

SISTEMAS DE CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA E ÓTICA DE DETECTORES FOTOVOLTAICOS PARA RADIÔMETROS

Tiago Franca Paes – tiago@las.inpe.br

Antonio Fernando Beloto – beloto@las.inpe.br

Luiz Angelo Berni – berni@las.inpe.br

Waldeir Amaral Vilela – waldeir@las.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Laboratório Associado de Sensores e Materiais - LAS
Av. dos Astronautas, nº 1.758 - Jd. Granja - CEP: 12227-010. São José dos Campos - SP - Brasil

Resumo. O objetivo deste trabalho é de apresentar sistemas de caracterização elétrica e ótica para análise e estudos de elementos sensores dos radiômetros fotovoltaicos desenvolvidos no laboratório. Atualmente, o Laboratório de Células Solares do LAS - INPE conta com três sistemas de caracterização: sistema de medida de curva de corrente por tensão (IxV), sistema de medida de resposta espectral e sistema de medida de resposta angular para avaliar a lei do cosseno. Todos os sistemas foram montados ou aprimorados e caracterizados de acordo com normas técnicas específicas. Para validar os sistemas de medidas do laboratório foram medidas diferentes amostras de elementos sensores voltados para os radiômetros tais como células solares espaciais e terrestres, nacionais e importadas, fotodiodos de silício, que respondem na faixa espectral do visível e do infravermelho próximo, e fotodiodos de dióxido de titânio, que respondem somente à radiação ultravioleta. Os resultados medidos foram analisados e comparados com os dados informados pelos fabricantes dos dispositivos fotovoltaicos confirmando a capacidade dos sistemas de medidas para caracterização e calibração de sensores fotovoltaicos.

Palavras-chave: Caracterização elétrica e ótica, Radiômetro, Detectores fotovoltaicos.

1. INTRODUÇÃO

A conversão da energia solar em energia elétrica alcançou nos últimos anos um estágio de desenvolvimento capaz de inseri-la na matriz energética mundial de modo bastante satisfatório, aumentando cada vez mais a pesquisa nesta área. Células solares e sensores fotovoltaicos são dispositivos semicondutores que absorvem radiação solar e são capazes de converter essa radiação eletromagnética proveniente do Sol em energia elétrica mensurável - corrente e tensão. O Grupo de Pesquisas em Células Solares - CELSOL do Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS localizado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE desenvolve atividades no estudo e na caracterização de células solares e fotodiodos como elementos sensores para uso em radiômetros, bem como no desenvolvimento de processos e técnicas de microeletrônica utilizadas para a obtenção destes dispositivos. O grupo desenvolveu e ainda mantém o Experimento Célula Solar a bordo do satélite brasileiro SCD2 que mede a variação do albedo planetário utilizando células solares de uso espacial de silício monocristalino (Veissid, 1990). Desenvolveu também, um simulador solar de baixo custo que simula o espectro da radiação solar na superfície terrestre e fora da atmosfera (Veissid, 2008). Outro projeto foi o Radiômetro Global, que também utiliza uma célula solar de silício monocristalino como elemento sensor para medida da radiação solar global (Vilela, 2010), e está em desenvolvimento um radiômetro que opera na faixa espectral do ultravioleta (Berni, 2010).

Como resultado da caracterização dos elementos sensores é possível determinar sua aplicabilidade nos diversos tipos de radiômetros, mas para isso são necessários sistemas de medidas apropriados para a obtenção dos parâmetros intrínsecos desses dispositivos. O objetivo deste trabalho é apresentar sistemas de caracterização para análise e estudos dos elementos sensores dos radiômetros fotovoltaicos desenvolvidos no laboratório. Cada tipo de radiômetro possui um elemento sensor que opera num intervalo de comprimento de onda específico. O radiômetro para medida da radiação global atua entre 400 e 1100nm, o radiômetro PAR (*Photosynthetically Active Radiation*) entre 400 e 700nm e o radiômetro ultravioleta entre 200 e 400nm. Nesses radiômetros são utilizadas células solares ou fotodiodos que, para uma caracterização apropriada, exigem equipamentos e sistemas de medidas específicos. Três sistemas são utilizados para a caracterização elétrica e ótica desses detectores que são objetos de estudo: sistema de medida de curva de corrente por tensão (IxV), sistema de medida da resposta espectral e sistema de medida da resposta angular por irradiância incidente.

2. ELEMENTOS SENSORES

Com o objetivo de caracterizar com maior precisão os elementos sensores dos radiômetros fotovoltaicos, foi aprimorado o sistema de medida IxV e projetado e montado os sistemas de medida de resposta espectral e de resposta angular. Além da otimização e da montagem dos sistemas de medidas, foram desenvolvidos dois suportes para os dois

tipos de fotodiodos e um suporte para medidas das células solares. Os suportes foram feitos em latão de modo a aproveitar toda a massa do corpo para diminuir a variação de temperatura dos detectores durante as medidas. Todos os suportes permitem a adaptação de termopares para a monitoração da temperatura do elemento sensor, sendo que o suporte de células solares conta com um sistema de vácuo para fixação das células. A Fig. 1 mostra a foto dos suportes desenvolvidos.

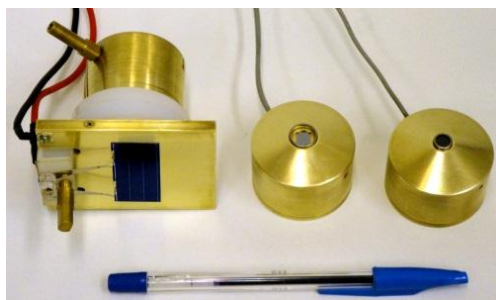


Figura 1 - Foto dos suportes desenvolvidos. Da esquerda para a direita, suporte das células solares, fotodiodo de silício e fotodiodo de UV.

Para verificar e validar a funcionalidade dos sistemas de caracterização do CELSOL, foram medidas células solares de uso espacial e de uso terrestre, células solares de tripla junção (3J), fotodiodos de Si e fotodiodos de TiO_2 . Das células solares que foram utilizadas nesse trabalho, dez foram da *Spectrolab*, dez células chinesas da CAST – *Chinese Academy for Space Technology*, duas células solares 3J e dez células solares fabricadas pelo Laboratório de Microeletrônica da USP (LME/USP). Além das células solares, foram medidos cinco fotodiodos modelo S1336-8BK e quatro fotodiodos modelo TW30DY2. A Tab. 1 mostra as características gerais dos elementos sensores e a Fig. 2 mostra a foto destes elementos utilizados neste trabalho.

Tabela 1. Características gerais das células solares e dos fotodiodos.

Elementos Sensores	Nacionalidade/ Fabricante	Material	Área [cm^2]	Faixa espectral [nm]	Tipo
Célula solar <i>Spectrolab</i>	Americana	Si - mono	8	400-1100	Espacial
Célula solar CAST	Chinesa	Si - mono	8	400-1100	Espacial
Célula solar LME/USP	Brasileira	Si - mono	2,4025	400-1100	Terrestre
Célula solar 3J	Chinesa	GaInP ₂ /InGaAs/Ge	12	300-1700	Espacial
Fotodiodo S1336-8BK	<i>Hamamatsu</i>	Si - mono	0,33 cm^2	320-1100	PN
Fotodiodo TW30DY2	<i>Scitec Instruments</i>	TiO_2	0,1566 cm^2	260-360	<i>Schottky</i>

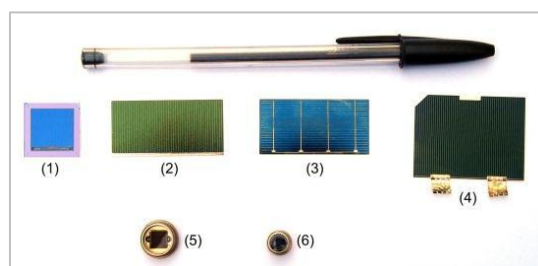


Figura 2 - Elementos sensores medidos neste trabalho: Células solares: 1 – LME/USP; 2– *Spectrolab*; 3– CAST; 4 – 3J; Fotodiodos: 5– S1336-8BK; 6 – TW30DY2.

3. SISTEMA DE MEDIDA DE CURVA DE CORRENTE POR TENSÃO

O sistema de medida IxV é utilizado para determinar os parâmetros elétricos relacionados ao desempenho do detector, que pode ser um fotodiodo ou uma célula solar utilizada como elemento sensor. Neste caso, é possível determinar: corrente de curto-circuito (I_{cc}), tensão de circuito aberto (V_{ca}), corrente de máxima potência, tensão de máxima potência, eficiência (η) e o fator de preenchimento (FF). É importante fazer essa medida corretamente em laboratório sob radiação de um simulador solar, pois a medição realizada em campo, sob radiação solar, geralmente apresenta problemas com a mudança do espectro solar ao longo do dia e também dificuldades no transporte e na utilização de fontes e sistemas de aquisição de dados. Por outro lado, pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de

células solares e sensores fotovoltaicos necessitam de sistemas de medidas que mantenham constantes essas condições, para caracterizar com precisão os dispositivos e permitir uma avaliação dos problemas, para que possa encontrar soluções adequadas. Deste modo, a montagem e o aperfeiçoamento de sistemas de medidas em laboratório são fundamentais para as atividades de pesquisa.

O Grupo CELSOL possui um sistema de medidas IxV de células solares de silício, que tem o simulador solar da *Oriel* de 1000 Watts modelo 81193 como principal componente. Esse simulador é alimentado por uma fonte estabilizada e opera com uma lâmpada de descarga em gás de Xenônio de alta pressão de 1000 W *Ozone-Free* da *Newport* modelo 6271. A área iluminada é de 152x152 mm² e reproduz o espectro solar AM0 ou AM1.5G. Além do simulador solar *Oriel*, o sistema possui uma base de fixação das células mantida termicamente estável através de um circulador de água com temperatura controlada e um sistema de vácuo para fixar as células na base. Para a aquisição de dados, o sistema conta com um voltímetro, um amperímetro, uma fonte de carga variável, uma fonte de tensão reversa e um computador para registro dos dados. A Fig. 3 mostra o diagrama por completo o sistema de medida IxV do CELSOL (esquerda) e a foto do sistema no laboratório (direita).

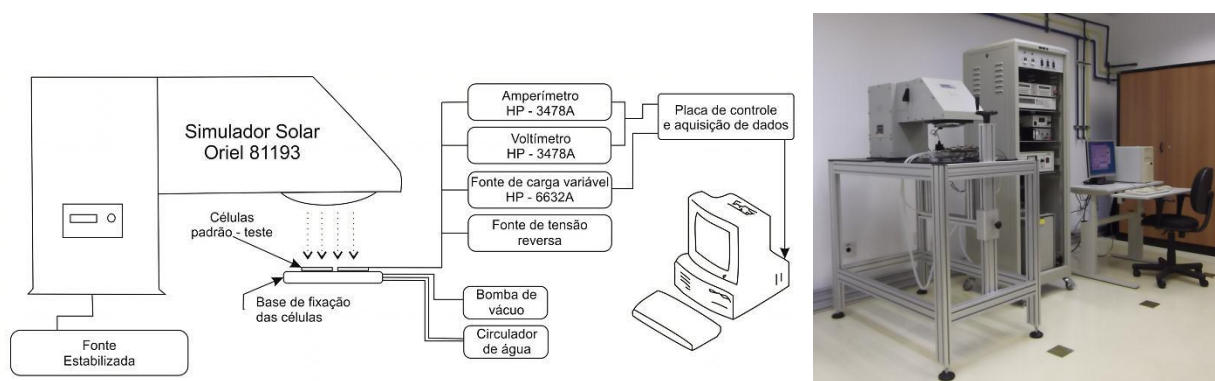


Figura 3 - Sistema de caracterização de curva IxV de células solares de silício do CELSOL. Diagrama (direita) e foto (esquerda).

Para manter a estabilidade da lâmpada, um fotodiodo localizado sob a lente colimadora ajusta o brilho variando a corrente de alimentação da lâmpada.

Instituições de padronização como ASTM *International Standards* (*American Society for Testing and Materials*), ISO (*International Organization for Standardization*), IEC (*International Electrotechnical Commission*) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) estabelecem requisitos de desempenho para os simuladores solares baseados em condições naturais de iluminação. Para determinar a classificação do simulador foram analisadas três categorias ligadas diretamente às condições de iluminação: a coerência espectral, a uniformidade e a estabilidade temporal do feixe de radiação sobre a área de trabalho. A Tab. 2 mostra essa classificação de um simulador de acordo com a norma IEC 60904-9 Ed.2 de 2007.

Tabela 2. Classificação do simulador solar segundo seu desempenho.

Característica	Casse A	Classe B	Classe C
Coerência espectral	0.75 – 1.25	0.6 – 1.4	0.4 – 2.0
Não-uniformidade	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 10\%$
Instabilidade temporal	$\leq \pm 0,5\%$	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 10\%$

Fonte: IEC 60904-9 Ed.2 (2007).

4. SISTEMA DE MEDIDA DE RESPOSTA ESPECTRAL

A caracterização espectral de elementos sensores é fundamental para determinar, além da resposta espectral, outros parâmetros como a eficiência quântica, o comprimento de difusão dos portadores minoritários, os efeitos da profundidade da junção e o efeito da camada anti-refletora sobre o desempenho da célula (Beloto, 1983). O sistema baseia-se na incidência de um feixe de radiação monocromática sobre o elemento sensor para obter a resposta do detector em relação à banda incidida.

O laboratório do CELSOL possui um sistema de caracterização espectral montado em uma bancada ótica contendo um sistema ótico de entrada com uma lâmpada halógena de tungstênio e quartzo de 250 W da *Newport*, modelo 6334NS, um monocromador modelo *Oriel* 77200 com distância focal de 250 mm, grade de difração de 1200 linhas/mm, garantindo uma faixa de comprimentos de onda de 200 a 1200 nm e uma resolução máxima de 0,1 nm e um amplificador *Lock-in* SR850-DSP para a aquisição de dados. A Fig. 4 mostra a foto e o esquema do sistema de caracterização espectral do CELSOL.

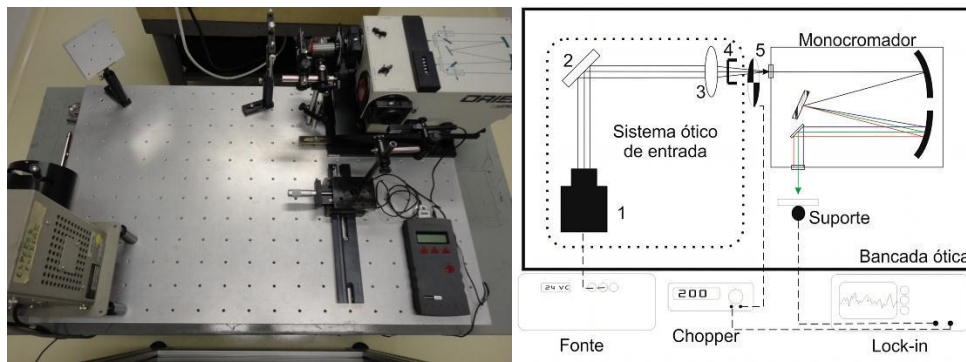


Figura 4 - A foto (esquerda) e o diagrama (direita) do sistema de medida de resposta espectral do CELSOL. 1- *Housing* da lâmpada, 2- espelho plano de primeira face, 3- lente convergente, 4- suporte para filtros óticos, 5- chopper ótico.

5. SISTEMA DE MEDIDA DE RESPOSTA ANGULAR

O sistema de caracterização da lei do cosseno permite determinar o comportamento de um sensor de radiação em função da variação do ângulo de incidência da radiação. A radiação solar que incide na superfície terrestre muda constantemente o ângulo de incidência ao longo do dia, por isso os dispositivos de medida dessa radiação devem ter uma boa resposta independente do ângulo de incidência da radiação, segundo a lei do cosseno (Michalsky, 1995).

O sistema de medida de resposta angular do CELSOL está montado em uma bancada ótica e possui duas fontes de radiação, com lâmpada de descarga em gás de mercúrio e xenônio de alta pressão 500 W e lâmpada de filamento de tungstênio de 1000 W. O caminho ótico percorrido pela radiação é de 2,85 m com cinco íris de 46 mm de diâmetro para colimar o feixe, sendo que uma sexta íris tem diâmetro ajustável de 1 a 40 mm. O suporte dos elementos sensores fica localizado logo na saída do tubo colimador de forma a estar totalmente iluminado, sobre um goniômetro que permite a variação manual do ângulo de incidência da radiação de 0° a 180°, com um erro de $\pm 1^\circ$. A Fig.5 mostra a foto e o diagrama da montagem do sistema de resposta angular.

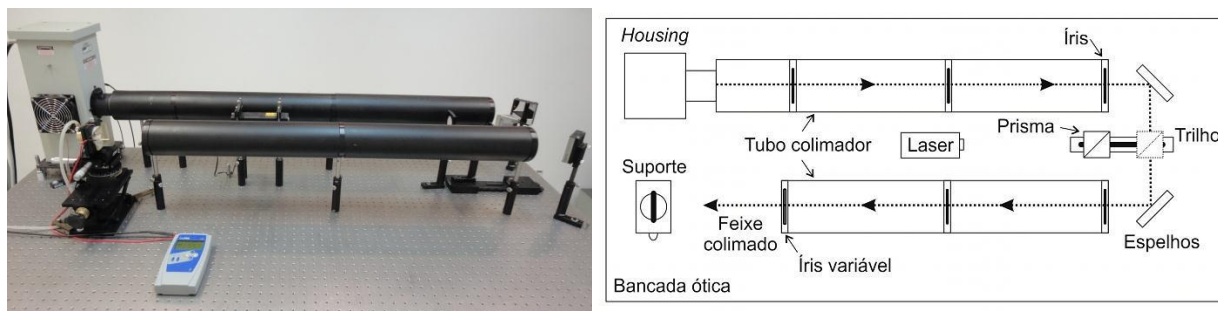


Figura 5 - Foto (esquerda) e o diagrama (direita) do sistema de resposta angular do CELSOL sobre a bancada ótica.

O alinhamento ótico é feito com o auxílio de um laser de hélio-neônio incidindo num prisma divisor de feixe, que se desloca sobre um trilho dividindo o feixe do laser em dois ramos: o primeiro na direção da fonte de radiação e o segundo na direção do suporte dos detectores. O alinhamento ótico e a precisão dos equipamentos de medida são de extrema importância para determinar os erros do sistema. Caso estes erros sejam grandes, irão influenciar nos resultados das medidas, que para a resposta angular de um detector em grandes ângulos de incidência da radiação o erro é significativo.

6. RESULTADOS

Neste trabalho, os sistemas de caracterização de células solares e de fotodiodos foram otimizados para determinar os parâmetros dos dispositivos fotovoltaicos para serem classificados de acordo com suas aplicações nos radiômetros em desenvolvimento no laboratório. Atualmente esses sistemas estão em operação e em constante atualização para obtenção de resultados que possam auxiliar no desenvolvimento dos sensores de radiação.

6.1. Características dos sistemas de medidas

A otimização do sistema de medidas de curva IxV permitiu determinar sua classificação de acordo com normas específicas. O mapeamento da uniformidade do feixe na área de trabalho do simulador solar permitiu determinar a não-uniformidade da radiação estabelecida pela norma IEC 60904-9. Para a área 152x152 mm², a não-uniformidade do feixe é de 2,27%, classificando o simulador segundo a norma como classe B. Já para uma área de 76x76 mm², com o objetivo

de obter uma região mais uniforme, a não-uniformidade do feixe é de 1,70% classificando o simulador como classe A. A medida de resposta temporal permitiu determinar variações da irradiância incidente do simulador. A classificação referente à estabilidade temporal é classe A, devido à instabilidade de 1,41% após 30 minutos, segundo a norma IEC 60904-9. O cálculo de comparação para a classificação dos espectros AM0 e AM1.5G mostra que o simulador solar do CELSOL é de classe C em relação à coerência espectral, tanto com filtro AM0 quanto AM1.5G. A Fig. 6 compara os espectros AM0 e AM1.5G do simulador solar com os espectros padrão AM0 e AM1.5G da ASTM. Os espectros do simulador solar foram obtidos com dois espectrômetros do laboratório: o modelo *GetSpec* USB-2048 que responde numa faixa espectral de 200 a 1100 nm, possui resolução de 0,04 a 20 nm e o modelo *GetSpec* NIR128L-1.7TE, que responde numa faixa espectral de 900 a 1700 nm e possui resolução nominal de 12,5 nm. 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 152x152 mm² e CAA para uma área de 76x76 mm². Dessa forma, o simulador solar do CELSOL pode ser utilizado para caracterização de células solares espaciais e terrestres, fotodiodos e para caracterização e calibração de radiômetros.

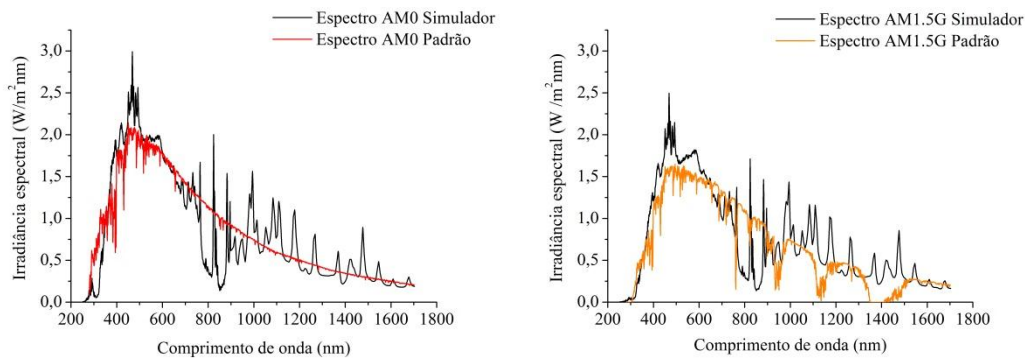


Figura 6 - Espectro solar AM0 (esquerda) e AM1.5G (direita) padrão da ASTM comparado com o espectro do simulador solar com filtro AM0 (esquerda) e AM1.5G (direita).

Para otimizar o sistema de medida de resposta espectral foi medida a estabilidade temporal durante 15 minutos, tempo suficiente para uma lâmpada de filamento, e após 3 minutos a instabilidade é de 0,49%. Também foi verificada a dispersão linear do monocromador utilizado um laser de hélio-neônio com comprimento de onda de 632,8 nm e 10 mW de potência. Foram realizadas medidas com a potência do sinal de saída para diferentes aberturas das fendas: 0,1 mm, 0,3 mm, 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, utilizando um radiômetro espectral da *Oriel*, modelo 70286. Registradas as potências dos sinais em relação aos comprimentos de onda incidentes no sensor, foi possível calcular a largura a meia altura do sinal, sigla em inglês (FWHM), de cada curva referente a cada abertura das fendas. A relação entre a FWHM e a abertura das fendas define a dispersão linear em $[nm \cdot mm^{-1}]$. A Fig. 7 mostra a curva de potência da radiação na saída do monocromador obtida a partir do espectroradiômetro calibrado da *Newport* para cada comprimento de onda e a dispersão linear do monocromador, onde o coeficiente de inclinação da reta define a resolução do monocromador que é de $2,7 \pm 0,1 \text{ nm} \cdot \text{mm}^{-1}$. O valor medido está coerente com o valor fornecido pelo fabricante que foi de $2,86 \text{ nm} \cdot \text{mm}^{-1}$.

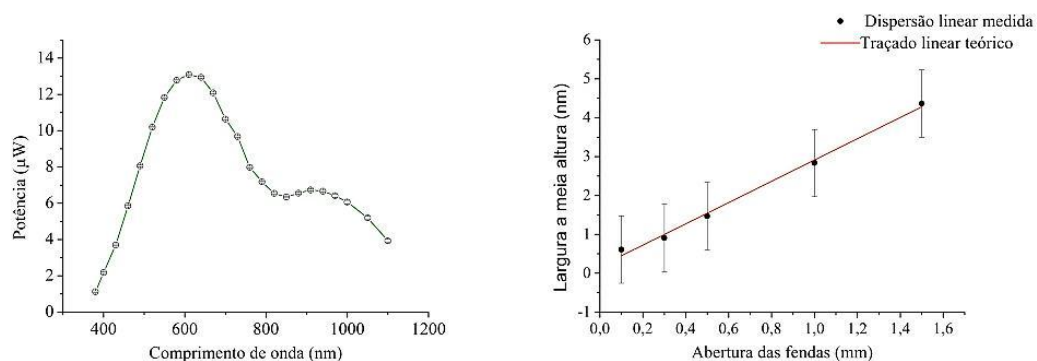


Figura 7 - Curva de potência da radiação na saída do monocromador (esquerda) e dispersão linear do monocromador *Oriel* do CELSOL (direita).

A otimização do sistema de medida de resposta angular permitiu medir a estabilidade das fontes, que para garantir um melhor resultado é necessário iniciar as medidas após 5 minutos quando utilizada a lâmpada de filamento, e 30 minutos quando utilizada a lâmpada de Hg(Xe). O feixe na posição dos dispositivos para as duas fontes possui uma divergência inferior a $0,45^\circ$ para meio ângulo. As uniformidades foram medidas utilizando espectrômetro da *GetSpec* com o diâmetro da ótica de entrada de 4 mm, varrendo uma distância de 50 mm na vertical e na horizontal. Considerando uma área de 28x28 mm², a não-uniformidade calculada para a fonte de Hg(Xe) é de 1,9% e para a fonte de filamento é de 3,6%.

6.2. Medidas dos elementos

Os resultados das caracterizações dos elementos sensores foram obtidos pela média aritmética da quantidade de dispositivos medidos, sendo que cada dispositivo foi medido três vezes em cada sistema. O erro associado ao resultado da medida é estatístico somado com as incertezas dos instrumentos de medição.

A calibração da irradiância do simulador solar com espectro AM0, em aproximadamente $1353 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, foi obtida utilizando uma célula solar padrão de referência, levando em consideração a corrente de curto-circuito e a temperatura na qual ela foi calibrada. Após o simulador solar calibrado, foram medidas células solares espaciais e os fotodiodos de UV, este último devido ao maior índice de radiação ultravioleta no AM0. Com o espectro AM1.5G foram medidas as células solares terrestres e os fotodiodos de silício em $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Para medir a célula solar 3J foi necessário implementar fontes radiação auxiliares na região do infravermelho, para estimular as junções do meio e da base e obter um incremento da corrente fotogerada por essas junções. A Fig. 8 mostra as curvas IxV dos elementos sensores medidos no laboratório.

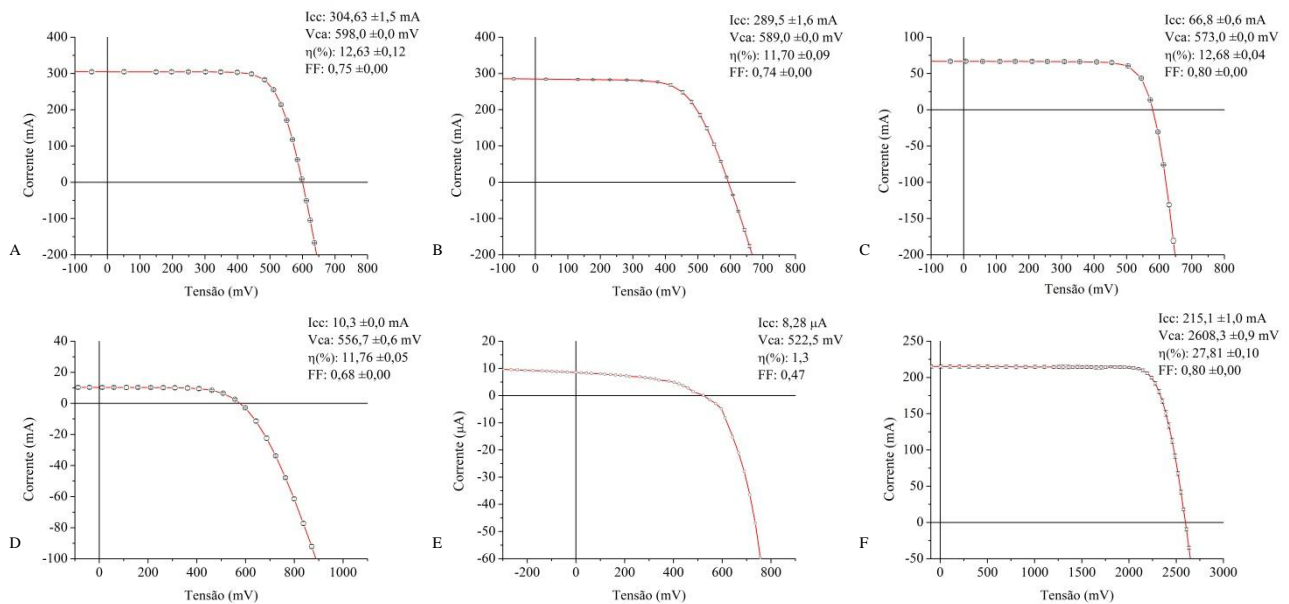


Figura 8 - Curvas IxV média dos elementos sensores medidos. Células solares *Spectrolab* (A), *CAST* (B), *LME* (C), fotodiodos de Si (D), fotodiodos de TiO₂ (E) e célula solar 3J (F).

O sistema de medida da resposta espectral do CELSOL permitiu obter as curvas de resposta espectral dos elementos sensores, sendo que as células solares de silício foram obtidas com maior precisão. A Fig. 9 mostra as médias das respostas espectrais relativas das células solares de silício, das células solares 3J e dos fotodiodos medidos, sendo que as respostas dos fotodiodos S1336-8BK e TW30DY2 estão representadas juntamente com suas respectivas curvas típicas, seguidos os mesmos procedimentos das medidas das células solares de silício.

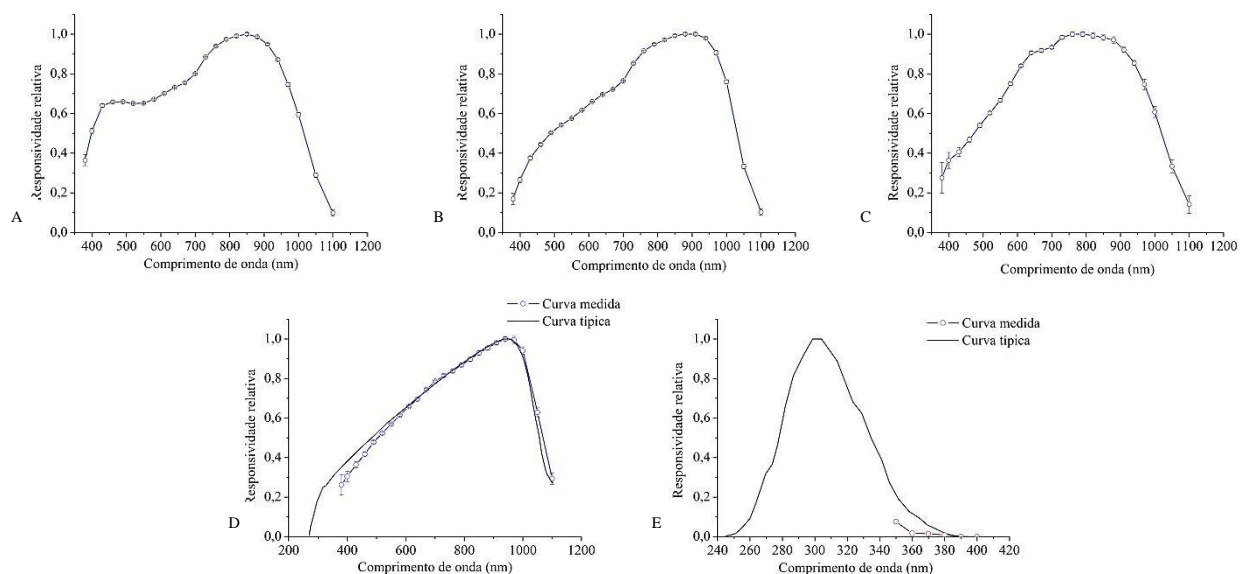


Figura 9 - Curvas da resposta espectral média dos elementos sensores medidos. Células solares *Spectrolab* (A), *CAST* (B), *LME* (C), fotodiodos de Si (D), fotodiodos de TiO₂ (E).

Só foi possível obter seis pontos de medidas dos fotodiodos de UV devido à limitação do sistema, principalmente, devido ao espectro da fonte de filamento que possui pouca radiação UV. As respostas espectrais referentes aos dois modelos de fotodiodo estão coerentes com o *datasheet* dos fabricantes, mesmo considerando apenas a faixa espectral medida dos fotodiodos de UV. Não foi possível obter a resposta espectral da célula solar espacial de tripla junção no sistema de medidas da curva de resposta espectral devido à restrição do monocromador que permite uma varredura espectral de 200 a 1200nm.

As medidas da curva de resposta angular de todos os elementos sensores foram feitas três vezes variando o ângulo de incidência de 0° a 90° em passos de 5° para cada fonte de radiação. Também foram feitas as medidas no escuro de cada detector, para as duas fontes, com o objetivo subtrair a radiação espúria caso seja observada. A Fig. 10 mostra as curvas médias da resposta angular dos diferentes elementos sensores medidos juntamente com as curvas médias de erro em relação à lei do cosseno, levando em conta os erros estatísticos, utilizando a fonte de radiação de Hg(Xe) de 500 W e comparando-as com a curva de resposta angular ideal, dos elementos sensores. A curva de erro da resposta angular é dado pela diferença entre a medida realizada e a curva de resposta angular ideal.

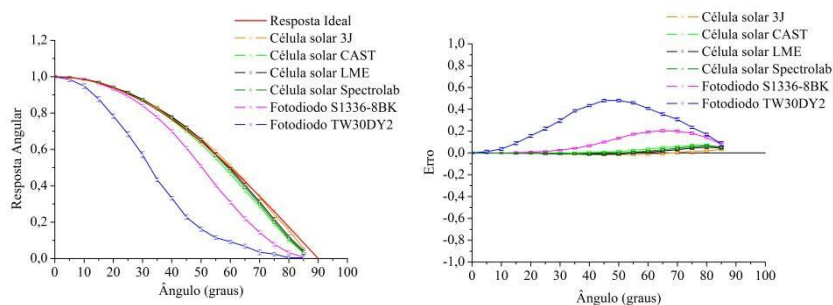


Figura 10 - Curvas médias da resposta angular dos elementos sensores medidos com a fonte de radiação de Hg(Xe) (esquerda) e curvas médias de erro (direita).

Vemos na Fig. 10 que a resposta angular dos fotodiodos é inferior às respostas das células solares devido ao encapsulamento dos fotodiodos que limita o ângulo de visão do fotodetector que se encontra dentro do fotodiodo. Para ângulos inferiores a 75°, essa diferença para as células solares é menor que 7%. O erro associado ao fotodiodo de S1336-8BK é menor que 25% para ângulos de incidência da radiação até 65°. Já o erro associado ao fotodiodo TW30DY2 é de 45% para ângulos até 60°, coerentemente com o máximo ângulo de visão informado pelo fabricante.

O mesmo procedimento de medida, para obter as curvas de resposta angular com a fonte de Hg(Xe), foi utilizado para obter as curvas de resposta angular dos elementos sensores, com fonte de radiação de filamento de 1000 W. Não foi possível obter a resposta angular do fotodiodo de UV, pois esta fonte não emite radiação ultravioleta suficiente para medir com os equipamentos disponíveis no laboratório. A Fig. 11 mostra as curvas média da resposta angular dos diferentes elementos sensores juntamente com as curvas médias de erro em relação à lei do cosseno, levando em conta os erros estatísticos, utilizando a fonte de radiação de filamento de tungstênio de 1000 W e comparando-as com a curva de resposta angular ideal.

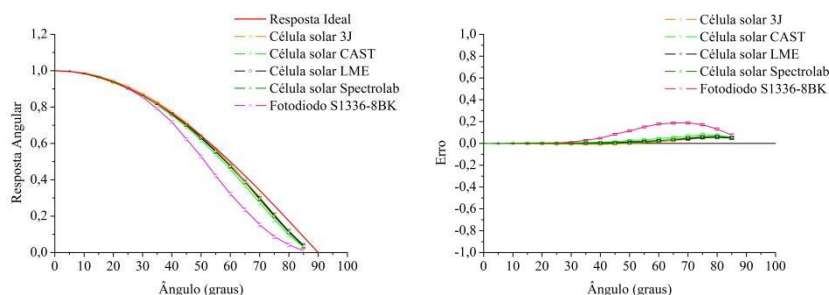


Figura 11 - Curvas médias da resposta angular dos elementos sensores medidos com a fonte de radiação de filamento (esquerda) e curvas médias de erro (direita).

Não muito diferente dos valores dos erros em relação à lei do cosseno da fonte de Hg(Xe), para a fonte de filamento a diferença para as células solares é inferior a 7,7% em ângulos menores que 75°. Para ângulos de incidência da radiação de até 65°, o erro associado ao fotodiodo de S1336-8BK é menor que 24,2%.

7. CONCLUSÃO

No Laboratório do Grupo de Células Solares do LAS/INPE foram implementados três sistemas de caracterização de dispositivos fotovoltaicos: um sistema de medida de curva de corrente por tensão, um sistema de medida de resposta espectral e um sistema de medida de resposta angular. Para validar esses sistemas de medidas, foram estudados e

caracterizados diferentes tipos elementos sensores fotovoltaicos: células solares de silício espaciais e terrestres, nacionais e importadas, células solares de tripla junção, fotodiodos de dióxido de titânio, que respondem apenas à radiação ultravioleta e fotodiodos de silício, que respondem à radiação visível e infravermelho próximo. Todo o sistema de medida de curva IxV foi otimizado de acordo com normas técnicas específicas, classificando o simulador solar como CBA para uma área de trabalho de 152x152 mm² e CAA para uma área de 76x76 mm². O sistema de medida de resposta espectral está montado em uma bancada ótica utilizando uma fonte de radiação de filamento de 250 Watts, um monocromador de grade de difração que garante radiação monocromática desde 300 a 1100 nm, com uma dispersão linear de $2,7 \pm 0,1 \text{ nm}\cdot\text{mm}^{-1}$, o que possibilita medir detectores de silício com precisão. O sistema de medida da resposta angular está montado numa bancada ótica podendo utilizar uma lâmpada de descarga em gás de mercúrio e xenônio de alta pressão 500 W ou uma lâmpada de filamento de tungstênio de 1000 W. Suportes foram desenvolvidos para fixar as células solares e os fotodiodos na vertical para permitir a variação gradual do ângulo de incidência da radiação de 0° a 180° com um erro de $\pm 1^\circ$. O sistema permitiu medir com boa precisão a resposta dos detectores em relação ao ângulo de incidência da radiação. Para as células solares não é necessário utilizar difusores óticos para a correção do cosseno devido ao seu pequeno erro na resposta, já para os fotodiodos, a utilização de difusores geralmente é necessário devido ao ângulo de visão limitado pelo encapsulamento. Espera-se com os resultados obtidos neste estudo, manter a capacitação do laboratório CELSOL para caracterização e calibração de elementos sensores fotovoltaicos e de radiômetros.

Agradecimentos

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro projeto nº 554887/2010-0.

REFERÊNCIAS

- Beloto, A. F. Estudo das características de células solares de silício monocristalino. 1983. 133f. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) - Instituto de Física e Química de São Carlos, São Carlos, 1983.
- Berni, L. A.; Vilela, W. A.; Beloto, A. F. Otimização da ótica de entrada por traçado de raios no desenvolvimento de um radiômetro UV. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 3., 2010, Belém. Anais... Belém - PA, 2010.
- International Electrotechnical Commission (IEC) 60904-9 Ed.2: Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements. 2007.
- Michalsky, J.J. Harrison, L.C. Berkheiser, W.E. Cosine response characteristics of some radiometric and photometric sensors. Solar Energy, v. 54, n. 6, p. 397-402, 1995.
- Veissid, N.; C. Costa Vaz. Desenvolvimento de simulador solar de baixo custo. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 1., 2007, Fortaleza. Anais... São Paulo: ABENS, 2008.
- Veissid, Nelson ; Nubile, P. ; Beloto, A. F. ; Andrade, A. M. The solar cell experiment of the first Brazilian complete space mission satellite. In: IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 21., 1990, Kissimmee-Florida. Proceedings... Kissimmee-Florida: IEEE, 1990. p. 1184-1187.
- Vilela, W. A. Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar. 2010. 208 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2010/09.17.18.50-TDI). Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERIZATION SYSTEMS OF PHOTOVOLTAIC DETECTORS FOR RADIOMETERS

Abstract. *The study of solar radiation inside and outside the earth's atmosphere is considered of fundamental importance to understand the climate change of the planet and the energy optimization of power generation systems. The Group of Solar Cells (CELSOL) at National Institute for Space Research (INPE) has been working on sensor elements characterization for use in satellite or radiometers. The objective of this study is to present the electrical and optical characterization systems for analysis and studies of the sensor elements from photovoltaic radiometers developed in the laboratory. Currently, CELSOL has three characterization systems: the current versus voltage (IxV) curve measurement system, the spectral response measurement system and the angle response measurement system. All systems were installed or improved and characterized according to specific technical standards. To validate the laboratory measurement systems were characterized different samples of sensor elements for radiometers such as space and terrestrial, national and imported solar cells, silicon photodiodes that responds in the visible and near infrared spectral range and titanium dioxide photodiodes that responds ultraviolet radiation only. The measured results were analyzed and compared with data reported by the manufacturers of photovoltaic devices, confirming the ability of the measurement systems for characterization and calibration of photovoltaic sensors.*

Key words: *Electrical and optical characterization systems, Radiometers, Sensors elements.*