTEMA PARA CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

**Tábata Aira Ferreira** - [t105695@dac.unicamp.br](mailto:t105695@dac.unicamp.br)

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW)  
Cidade Universitária Zeferino Vaz Barão Geraldo – Campinas / SP, 13083-859

**Luiz Ângelo Berni** - [berni@las.inpe.br](mailto:berni@las.inpe.br)

**Tiago Franca Paes** - [tiago@las.inpe.br](mailto:tiago@las.inpe.br)

**Wadeir Amaral Vilela** - [waldeir@las.inpe.br](mailto:waldeir@las.inpe.br)

**Antonio Fernando Beloto** - [beloto@las.inpe.br](mailto:beloto@las.inpe.br)

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS). Av. dos Astronautas, 1758 – São Jose dos Campos/ SP, 12227-010

**Resumo.** No laboratório do grupo de células solares do LAS – Laboratório Associado de Sensores e Materiais foi implementado um sistema manual de caracterização espectral de dispositivos fotovoltaicos. Basicamente, o sistema é composto por uma fonte de radiação de filamento de 250 W, um monocromador de distância focal de 250 mm e um sistema de detecção com amplificador lock-in. O sistema foi caracterizado em irradiância com um detector calibrado e permite caracterizar dispositivos que trabalham na faixa espectral entre 300 nm e 1100 nm. Várias curvas de respostas espectrais de células solares foram obtidas e os valores estimados das correntes de curto-circuito foram comparados com os valores medidos no simulador solar obtendo boa concordância. Também foram obtidas as curvas de resposta espectral relativa de alguns radiômetros.

**Palavras-chave:** Resposta espectral, Radiômetro, Célula solar

## 1. INTRODUÇÃO

A resposta espectral de um dispositivo fotovoltaico descreve a sua capacidade em converter a radiação incidente em corrente elétrica em função do comprimento de onda. Podemos definir a resposta espectral absoluta de um dispositivo (célula solar, fotodiodo ou radiômetro) como sendo a razão entre a densidade de corrente gerada pelo dispositivo na condição de curto circuito ( $A/cm^2$ ) e a irradiância incidente ( $W/cm^2$ ) em função do comprimento de onda. Através da medida da resposta espectral, no caso de células solares, é possível analisar vários aspectos de sua estrutura, como por exemplo, o material de fabricação da célula, a profundidade e as características da junção e do filme anti-refletor aplicado. Também é possível calcular a corrente de curto-circuito de um dispositivo fotovoltaico ou célula solar para diferentes espectros de iluminação (AM0, AM1, etc.).

No geral, são utilizados filtros de interferência ou um monocromador para a obtenção da radiação monocromática. Dependendo da sensibilidade do dispositivo, a radiação monocromática que incide sobre o sensor é pulsada em uma dada frequência, através de um modulador ("chopper") que obstrui a luz por espaços regulares de tempo. O sinal do sensor é então amplificado e medido em um lock-in na frequência determinada pelo "chopper" [L. Philipe Boivin, 1986] [S. Silvestre, 1999] [H. Field, 1998].

Este trabalho teve por objetivo montar um sistema para obter a curva de resposta espectral de dispositivos fotovoltaicos e, no caso de células solares, estimar a corrente de curto-circuito utilizando espectros AM1,5G e comparar com os resultados medidos no simulador solar disponível no laboratório. Também foram medidas as curvas de alguns radiômetros.

## 2. SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL

Para medir a resposta espectral de elementos sensores, o Laboratório de Células Solares - CELSOL implementou um sistema com monocromador montado em uma bancada ótica de  $600 \times 900 \text{ mm}^2$ , como pode ser verificado na Fig. 1. A ótica de entrada é composta por uma lâmpada halógena de tungstênio (QTH) de 250W da Newport (modelo 6334NS), instalada em um "housing" (modelo 6144-1) que possui um sistema próprio de ventilação para evitar superaquecimento da lâmpada, um espelho plano de primeira superfície ( $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ), uma lente plano-convexa ( $\phi = 75 \text{ mm}$ ,  $f = 145 \text{ mm}$ ) e um suporte para filtros passa alta para inibir espectros de segunda ordem na saída do monocromador. O monocromador utilizado (Oriel 77200) possui distância focal de 250 mm e grade de difração de 1200 linhas/mm reproduzindo comprimentos de onda de 300 a 1100 nm. A fenda de saída do monocromador tem

largura ajustável até 3 mm e altura até 12 mm e a dispersão linear é 2,86 nm/mm. O plano de configuração ótica do monocromador é assimétrica Czerny-Turner.

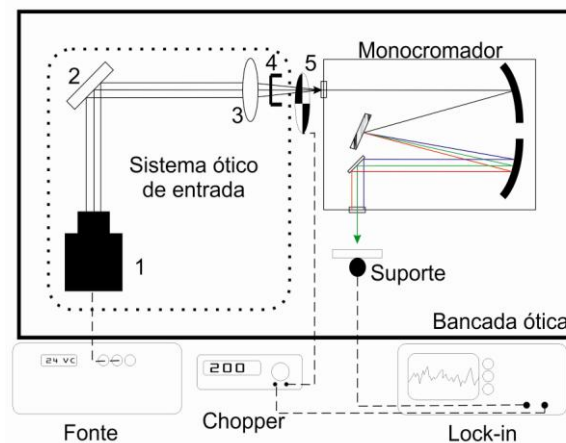


Figura 1- Diagrama do sistema de medida de resposta espectral do CELSOL (1- *Housing* da lâmpada, 2- espelho plano de primeira superfície, 3- lente convergente, 4- suporte para filtros óticos, 5- *chopper* ótico).

Os sinais na saída dos dispositivos em teste foram medidos através de um multímetro de 6½ dígitos (Agilent-34401A) com precisão de  $\pm 0,0035\%$  DC e  $\pm 0,06\%$  AC. No caso de baixa sensibilidade dos dispositivos é possível utilizar um amplificador “lock-in” (SR850-DSP) em conjunto com um “chopper” ótico como representado na Fig. 1. A Fig. 2 mostra uma foto geral do sistema montado no laboratório.

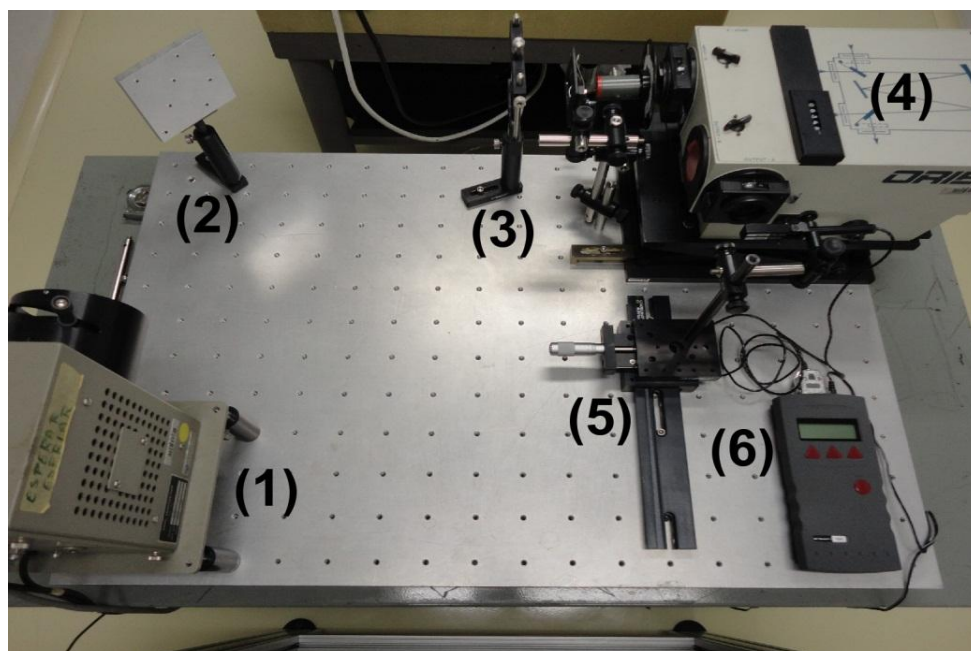


Figura 2- Foto do sistema de medida de resposta espectral (1- fonte de radiação, 2- espelho plano, 3- lente convergente, 4- monocromador, 5- suporte dos detectores, 6- fotodiodo calibrado).

## 2.1 Medida da corrente de curto-circuito

O laboratório CELSOL possui um sistema de medidas de curva IxV de células solares de silício, que tem o simulador solar da Oriel de 1000 Watts modelo 81193 como principal componente. O simulador opera com uma lâmpada de descarga em gás de alta pressão de Xenônio de 1000 W sendo possível iluminar uma área de 152 x 152mm<sup>2</sup> e reproduzir o espectro solar AM0 ou AM1,5G. A Fig. 3 mostra um desenho esquemático do simulador com o sistema de medida de curva IxV.

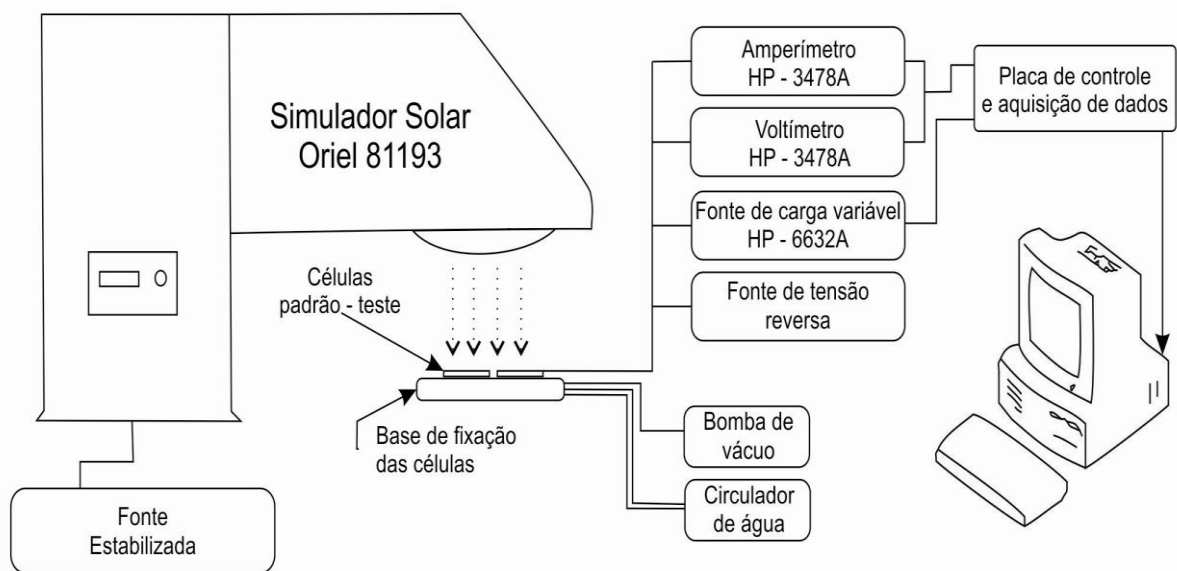


Figura 3- Diagrama do sistema de caracterização de curva IxV de células solares de silício do CELSOL.

O sistema permite a determinação dos parâmetros de saída de uma célula solar ou radiômetros, como por exemplo, corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, potência máxima, fator de preenchimento e eficiência. No presente trabalho, a corrente de curto-circuito das células será medida neste sistema e comparada com a corrente de curto-circuito estimada através da medida de resposta espectral. Esta corrente estimada é obtida através da integração em todo o espectro do produto da irradiância espectral do simulador solar incidente no elemento sensor ( em  $Wcm^{-2}nm^{-1}$ ) pela resposta espectral medida com o monocromador ( em  $AW^{-1}$ ), considerando a área efetiva do sensor ( em  $cm^{-2}$ ).

### 3. RESULTADOS

Após a montagem do sistema de caracterização espectral como mostrado na Fig. 2, o sistema foi alinhado com um laser de HeNe e os espectros na entrada e saída do monocromador foram medidos utilizando dois espectrômetros da GetSpec (modelos 2048 e NIR128L-1.7TE). A Fig. 4 mostra o espectro da fonte de radiação na entrada do monocromador e a Fig. 5 mostra a irradiância espectral na saída do monocromador com uma fenda de 1 mm de abertura e a 1,85 cm de distância da fenda. Verificamos na Fig. 5 que a região de trabalho do sistema está limitada entre 300 nm a 1100 nm.

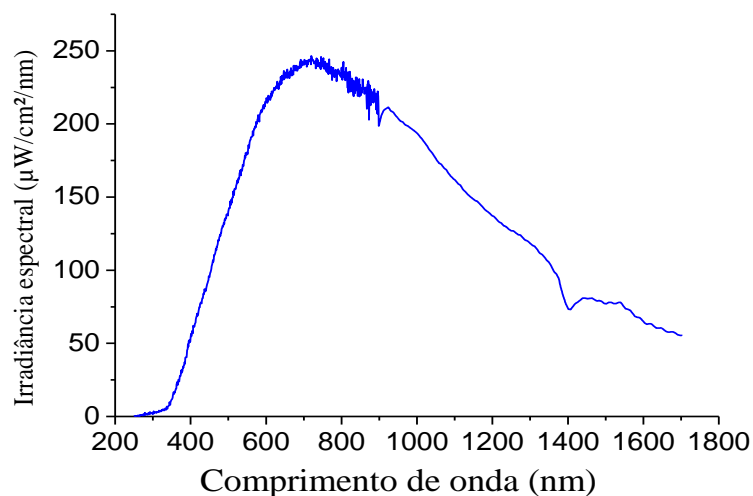


Figura 4- Irradiância da lâmpada na entrada do monocromador.

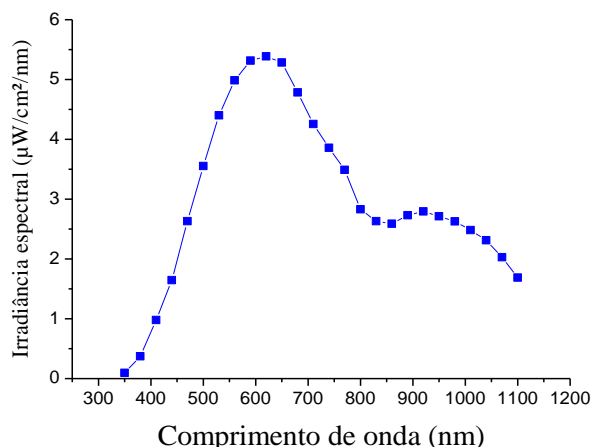


Figura 5- Irradiância espectral na saída do monocromador.

A irradiância do simulador solar foi calibrada utilizando uma célula solar espacial padrão de referência. De acordo com a norma IEC 60904-9 e com os resultados das medidas realizadas no laboratório, o simulador solar do CELSOL está classificado como CBA para uma área de trabalho de 152 x 152 mm<sup>2</sup> e CAA para uma área de 76 x 76 mm<sup>2</sup>. [T. F. Paes, 2012]. Na Fig. 6 temos o espectro padrão AM1,5G e o espectro medido utilizando os espectrômetros da GetSpec.

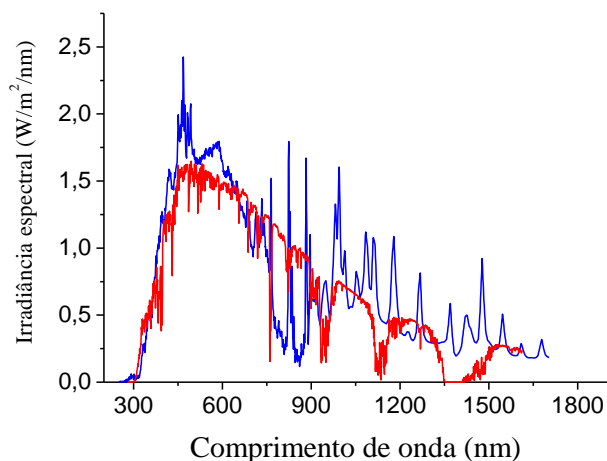


Figura 6- Espectro solar AM1,5G padrão (vermelho) e espectro gerado pelo simulador solar (azul).

Nas medidas de caracterização espectral foram utilizados uma célula solar fabricada no Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP (LME/USP), uma célula solar da Spectrolab, dois radiômetros da Kipp&Zonen e um radiômetro protótipo usado para a medida da radiação global desenvolvido no laboratório. As Tab. 1 e 2 resumem algumas características desses dispositivos.

Tabela 1. Características das células solares utilizadas para validar o sistema de caracterização espectral.

Célula Solar	Origem	Tipo de uso	Área	Corrente de curto-circuito	Tensão de circuito aberto
LME/USP	Brasileira	Terrestre	2,10 cm <sup>2</sup>	(0,070 ± 0,002)A	(0,59 ± 0,01)V
Spectrolab	Americana	Espacial	7,88 cm <sup>2</sup>	(0,276 ± 0,002)A	(0,590 ± 0,004 )V

Tabela 2. Características dos radiômetros utilizados para validar o sistema de caracterização espectral.

Radiômetro	Sensibilidade	Tipo de detector	Faixa espectral	Medição
Kipp&Zonen Tipo: PAR n° de série: 060773	$4,57\mu\text{V}/\mu\text{mol}/\text{s}.\text{m}^2$	Fotodiodo de silício e filtros	(400 – 700) nm	Radiação fotossinteticamente ativa
Kipp&Zonen Tipo: GLOBAL n° de série: 064170	$74,1\mu\text{V}/\text{W}.\text{m}^{-2}$	Fotodiodo de silício	(400 – 1100) nm	Radiação Solar Global
Protótipo CELSOL	$18,5\mu\text{V}/\text{W}.\text{m}^{-2}$	Célula solar	(400 – 1100) nm	Radiação Solar Global

Utilizando o sistema de medida de resposta espectral descrito no item 2, foram medidas as células solares do LME/USP e Spectrolab usando um resistor de carga de  $99,372\ \Omega$ . A Fig. 7 representa a curva obtida para a célula solar do LME/USP. Com os dados da resposta espectral e conhecendo o espectro do simulador solar (Fig. 6), a corrente de curto-circuito foi estimada em  $(0,0788 \pm 0,0001)$  A. A mesma célula foi medida no simulador solar e obtivemos uma corrente de curto-circuito de  $(0,070 \pm 0,002)$  A. A Fig. 8 mostra a resposta espectral obtida para a célula solar da Spectrolab. A corrente de curto-circuito estimada foi de  $(0,2098 \pm 0,0001)$  A. Para esta célula solar o valor obtido pelo simulador foi  $(0,2756 \pm 0,002)$  A de corrente de curto-circuito, que por ser uma célula solar de uso espacial apresenta maior sensibilidade na região do UV, como pode ser verificado no gráfico da Fig. 8.

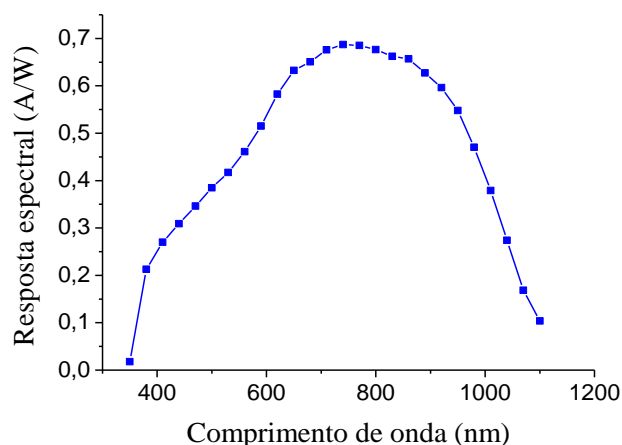


Figura 7- Curva de resposta espectral da célula solar LME/USP.

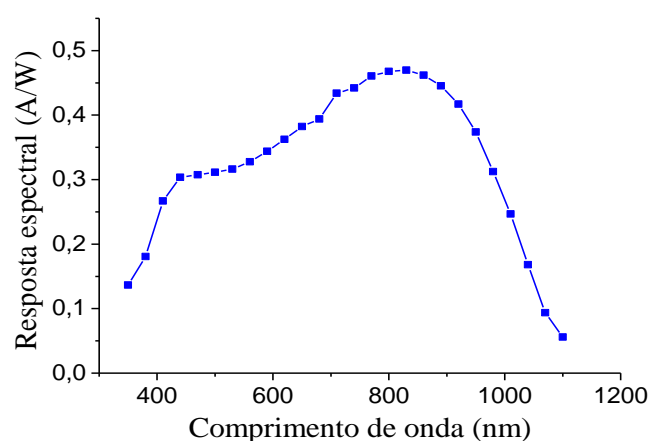


Figura 8- Resposta espectral para a célula Spectrolab.

As Fig. 9 e 10 mostram as curvas obtidas para dois radiômetros da Kipp&Zonen, ver Tab. 2. Como não temos as curvas do fabricante para estes radiômetros, apenas podemos verificar que os valores medidos são compatíveis com curvas típicas relativas esperadas para estes radiômetros. Na Fig. 11, temos a resposta espectral medida de um protótipo de radiômetro global desenvolvido no laboratório (curva preta) onde verificamos uma queda acentuada em relação à curva do sensor utilizado (curva vermelha) que provavelmente se deve à transmitância do difusor usado neste radiômetro (curva azul).

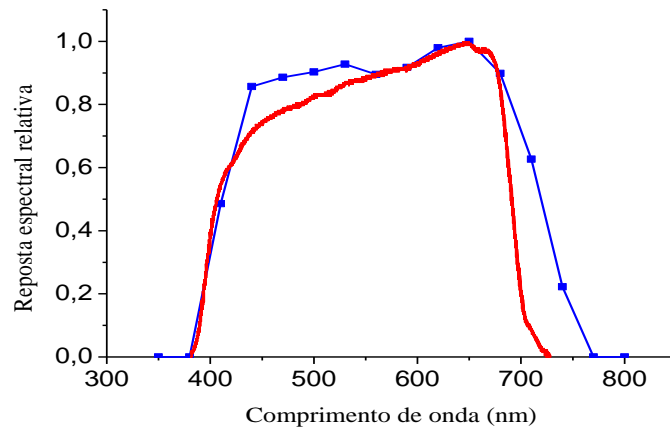


Figura 9- Resposta espectral relativa do radiômetro Kipp&Zonen-PAR (vermelha) e resposta espectral medida (azul).

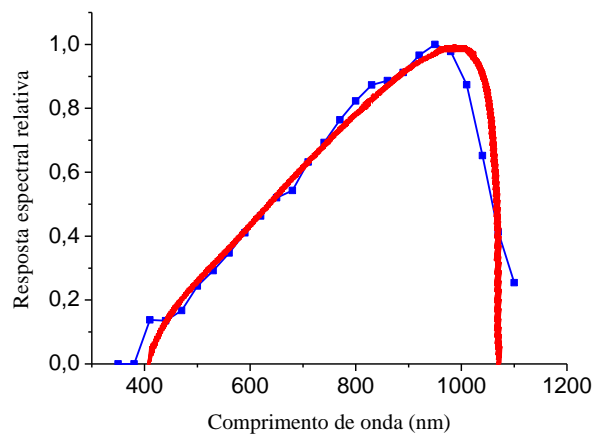


Figura 10- Resposta espectral relativa do radiômetro Kipp&Zonen-Global (vermelha) e resposta espectral medida (azul).

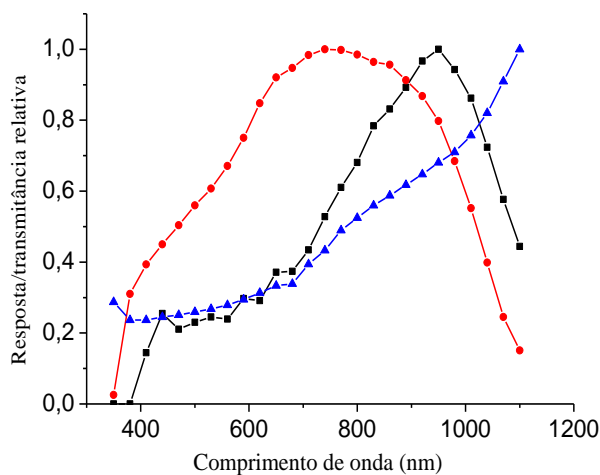


Figura 11- Resposta espectral relativa de um radiômetro protótipo (preta) em conjunto com resposta do sensor (vermelha) e transmitância do difusor de teflon (curva azul).

Quando comparados com a corrente determinada através das curvas corrente-tensão e das especificações fornecidas pelos fabricantes, os resultados obtidos mostram que o sistema de caracterização espectral permite uma avaliação precisa da resposta das células solares e radiômetros. Isso permite que o sistema de medidas possa ser utilizado em processos de fabricação de células solares e sensores de silício, indicando se alterações nesses processos provocam modificações nos valores de resposta espectral e desempenho dos dispositivos.

#### 4. CONCLUSÃO

Com equipamentos disponíveis no laboratório foi possível implementar um sistema manual de caracterização espectral de dispositivos fotovoltaicos que permite caracterizar sensores e dispositivos na faixa espectral entre 300 nm e 1100 nm. Através das curvas de resposta espectral de algumas células solares e radiômetros foram calculadas as correntes de curto-circuito e comparadas com os valores medidos utilizando o simulador solar obtendo-se resultados compatíveis. Também houve concordância dos resultados quando comparados com as respostas relativas fornecidas pelos fabricantes. Como proposta de aprimoramento do sistema, poderiam ser utilizadas duas fontes de radiação para cobrir por completo o intervalo de interesse na caracterização dos dispositivos: uma lâmpada de deutério que apresenta emissão na região UV e uma segunda fonte de filamento com emissão na região do visível e do infravermelho. Além disso, o monocromador deverá comportar até quatro redes de difração cobrindo o espectro desde o UV até o IR. O sistema poderá ser controlado por um microcomputador com um programa dedicado para aquisição e análise dos dados. Para a caracterização de células de tripla junção, o sistema deverá permitir a introdução de uma fonte de radiação de polarização.

#### *Agradecimentos*

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte parcial neste trabalho através do projeto “Desenvolvimento de Sistema para Monitoramento Ambiental Remoto” e pela bolsa de iniciação científica da aluna Tábata Aira Ferreira.

#### REFERÊNCIAS

- H. Field; UV-VIS-IR Spectral Responsivity Measurement System for Solar Cells; National Renewable Energy Laboratory, NREL/CP-520-25654, 1998.
- L. Philippe Boivin, Wolfgang Budde, C. X. Dodd and S. R. Das; Spectral response measurement apparatus for large area solar cells; Applied Optics, vol. 25, No 16, 1986.
- S. Silvestre, L. Sentís and L. Castaner; A Fast Low-Cost Solar Cell Spectral Response Measurement System with Accuracy Indicator; IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 48, No 5, October 1999.
- T. F. Paes; Sistemas de Caracterização de Elementos Sensores para Radiômetros Fotovoltaicos; dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/LAS, Fevereiro/2012.

#### SYSTEM FOR SPECTRAL CHARACTERIZATION OF PHOTOVOLTAIC DEVICES

**Abstract.** *In the laboratory group of solar cells of LAS was implemented a manual system for spectral characterization of photovoltaic devices. Basically, the system comprises a radiation source filament of 250 W, a monochromator with focal length of 250 mm and detection system with lock-in amplifier. The system was characterized with a calibrated power detector to measure the signal at the output of the monochromator and allows the characterization of devices that work in the spectral range between 300nm and 1100nm. Several spectral response curves of solar cells were obtained and the estimated values of short circuit currents were compared with values measured in the solar simulator available in the laboratory getting good agreement. Also the relative spectral response curves of some radiometers was obtained.*

**Key words:** Spectral response, Radiometer, Solar cell