

Célula Solar de Silício como Elemento Sensor para Medidas da Radiação Solar Global

Waldeir Amaral Vilela - waldeir@las.inpe.br

Antonio Fernando Beloto - beloto@las.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Laboratório de Sensores e Materiais-LAS

Manuel Cid Sanchez - manuel@lme.usp.br

Carlos Alberto Santos Ramos - cramos@lme.usp.br

Escola Politécnica da USP – EPUSP, Laboratório de Microeletrônica - LME

Célio Costa Vaz - orbital@bighost.com.br

Cláudio Júnior Melo - orbital@bighost.com.br

Orbital Engenharia Ltda

Resumo. Neste trabalho foi desenvolvido um radiômetro para medida de radiação solar global utilizando-se, como elemento sensor célula solar de silício (Si) monocristalino convencional. A célula solar foi desenvolvida utilizando-se lâmina de Si, crescido por Czochralski (Cz), do tipo-p, (100), com resistividade de $1 \Omega \cdot \text{cm}$, área de $15 \times 15 \text{ mm}^2$, com camada anti-refletora de TiO_2 e apresenta tipicamente tensão de circuito aberto de 580 mV, corrente de curto circuito de 70 mA, potência máxima de 28 mW e eficiência em torno de 12% medido no espectro AM 1,5, nas condições normais de pressão e temperatura. A Célula solar é alojada em um compartimento cilíndrico de alumínio anodizado, onde também está alojado o resistor de carga da célula e esse cilindro é acoplado a uma base, também de alumínio anodizado. Junto à base existe um indicador de nível para ajuste e posicionamento do radiômetro. Sobre a célula, existe uma janela óptica para resposta compatível com a lei dos co-senos. Para a calibração e caracterização do radiômetro foram montados sistemas de calibração absoluta, resposta espectral e lei dos co-senos. Nos protótipos desenvolvidos foram realizados testes ambientais de umidade, radiação ultravioleta e névoa salina. Antes e após os ensaios ambientais foram feitas medidas e verificou-se que não houve alterações significativas na sensibilidade dos protótipos. O radiômetro desenvolvido apresenta um espectro de resposta de 400 a 1100 nm e sensibilidade típica entre 10 a $20 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$. Possui também resposta compatível com a lei dos cossenos para ângulos de incidência até 80° e sinal estável com a variação da temperatura.

Palavras-chave: célula solar, radiação solar, radiômetro.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a ausência de uma indústria nacional de sensores de radiação solar faz com que estes sensores sejam importados com custos elevados. Usualmente, os radiômetros fotovoltaicos importados para medidas da radiação solar global e fotossinteticamente ativa utilizam como elemento sensor fotodiodos de Si com área ativa menor que 25 mm^2 . Com base nos trabalhos de pesquisa em células solares de Beloto (1989), do Laboratório de Materiais e Sensores do INPE – LAS/INPE e Stem (1998), do Laboratório de Microeletrônica LME/USP, foi desenvolvido um radiômetro cujo elemento sensor é uma célula solar de silício monocristalino de área $15 \times 15 \text{ mm}^2$. A célula foi fabricada em lâminas de Si monocristalino (CZ) do tipo-p, com resistividade de $1 \Omega \cdot \text{cm}$, orientação (100) e espessura de $275 \mu\text{m}$. A região de emissor (n^+) foi obtida por difusão de fósforo, a metalização frontal é uma liga de Ti/Pd/Ag, a posterior de Al e Ag e a camada anti-refletora de TiO_2 . Estas células possuem tipicamente uma corrente de curto-circuito de 70 mA, tensão de circuito aberto de 570 mV e eficiência em torno de 12% para espectro AM 1,5, temperatura $T = 25 \text{ C}$. O radiômetro é constituído basicamente pela célula solar e um resistor para condicionamento do sinal. O seu funcionamento baseia-se na medida da corrente de curto-circuito da célula. O sinal obtido é diretamente proporcional à radiação incidente recebida do hemisfério centrado na direção perpendicular ao eixo de montagem do dispositivo sensor. A célula juntamente com o resistor de condicionamento do sinal são alojados em um compartimento cilíndrico de alumínio anodizado. Este cilindro é acoplado a uma base também de alumínio anodizado. Junto à base existe um indicador de nível e parafusos para ajustes e posicionamento do radiômetro. Sobre o elemento fotossensível existe uma janela óptica que tem como finalidade espalhar a luz uniformemente sobre o elemento sensor permitindo um perfeito funcionamento do radiômetro independente do ângulo de incidência da radiação solar. A célula e a parte elétrica são protegidas da umidade através de uma resina de silicone. A saída de sinal é feita através de cabos especiais para diversas condições ambientais e tem níveis de tensão e corrente compatíveis aos sistemas de aquisição de dados comuns no mercado.

Um radiômetro para ter valor como um instrumento de medida confiável e com precisão deve ser devidamente calibrado e caracterizado. A calibração é um conjunto de operações que estabelece a relação entre os valores indicados por um sensor de radiação solar e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões. O resultado de uma calibração permite o estabelecimento dos valores de mensuramento e é através da calibração que determinamos a constante do instrumento, bem como as correções a serem aplicadas às medidas. Basicamente, três métodos são

utilizados para calibração e caracterização de radiômetros: sistema de calibração através da medida da radiação absoluta, sistema de medida em resposta à lei dos co-senos e sistema de medida de resposta espectral. A medida da radiação absoluta tem como objetivo determinar a resposta do radiômetro em relação à radiação incidente em um determinado ângulo fixo, de uma fonte conhecida. Esta fonte pode ser o sol, uma lâmpada calibrada, uma cavidade de corpo negro de alta e baixa temperatura.

O método de calibração em resposta a lei dos co-senos é uma técnica que consiste em gerar a curva de resposta do radiômetro em função da variação do ângulo em que o radiômetro está sendo iluminado. O sinal obtido através do sensor é proporcional ao ângulo de incidência da radiação. O sistema de calibração da resposta à lei dos co-senos consiste basicamente em uma fonte de luz calibrada com resposta espectral semelhante à radiação solar, uma mesa girante, onde é fixado o radiômetro ou elemento sensor em teste e um sistema de aquisição de dados. A medida da resposta espectral fornece a resposta do radiômetro em função do espectro da luz incidente. O sistema de calibração por resposta espectral consiste basicamente em uma fonte de luz calibrada em resposta espectral, um monocromador ou um sistema de filtros, um sensor de referência (padrão) também calibrado para diversos comprimentos de luz e um sistema de medida e aquisição de dados.

Para completar a projeto, foram realizados testes ambientais de umidade, ultravioleta e de névoa salina, com o objetivo de verificar se o radiômetro está protegido contra condições extremas encontradas em diferentes regiões do país e no mundo. Finalmente, o radiômetro foi testado em uma Plataforma de Coleta de Dados – PCD no CPTEC-INPE em Cachoeira Paulista, ao longo de dois meses, onde foi feita uma comparação com radiômetros importados, atualmente utilizados nas PCDs espalhadas pelo País.

2. CÉLULA SOLAR

2.1 Fabricação da célula

As células solares foram produzidas utilizando-se lâminas de Si monocristalino do tipo p, Cz, com orientação (100), resistividade de $1\Omega\text{cm}$, com espessura aproximada de 270-280 μm obtida por ataque químico. O processo de fabricação foi realizado no Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP em São Paulo, utilizando-se a tecnologia planar e fornos de tubo aberto para os processos de oxidação inicial e difusão de fósforo. A figura 1a mostra colocação das lâminas de Si no forno de difusão de fósforo para a formação da região (n^+) emissor frontal da célula. Os contatos frontais de Ti/Pd/Ag foram depositados por um sistema de “electron beam” e definidos pelo processo de “lift-off”.

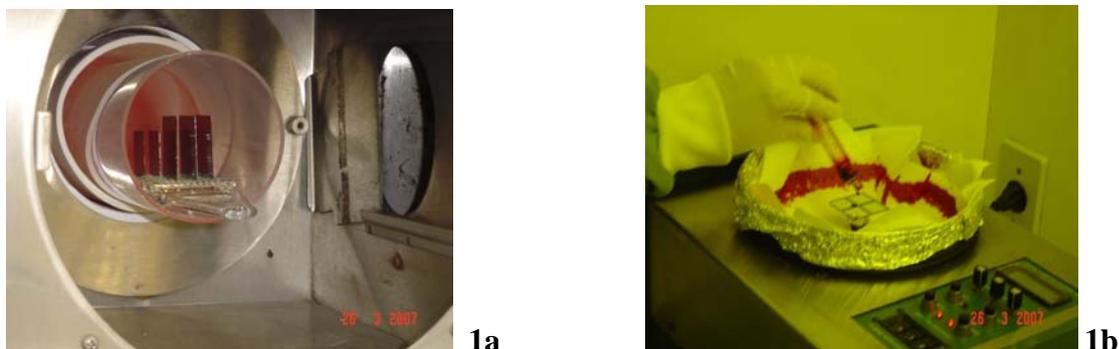


Figura 1- a) Lâminas de Si na entrada do forno de difusão de fósforo para obtenção da região de emissor da célula. b) Aplicação de fotorresiste no processo “lift – off” para obtenção da metalização frontal da célula.

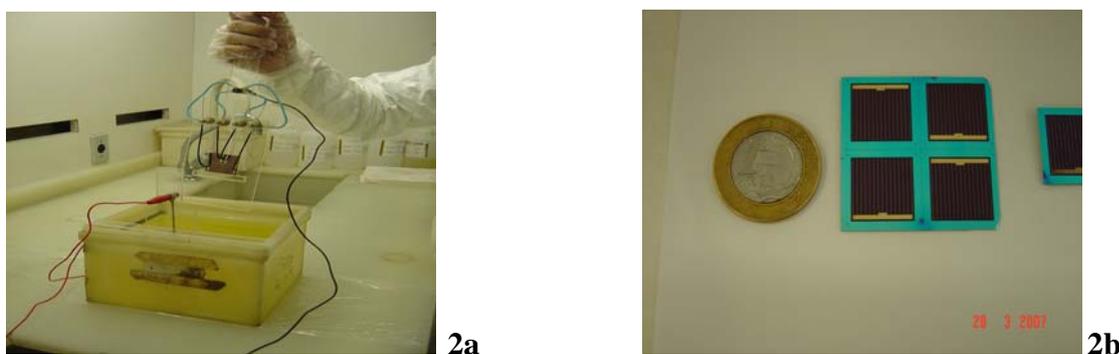


Figura 2 – a) Detalhe do processo de espessamento da prata nas regiões frontal e posterior da célula . b) Células prontas para corte final no “scribin”

A figura 1b mostra a aplicação de fotorresiste, no processo de “lift-off” para a obtenção dos contatos frontais da célula. O contato posterior é obtido por evaporação térmica de Al e depósito de Ag por “electron beam” em toda a superfície. Numa etapa posterior foi feito um espessamento da Ag na região frontal e posterior por eletrodeposição. A camada anti-refletora de TiO₂ foi obtida por “sputtering”, seguido por um recozimento em FG durante 30 minutos. A figura 2a mostra detalhe do processo de espessamento da prata na cuba eletrolítica e a figura 2b células prontas para corte final no “scribin”.

2.2 Caracterização da célula

Após a fabricação, as células são caracterizadas utilizando-se um simulador solar, é feito um controle de qualidade e são agrupadas por classes. A figura 3 mostra uma curva I x V típica de uma célula solar utilizada nos radiômetros. A célula com área ativa 15 x 15 mm², apresenta uma tensão de circuito aberto de 579 mV, corrente de curto-circuito de 66 mA, potência máxima de 28,1 mW e eficiência de 12,48%.

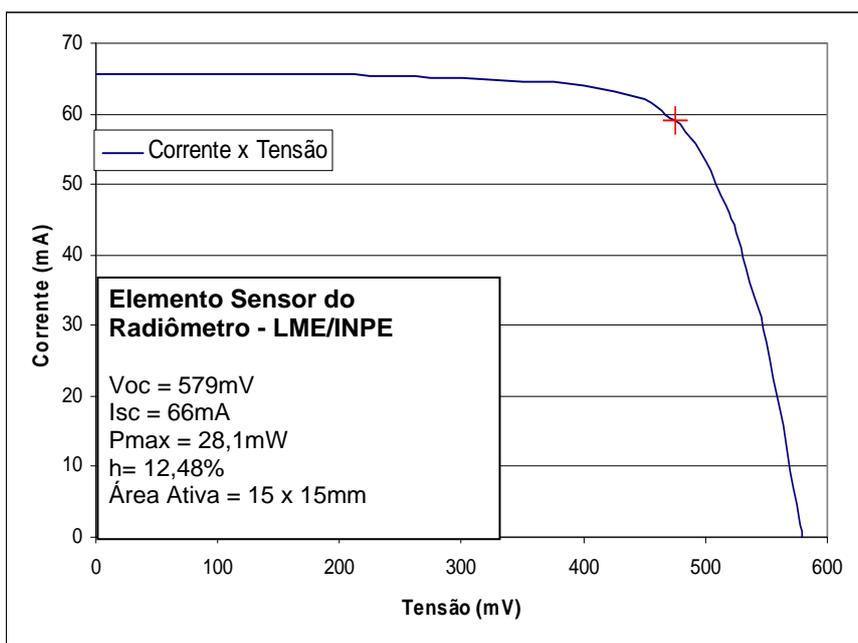


Figura 3 – Curva I x V típica de uma célula solar de silício utilizada na fabricação dos radiômetros

3. MONTAGEM DO RADIÔMETRO

O Corpo principal do radiômetro é uma estrutura, em alumínio naval, para a montagem das partes e componentes: difusor, porca de fixação do difusor, sensor, suporte do sensor, placa de circuito impresso, resistores, cabo e tampa. Na figura 4 temos um desenho ilustrativo do corpo principal do radiômetro.

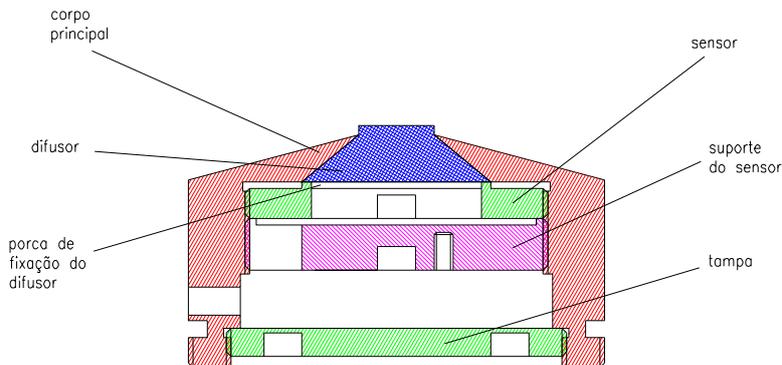


Figura 4 – Desenho ilustrativo do corpo principal do radiômetro

Na montagem é utilizada resina para travar as partes instaladas dentro do corpo principal, e também garantir a impermeabilização. O difusor é um sólido cônico com prolongamento cilíndrico, fabricado em teflon ou acrílico e tem a finalidade de espalhar a radiação solar uniformemente sobre o sensor. O sensor é uma célula solar quadrada nas dimensões 15 x 15 mm² com dois interconectores, um soldado na parte frontal e outro soldado na parte traseira da célula, utilizados na interligação da célula na placa de circuito impresso. A base do radiômetro tem a finalidade de fixá-lo em uma Plataforma de Coleta de Dados (PCD) e permitir o seu nivelamento. A furação e os parafusos desta base são compatíveis com a maioria das plataformas existentes no mercado. A estrutura do radiômetro é constituída de quatro partes: disco da base, nível de bolha, parafusos de nivelamento e parafusos de fixação. O isolamento elétrico é feito com anodização das partes metálicas, fabricadas em alumínio naval e os interconectores são terminais de prata utilizados na interligação elétrica do sensor à placa de circuito impresso. A montagem do radiômetro é feita em sala limpa, na Orbital Engenharia Ltda, onde a célula é colada no suporte, é feita a soldagem dos interconectores e é injetada a resina protetora. A figura 5a mostra a montagem do radiômetro e a 5b um exemplar do radiômetro já montado e finalizado.

No processo de desenvolvimento do radiômetro foram realizados testes ambientais de umidade (Laboratório de Integração e Testes do INPE), ultravioleta (Laboratório de Materiais e Sensores do INPE) e de névoa salina (Centro técnico Aeroespacial), com o objetivo de verificar se o radiômetro está protegido contra condições extremas encontradas em diferentes regiões do país e no mundo. Nestes testes foram observadas as normas da ABNT e gerados relatórios de avaliação e aprovação dos radiômetros. Os mesmos cinco radiômetros foram utilizados em todos os testes, sendo que foram feitas calibrações antes e depois de cada teste, onde ficou comprovada a manutenção das características físicas e elétricas dos mesmos. A tabela 1 mostra os resultados da calibração antes do primeiro teste e após o último.

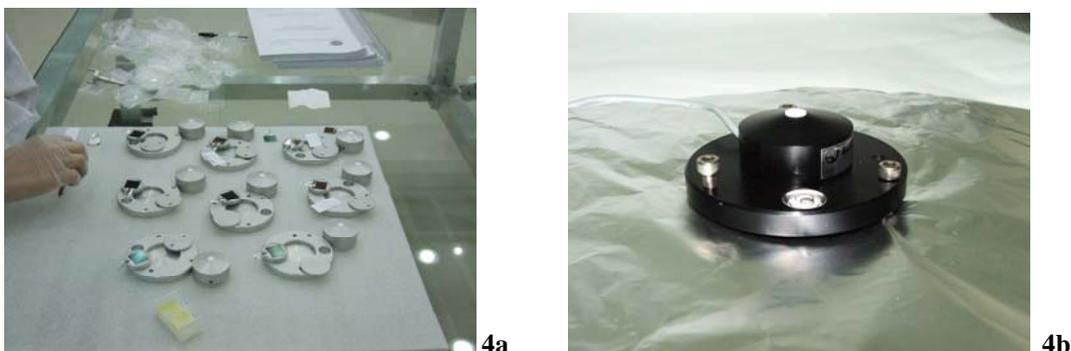


Figura 5 – a) Montagem do radiômetro na Orbital Engenharia Ltda b) Radiômetro para medidas de radiação solar global já montado e finalizado

Tabela 1. Comparação de sensibilidade dos radiômetros antes e após os testes ambientais

Sensibilidade $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$		
Sensor	Antes	Após
103	19,9	19,9
104	17,7	16,6
106	17,8	17,6
107	18,5	17,6
108	17,8	17,1

A estabilidade e temperatura de operação foram verificadas através de ensaios realizados em laboratório, utilizando um simulador solar da Oriel, e externo sob radiação solar. Os radiômetros foram submetidos à variação de temperatura de -15 a 120 °C, juntamente com outros dois importados do mesmo tipo (Licor e Kipp Zonen). A temperatura foi monitorada através de termopares acoplados ao corpo dos radiômetros. Todos os sinais do teste foram registrados simultaneamente através de um sistema de aquisição de dados. Estes resultados são mostrados na figura 6

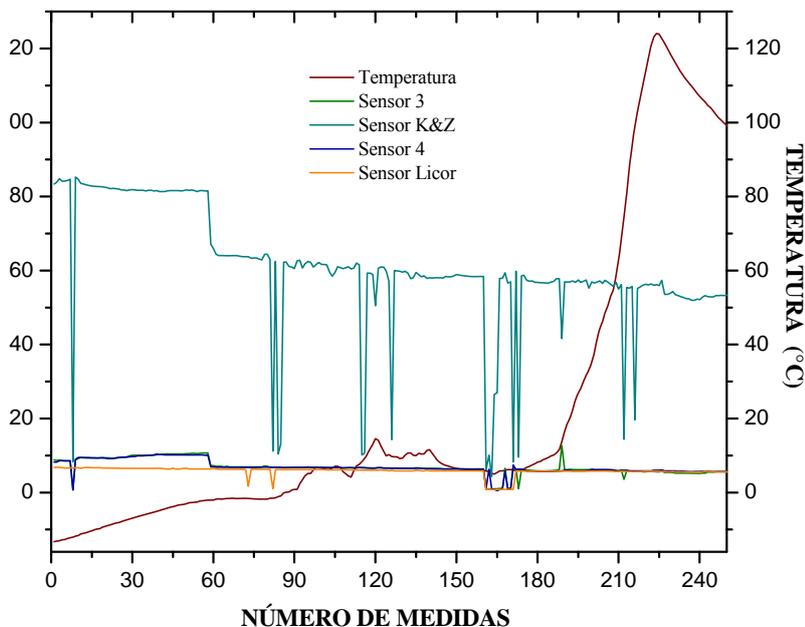


Figura 6 – Gráfico da medida de estabilidade e variação de temperatura

4. CALIBRAÇÃO DOS RADIÔMETROS

A calibração é um conjunto de operações que estabelece a relação entre os valores indicados por um sensor de radiação solar (tensão, corrente, diferença de temperatura) e os valores correspondentes das grandezas radiométricas de interesse estabelecidas por padrões (W/m^2 , mW/cm^2 , $\mu mol/s.m^2$). A calibração de radiômetros é normalizada através de acordos internacionais e são descritas nas normas: ISO 9846 (1993); ISO 9847 (1992); ISO 9859 (1990). O resultado de uma calibração permite o estabelecimento da constante do instrumento, bem como a determinação das correções a serem aplicadas às medidas. Para tanto, é necessário um sistema que permita que as grandezas radiométricas sejam conhecidas com precisão e exatidão.

A verificação periódica da constante de calibração se faz necessária para avaliar o efeito de envelhecimento causado nos componentes sensíveis do radiômetro devido às condições ambientais a que são submetidos.

Neste trabalho, foram montados três sistemas para caracterização e calibração dos radiômetros: sistema de medida da radiação absoluta, sistema de medida em resposta à lei dos co-senos e sistema de medida de resposta espectral.

A medida da radiação absoluta consiste basicamente na medida do sinal de tensão ou corrente nos terminais de saída do radiômetro em relação à radiação incidente de uma fonte devidamente calibrada, com um fluxo constante de radiação em um determinado ângulo fixo. O principal objetivo desta calibração é determinar a sensibilidade e a constante de calibração do radiômetro. Para determinação da constante de calibração foi utilizado o método do quociente, recomendado pela WMO (1971), que consiste em determinar a constante de calibração através do quociente do sinal medido nos terminais do radiômetro e a intensidade da radiação incidente:

$$k_p = k_R \left[\frac{V_p}{V_R} \right] \tag{1}$$

Onde k_p e k_r são as constantes de calibração dos radiômetros protótipo e referência respectivamente, V_p e V_r são seus respectivos sinais medidos (μV).

Neste trabalho, a calibração foi feita por comparação com um padrão secundário, utilizando-se um radiômetro CM11 da Kipp & Zonen, sn°. 027787, sensibilidade $8,73\mu V/w.m^2$ adquirido exclusivamente para esta finalidade, calibrado e com rastreabilidade. Foram feitas calibrações utilizando como fonte de luz o sol sob condições de atmosfera limpa e estável em local aberto sem presença de sombras e reflexos. Também foram feitas medidas no laboratório utilizando uma lâmpada FEL/QTH de 1.000W alimentada por uma fonte Oriel modelo 69935. As medidas e aquisição de dados foram realizadas com um multímetro Argilent 344401A de 6 ½ dígitos e um data Logger de alta resolução, 16 bits, marca DaqPro. Tanto as calibrações feitas no sol como as feitas no laboratório apresentaram resultados iguais. Tipicamente, a sensibilidade do radiômetro desenvolvido é de $14 \mu V/W.m^2$.

Para a medida da resposta à lei dos co-senos, a lei de Lambert ou lei dos co-senos estabelece que a radiação sobre uma superfície varia de acordo com o co-seno do ângulo de incidência. O ângulo de incidência é o ângulo entre a normal da superfície e a direção da radiação incidente

$$E_s = E_i \cdot \cos\theta \tag{2}$$

Onde: E_s é a radiação que chega a uma dada superfície, E_i e a radiação incidente e θ é o ângulo entre a normal da superfície e a direção da radiação incidente

O sinal obtido através do sensor é proporcional ao ângulo de incidência da radiação. O sistema montado é constituído por uma fonte de luz calibrada com resposta espectral semelhante a do sol, distante do sensor o suficiente para garantir que seja pontual, uma mesa girante com deslocamento preciso em graus, onde é fixado o radiômetro ou elemento sensor em teste e um sistema de aquisição de dados para fazer as medidas em cada ângulo.

A figura 7 mostra a resposta do radiômetro LAS 104 à lei dos co-senos. Quando comparada com a resposta de um radiômetro semelhante importado da kipp & Zonen SP LITE, 101,20 $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^2$, sn°. 042831. Verifica-se que o radiômetro desenvolvido neste trabalho apresenta uma resposta adequada praticamente em qualquer ângulo de incidência menor que 80°.

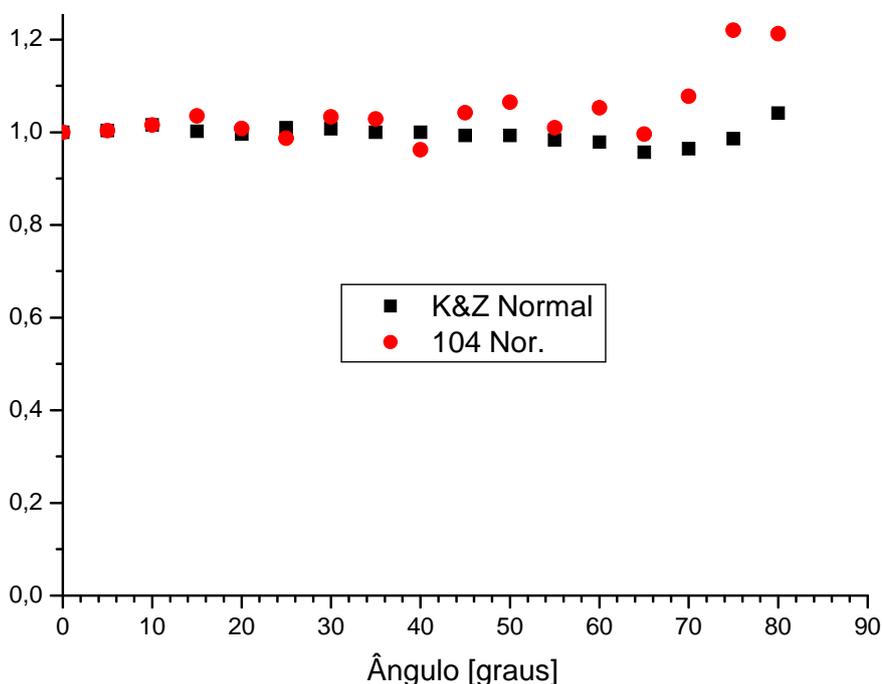


Figura 7 – resposta típica do radiômetro desenvolvido à lei dos cossenos

Para a medida da resposta espectral, foi utilizado um sistema de filtros interferências para o intervalo de comprimento de onda de 400 a 1100 nm, uma lâmpada de tungstênio de 1000 W, um multímetro Argilent 344401A de 6½ dígitos e um detector calibrado da Oriel. A figura 8 mostra uma medida típica da resposta espectral normalizada do radiômetro desenvolvido.

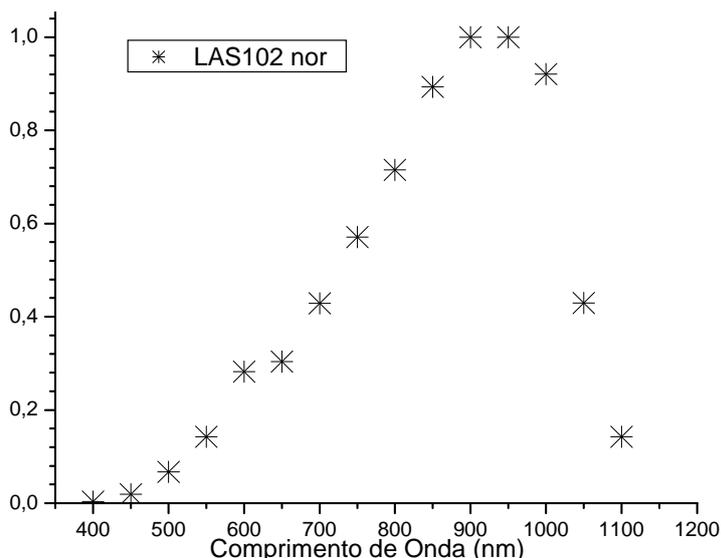


Figura 8 – Curva de resposta espectral do sensor LAS 102 normalizada

5. CONCLUSÃO

Este trabalho reporta o desenvolvimento de um radiômetro para medidas da radiação solar global, com tecnologia totalmente nacional, onde o elemento sensor é uma célula solar de Si monocristalino. Os resultados da calibração mostram que seu desempenho é compatível com o de radiômetros fotovoltaicos importados, onde são utilizados fotodiodos como elemento sensor. A célula solar foi fabricada no Laboratório de Microeletrônica da USP, que possui os equipamentos e técnicas apropriados para esse tipo de célula e a montagem do radiômetro foi feita através de uma parceria entre INPE e a empresa Orbital Engenharia Ltda., visando à transferência de tecnologia para futura comercialização. As técnicas de calibração foram montadas no Laboratório de Materiais e Sensores do INPE.

O radiômetro desenvolvido possui um elemento sensor de célula solar de Si monocristalino convencional, de 15x15 mm², espectro de resposta de 400 a 1100 nm, sensibilidade típica entre 10 a 20 μV/Wm⁻², tempo de resposta menor que 10 ms, que é uma característica inerente a uma célula solar de Si. Possui também resposta compatível com a lei dos cossenos para ângulos de incidência até 80°, precisão dentro das condições naturais da luz do dia de ± 5% máximo e temperatura de operação de -20 a 80° C. A variação máxima da estabilidade no período de 1 ano é prevista para ± 2%.

A célula solar possui tipicamente as seguintes características elétricas: tensão de circuito aberto (Voc) de 580 mV, corrente de curto circuito (Isc) de 70 mA, potência máxima de 30 mW, eficiência de 12 %, para uma área ativa de 15x15 mm².

Para o desenvolvimento do radiômetro, foram montados três sistemas para caracterização e calibração: calibração absoluta, resposta espectral e resposta à lei dos co-senos.

Agradecimentos

Este trabalho contou com apoio da FINEP no projeto “Desenvolvimento de Radiômetro para Medida de Radiação Solar Global” (2004-2008) e da empresa Orbital Engenharia Ltda.

REFERÊNCIAS

- Beloto, A. F., 1989. Técnicas para a Otimização de Células Solares de Uso Espacial. Tese de doutorado, LME-EPUSP.
- Norma ISO 9846, 1993. “Solar Energy – Calibration of a Pyranometer Using a Pyrheliometer”.
- Norma ISO 9847, 1992. “Calibration of Field Pyranometers by Comparison to a reference Pyranometer”.
- Norma ISO 9059, 1990. “Calibration of Field Pyrheliometers by Comparison to a reference Pyrheliomete”.
- Stem, N., 2007. Análise Teórica de Emissores Homogêneos e Duplamente Difundidos em Células Solares de Silício. Implementações ao Processo de Fabricação. Dissertação de mestrado, LME-EPUSP.

SILICON SOLAR CELL AS SENSOR FOR SOLAR GLOBAL RADIATION MEASUREMENTS

Abstract. *In this work were developed radiometers for global radiation measurements having conventional monocrystalline silicon solar cells as sensor. The solar cell was developed using silicon slices growth by CZ, type-p, (100), with resistivity of 1 Ω .cm, area of 15 x 15mm and antireflective coating of TiO₂. This solar cell presents open circuit voltage of 580 mV, short circuit current of 70 mA, maximum power out put of 28mW and 12% of efficiency measured under AM1.5 spectrum, temperature of 25C. The solar cells are located in a cylindrical container of cast aluminum. This container is fixed on a base where there is a level indicator for cell positioning. Under cell there is an optical window for cosine law compatibility. The solar cell and electric circuit are protected against humidity. For radiometers calibration were set up systems for absolute calibration, spectral response and cosine law. The engineering model was tested against humidity, ultraviolet radiation and salt spray. The radiometer was also tested in a data collect station in the Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC at INPE in Cachoeira Paulista-SP.*

Key words: Solar cell, Solar Radiation, Radiometer.