



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.06.12.50-TDI

SISTEMAS DE CARACTERIZAÇÃO DE ELEMENTOS SENSORES PARA RADIÔMETROS FOTOVOLTAICOS

Tiago Franca Paes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Antônio Fernando Beloto, e Luiz Angelo Berni, aprovada em 29 de fevereiro de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BASKJ5>>

INPE
São José dos Campos
2012

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.06.12.50-TDI

SISTEMAS DE CARACTERIZAÇÃO DE ELEMENTOS SENSORES PARA RADIÔMETROS FOTOVOLTAICOS

Tiago Franca Paes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Antônio Fernando Beloto, e Luiz Angelo Berni, aprovada em 29 de fevereiro de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BASKJ5>>

INPE
São José dos Campos
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Paes, Tiago Franca.
P138s Sistemas de caracterização de elementos sensores para radiômetros fotovoltaicos / Tiago Franca Paes. – São José dos Campos : INPE, 2012.

xxiv + 99 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.06.12.50-TDI)

Dissertação (Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

Orientadores : Drs. Antônio Fernando Beloto, e Luiz Angelo Berni.

1. energia solar. 2. elementos sensores. 3. células solares. 4. radiômetros. I.Título.

CDU 621.383.51

Copyright © 2012 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2012 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em

**ETE/Ciência e Tecnologia de Materiais e
Sensores**

Dr. Antônio Fernando Beloto



Presidente / Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Luiz Angelo Berni



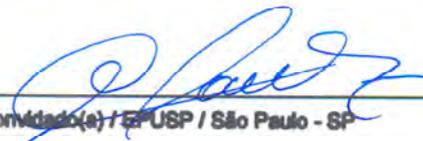
Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Nelson Veissid



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Manuel Cid Sánchez



Convidado(a) / UFUSP / São Paulo - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

Aluno (a):  **Tiago Franca Pass**

São José dos Campos, 29 de fevereiro de 2012

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Aos Professores e Orientadores Beloto e Berni, pelo crédito, conhecimento e dedicação demonstrada.

Ao meu pai Normando, meu referencial.

À minha mãe Mary, minha fortaleza.

À minha querida e inseparável Natinha, parceira em todos os momentos.

A meus irmãos Julinha, Dani e Nena, eternos companheiros.

À minha ímpar Ayalla, fonte de amor e carinho.

Aos Professores colaboradores Waldeir Vilela e Nelson Veissid, que me auxiliaram neste projeto.

Aos amigos uesquianos Dudu, Jesus, Celso, Bum e Chapola, sempre presentes.

Aos novos amigos Felipe Carreri, Luiz Gustavo, Douglas Baquião e Rodolfo Lotte, que fizeram parte dessa conquista.

Aos parceiros de trabalho, Dalmo, Tabata e Peixoto, pelo suporte necessário.

Todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso deste projeto.

RESUMO

O estudo da radiação solar tanto no âmbito terrestre quanto fora da atmosfera é de fundamental importância para a compreensão das mudanças climáticas do planeta e otimização de sistemas de geração de energia. Trabalhos de caracterização de elementos sensores para uso em satélites ou em radiômetros vêm sendo desenvolvidos no Grupo de Células Solares (CELSOL) do Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS) localizado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O objetivo deste trabalho foi de aprimorar os sistemas de caracterização para análise e estudos dos elementos sensores dos radiômetros fotovoltaicos desenvolvidos no laboratório. O Grupo dispõe de três sistemas de caracterização de dispositivos fotovoltaicos. Um sistema de curva de corrente por tensão (I_xV) composto por um simulador solar da Oriel classe CBA que opera com lâmpada de alta pressão de xenônio de 1000 Watts que reproduz o espectro solar fora da atmosfera (AM0) e terrestre na superfície (AM 1.5G) que, associado a outros equipamentos, possibilita a determinação de parâmetros relacionados ao desempenho de sensores fotovoltaicos tais como corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, corrente de máxima potência, tensão de máxima potência, eficiência e o fator de preenchimento. Uma bancada óptica para medida da resposta angular por luz incidente que permite obter a resposta à lei dos cossenos, composto por fontes com lâmpadas de descarga elétrica de Hg(Xe) e de filamento (W) de 500 e 1000 Watts respectivamente, um tubo colimador de feixe de 2,85m com 6 íris, sendo a sua última ajustável entre 1 à 40mm e um suporte da célula que permite ajustar o ângulo de incidência da luz de 0° à 180° . Um sistema de medida de responsividade espectral, composto por uma fonte com lâmpada de filamento (W) de 250 Watts, um monocromador Oriel, um amplificador *Lock-in* e um chopper. A partir das medidas de corrente por potência incidente [A/W], para cada comprimento de onda, é possível determinar a curva de resposta espectral dos detectores. Para validar os sistemas de medidas do laboratório foram caracterizadas de acordo com normas técnicas, diferentes amostras de elementos sensores voltados para os radiômetros desenvolvidos no laboratório 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 do laboratório do CELSOL para caracterização e calibração de sensores fotovoltaicos.

CHARACTERIZATION SYSTEMS OF SENSORS ELEMENTS FOR PHOTOVOLTAIC RADIOMETERS

ABSTRACT

The study of solar radiation inside and outside the earth's atmosphere is considered of fundamental importance for the understanding of the climate change on the planet and the energy optimization of power generation systems. Works on sensor elements characterization for use in satellite or radiometers have been developed in the Group of Solar Cells (CELSOL) at Associate Laboratory of Sensors and Materials (LAS) of the National Institute for Space Research (INPE). The objective of this study was to improve the characterization systems for analysis and studies of the sensor elements from photovoltaic radiometers developed in the laboratory. The Group has three characterization systems for photovoltaic devices. A current versus voltage system composed by a solar simulator class CBA from Oriel that operates with a high pressure Xenon 1000 Watt arc-lamp, reproduces the solar spectrum outside (AM0) and inside the atmosphere (AM 1.5G), which enables to determine the parameters related to the performance of the photovoltaic sensors such as short circuit current, open circuit voltage, maximum power current, maximum power voltage, efficiency and fill factor. An optical bench for measurement of the angular response in respect of the incident light which gives the answer to the cosines law of the detector, consisting of electric discharge lamps sources with Hg(Xe) and filament (W) of 500 and 1000 Watts respectively, a beam collimator tube of 2.85m with 6 apertures, being the last one adjustable between 1 and 40mm and a support cell that allows to adjust the angle of incidence of light from 0° to 180°. A system for measuring spectral responsivity, consisting of a filament lamp (W) 250 Watts, an Oriel monochromator, a *Lock-in* amplifier and a chopper. The measurements of the output current and incident power [A/W] for each wavelength make possible to determine the spectral response curve. To validate the laboratory measurement systems were characterized, according to technical standards, different samples of sensor elements facing the radiometer developed in the CELSOL 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 only on ultraviolet radiation. The measured results were analyzed and compared with data reported by the manufacturers of photovoltaic devices, confirming the ability of the CELSOL laboratory for characterization and calibration of photovoltaic sensors.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 - Radiação solar global diária, média anual.....	3
Figura 2.1 - Espectro eletromagnético.....	5
Figura 2.2 - Representação de uma onda eletromagnética.....	6
Figura 2.3 - Geometria da definição de radiância.....	7
Figura 2.4 - Irradiância incidente de angulo sólido hemisférico sobre um elemento de área.	8
Figura 2.5 - Espectro solar fora da atmosfera comparado com o espectro de corpo negro em 5800K.....	10
Figura 2.6 - Espectro solar direto ao nível do mar comparado com o espectro solar fora da atmosfera.....	10
Figura 2.7 - Radiação global composta pelas componentes da radiação direta, difusa e refletida.	11
Figura 2.8 - A posição em graus e valores das diferentes massas de ar.	12
Figura 2.9 - Espectros padrão de referencia AM0, AM1.5G e AM1.5D.	13
Figura 2.10 - Diagrama da determinação do sinal de saída de um sensor de radiação.	16
Figura 2.11 - Radiômetro fotovoltaico desenvolvido no LAS/INPE.....	18
Figura 2.12 - Células solares de silício monocristalino no formato final do processo utilizadas na fabricação dos radiômetros.....	18
Figura 2.13 - Dispositivo de aquisição <i>data RAD</i> e os radiômetros do LAS/INPE (maior) e o da Kipp&Zonen (menor).....	19
Figura 2.14 - Diagrama das bandas de energia de um material semiconductor intrínseco.	21
Figura 2.15 - Energia do <i>gap</i> em função do momento para semicondutores com transição direta (a) e com transição indireta (b).	22
Figura 2.16 - Curva típica de resposta espectral extrínseca de uma célula solar de silício monocristalino.	22
Figura 2.17 - Comparação entre a responsividade por comprimento de onda de um detector fotovoltaico ideal (reta) e de um detector fotovoltaico real (curva).	24
Figura 2.18 - Esquema típico de uma célula solar.....	25
Figura 2.19 - Circuito equivalente de uma célula solar real.....	27

Figura 2.20 - Curva IxV típica de uma célula solar de silício monocristalino, onde $P_{máx}$ é a potência máxima da célula.	28
Figura 2.21 - Curvas IxV de uma célula solar simulando diferentes valores de R_s e R_p	29
Figura 2.22 - Curvas IxV de uma célula solar de silício em diferentes temperaturas.	30
Figura 2.23 - Curvas IxV de uma célula solar de silício monocristalino em diferentes intensidades luminosas.	31
Figura 2.24 - Diagrama de uma célula solar de tripla junção.	32
Figura 2.25 - Diagrama simples de um sistema de medida de curva IxV.	34
Figura 2.26 - Diagrama típico do sistema de medida de resposta espectral. ...	37
Figura 2.27 - Transformada de Fourier sobre uma onda quadrada tendendo ao infinito.	38
Figura 2.28 - Luz monocromática incidente na grade de difração é difratada em direções discretas, onde m é ordem de difração.	39
Figura 2.29 - Geometria da difração de luz monocromática sobre grade de difração.	40
Figura 2.30 - Curva de resposta angular ideal de uma superfície que obedece a lei dos cossenos.	42
Figura 2.31 - Diagrama típico do sistema de medida de resposta angular.	42
Figura 3.1 - Foto dos suportes desenvolvidos. Da esquerda para a direita, suporte das células solares, fotodiodo de silício e fotodiodo de UV.	45
Figura 3.2 - Elementos sensores medidos neste trabalho: Células solares: 1 – LME/USP; 2– <i>Spectrolab</i> ; 3– CAST; 4 – 3J; Fotodiodos: 5– S1336-8BK; 6 – TW30DY2.	46
Figura 3.3 - Esquema do Simulador solar Oriel 81193 do CELSOL.	47
Figura 3.4 - Diagrama do sistema de caracterização de curva IxV de células solares de silício do CELSOL.	48
Figura 3.5 - Espectros do simulador solar do CELSOL com filtros AM0 e AM1.5G.	49
Figura 3.6 - Esquema de medidas para uniformidade do feixe do simulador.	50
Figura 3.7 - Espectro solar AM0 padrão da ASTM comparado com o espectro do simulador solar com filtro AM0.	51
Figura 3.8 - Espectro solar AM1.5G padrão da ASTM comparado com o espectro do simulador solar com filtro AM1.5G.	51

Figura 3.9 - Sistema, atual (esquerda) e antigo (direita), de medida de curva Corrente por tensão do CELSOL.....	53
Figura 3.10 - Interface do programa de medida de curva IxV do CELSOL.	55
Figura 3.11 - Curva de corrente por tensão gerada pelo programa de medida de curva IxV do CELSOL.	56
Figura 3.12 - Diagrama do sistema de medida de resposta espectral do CELSOL. 1- <i>Housing</i> da lâmpada, 2- espelho plano de primeira face, 3- lente convergente, 4- suporte para filtros óticos, 5- <i>chopper</i> ótico.	57
Figura 3.13 - Diagrama de montagem do chopper juntamente com o Lock-in.	58
Figura 3.14 - Configuração ótica do monocromador <i>Oriel 77200</i>	59
Figura 3.15 - Diagrama do caminho ótico da radiação através do monocromador.	60
Figura 3.16 - Foto do sistema de medida de resposta espectral do CELSOL. (1) fonte de radiação; (2) espelho plano; (3) lente convergente; (4) monocromador; (5) suporte dos detectores; (6) espectralradiômetro <i>Newport</i>	61
Figura 3.17 - Montagem do sistema de resposta angular do CELSOL sobre a bancada ótica.	63
Figura 3.18 - Foto do sistema de medida de resposta angular do CELSOL. ...	64
Figura 4.1 - Perfil da uniformidade do feixe do simulador solar.	68
Figura 4.2 - Perfil X e Y da uniformidade do feixe do simulador solar em relação ao ponto central da área de trabalho.	68
Figura 4.3 - Gráfico da estabilidade temporal do simulador solar.	69
Figura 4.4 - Gráfico da estabilidade temporal da fonte de radiação do sistema de resposta espectral do CELSOL.	71
Figura 4.5 - Espectro da fonte de luz do sistema de medida de resposta espectral do CELSOL usando uma lâmpada de filamento de 250W.	72
Figura 4.6 - Curva de potência da radiação na saída do monocromador.	73
Figura 4.7 - Ajuste de curva pelo modelo de Gauss das medidas da potência de saída do sinal dos comprimentos de onda referente 1mm de abertura de fenda.	73
Figura 4.8 - Dispersão linear do monocromador <i>Oriel</i> do CELSOL.	74
Figura 4.9 - Perfil da uniformidade do feixe na saída do tubo colimado para a fonte de luz de Hg(Xe).	75

Figura 4.10 - Perfil da uniformidade do feixe na saída do tubo colimado para a fonte de luz de filamento de W.....	76
Figura 4.11 - Espectro da fonte de luz usando a lâmpada de 500W Hg(Xe)....	76
Figura 4.12 - Espectro da fonte de luz usando a lâmpada de filamento de 1000W.....	77
Figura 4.13 - Curva IxV média da célula solar padrão de referência CHINA-923.	78
Figura 4.14 - Curva IxV média de uma célula solar espacial <i>Spectrolab</i>	79
Figura 4.15 - Curva IxV média de uma célula solar espacial CAST.	80
Figura 4.16 - Curva IxV média de uma célula solar terrestre LME.	81
Figura 4.17 - Curva IxV média de um fotodiodo S1336-8BK.....	81
Figura 4.18 - Curva IxV média de um dos fotodiodos TW30DY2.	82
Figura 4.19 - Comparação do espectro do simulador AM0 com e sem lâmpada auxiliar.	83
Figura 4.20 - Curva IxV média de uma das células solares 3J.....	84
Figura 4.21 - Curva média da resposta espectral relativa de uma das células solares espaciais <i>Spectrolab</i>	85
Figura 4.22 - Curva média da resposta espectral relativa de uma das células solares espaciais CAST.	85
Figura 4.23 - Curva média da resposta espectral relativa de uma das células solares terrestres LME.	86
Figura 4.24 - Curva média da resposta espectral relativa de um dos fotodiodos S1336-8BK juntamente com sua curva típica.	87
Figura 4.25 - Curva média da resposta espectral relativa de um dos fotodiodos TW30DY2 juntamente com sua curva típica.....	87
Figura 4.26 - Curvas médias da resposta angular de diferentes elementos sensores para a fonte de radiação Hg(Xe) comparado com uma resposta ideal.....	88
Figura 4.27 - Curvas de erro referente às respostas angulares dos elementos sensores para a fonte de radiação Hg(Xe).	89
Figura 4.28 - Curvas de resposta angular dos diferentes elementos sensores para a fonte de radiação de filamento comparado com uma resposta ideal.	90
Figura 4.29 - Curvas de erro referente às respostas angulares dos elementos sensores para a fonte de radiação Hg(Xe).	91

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Classificação do simulador solar segundo seu desempenho.....	34
Tabela 2.2 - Porcentagem da radiação em diferentes intervalos de comprimento de onda sobre a radiação total do espectro de referência.	35
Tabela 3.1 - Características gerais das células solares medidas.....	45
Tabela 3.2 - Características gerais dos fotodiodos medidos.....	46
Tabela 3.3 - Normas referentes às medidas de dispositivos fotovoltaicos de uso terrestre.	52
Tabela 4.1 - Classificação dos diferentes intervalos de comprimento de onda referentes às razões das porcentagens do espectro AM1.5G medido sobre as porcentagens do espectro total de referência AM1.5G.	70
Tabela 4.2 - Classificação dos diferentes intervalos de comprimento de onda referentes às razões das porcentagens do espectro AM0 medido sobre as porcentagens do espectro total de referência AM0.....	70
Tabela 4.3 - Características elétricas da célula solar padrão de referência CHINA-923.....	78
Tabela 4.4 - Características elétricas do lote de células solares <i>Spectrolab</i> ...	79
Tabela 4.5 - Características elétricas do lote das células solares CAST.	80
Tabela 4.6 - Características elétricas do lote das células solares LME.....	81
Tabela 4.7 - Características elétricas do lote dos fotodiodos S1336-8BK.....	82
Tabela 4.8 - Características elétricas do lote dos fotodiodos TW30DY2.....	83
Tabela 4.9 - Características físicas e elétricas do lote das células solares 3J.	84

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
CELSOL	Grupo de Pesquisas em Células Solares
LAS	Laboratório Associado de Sensores e Materiais
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AM	<i>Air Mass</i>
PAR	<i>Photosynthetically - Active Radiation</i>
UV	Radiação ultravioleta
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
LME/USP	Laboratório de Microeletrônica da Universidade de São Paulo
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ABNT	Associação de Brasileira de Normas Técnicas
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
RMS	Root Mean Square
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i>
CAST	<i>Chinese Academy for Space Technology</i>
IxV	Corrente por tensão

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Comprimento de onda
Q	Energia radiante
E	Campo elétrico
B	Campo magnético
V	Velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo
ϵ_0	Permissividade elétrica do vácuo
c	Velocidade da luz no vácuo
E	Energia de um fóton
h	Constante de Planck
ν	Frequência da radiação
Φ	Potência radiante ou fluxo radiante
L	Radiância
L_λ	Radiância espectral
A	Área
Ω	Ângulo sólido
n	Normal à superfície
E	Irradiância
E_λ	Irradiância espectral
M	Exitância
I	Intensidade radiante
E_0	Constante solar
P	Pressão atmosférica
P_0	Pressão atmosférica ao nível do mar
θ	Ângulo
S	Sinal de saída do sensor
R	Constante de calibração ou resposta do sensor
S_0	Sinal de escuro do sensor

$T(\lambda)$	Transmitância espectral
E_g	Energia da banda proibida ou <i>gap</i>
Q_E	Eficiência quântica
R_λ	Responsividade espectral, sensibilidade espectral, ou resposta espectral absoluta.
q	Carga elementar
I_{cc}	Corrente de curto-circuito
V_{ca}	Tensão de circuito aberto
I_L	Corrente fotogerada
I_{01} e I_{02}	Correntes de saturação dos diodos
R_S	Resistência em série
R_p	Resistência em paralelo
k	Constante de Boltzmann
T	Temperatura
m	Fator de qualidade do diodo
V_{mp}	Tensão de máxima potência
I_{mp}	Corrente de máxima potência
$P_{m\acute{a}x}$	Potência máxima
FF	Fator de forma ou fator de preenchimento
η	Eficiência

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1	INTRODUÇÃO..... 1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 5
2.1.	Radiação eletromagnética..... 5
2.2.	Radiação Solar..... 9
2.2.1.	Espectro Solar..... 9
2.3.	Sensores de radiação 13
2.3.1.	Radiômetros 16
2.3.2.	Radiômetro do LAS/INPE..... 18
2.4.	Elementos sensores..... 20
2.4.1.	Princípio de funcionamento de elemento sensores..... 20
2.5.	Células Solares 24
2.6.	Sistemas de caracterização de elementos sensores fotovoltaicos 32
2.6.1.	Sistema de medida corrente por tensão (IxV)..... 32
2.6.2.	Sistema de medida de resposta espectral 36
2.6.3.	Sistema de medida de resposta angular 40
3	METODOLOGIA 43
3.1.	Instrumentos de medição e aquisição de dados 43
3.2.	Suportes dos elementos sensores 44
3.3.	Elementos sensores utilizados no trabalho 45
3.4.	Sistema de medida de corrente por tensão do CELSOL..... 46
3.4.1.	Medidas de curvas IxV dos elementos sensores 54
3.5.	Sistema de medidas de resposta espectral do CELSOL..... 56
3.5.1.	Medidas de resposta espectral dos elementos sensores..... 61
3.6.	Sistema de medidas da resposta à lei dos cossenos do CELSOL 62
3.6.1.	Medidas de resposta angular dos elementos sensores 64

4	RESULTADOS	67
4.1.	Resultados da análise e estudo do sistema de medidas de corrente por tensão	67
4.2.	Resultados da análise e estudo do sistema de medidas de resposta espectral	71
4.3.	Resultados da análise e estudo do sistema de medidas de resposta angular	74
4.4.	Resultados da caracterização dos elementos sensores	77
4.4.1.	Caracterização IxV dos elementos sensores	77
4.4.2.	Caracterização da resposta espectral dos elementos sensores .	84
4.4.3.	Caracterização da resposta angular dos elementos sensores	88
5	CONCLUSÃO	93
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

1 INTRODUÇÃO

Todas as formas de vida do nosso planeta precisam de energia solar para crescimento e manutenção. A maior parte da energia utilizada hoje na Terra (petróleo, gás natural, carvão, etc.) foi armazenada durante milhões de anos através da decomposição de plantas, animais terrestres e aquáticos que existiram. Hoje, a utilização destas formas de energia tem se tornado cada vez mais um problema crucial para a evolução das formas de vida no planeta e, por isso, o ser humano começou a pesquisar e desenvolver meios de utilização da energia solar diretamente através da conversão térmica e elétrica dos raios solares, tentando evitar assim problemas como, por exemplo, de poluição e efeito estufa entre outros. A conversão da energia solar em energia elétrica, que é uma das formas de energia mais utilizadas pelo homem, alcançou nos últimos anos um estágio de desenvolvimento capaz de inserí-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. Essa forma de conversão de energia vem sendo discutida desde o primeiro reconhecimento do efeito fotovoltaico realizado pelo físico Alexandre-Edmond Becquerel em 1839 (MAURER, 1945). No seu experimento de duas placas metálicas mergulhadas numa solução eletrolítica, percebeu-se que quando exposto à luz havia um aumento na geração de energia. Após essa descoberta em 1839, foi desenvolvida com pastilhas de selênio a primeira célula solar por Charles Fritts (SCIENCE FACTS, 2011). Desde então esses dispositivos vêm sendo estudados e aprimorados, principalmente quando se trata de geração de energia elétrica. As células solares são uma forma alternativa de gerar energia, pois não degradam o meio ambiente e possuem uma fonte inesgotável – o Sol. No Brasil, a pesquisa em sensores fotovoltaicos vem atuando tanto na aplicação terrestre quanto na aplicação espacial e em sensores de monitoramento ambiental (VEISSID, 1990; ANNEL, 2008).

Recentemente, políticas de incentivo têm sido feitas para um melhor aproveitamento da energia solar, particularmente por meio de sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica, visando comunidades isoladas das redes de transmissão de energia elétrica e ao desenvolvimento regional (LA ROVERE, 2011). O Atlas Solarimétrico do Brasil desenvolvido pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE e pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF, em parceria com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB, publicado em 2000, apresenta uma estimativa da radiação solar incidente no país, uma vez que os dados obtidos das estações solarimétricas espalhadas pelo território nacional foram feitos através da interpolação e extrapolação das medidas (TIBA, 2000). Apesar de possuir baixa precisão em algumas localidades, o Atlas Solarimétrico permite a avaliação da disponibilidade da radiação solar no país. A figura 1.1 ilustra a média anual do mapeamento da radiação solar diária do Brasil em termos de $[MJ/m^2\text{dia}]$. Percebe-se que os índices mais altos de radiação solar estão concentrados, na sua maioria, em grande parte do nordeste e numa faixa do centro-oeste do país.

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 (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 utiliza uma célula solar de silício monocristalino como elemento sensor, para medida da radiação solar (VILELA, 2010) e está em desenvolvimento um radiômetro que opera na faixa espectral do ultravioleta (BERNI, 2010).

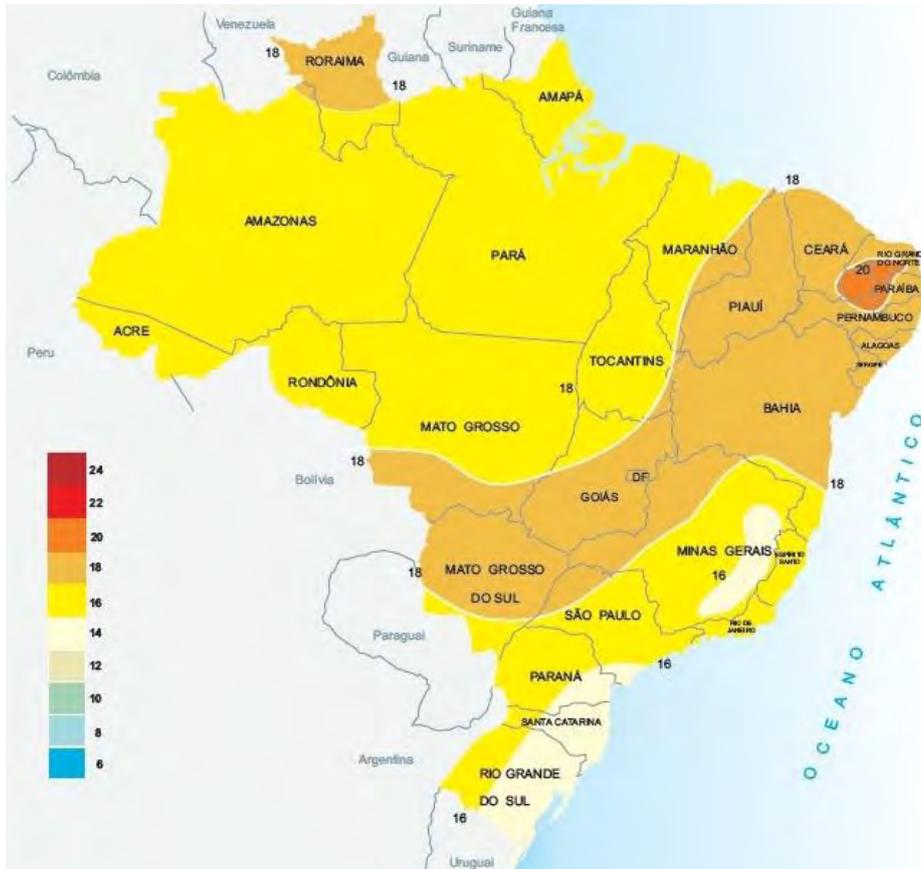


Figura 1.1 - Radiação solar global diária, média anual.
 Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos (2000).

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 a fim de obter parâmetros intrínsecos desses dispositivos. O objetivo deste trabalho foi de aprimorar os 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 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 sensores que são objetos de estudo: sistema de medida corrente por tensão, sistema de medida da resposta espectral e sistema de medida da resposta angular da luz incidente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Radiação eletromagnética

Radiometria é a ciência de medição da energia eletromagnética radiante e do modo como esta energia é transportada através de sistemas óticos. O estudo da radiometria se aplica a todo o espectro eletromagnético que cobre uma faixa de comprimento de onda, desde raios cósmicos ($\lambda \approx 10^{-15}\text{m}$) até ondas de rádio ($\lambda \approx 10\text{m}$). Já a fotometria é o estudo da radiometria que se aplica apenas numa faixa espectral limitada de aproximadamente 380nm a 740nm, onde representa a faixa espectral da luz visível como mostra a figura 2.1.

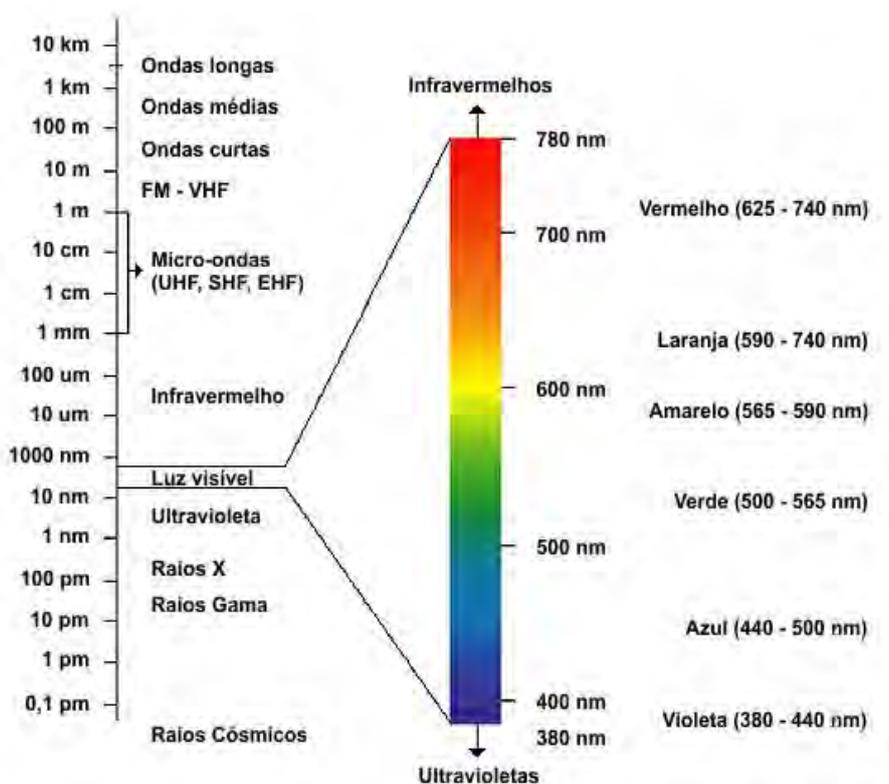


Figura 2.1 - Espectro eletromagnético.

A unidade fundamental da radiometria é a energia radiante Q e possui unidade de medida em Joule. Essa energia geralmente se origina de um corpo luminoso e se propaga na forma de ondas eletromagnéticas, representada na figura 2.2. James Clerk Maxwell (1831-1879) mostrou que a variação do campo elétrico E

e do campo magnético \mathbf{B} no vácuo, ou seja, a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas V no vácuo é constante independentemente do referencial da fonte emissora. A equação 2.1 descreve a velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo, onde μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo e ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo.

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} \quad (2.1)$$

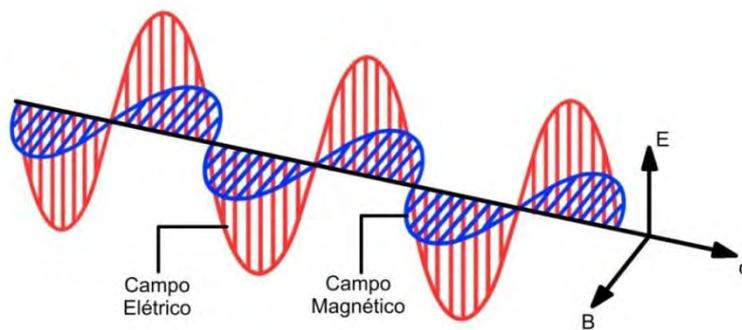


Figura 2.2 - Representação de uma onda eletromagnética.

Substituindo as constantes μ_0 e ϵ_0 na equação 2.1, obtemos a velocidade de propagação de qualquer onda eletromagnética no vácuo, dada pelo valor $V=2,99792458 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Essa velocidade também é conhecida como velocidade da luz no vácuo, sendo representada pelo símbolo c .

A interação da radiação eletromagnética com a matéria possui um caráter discreto. Segundo Max Planck (1858 – 1947), essa energia não é contínua, mas sim dividida em pacotes de onda, denominando de “*quanta*”. Na física quântica, a quantidade de energia de qualquer sistema é quantizada, ou seja, não admite qualquer valor (HEWITT, 2006). A expressão 2.2 mostra a hipótese de Planck que a energia de um fóton é proporcional à frequência da radiação,

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.2)$$

onde h é a constante de Planck igual a $6,626 \times 10^{-34}$ J · s e ν é a frequência da radiação que depende apenas do comprimento de onda da luz λ .

Considerando todo o espectro solar como fonte de radiação, podemos dizer que a potência radiante ou fluxo radiante Φ é a energia radiante por unidade de tempo $\left(\frac{dQ}{dt}\right)$ e é medida em Watts. Esse fluxo radiante incidindo ou emitido por uma determinada área permite definir a radiância L , que é a quantidade elementar da radiometria dada em termos de potência por unidade de área projetada por unidade de ângulo sólido expresso pela equação (2.3). Considerando L em termos de λ temos a radiância espectral L_λ definida pela equação 2.4 dada por $\left[\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}\right]$:

$$L = \frac{d\Phi}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\Omega} \quad (2.3)$$

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} = \frac{d\Phi}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\Omega \cdot d\lambda} \quad (2.4)$$

A figura 2.3 ilustra a radiância de um elemento de área projetada dA em um ângulo sólido Ω em relação a normal n .

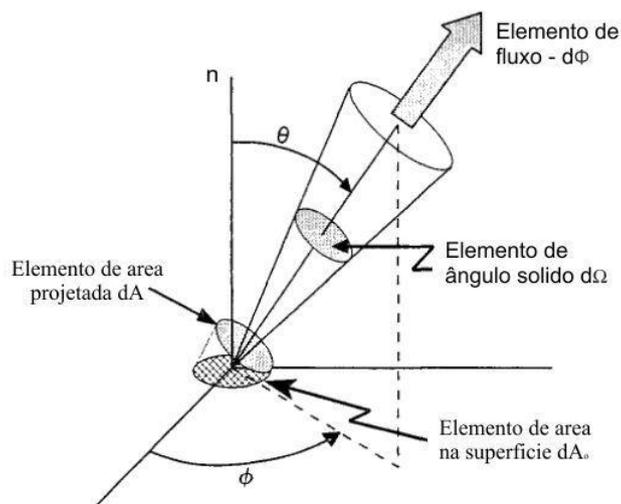


Figura 2.3 - Geometria da definição de radiância.
Fonte: McCluney (1994).

Podemos definir também a irradiância E como sendo o fluxo radiante incidente por unidade de área, ou seja, a densidade de fluxo radiante incidente dada em termos de $[W \cdot m^{-2}]$. Da mesma forma da radiância espectral, a irradiância espectral E_λ depende de λ com unidade $[W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}]$. A expressão 2.5 define a irradiância espectral.

$$E_\lambda = \frac{d\Phi}{dA \cdot d\lambda} \quad (2.5)$$

A figura 2.4 ilustra o fluxo radiante incidente de um ângulo sólido hemisférico em uma superfície definida.



Figura 2.4 - Irradiância incidente de ângulo sólido hemisférico sobre um elemento de área.
Fonte: McCluney (1994).

A emitância M é o oposto da irradiância, pois define a potência emitida de uma superfície de área definida em termos de $[W \cdot m^{-2}]$ como mostra a expressão 2.6.

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \quad (2.6)$$

Já a intensidade radiante I é o fluxo de energia radiante emitida em uma determinada direção por uma fonte por unidade de ângulo sólido. A equação 2.7 define a intensidade radiante em termos de $[W \cdot sr^{-1}]$.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2.7)$$

2.2. Radiação Solar

Parte da radiação emitida pelo Sol chega à Terra, de modo que a irradiância integrada em toda a faixa do seu espectro define um valor denominado de constante solar E_0 . Essa irradiância medida à uma distância Terra-Sol sobre a atmosfera terrestre possui um valor numérico médio de aproximadamente $1366,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (VILELA, 2010). Esse valor pode variar em torno de 0,1% ao longo dos anos, principalmente devido às manchas solares. Por outro lado, ao penetrar na atmosfera a radiação solar sofre fenômenos físicos de difusão, absorção, reflexão entre outros. O valor da irradiância hemisférica na superfície terrestre é de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, segundo a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) (ASTM, 2008).

2.2.1. Espectro Solar

Chamamos de radiação de corpo negro a radiação eletromagnética emitida por um objeto que depende apenas de sua temperatura, não de sua composição. Podemos afirmar que a radiação eletromagnética emitida pelo Sol é semelhante à de um corpo negro, pois a maior parcela do seu espectro é térmica, devido à sua temperatura superficial de 5800K, admitindo o máximo da radiação emitida na faixa do espectro visível. A figura 2.5 mostra o espectro de corpo negro a uma temperatura de 5800K juntamente com o espectro solar fora da atmosfera numa faixa de 200nm a 2400nm.

O Sol emite radiação eletromagnética que compreende desde raios cósmicos até ondas curtas devido a sua temperatura, já a Terra emite radiação de comprimentos de onda longos. Cerca de 99% dos comprimentos de onda é representada pela radiação infravermelha, que abrange aproximadamente de 760nm – 1mm. Porém, a faixa da luz visível é mais intensa em relação ao resto do espectro solar, que apesar de ser estreita, representa aproximadamente 47,3% da irradiância total, contra 46,7% da radiação infravermelha e 6,1% de ultravioleta. Ao penetrar na atmosfera, a radiação solar sofre vários fenômenos

físicos que interferem no espectro solar terrestre. A figura 2.6 mostra tanto o espectro solar fora da atmosfera quanto o espectro solar direto ao nível do mar. Vemos que a irradiância total na superfície terrestre é menor em relação à irradiância total fora da atmosfera devido os fenômenos de absorção e difusão da radiação em determinadas regiões do espectro ao penetrar na atmosfera.

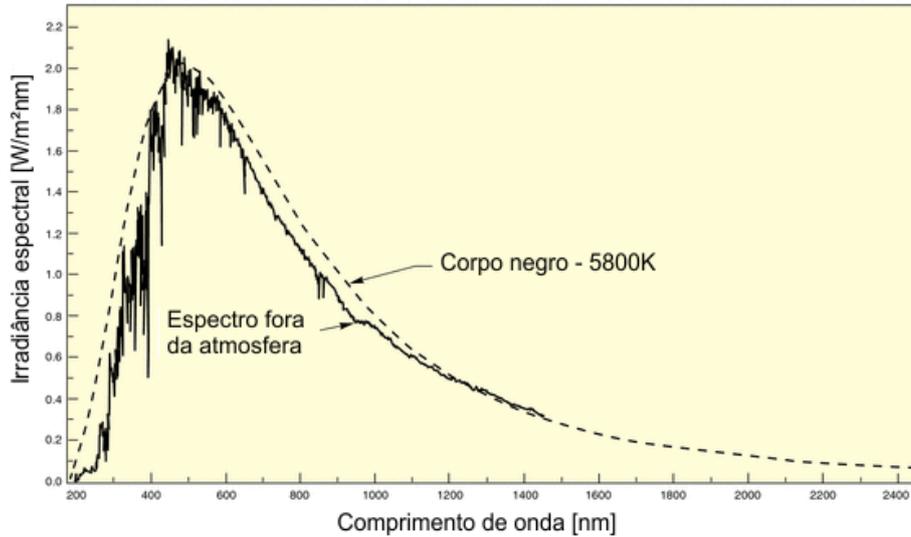


Figura 2.5 - Espectro solar fora da atmosfera comparado com o espectro de corpo negro em 5800K.
Fonte: Newport (2011).



Figura 2.6 - Espectro solar direto ao nível do mar comparado com o espectro solar fora da atmosfera.
Fonte: Newport (2011).

As componentes da radiação solar na atmosfera, conhecidas como direta, difusa e refletida determinam o perfil do espectro solar terrestre. A componente direta da radiação, ou radiação direta é aquela que incide perpendicularmente numa superfície, diferente da radiação difusa que é espalhada pelas nuvens e pelo ambiente. Já a radiação refletida depende do albedo local, mar ou terra. A soma das radiações diretas, difusas e refletidas é denominada de radiação global, ou seja, é a radiação proveniente de todas as direções. A figura 2.7 ilustra as componentes da radiação terrestre. Percebemos que parte da radiação é refletida e absorvida pela atmosfera.

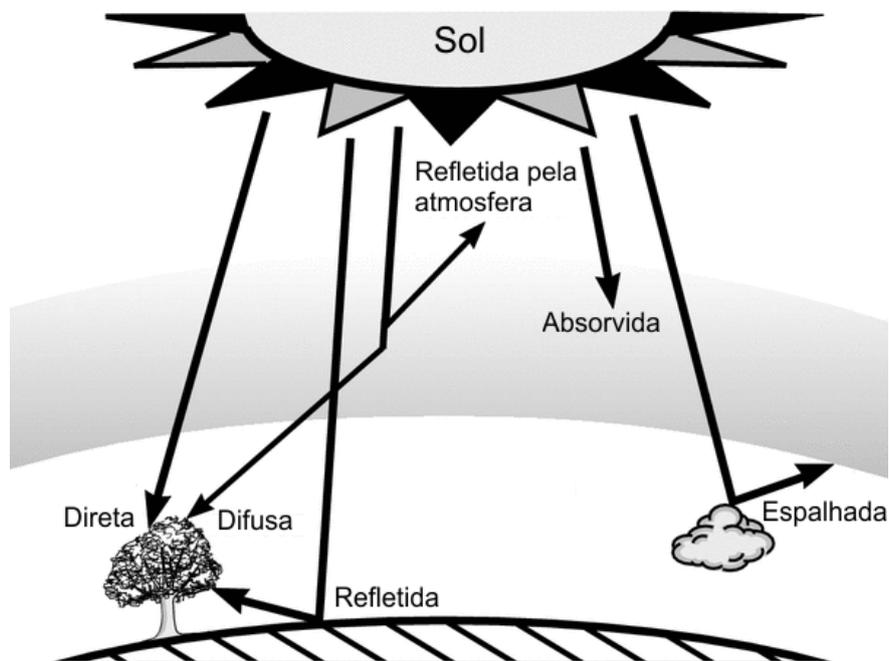


Figura 2.7 - Radiação global composta pelas componentes da radiação direta, difusa e refletida.
Fonte: Newport (2011).

O espectro solar terrestre também depende do caminho ótico por onde a radiação passa. Esse caminho ótico na área de energia solar é chamado de “Air Mass” - AM em inglês, ou massa de ar. Significa que existe uma camada de ar por onde a radiação solar atravessa determinando seu espectro. O valor da massa de ar é 1 ao nível do mar, sob pressão de $P=1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$, à céu claro quando o sol está perpendicular à superfície terrestre, no zênite. Para

qualquer outro ponto na superfície da Terra, o valor X da AM é dado pela equação 2.8.

$$X = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{1}{\text{sen}\theta} \quad (2.8)$$

Sendo P a pressão do ar local em [Pa], $P_0 = 1,013 \times 10^5 \text{Pa}$ e θ é a inclinação do ângulo solar [graus]. A figura 2.8 ilustra as diferentes massas de ar para as diferentes posições do sol referente ao ângulo zênite.

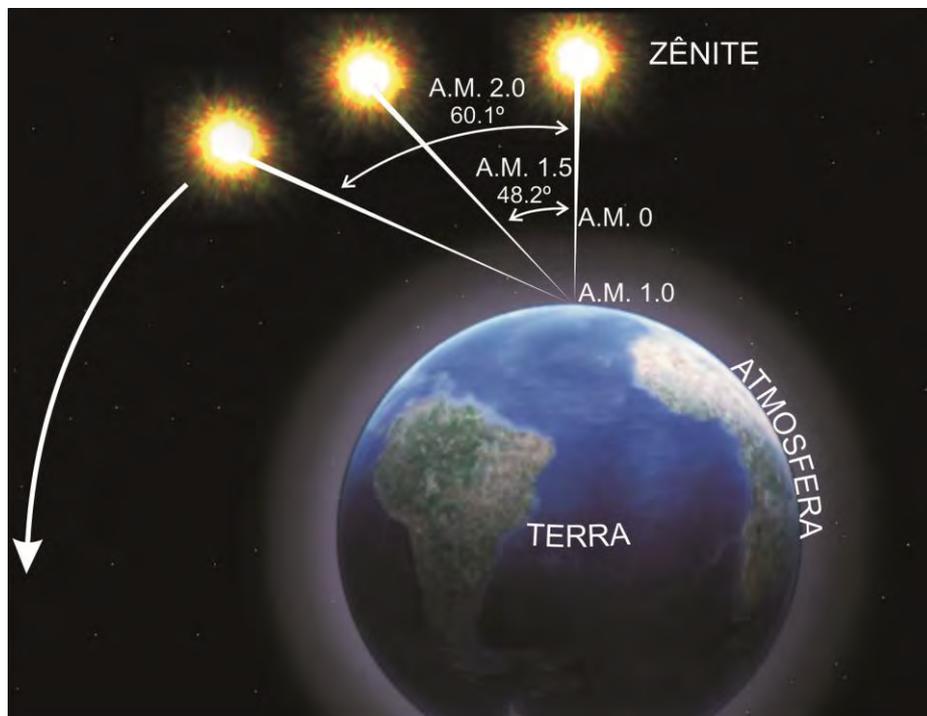


Figura 2.8 - A posição em graus e valores das diferentes massas de ar.

Quando $X = 0$, o espectro fora da atmosfera é denominado de AM0 e para as diferentes posições do Sol em relação ao ângulo zênite, os espectros solares terrestres variam entre AM1, AM1.5 e AM2, sendo que para AM1.5 são estabelecidos dois padrões: o AM1.5G, referente a radiação global na angulação de 48,2° e AM1.5D, referente a radiação direta na angulação de 48,2°.

O gráfico da figura 2.9 mostra o perfil dos espectros padrão de referência AM0, AM1.5G e AM1.5D da ASTM.

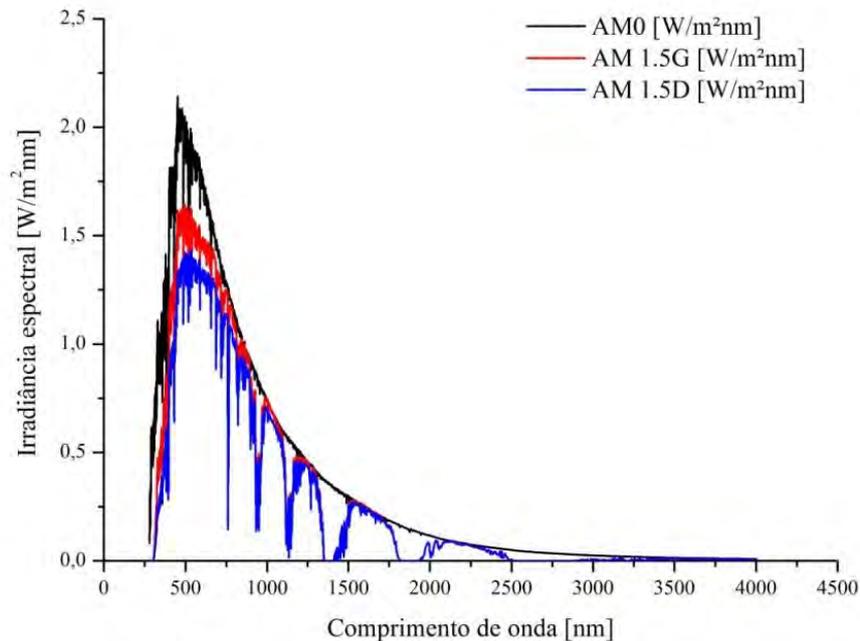


Figura 2.9 -Espectros padrão de referencia AM0, AM1.5G e AM1.5D.
Fonte: ASTM G173-03 *Reference Spectra Derived from SMARTS*
v. 2.9.2.

A partir desses padrões de referência é possível caracterizar espectralmente sistemas de simulação solar ou simuladores solares. A integral da irradiância espectral desses padrões permite obter as constantes solares equivalentes de cada espectro.

2.3. Sensores de radiação

Podemos generalizar a definição de sensores como sendo qualquer dispositivo que responde a um estímulo com sinal elétrico (FRADEN, 2003). No caso de sensores de radiação, esse estímulo é a radiação eletromagnética incidente sobre ele. Nesse trabalho, iremos discutir apenas sensores que convertem energia eletromagnética em energia elétrica, ou seja, a relação entre o sinal elétrico de saída e o fluxo de radiação solar incidente. Essa relação é chamada

de responsividade ou sensibilidade. Para um bom sensor, a relação é linear e pode ser descrita pela expressão (2.9) (MCCLUNEY, 1994).

$$S = R \cdot \Phi \quad (2.9)$$

Onde S é o sinal de saída, R é a constante de calibração ou resposta do sensor e Φ é o fluxo da radiação incidente. Se o sinal de saída do sensor estiver em volts e o fluxo radiante em Watts, sendo proporcional ao sinal de saída, então R é dado em $[V \cdot W^{-1}]$. Se o sinal de saída do sensor for uma corrente $[A]$, R terá unidade de $[A \cdot W^{-1}]$.

Qualquer sensor de radiação, independente de como foi projetado, nunca produz uma representação ideal da radiação incidente no sinal de saída, há sempre um ruído. Esse ruído ou sinal de escuro faz com que o sinal de saída seja diferente de zero mesmo quando o fluxo de radiação incidente for zero. Dessa forma podemos chamar de S_0 o sinal de escuro. Assim a equação (2.9) é reescrita da forma:

$$S = R \cdot \Phi + S_0 \quad (2.10)$$

Na prática, a resposta do sensor depende de vários fatores como temperatura, fluxo da radiação incidente, ângulo de incidência da radiação, comprimento de onda do feixe e outros. Dessa forma, a resposta do sensor é representada por $R(\Phi, \theta, \lambda, x, y, z, \dots)$, onde Φ é o fluxo de radiação incidente, θ é o ângulo de incidência do feixe, λ é o comprimento de onda do feixe e x, y, z são outros parâmetros variáveis presentes no sinal de saída. Como a radiação solar que atinge uma superfície plana através de um feixe colimado decresce com o cosseno do ângulo de incidência, a resposta obedece à lei dos cossenos ou lei de Lambert. Por esta razão, o sinal de saída de um sensor tem a resposta proporcional ao cosseno do ângulo de incidência do feixe. No caso geral, a equação da sensibilidade é expressa por:

$$S = R(\Phi, \cos(\theta), \lambda, x, y, z, \dots) \cdot \Phi + S_0 \quad (2.11)$$

Para um caso específico, iremos atribuir a dependência da resposta do sensor apenas para λ , pois vimos que a radiação solar é composta por uma larga faixa de comprimentos de onda. Assim, a equação (2.11) é expressa como:

$$S(\lambda) = R(\Phi_\lambda, \cos(\theta), \lambda, x, y, z, \dots) \cdot \Phi_\lambda + S_0 \quad (2.12)$$

Considerando ainda que se $E_\lambda(\lambda)$ é o espectro de radiação incidente sobre uma área sensível do sensor A e que o sensor depende apenas de λ para uma radiação normal à superfície sensível do sensor, onde $\theta = 0$, o sinal de saída do sensor para toda faixa espectral é dado pela expressão:

$$S = A \cdot \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda + S_0 \quad (2.13)$$

Para que a equação (2.13) se torne mais genérica, podemos inserir um sistema ótico qualquer que interfira no sinal do sensor. Iremos chamar $T(\lambda)$ de transmitância espectral deste sistema ou janela ótica e incluir na integral (2.13).

$$S = A \cdot \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda + S_0 \quad (2.14)$$

A figura 2.10 ilustra de forma simples como determinar o sinal de saída de um sensor a partir de uma fonte de radiação. Conhecendo o espectro da fonte e a transmitância do sistema ótico, podemos determinar o sinal de saída do sensor que tem uma área e uma resposta determinada. Essa demonstração encontra-se mais detalhada na referência (MCCLUNEY, 1994).

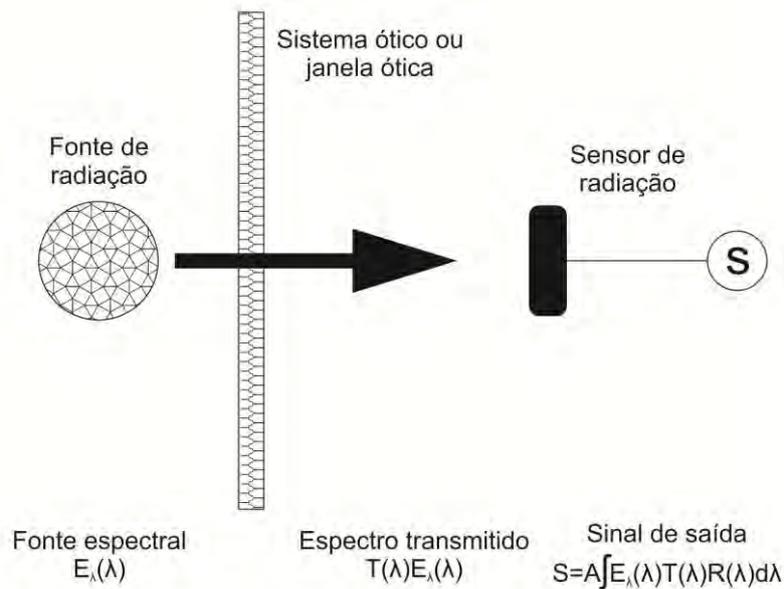


Figura 2.10 - Diagrama da determinação do sinal de saída de um sensor de radiação. Fonte: McCluney (1994).

2.3.1. Radiômetros

O termo radiômetro é genericamente usado quando se trata de sensores de radiação. Devido à evolução tecnológica e a própria necessidade de monitorar qualquer tipo de radiação por diversas áreas de pesquisa, os radiômetros foram sendo aprimorados para vários tipos de medição. Como exemplo, temos os sensores de radiação solar aplicados para a agricultura, que recebem a denominação de radiômetro PAR (*Photosynthetically-Active Radiation*) por medir apenas a radiação de interesse responsável pela fotossíntese das plantas. A principal característica do radiômetro PAR é de ter sua resposta espectral limitada ao visível, ou seja, na faixa de 400nm a 700nm.

Outros radiômetros voltados para uma determinada aplicação são os radiômetros para ultravioleta, que são destinados à medida da radiação solar apenas da parcela do espectro que contém o UV. Também podem ser encontrados sensores que atuam na subdivisão do espectro do ultravioleta, que são radiômetros UV-A, UV-B e UV-AB. Já os radiômetros globais medem

as componentes da radiação direta e difusa recebida de todo o hemisfério (VILELA, 2010).

A Organização Meteorológica Mundial (WMO – *World Meteorological Organization*), através da Comissão para Instrumentos e Métodos, definiu nomenclaturas para os sensores de radiação eletromagnética com objetivo de diferenciar os instrumentos para cada tipo de medida (WMO, 2008).

- Pireliômetro - Instrumento dedicado apenas para a medida da radiação solar direta. Sua principal característica é de apresentar uma pequena abertura de forma a "visualizar" apenas o disco solar e a região vizinha denominada circunsolar. Geralmente os pireliômetros seguem o movimento solar com o objetivo de sempre focalizar melhor a região do sensor.

- Piranômetro - Instrumento para medida da radiação solar global (direta + difusa) recebida em todo hemisfério, numa faixa espectral de 300nm a 3000nm. O detector do sensor pode ser tanto quântico quanto térmico, ou seja, pode ser célula solar, fotodiodo, ou uma termopilha. A termopilha é um conjunto de termopares em série e seu funcionamento baseia-se no efeito *Seebeck*, descoberto pelo físico Thomas Johann Seebeck em 1821 (FRADEN, 2003). O termopar é uma junção de dois metais, de diferentes propriedades físicas, que quando submetido a uma fonte de calor, é capaz de gerar uma diferença de potencial mensurável.

- Pirradiômetro - Instrumento para medida da radiação total, ou seja, radiação de origem solar (global), terrestre e atmosférica, que compreende comprimentos de onda entre 300nm e 1mm. Geralmente utilizam detectores térmicos, pois cobrem uma ampla faixa espectral.

- Pirgeômetro - Instrumento de medida da radiação que possui comprimentos de onda longos (a partir de 3000nm). Esses sensores geralmente utilizam detectores térmicos, por serem mais sensíveis a comprimentos de onda longos

e filtros óticos para subtrair a radiação com comprimentos de onda curtos (radiação solar).

2.3.2. Radiômetro do LAS/INPE

Como exemplo de um sensor de radiação solar, o grupo CELSOL do LAS/INPE em parceria com o Laboratório de Microeletrônica da Universidade de São Paulo – LME/USP e a empresa Orbital Engenharia Ltda., desenvolveu um radiômetro fotovoltaico de baixo custo para medida da radiação solar global e um dispositivo de aquisição de dados dedicado ao monitoramento da radiação solar (VILELA, 2010). O radiômetro desenvolvido (figura 2.11) tem como principal característica o uso de uma célula solar de silício monocristalino como elemento sensor (figura 2.12).



Figura 2.11 - Radiômetro fotovoltaico desenvolvido no LAS/INPE.
Fonte: Vilela (2010).

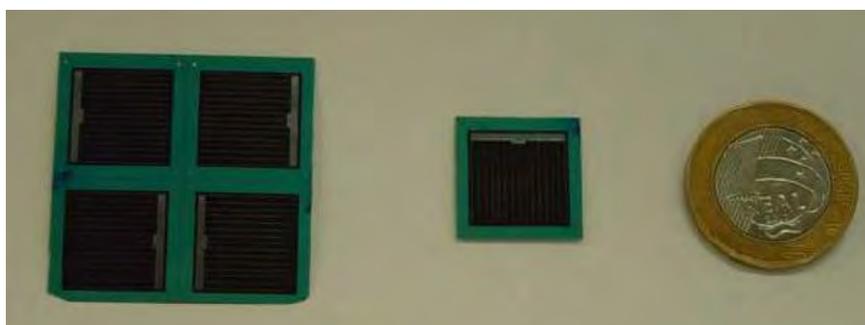


Figura 2.12 - Células solares de silício monocristalino no formato final do processo utilizadas na fabricação dos radiômetros.
Fonte: Vilela (2010).

O elemento sensor utilizado no radiômetro foi produzido no LME/USP e possui área ativa de $15,5 \times 15,5 \text{mm}^2$. Sua resposta espectral está contida na faixa de comprimento de onda de 400nm a 1100nm e sua sensibilidade típica está entre 10 a $20 \frac{\mu\text{V}}{\text{W}\cdot\text{m}^{-2}}$. Possui um tempo de resposta menor que 10ms e é compatível com a resposta à lei dos cossenos com precisão de $\pm 3\%$. O dispositivo de aquisição de dados é um *data logger* dedicado para medida da radiação. O sistema possui baixo consumo de energia, capaz de adquirir e armazenar dados de quatro radiômetros e dois termopares durante mais de um ano. Os sinais dos sensores medidos são convertidos em valores e unidades adequadas e podem ser registrados na memória, apresentados simultaneamente no mostrador do dispositivo ou enviados a um microcomputador. A figura 2.13 mostra o dispositivo de aquisição de dados, *data RAD* juntamente com o radiômetro fotovoltaico do LAS/INPE e com um radiômetro calibrado da *Kipp&Zonen*.

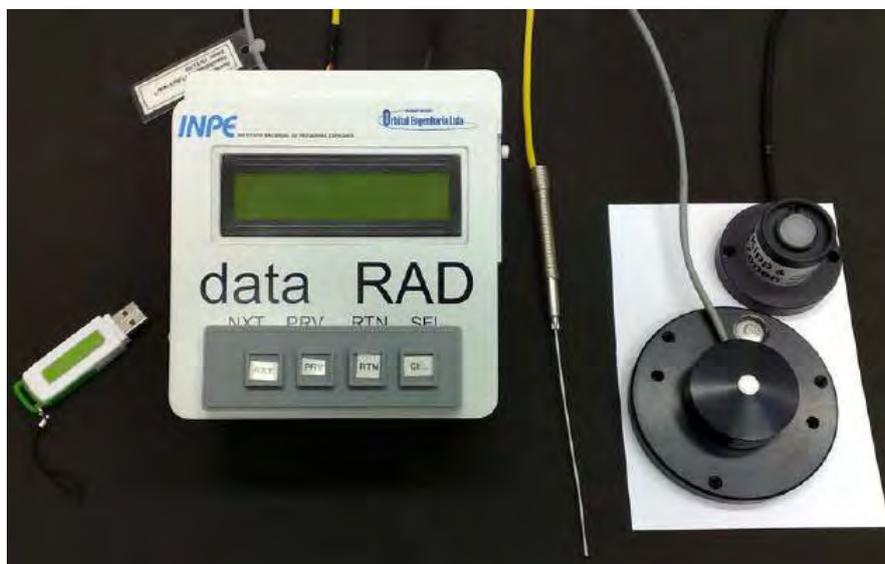


Figura 2.13 - Dispositivo de aquisição *data RAD* e os radiômetros do LAS/INPE (maior) e o da Kipp&Zonen (menor).
Fonte: Vilela (2010).

Para que o valor de medida do radiômetro fosse confiável, ele foi calibrado por comparação com um padrão de referência que tem certificação e rastreabilidade. As caracterizações elétricas e óticas dos radiômetros foram

feitas no laboratório de células solares do LAS/INPE em três sistemas: sistema de medida da radiação por comparação com um sensor padrão ou caracterização relativa, sistema de medida da resposta à lei dos cossenos e sistema de medida de resposta espectral. Para determinar a conformidade dos radiômetros em relação aos requisitos de qualidade, eles também foram submetidos a testes ambientais de umidade, radiação ultravioleta e névoa salina.

2.4. Elementos sensores

Detectores ou elemento sensores são dispositivos responsáveis pela conversão de energia entre um estímulo qualquer que se deseja medir e o sinal de saída possível de ser mensurável. Tratando de sensor fotovoltaico de radiação, o elemento sensor converte a energia do fóton incidente (estímulo) em energia elétrica. A absorção dos fótons de comprimentos de onda que abrange a faixa espectral desde o ultravioleta até o infravermelho extremo pelo elemento sensor, pode resultar tanto em uma resposta quântica quanto térmica. Dessa forma, os fotodetectores estão divididos em dois grupos chamados de quânticos e térmicos. Esses grupos se diferenciam pela faixa espectral operacional, onde o detector quântico que opera na faixa do ultravioleta até o infravermelho médio e o detector térmico que opera na faixa do infravermelho médio até o infravermelho extremo (FRADEN, 2003). Nesse trabalho, iremos discutir apenas os elementos sensores quânticos.

2.4.1. Princípio de funcionamento de elemento sensores

Detectores quânticos, também conhecidos como detectores de estado sólido são dispositivos fotovoltaicos ou fotocondutores que dependem da interação de fótons com a rede cristalina de um material semiconductor. Seu funcionamento está baseado no efeito fotovoltaico. Diferente do efeito fotoelétrico onde o elétron é arrancado da superfície do material, no efeito fotovoltaico o elétron é transferido entre bandas de energia dentro do material gerando uma diferença de potencial quando o material é exposto à radiação. Em outras palavras, no

efeito fotovoltaico os fótons emitidos por uma fonte de radiação e absorvidos pelo semicondutor excitam elétrons da banda de menor energia, chamada de banda valência, para a banda de maior energia, ou banda de condução, gerando um potencial.

A figura 2.14 mostra a estrutura das bandas de energia de um material semicondutor intrínseco, quando não há impurezas no cristal. Para que um elétron passe da banda de valência para a banda de condução criando portadores de carga (elétrons-lacunas) é necessário que o fóton absorvido pelo semicondutor tenha uma energia (eq. 2.2) maior ou igual à energia da banda proibida, também chamada de *gap* E_g .

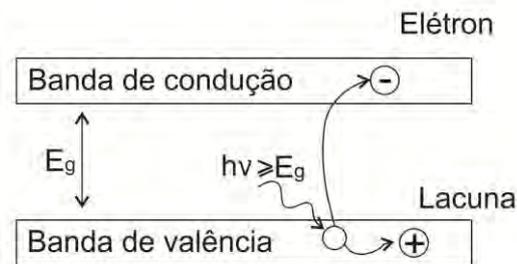


Figura 2.14 - Diagrama das bandas de energia de um material semicondutor intrínseco.

A probabilidade de um fóton ser absorvido pelo semicondutor é definida pelo coeficiente de absorção do material, que depende da energia de *gap* e da energia dos fótons da radiação incidente (WURFEL, 2005).

A lei da conservação da energia se aplica em todo o processo de absorção do fóton e excitação do elétron. Dessa forma, existem dois tipos de transição do elétron entre as bandas de energia: a transição direta e a transição indireta. A figura 2.15 (a) mostra a transição direta do elétron entre as bandas de energia onde o momento do elétron permanece constante. Na figura 2.15 (b) ocorre a transição indireta, ou seja, além da interação do fóton e do elétron, é necessária a interação de um fônon para que a rede cristalina provoque uma mudança no momento devido ao deslocamento entre o mínimo da banda de condução e o máximo da banda de valência (BELOTO, 1983).

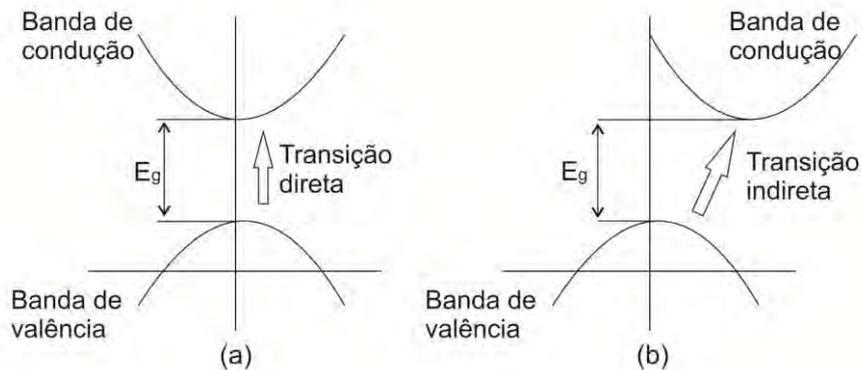


Figura 2.15 - Energia do *gap* em função do momento para semicondutores com transição direta (a) e com transição indireta (b).

A probabilidade de um elétron saltar da banda de valência para a banda de condução na região central das bandas é maior comparada com as regiões das extremidades. Portanto, a densidade de portadores de carga gerados na região central das bandas de valência e condução são maiores que nas extremidades das bandas. A figura 2.16 mostra uma curva típica da resposta espectral extrínseca de um semicondutor, uma célula solar de silício monocristalino. Vemos que o pico da curva se encontra onde a probabilidade de gerar portadores de carga é maior.

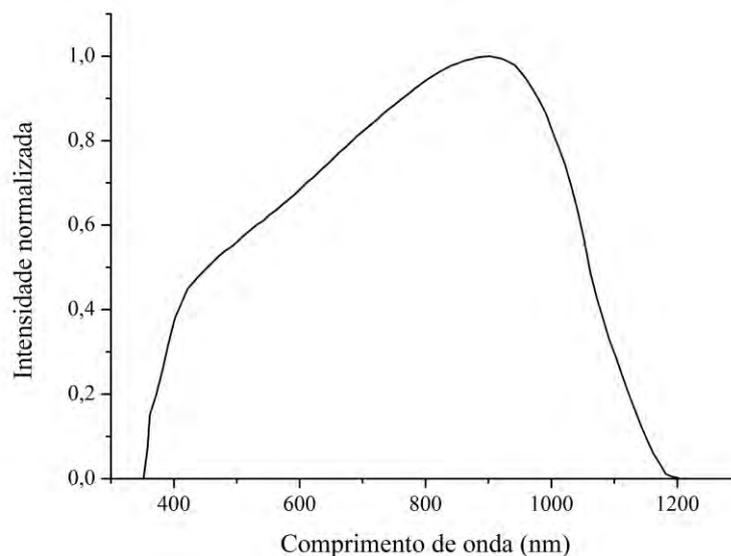


Figura 2.16 - Curva típica de resposta espectral extrínseca de uma célula solar de silício monocristalino.

A responsividade R de um dispositivo fotovoltaico é a relação entre os sinais de saída e de entrada do dispositivo. Costuma-se expressar essa responsividade em termos de Amperes por Watts [$A \cdot W^{-1}$], visto que sua definição, equação (2.14), é dada como a razão entre a densidade de corrente de curto-circuito J e a irradiância incidente E .

$$R = \frac{J}{E} \quad (2.14)$$

A resposta de um elemento sensor ou responsividade, quando expressa em função de λ , R_λ é definida como responsividade espectral, sensibilidade espectral, ou mesmo, resposta espectral absoluta. Uma das propriedades que determina a responsividade espectral de um elemento sensor é a eficiência quântica Q_E , que é a quantidade definida, em porcentagem, do número de fótons incidentes sobre um detector, que geram portadores de carga no estado de curto-circuito. É uma medida exata da sensibilidade do dispositivo à luz.

A eficiência quântica fornece informações sobre a corrente que um determinado detector quântico vai produzir quando iluminado por um comprimento de onda específico. Tanto a eficiência quântica quanto a responsividade espectral são funções que dependem de λ .

Podemos relacionar a eficiência quântica com a resposta espectral de um elemento sensor pela equação (2.16):

$$Q_E(\lambda) = \frac{hc}{\lambda q} R_\lambda \quad (2.16)$$

Onde h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz no vácuo e q a carga elementar (PALMER, 2009).

Uma comparação gráfica de um elemento sensor fotovoltaico ideal e um elemento sensor fotovoltaico real estão ilustrados na figura 2.17.

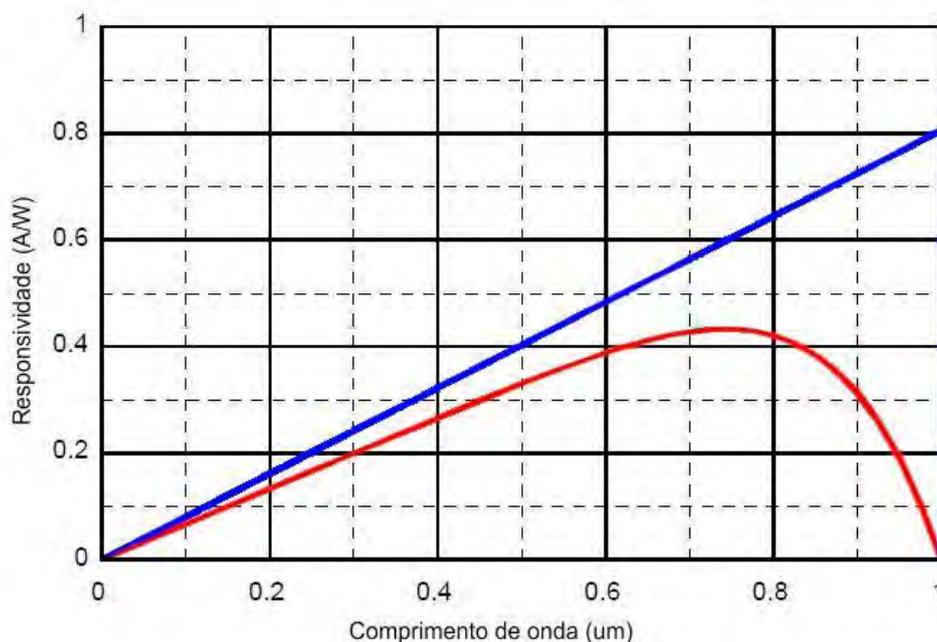


Figura 2.17 - Comparação entre a responsividade por comprimento de onda de um detector fotovoltaico ideal (reta) e de um detector fotovoltaico real (curva).
Fonte: Palmer (2009).

Para um dispositivo ideal, consideramos que todos os fótons incidentes são absorvidos e geram portadores de carga, $Q_E = 1$, ($Q_E = 100\%$).

2.5. Células Solares

Células solares, assim como fotodiodos, são dispositivos semicondutores projetados e construídos para absorverem e converterem, de forma eficiente, a radiação solar (fótons) em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. A diferença básica entre o fotodiodo e a célula solar está no tamanho da superfície de absorção da radiação, uma vez que a célula solar possui, geralmente, uma área maior que a do fotodiodo. As células solares podem ser fabricadas a partir de uma série de materiais semicondutores, sendo o material mais comum, o silício (Si), que pode ter a estrutura do tipo monocristalino, policristalino ou amorfo. Outros materiais como GaAs, GaInP, e CdTe também

podem ser utilizados na fabricação de células. Geralmente, a escolha dos materiais para células solares é determinada pela sua aplicação, pela sua característica de absorção do espectro solar e pelo seu custo. O silício tem sido uma escolha comum devido ao fato de que sua característica de absorção condiz com o espectro solar e por ter uma tecnologia de fabricação bem desenvolvida, pois há muito tempo vem sendo utilizado na indústria de microeletrônica.

A estrutura típica de uma célula solar de silício está ilustrada na figura 2.18. A parte superior da célula solar é formada pelos contatos elétricos superiores e pela camada anti-refletora, que garante maior transmissão de luz e geração de portadores no interior da célula. O emissor é obtido através de técnicas de dopagem de impurezas ou dopantes, como por exemplo, difusão em forno de tubo aberto e implantação iônica. Por fim, outro contato elétrico é localizado na parte de trás da célula solar.

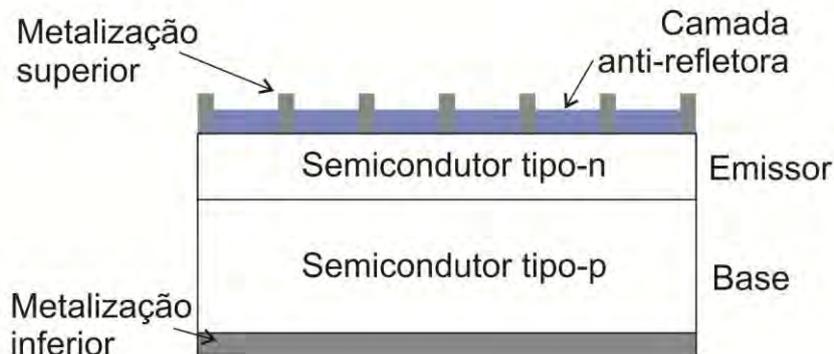


Figura 2.18 - Esquema típico de uma célula solar.

A metalização na região superior da célula deve ter a forma de grade de modo a cobrir o mínimo possível da superfície, pois a parte coberta pela metalização não contribui para o efeito fotovoltaico. Esses contatos devem ter baixa resistência ôhmica, pois qualquer resistência de contato significativa é somada à resistência em série da célula influenciando na sua potência de saída.

A deposição de uma camada anti-refletora sobre a célula solar permite reduzir a reflexão da luz em sua superfície, favorecendo um melhor desempenho. Essas camadas são geralmente obtidas através de processos de evaporação a vácuo, crescimento térmico, CVD, aspensão e "*sputtering*", de materiais transparentes como, por exemplo, SiO, SiO₂, SnO₂, TiO₂, Ta₂O₅, Si₃N₄ e outros. A espessura dessas camadas é de um quarto de comprimento de onda, na região de máxima densidade de fótons do espectro solar, que incide na superfície terrestre, de tal modo a obter reflexão mínima (BELOTO, 1983).

A corrente fotogerada de uma célula depende dos portadores gerados nas regiões do emissor e de base. Os portadores gerados longe da região do emissor podem sofrer recombinação e não contribuir para a corrente fotogerada. A contribuição dos portadores de carga gerados nos dois lados da junção define a corrente total de uma célula fotovoltaica. A máxima corrente da célula ocorre quando os seus terminais são postos em curto-circuito I_{cc} . Por outro lado, a máxima diferença de potencial ocorre no circuito aberto V_{ca} (VILELA, 2010).

Na figura 2.19 temos um circuito elétrico equivalente de uma célula solar real composto por uma fonte de corrente, dois diodos, uma resistência em série e outra em paralelo. Um diodo no circuito equivalente representa a junção p-n da célula, que possui características de um diodo ideal, o outro diodo refere-se à recombinação dos portadores na região de carga espacial. A resistência em paralelo define as perdas da corrente fotogerada quando flui através da junção, e também como corrente de fuga, devido a problemas de borda (sujeira, descontinuidade do cristal), e defeitos internos do material. Já a resistência em série é constituída da soma das resistências de contato, entre a metalização e o substrato, da resistência do emissor, da região de base ou *bulk* e também da resistência da grade coletora (dimensões).

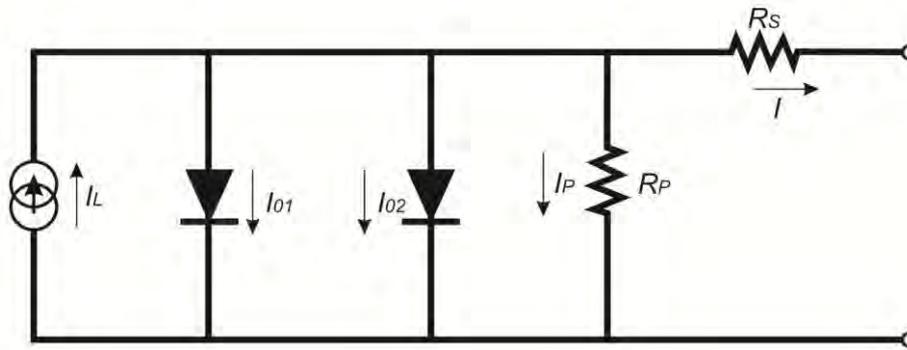


Figura 2.19 - Circuito equivalente de uma célula solar real.

A partir do circuito equivalente de uma célula solar real, podemos escrever a expressão da corrente total da célula em termos dos componentes do circuito da figura 2.19. Assim, a corrente da célula em uma carga externa é dada pela equação (2.17).

$$I = I_L - I_{01} \cdot \left\{ e^{\left[\frac{q(V+IR_S)}{m_1 kT} \right]} - 1 \right\} - I_{02} \cdot \left\{ e^{\left[\frac{q(V+IR_S)}{m_2 kT} \right]} - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (2.17)$$

Onde I_L é a corrente fotogerada, I_{01} e I_{02} são as correntes de saturação dos diodos, V é a tensão nos terminais dos diodos, R_S é a resistência em série, R_P é a resistência em paralelo, q é a carga elementar, k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura absoluta da célula e m_1 e m_2 são fatores que representam a idealidade da junção ou fator de qualidade do diodo (VEISSID, 1995). A equação permite determinar a curva corrente por tensão (IxV) de uma célula solar quando variamos a resistência de carga de zero a infinito (VILELA, 2010), e através dela, os principais parâmetros de desempenho. A figura 2.20 mostra uma curva IxV típica de uma célula solar de silício monocristalino.

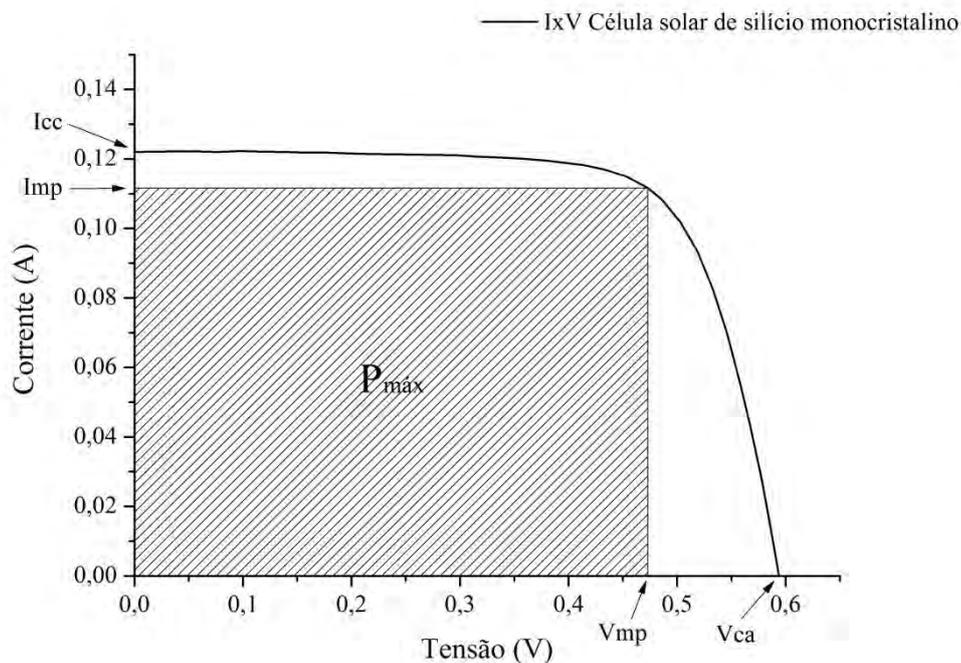


Figura 2.20 - Curva IxV típica de uma célula solar de silício monocristalino, onde $P_{máx}$ é a potência máxima da célula.

A potência máxima de uma célula solar é determinada por um valor específico de resistência de carga. Esse valor está representado pelo retângulo de máxima área inscrito na curva da figura 2.20 e podemos expressá-lo pela equação (2.18).

$$P_{MÁX} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (2.18)$$

Onde V_{mp} e I_{mp} são tensão de máxima potência e corrente de máxima potência respectivamente, diferentes de V_{ca} e de I_{cc} .

A partir da potência máxima, podemos definir o fator de forma ou fator de preenchimento FF como sendo a razão da potência máxima pelo produto de V_{ca} e de I_{cc} , expressado na equação (2.19), e a eficiência da célula, expressada pela equação (2.20).

$$FF = \frac{P_{M\acute{A}X}}{V_{ca} \cdot I_{cc}} \quad (2.19)$$

$$\eta = \frac{P_{M\acute{A}X}}{E \cdot A} \quad (2.20)$$

Onde E é a irradiância incidente e A é a área da célula.

O efeito das resistências em série e em paralelo da célula solar afeta sua eficiência alterando o fator de preenchimento da curva. Para que uma célula solar tenha alta eficiência, a resistência em série deve ser muito baixa e a resistência em paralelo deve ser alta. A figura 2.21 mostra curvas $I \times V$ de uma célula solar simulando diferentes resistências, tanto em série quanto em paralelo.

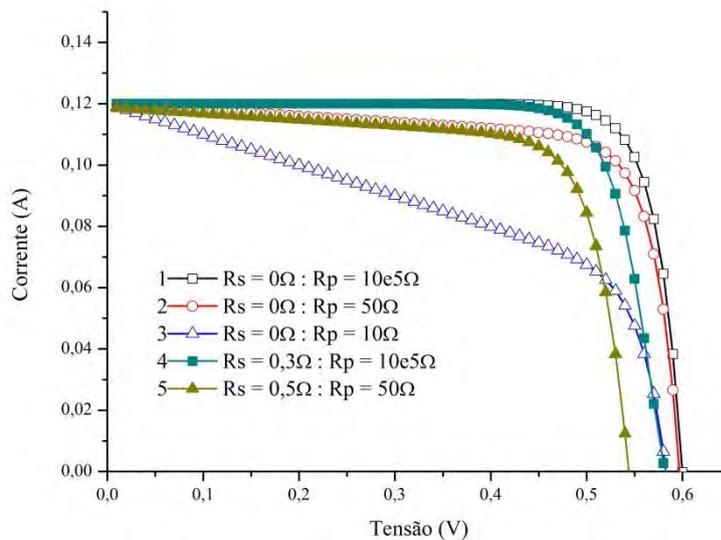


Figura 2.21 - Curvas $I \times V$ de uma célula solar simulando diferentes valores de R_s e R_p .

Percebe-se nas curvas 1, 2 e 3, que o aumento da resistência em paralelo não altera a tensão de circuito aberto (V_{ca}) da célula, mas altera o fator de preenchimento da curva, reduzindo a eficiência. Também pode haver redução da corrente de curto-circuito devido à queda de tensão dessa resistência. Nas curvas 4 e 5, a variação da resistência em série faz diminuir o valor de V_{ca} ,

também alterando o fator de preenchimento, portanto, reduzindo a eficiência da célula.

Um parâmetro que influencia no desempenho da célula é a variação da temperatura. A figura 2.22 mostra a curva IxV de uma célula em diferentes temperaturas. Vemos que com o aumento da temperatura, a corrente de curto-circuito da célula aumenta enquanto que a tensão de circuito aberto diminui independente da área da célula.

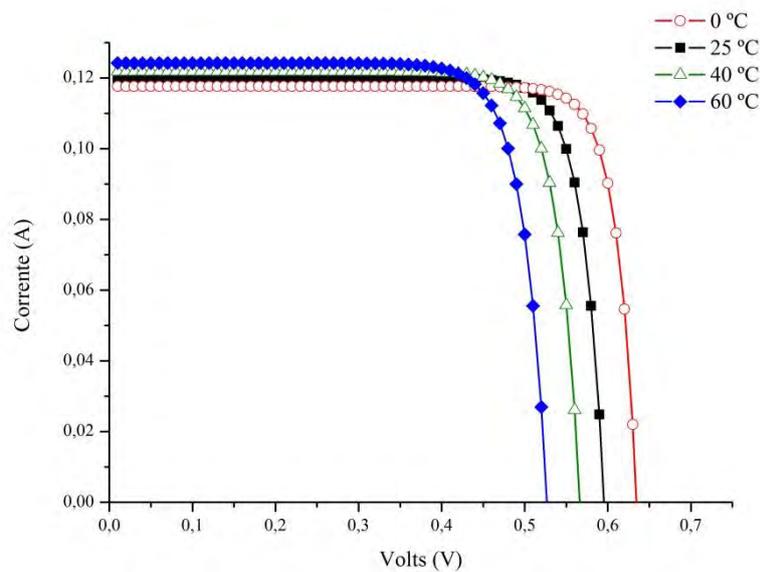


Figura 2.22 - Curvas IxV de uma célula solar de silício em diferentes temperaturas.

Outro fator importante é efeito da intensidade da radiação solar na curva IxV da célula. A corrente de curto-circuito é proporcional à intensidade luminosa desde que o espectro de irradiância da fonte seja constante, inclusive a temperatura da célula. A figura 2.23 mostra a curva IxV de uma célula em relação a variação da intensidade luminosa.

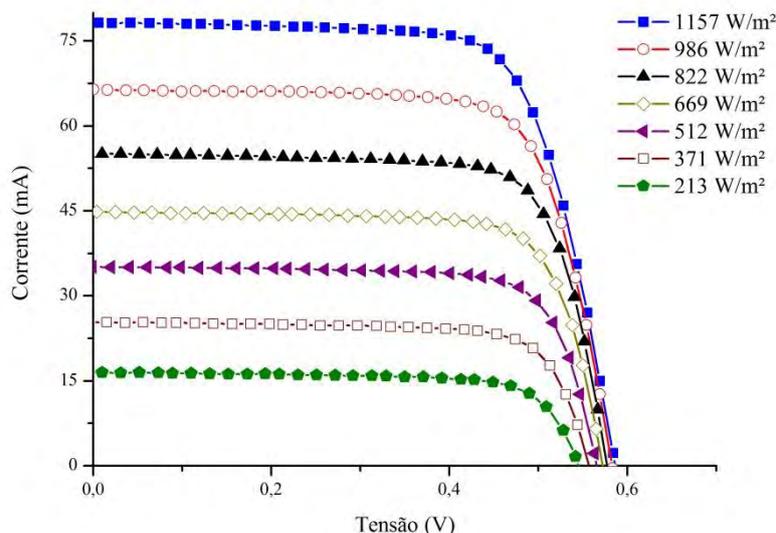


Figura 2.23 - Curvas IxV de uma célula solar de silício monocristalino em diferentes intensidades luminosas.

A utilização de células solares como detectores em radiômetros, ao invés de fotodiodos, também é possível quando se opera próximo da corrente de curto-circuito (VILELA, 2010), pois como vimos, a corrente de curto-circuito é proporcional a irradiância incidente na célula. As vantagens de seu uso como elemento sensor dependem da técnica de fabricação, ou seja, uma célula solar de silício cuidadosamente fabricada, que geralmente possui estabilidade de resposta, sensibilidade espectral, baixo tempo de resposta e linearidade do sinal.

Células solares de tripla junção são desenvolvidas, como o nome já diz, utilizando uma combinação de diferentes materiais semicondutores formando camadas de junções com o objetivo de absorver fótons de uma maior faixa espectral, desde 300nm a 1800nm do espectro solar. Geralmente, a eficiência mínima de uma célula tripla junção de uso espacial é de 26%. Estas células foram uma alternativa para evitar perdas inerentes das células monojunção.

A diferença da eficiência das células de tripla junção está diretamente ligada às absorções das camadas dos diferentes materiais semicondutores. A figura 2.24

mostra a camada do topo, que é responsável para absorver os fótons de maior energia, e as camadas do meio e da base, que absorvem os fótons de menor energia. As três junções em série implicam que a corrente de curto-circuito seja definida pelo valor da menor corrente fotogerada entre as três junções. Dessa forma, é desejável que cada junção produza a mesma fotocorrente. Por outro lado, a tensão de circuito aberto é produzida pela soma das tensões de cada junção da célula resultando em um alto valor (ABREU, 2006).

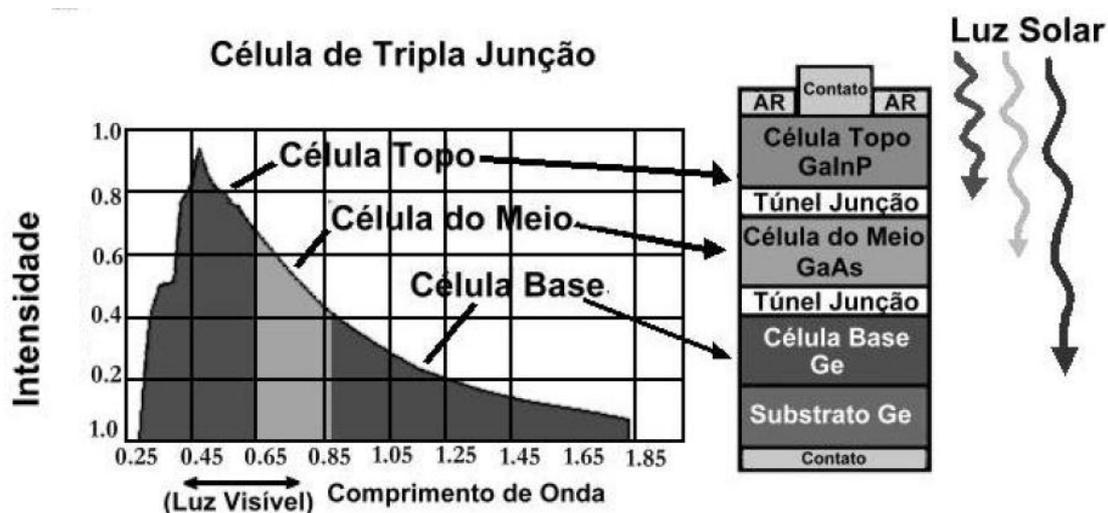


Figura 2.24 - Diagrama de uma célula solar de tripla junção.
Fonte: ABREU (2006).

2.6. Sistemas de caracterização de elementos sensores fotovoltaicos

Para determinar os parâmetros elétricos e óticos de dispositivos fotovoltaicos são necessários sistemas de medidas apropriados e precisos. Nesse trabalho, serão discutidos três sistemas de caracterização de elementos sensores para radiômetros fotovoltaicos: o sistema de corrente por tensão, o sistema de resposta espectral e o sistema de resposta angular por luz incidente.

2.6.1. Sistema de medida corrente por tensão (IxV)

O sistema de medida corrente por tensão (IxV) é utilizado para determinar os parâmetros elétricos relacionados ao desempenho do detector, que pode ser um fotodiodo ou uma célula solar de silício monocristalino, que é utilizada como

elemento sensor. Neste caso, é possível determinar: corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, corrente de máxima potência, tensão de máxima potência, eficiência e o fator de preenchimento. Uma alternativa para essa medida de característica do dispositivo fotovoltaico é realizá-la 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, todas as pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de células solares e sensores fotovoltaicos necessitam de sistemas de medidas que mantenham constantes essas condições, para caracterizar corretamente os dispositivos e permitir uma avaliação dos problemas, para que possa encontrar soluções adequadas. Artigos científicos também são baseados em sistemas de medidas onde os resultados são reproduzíveis para que possam ser confiáveis e aceitos pela comunidade científica. Deste modo, a montagem e o aperfeiçoamento de sistemas de medidas em laboratório são fundamentais para as atividades de pesquisa.

Basicamente, o sistema é constituído por um simulador solar, um suporte de amostras com temperatura controlada, uma carga variável, um sistema de medida de corrente e tensão e um sistema de aquisição de dados. A figura 2.25 mostra o diagrama simples de um sistema de medida de curva $I \times V$. O simulador solar é o principal equipamento do sistema composto por uma fonte de tensão estabilizada, um sistema ótico para colimação da luz, um fotodiodo para ajuste de potência e para manter a estabilidade da lâmpada e uma lâmpada de alta potência capaz de simular a radiação solar, levando em conta a intensidade de radiação, a uniformidade do feixe, a estabilidade temporal e o espectro, que dependendo dos filtros óticos inseridos, simula espectros do tipo AM0 para radiação solar fora da atmosfera ou AM1, AM1.5 ou AM2 para radiação solar dentro da atmosfera.

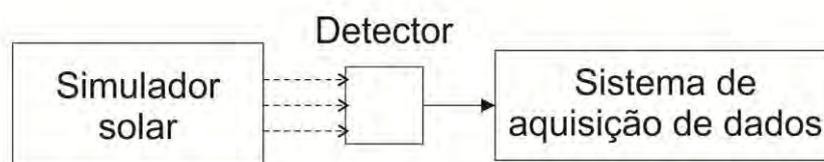


Figura 2.25 - Diagrama simples de um sistema de medida de curva IxV.

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. A norma IEC 60904-9 Ed.2 de 2006 refere-se à classificação de simuladores solares para caracterização de dispositivos fotovoltaicos de uso terrestre apenas. Para determinar a classificação de um simulador serão analisadas três categorias: a coerência espectral, a uniformidade e a estabilidade temporal do feixe de luz sobre a área de trabalho. Essas categorias são representadas pelas letras A, B, C, sendo que a de menor classe é CCC. A tabela 2.1 mostra a classificação dos simuladores de acordo com as condições de desempenho segundo a norma da IEC.

Tabela 2.1 - Classificação do simulador solar segundo seu desempenho.

Característica	Classe 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).

Se um simulador é de classe CBA, como exemplo, significa que sua coerência espectral é C, a uniformidade do feixe é B e a estabilidade temporal é A.

A coerência espectral é o percentual da radiação em cada intervalo de comprimento de onda pela radiação total do espectro medido. Na tabela 2.2, os valores para AM1.5G são indicados pela norma IEC 60904-9 Ed.2 e os valores para o espectro AM0 são calculados pelo padrão NIST (*National Institute of Standards and Technology*), considerando os mesmos intervalos de comprimento de onda. Esses intervalos de comprimento de onda são válidos apenas para caracterização de células solares de silício, visto que para células de outros materiais são necessárias outras normas específicas (VEISSID, 2008). A classificação espectral do simulador solar é determinada pelas razões entre os valores da coerência espectral medida pela padrão de referência (tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Porcentagem da radiação em diferentes intervalos de comprimento de onda sobre a radiação total do espectro de referência.

Intervalo de comprimento de onda (nm)	Porcentagem da radiação total no AM1.5G (%)	Porcentagem da radiação total no AM0 (%)
400 a 500	18,4	20,5
500 a 600	19,9	20,5
600 a 700	18,4	17,5
700 a 800	14,9	14
800 a 900	12,5	11,2
900 a 1100	15,9	16,3

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

A não-uniformidade, em porcentagem, determina a variabilidade da irradiância na área de trabalho e depende da ótica do simulador. Já a estabilidade temporal é a variabilidade da intensidade da radiação por um determinado período e está diretamente ligada às flutuações da corrente de alimentação da lâmpada. Para cálculo da não-uniformidade do feixe e da instabilidade temporal, utiliza-se a equação (2.21) (IEC, 2007).

$$\text{Não conformidade (\%)} = \pm \frac{\text{Irradiância}_{\text{Max}} - \text{Irradiância}_{\text{Min}}}{\text{Irradiância}_{\text{Max}} + \text{Irradiância}_{\text{Min}}} \times 100\% \quad (2.21)$$

Onde a irradiância máxima e mínima são medidas na área de trabalho do simulador.

2.6.2. Sistema de medida de resposta espectral

A caracterização espectral de elementos sensores é fundamental para determinar, além da responsividade 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 de medida de resposta espectral baseia-se na incidência de um feixe de luz monocromática sobre o elemento sensor para obter a resposta do detector em relação à banda incidida. Varrendo o detector, com bandas estreitas de comprimentos de onda numa ampla faixa espectral, é possível determinar a resposta espectral do elemento sensor. A varredura espectral, geralmente utiliza filtros de interferência com bandas estreitas, de até 10nm, com o objetivo de diminuir erros relacionados ao espectro da fonte de luz (FIELD, 1997). Outra opção é o uso de um monocromador com resolução espectral relativamente alta para obter uma maior amostragem de medidas e conseqüentemente uma melhor definição da resposta espectral.

Basicamente, um sistema espectral é composto por uma fonte de luz, de preferência uma lâmpada de filamento, pois possui um espectro comportado, um sistema ótico de lentes e/ou espelhos, um monocromador ou filtros de interferência e um sistema de aquisição de dados, que pode ser um amplificador *Lock-in* com um *chopper* ou multímetros de precisão. Um diagrama típico está ilustrado na figura 2.26.

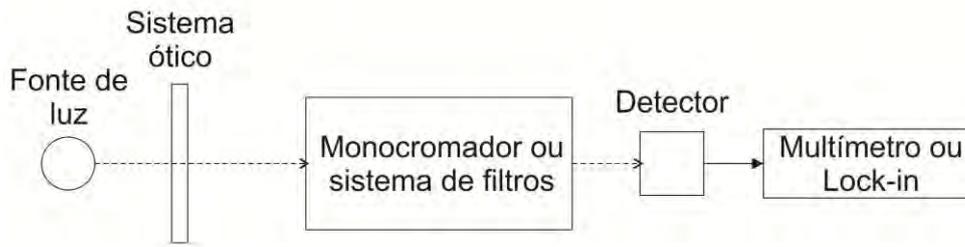


Figura 2.26 - Diagrama típico do sistema de medida de resposta espectral.

Alguns sistemas de resposta espectral utilizam luz de *bias* sobre o dispositivo para garantir a medida nas condições típicas de funcionamento, ou seja, uma irradiância incidente equivalente a $1000\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, enquanto que a luz monocromática é modulada pelo *chopper* antes de incidir na amostra. Para medidas de resposta espectral em elementos sensores de silício monocristalino, a luz de *bias* não influencia no resultado final, seja com sistema de filtros de interferência ou monocromador (BOIVIN, 1986).

Um amplificador *Lock-in* acoplado a um *chopper* para o registro dos dados pode ser usado quando o sinal de saída do detector for muito baixo e/ou para evitar a influência da luz difusa no decorrer da medida. O *chopper* pode ser considerado como um filtro de frequências para detectores óticos, pois é um disco preto com aberturas que gira em uma frequência pré-determinada e montado de forma que a luz passe através do disco antes de chegar ao monocromador, gerando um sinal de onda quadrada. A informação da frequência de referência do *chopper* ao *Lock-in*, permite registrar apenas o sinal com a frequência ajustada, eliminando grande parte da luz espúria do ambiente e/ou luz de *bias*. O princípio de funcionamento do *Lock-in* é de aplicar a transformada de Fourier no sinal recebido, obtendo uma série de senos. A equação da transformada de Fourier é dada pela expressão (2.22),

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n \cdot \omega_0 \cdot t) + b_n \cdot \text{sen}(n \cdot \omega_0 \cdot t)] \quad (2.22)$$

onde a_0 , a_n e b_n são coeficientes de Fourier e $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ é a frequência do sinal, onde T é o período. Se a série tender ao infinito, o sinal se aproxima de uma onda quadrada, semelhante ao sinal do *chopper*, como mostra a figura 2.27.

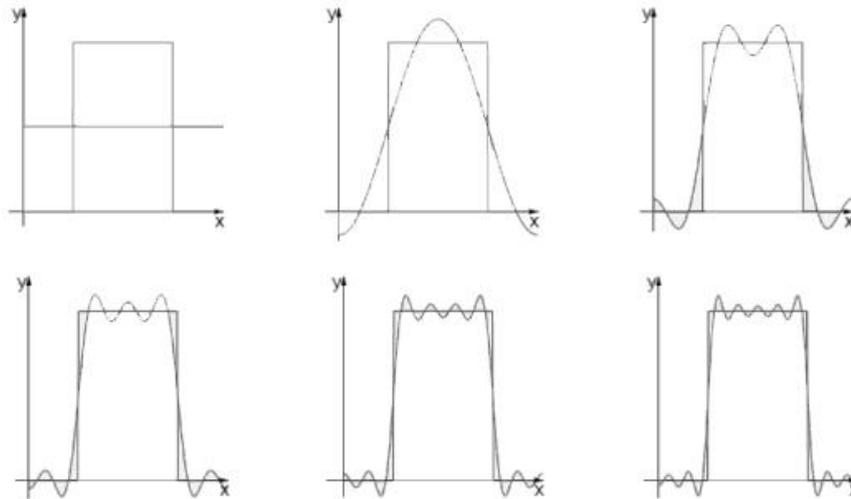


Figura 2.27 - Transformada de Fourier sobre uma onda quadrada tendendo ao infinito.

O amplificador *Lock-in* fornece o valor da amplitude da primeira harmônica da série de Fourier, ou seja, o primeiro coeficiente da série e não o valor do sinal em RMS como é medido em multímetros. Para obter o valor real, é necessário utilizar a expressão (2.23), sendo que a amplitude da n -ésima harmônica é dada pela equação (2.24) (SRS, 2009).

$$V_{RMS} = \frac{A_1}{\sqrt{2}} \quad (2.23)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.24)$$

Nesse trabalho, abordaremos o sistema com monocromador ao invés de filtros de interferência devido ao tamanho menor das larguras de bandas da radiação monocromática, possibilitando uma maior quantidade de pontos medidos nos resultados, e também uma alternativa que permite a automatização do sistema. O monocromador é um dispositivo ótico que transmite faixas estreitas de

comprimentos de onda mecanicamente selecionadas de uma fonte de luz incidente. Para a difração da luz, podem ser usados tanto prismas quanto grades de difração. Para haver difração, a colimação do feixe incidente na grade de difração é de extrema importância. Quando uma luz monocromática incide na superfície da grade, é difratada em direções discretas como mostra a figura 2.28.

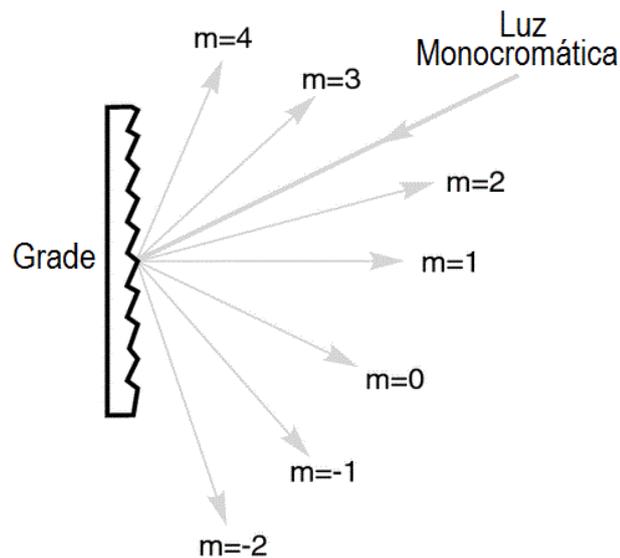


Figura 2.28 - Luz monocromática incidente na grade de difração é difratada em direções discretas, onde m é ordem de difração.

A difração ocorre quando a radiação refletida pela grade de difração, composta por n ranhuras na sua superfície refletora e espaçadas por uma determinada distância entre elas, interfere construtivamente formando um conjunto de frentes de onda em direções discretas com ângulos específicos.

O princípio da interferência construtiva se define quando a diferença de caminho óptico da radiação refletida é igual ao seu comprimento de onda ou igual a um múltiplo inteiro do mesmo. Qualquer outra luz proveniente de outras direções irá interferir destrutivamente. A figura 2.29 mostra a diferença de caminho óptico definido pelas ranhuras da superfície da grade de dois raios, A e B, incidentes sobre a grade, a uma distância d entre si, em fase na frente de onda. Após a difração, o princípio de interferência construtiva implica que estes

raios difratados estarão em fase na frente de onda se a diferença de seus caminhos óticos, $d\text{sen}\alpha + d\text{sen}\beta$, for um número inteiro de λ , o que por sua vez leva à equação de grade (2.25) (PALMER, 2005):

$$m\lambda = d (\text{sen}\alpha + \text{sen}\beta) \quad (2.25)$$

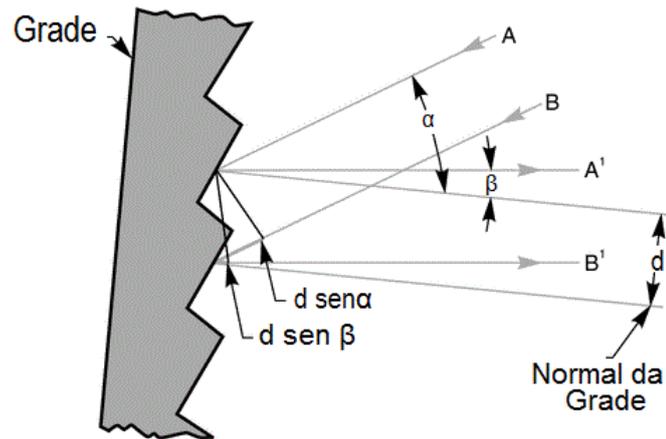


Figura 2.29 - Geometria da difração de luz monocromática sobre grade de difração. Fonte: Palmer (2005).

A dispersão do feixe de saída do monocromador é definida pela largura da banda espectral $\Delta\lambda$ por unidade de largura da fenda de saída a . Para a grade de difração, esse fator é constante e define sua resolução como mostra a equação (2.26).

$$R_{\text{grade}} = \frac{\Delta\lambda}{a} \quad (2.26)$$

A largura de banda espectral é definida como a largura a meia altura da faixa espectral.

2.6.3. Sistema de medida de resposta angular

Medidas de radiação ao longo do dia com aparelhos meteorológicos são afetados por diversos tipos de erros, como exemplos, ruídos elétricos, degradação da ótica, resposta não linear do sensor e desvio da resposta

angular em relação à lei dos cossenos da ótica de entrada (BERNI, 2010). Para medidas da radiação global, o erro relacionado à resposta angular não é muito significativo, já que a maior contribuição de toda a radiação diária é quando o sol está próximo ao zênite. Porém, para medidas da radiação difusa, esses erros podem interferir nos valores reais, pois a resposta piora com o aumento do ângulo de incidência. Essa dificuldade aparece para ângulos superiores a 60°. Para melhorar a resposta angular dos sensores, óticas de entrada são desenvolvidas utilizando diferentes materiais e formas de difusores.

O sistema de caracterização da lei dos cossenos 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 dos cossenos (MICHALSKY, 1995).

A lei dos cossenos de Lambert, expressa na equação 2.27, diz que a irradiância observada a partir de uma superfície é diretamente proporcional ao cosseno do ângulo θ entre a linha de visão do observador e a normal da superfície. Em ótica, define-se como superfície lambertiana, qualquer superfície, real ou imaginária, cuja radiância refletida, transmitida ou emitida independe do ângulo de observação, ou seja, para qualquer ângulo visto, o brilho aparentemente é o mesmo, pois obedece a lei dos cossenos de Lambert.

$$E_{\theta} = E_0 \cdot \cos \theta \quad (2.27)$$

O gráfico da figura 2.30 mostra a resposta angular ideal de uma superfície com área uniformemente iluminada e que decresce com o ângulo de incidência.

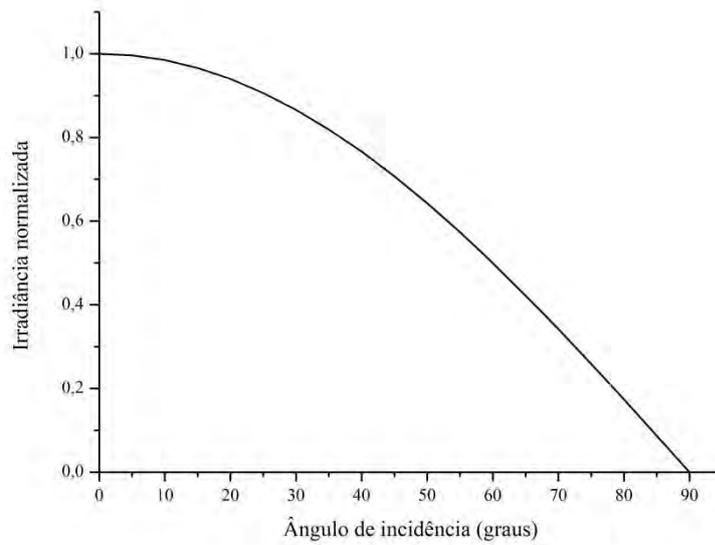


Figura 2.30 - Curva de resposta angular ideal de uma superfície que obedece a lei dos cossenos.

O sistema de medida de resposta angular é composto por uma fonte de radiação estabilizada, um sistema ótico, para manter o feixe de luz colimado e uniforme sobre o detector, um suporte para elemento sensor, que permita variar gradualmente o ângulo de incidência da luz de 0° a 180° e um sistema de aquisição de dados. A figura 2.31 ilustra um esquema simples de um sistema de medida de resposta angular por luz incidente.

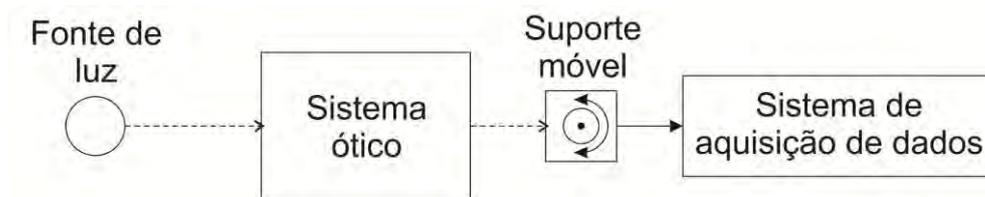


Figura 2.31 - Diagrama típico do sistema de medida de resposta angular.

3 METODOLOGIA

Com o objetivo de caracterizar com maior precisão os elementos sensores dos radiômetros fotovoltaicos desenvolvidos no laboratório, foi aprimorado o sistema de medida de corrente por tensão e projetado e montado os sistemas de medida da resposta espectral e da resposta angular. Esses sistemas foram utilizados no estudo e caracterização dos seguintes sensores: células solares de silício monocristalino nacionais e importadas, fotodiodos de silício (Si), que respondem desde UV até infravermelho próximo, fotodiodos de dióxido de titânio (TiO₂), que respondem para UVA, UVB e UVC e célula solar de tripla-junção de uso espacial.

3.1. Instrumentos de medição e aquisição de dados

A confiabilidade dos dados medidos é de extrema importância para validar os resultados obtidos de um experimento. Por isso, a instrumentação de medição deve ser calibrada com certificação e rastreabilidade. Outro quesito importante é a resolução do equipamento, pois dependendo do sinal medido, é necessário um instrumento de precisão. Atualmente, o laboratório do CELSOL possui instrumentos de aquisição e de medida de precisão tais como, espectrômetros, multímetros, *data-loggers* e amplificadores *Lock-in*.

Neste trabalho, foram utilizados os seguintes instrumentos de medição e de aquisição de dados disponíveis no laboratório para medidas da radiação espectral, corrente e voltagem.

- Espectrômetro modelo *GetSpec* USB-2048 que responde numa faixa espectral de 200 a 1100nm, possui resolução de 0,04 a 20nm e sensibilidade de 5000counts/ μ W por tempo de integração [ms];
- Espectrômetro modelo *GetSpec* NIR128L-1.7TE, que responde numa faixa espectral de 900 a 1700nm e possui resolução nominal de 12,5nm;

- Multímetro da *Agilent*, modelo 34401A com resolução de 6½ dígitos e uma precisão de $\pm 0,0035\%$ DC e $\pm 0,06\%$ AC;
- Multímetros da *Fluke*, modelo 189 com resolução de $1\mu\text{V}$ e precisão de $\pm 0,025\%$ voltagem DC e com resolução de $0,01\mu\text{A}$ e precisão de $\pm 0,15\%$ corrente DC, além da interface USB para conexão com computadores;
- *Data-logger DaqPRO* de 16-bits e 8 canais, que tem a função de medir e de registrar no mesmo instante.
- Amplificador *Lock-in*, modelo SR850-DSP, possui sensibilidade de 2nV a 1V, impedância de entrada de $10\text{M}\Omega + 25\text{pF}$, precisão típica de $\pm 0,2\%$ e resolução de fase de $0,001^\circ$.

Unindo os dados dos dois espectrômetros citados, é possível obter um espectro compreendido entre 200 e 1700nm. Ambos os espectrômetros foram calibrados a partir de uma lâmpada halógena de tungstênio calibrada da *Optronic Laboratories* de 1000W modelo S-709.

3.2. Suportes dos elementos sensores

Primeiramente 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 figura 3.1 mostra a foto dos suportes desenvolvidos. Percebe-se que a única diferença entre os suportes dos fotodiodos é o tamanho do furo superior de encaixe dos dispositivos.

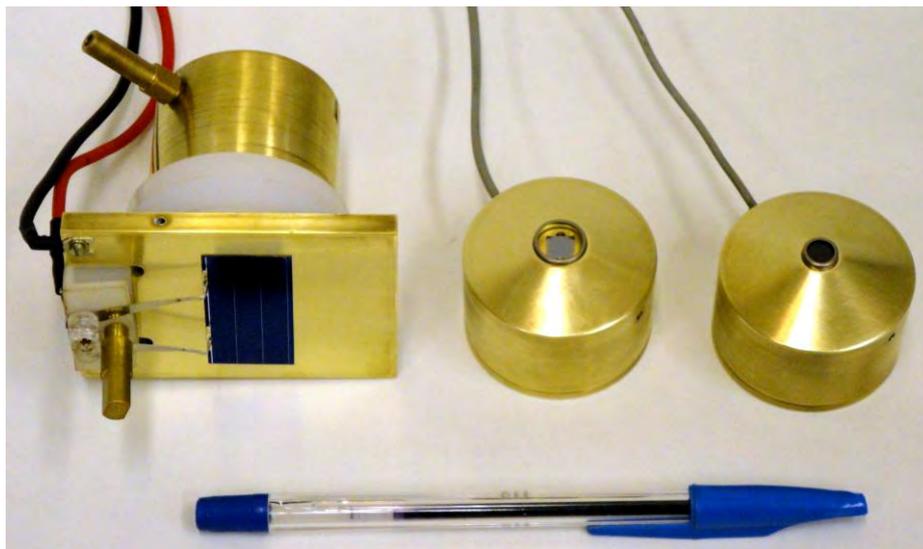


Figura 3.1 - Foto dos suportes desenvolvidos. Da esquerda para a direita, suporte das células solares, fotodiodo de silício e fotodiodo de UV.

3.3. Elementos sensores utilizados no trabalho

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 de 3J e dez células solares fabricadas pelo LME/USP, semelhante às células utilizadas no Projeto Radiômetro da figura 2.12. A tabela 3.1 mostra as características gerais de cada célula solar.

Tabela 3.1 - Características gerais das células solares medidas.

Células solares	Nacionalidade	Material	Área [cm ²]	Faixa espectral [nm]	Tipo de uso
Spectrolab	Americana	Si - mono	8	400-1100	Espacial
CAST	Chinesa	Si - mono	8	400-1100	Espacial
LME/USP	Brasileira	Si - mono	2,4025	400-1100	Terrestre
Tripla junção – 3J	Chinesa	GaInP ₂ /InGaAs/Ge	12	300-1700	Espacial

Além das células, foram medidos cinco fotodiodos modelo S1336-8BK e quatro fotodiodos modelo TW30DY2. As características gerais dos fotodiodos estão na tabela 3.2. A figura 3.2 mostra a foto dos elementos sensores utilizados neste trabalho.

Tabela 3.2 - Características gerais dos fotodiodos medidos.

Fotodiodos	Fabricante	Material	Área [cm ²]	Faixa espectral [nm]	Tipo
S1336-8BK	<i>Hamamatsu</i>	Si - mono	0,33cm ²	320-1100	PN
TW30DY2	<i>Scitec Instruments</i>	TiO ₂	0,1566cm ²	260-360	<i>Schottky</i>

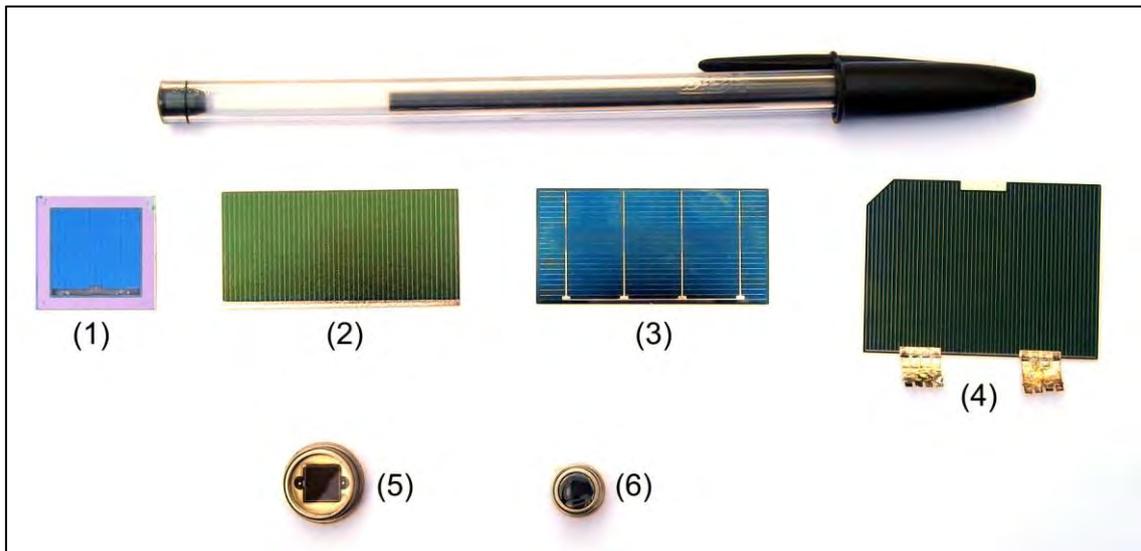


Figura 3.2 - Elementos sensores medidos neste trabalho: Células solares: 1 – LME/USP; 2– *Spectrolab*; 3– *CAST*; 4 – 3J; Fotodiodos: 5– S1336-8BK; 6 – TW30DY2.

3.4. Sistema de medida de corrente por tensão do CELSOL

Para especificar e classificar um simulador solar existem normas e procedimentos a serem seguidos conforme as organizações de padronização. Essas normas estão ligadas diretamente às condições de iluminação do simulador, que basicamente referem-se à coerência do espectro, à irradiância espacial ou uniformidade espacial e à estabilidade temporal do feixe (Tabela

2.1). Essas condições devem ser próximas às condições naturais, como por exemplo, a uniformidade da radiação proveniente do Sol, melhor que 99%, assim como a estabilidade temporal, que também é melhor que 99% devido à distância Terra-Sol ser muito maior em relação à área iluminada na Terra.

O Grupo de Célula Solar (CELSOL) do LAS/INPE 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. Esse simulador é alimentado por uma fonte estabilizada e opera com uma lâmpada de descarga em gás de alta pressão de Xenônio de 1000W. A área iluminada é de 152x152mm² e reproduz o espectro solar AM0 ou AM1.5G. É composto por um refletor elipsoidal, dois espelhos à 45°, um integrador ótico, um obturador (*shutter*), suporte para filtros e uma lente colimadora conforme a figura 3.3.

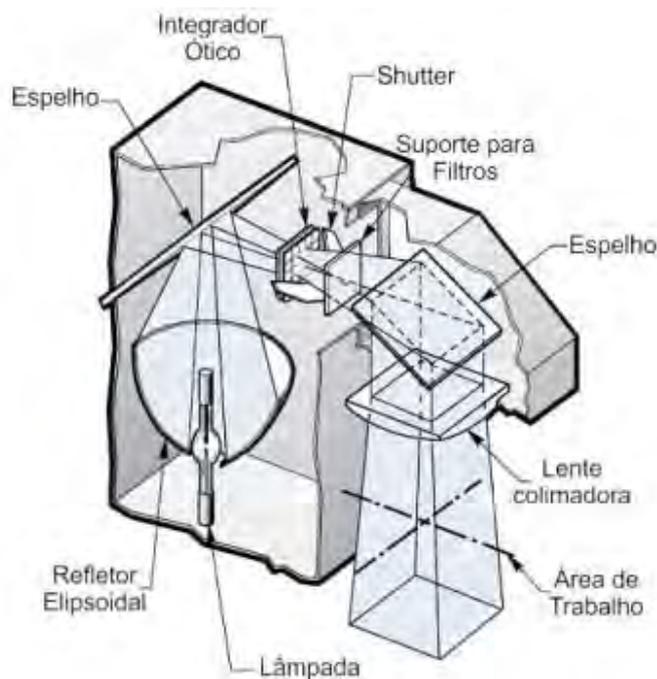


Figura 3.3 -Esquema do Simulador solar Oriel 81193 do CELSOL.
Fonte: Newport (2011).

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. O diagrama da figura 3.4 mostra por completo o sistema de medida de curva IxV do CELSOL.

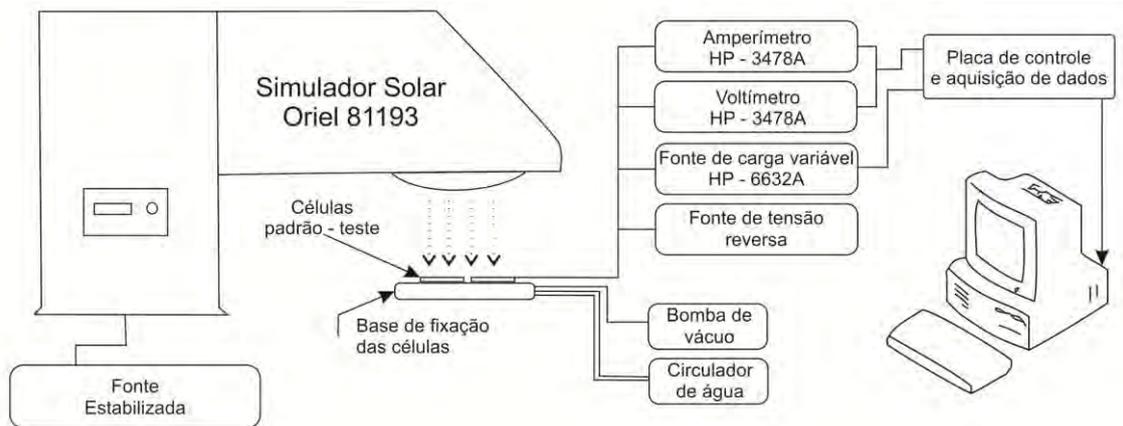


Figura 3.4 - Diagrama do sistema de caracterização de curva IxV de células solares de silício do CELSOL.

Para manter a estabilidade da lâmpada, um fotodiodo localizado sob a lente colimadora ajusta o brilho variando a corrente de alimentação da fonte. A fonte de luz utilizada é uma lâmpada de descarga em arco de Xenônio 1000 Watts *Ozone-Free* da *Newport* modelo 6271. O espectro da lâmpada do simulador com filtros AM0 e AM1.5G, ilustrados na figura 3.5, foram obtidos com os dois espectrômetros do laboratório.

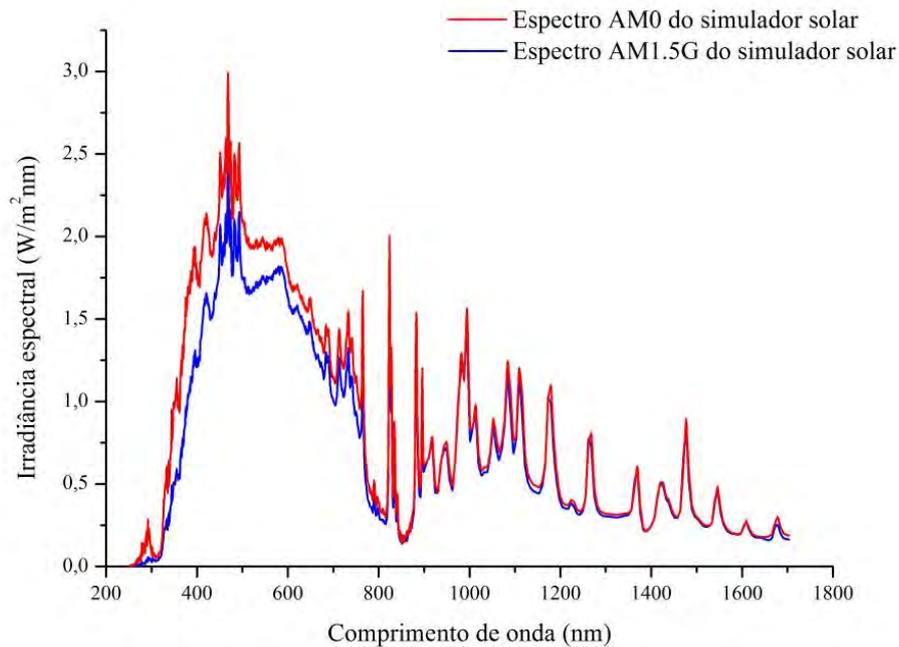


Figura 3.5 -Espectros do simulador solar do CELSOL com filtros AM0 e AM1.5G.

Os critérios estabelecidos pela norma IEC 60904-9 Ed.2 de 2006, foram obedecidos para a montagem do sistema de medidas. O mapeamento da uniformidade foi feito para uma área de trabalho determinada pelo manual do fabricante, que para o modelo do Simulador Solar *Oriel* 81193 é de $152 \times 152 \text{mm}^2$. Também foram feitas medidas considerando uma área menor que a sugerida, com $76 \times 76 \text{mm}^2$, visando uma região mais uniforme. O método para essa medida, ilustrado na figura 3.6, foi de medir a irradiância em pontos específicos do plano de trabalho usando um radiômetro calibrado da *Li-Cor* modelo *Pyranometer*, serial nº Py52184, que possui uma janela ótica de $47,8 \text{mm}^2$.

O esquema ilustrado na figura 3.6 permitiu mapear a uniformidade do feixe, calcular a não-uniformidade pela equação (2.21) e classificar o simulador solar de acordo com a norma seguida.

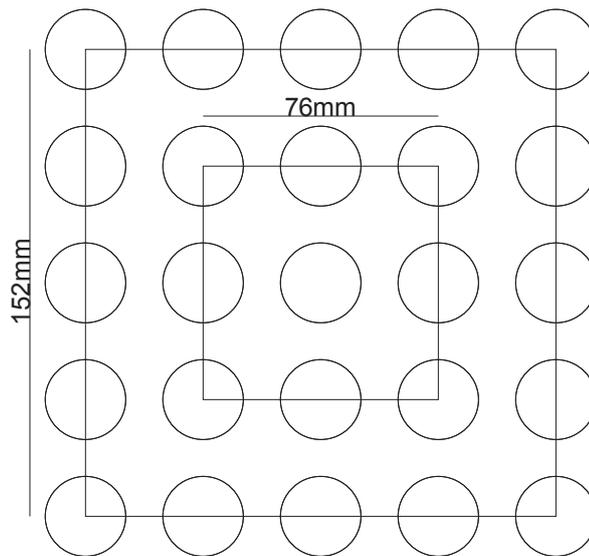


Figura 3.6 -Esquema de medidas para uniformidade do feixe do simulador.

A medida da resposta temporal tem como objetivo determinar variações significativas de irradiância incidente. O tempo de medida para calcular a instabilidade temporal do simulador foi de duas horas. Foi utilizado um radiômetro desenvolvido pelo CELSOL posicionado no ponto central da área de trabalho do simulador. Este radiômetro possui uma célula solar de silício monocristalino como elemento sensor e apresenta tempo de resposta da ordem de [ms].

Uma característica importante de um simulador solar é ter seu espectro semelhante ao espectro do sol, seja ele AM0, AM1 ou AM1.5G. Para comparar o espectro solar ao espectro do simulador é necessário que a irradiância esteja de acordo com as normas. Para isso, o simulador foi calibrado com uma irradiância de $1353\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, utilizando uma célula solar espacial de referência (CHINA-923), de silício monocristalino, por ter sua rastreabilidade e seus parâmetros bem definidos, possibilitando a comparação do espectro solar padrão AM0 da ASTM com espectro simulador solar usando filtro AM0, ilustrado na figura 3.7.

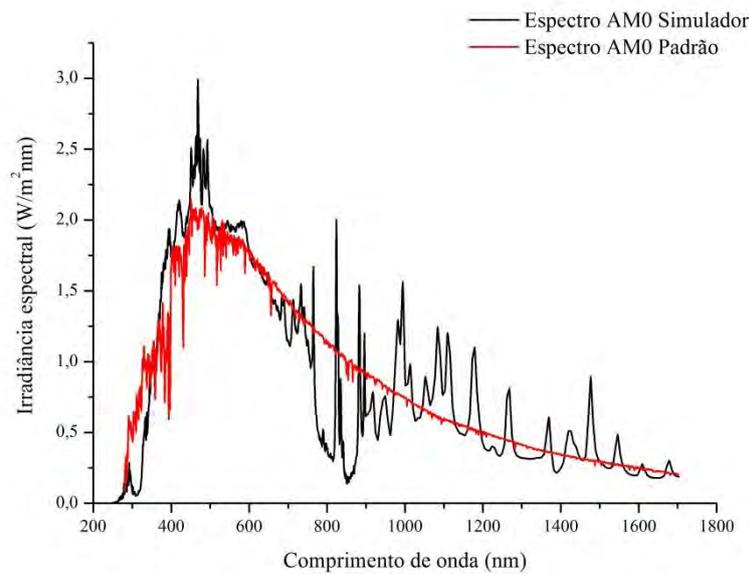


Figura 3.7 - Espectro solar AM0 padrão da ASTM comparado com o espectro do simulador solar com filtro AM0.

Para obter a irradiância terrestre de $1000\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ foi inserido um filtro calibrado AM1.5G do mesmo fornecedor do simulador. A figura 3.8 compara o espectro com filtro AM1.5G do simulador solar e o espectro padrão AM1.5G da ASTM.

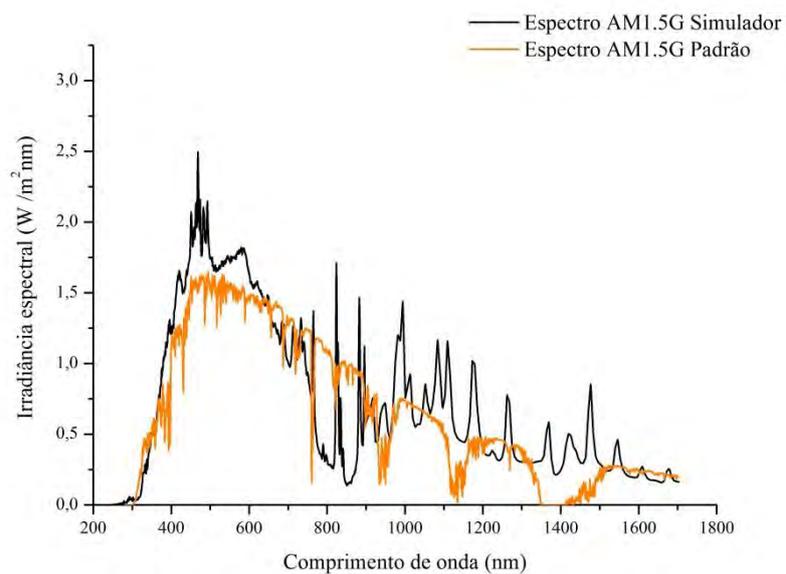


Figura 3.8 - Espectro solar AM1.5G padrão da ASTM comparado com o espectro do simulador solar com filtro AM1.5G.

Para medida da curva IxV de dispositivos fotovoltaicos, existem normas que estabelecem as condições necessárias para realizá-las. As normas IEC60904-1 e IEC60904-2 estabelecem critérios de medida da característica IxV, assim como requisitos para dispositivos solares de referência. De acordo com as normas, as condições para realizar as medidas da curva IxV de dispositivos fotovoltaicos de uso terrestre se referem basicamente ao simulador solar utilizado, obedecendo à norma IEC 60904-9. A instrumentação de medição utilizada (Voltímetro e Amperímetro) deve ser calibrada com certificação e rastreabilidade e a irradiância simulada deve ter a distribuição espectral similar ao padrão AM1.5G e irradiância de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, conforme as normas IEC 60904-3 e IEC 60904-7. Os dispositivos, padrão e de teste devem estar em $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, sendo que o padrão de referência deve ser um dispositivo calibrado com certificação e similar ao que está sendo medido, de acordo com a norma IEC 60904-2. A tabela 3.3 mostra algumas normas e procedimentos de medidas de dispositivos fotovoltaicos que foram adotadas nas medidas realizadas nesse trabalho, levando em conta as limitações do laboratório.

Tabela 3.3 - Normas referentes às medidas de dispositivos fotovoltaicos de uso terrestre.

Normas	Título
IEC 60904-1	Medição da característica IxV.
IEC 60904-2	Requisitos para dispositivo solar de referência.
IEC 60904-3	Princípios de medição para os dispositivos fotovoltaicos terrestres com dados da irradiância espectral de referência.
IEC 60904-4	Procedimentos para o estabelecimento da rastreabilidade da calibração de dispositivos solares de referência.
IEC 60904-5	Determinação da temperatura da célula equivalente dos dispositivos fotovoltaicos pelo método de tensão de circuito aberto.
IEC 60904-7	Cálculo da correção de incompatibilidade espectral para medições de dispositivos fotovoltaicos.
IEC 60904-8	Medição da resposta espectral de um dispositivo fotovoltaico.
IEC 60904-9	Requisitos de desempenho do simulador solar.
IEC 60904-10	Métodos de medição da linearidade.

A melhoria do sistema foi alcançada principalmente devido à mudança da sua bancada. Antes, o simulador solar estava fixado numa bancada que impedia medir alguns sensores devido ao seu tamanho, pois a base de medição era fixa e mantinha seus equipamentos periféricos (fonte estabilizada, sistema de medição, bomba de vácuo, etc.) espalhados pela bancada. Atualmente, o simulador está sobre uma estrutura versátil de alumínio que possibilita um deslocamento vertical de 370mm da base de medição em relação à área de trabalho, permitindo medir sensores de tamanhos maiores, e sendo de alumínio anodizado de preto, não reflete muita luz, além de manter todos os equipamentos periféricos em um único rack. A figura 3.9 mostra o sistema atual e o anterior.



Figura 3.9 - Sistema, atual (esquerda) e antigo (direita), de medida de curva Corrente por tensão do CELSOL.

Outras mudanças realizadas no simulador solar foram as trocas da lâmpada de xenônio e do refletor elipsoidal, com o objetivo de melhorar o espectro da lâmpada e a reflexão da luz, pois o refletor anterior já se encontrava danificado.

3.4.1. Medidas de curvas IxV dos elementos sensores

A medida de curva IxV determina os parâmetros relacionados ao desempenho dos elementos sensores. Para a realização da medida é necessária a utilização de dispositivos calibrados, através de um processo que estabeleça a corrente de curto-circuito em condições pré-estabelecidas da temperatura do dispositivo, da irradiância incidente e da distribuição espectral da fonte (OSSENBRINK, 2003). Os elementos sensores em estudo foram caracterizados de acordo com as condições pré-estabelecidas.

A irradiância do simulador solar foi calibrada com espectro AM0, em aproximadamente $1353W \cdot m^{-2}$, utilizando a célula solar espacial padrão de referência. Com isso, foi possível medir as células solares de uso espacial; *Spectrolab* e CAST. Sem alterar a potência da lâmpada, que definia a irradiância de aproximadamente $1353W \cdot m^{-2}$, foi inserido um filtro no simulador para obter o espectro AM1.5G de aproximadamente $1000W \cdot m^{-2}$ a fim de medir as células solares LME, e os fotodiodos S1336-8BK. Os fotodiodos TW30DY2 foram medidos somente com o espectro AM0, devido um maior índice de UV. Já as células solares 3J foram medidas com o espectro AM0, porém houve a necessidade de 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 temperatura de todas as células solares medidas foi controlada e monitorada em aproximadamente $25^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ na base, local onde as células são fixas através de vácuo. Os fotodiodos foram medidos em seus suportes específicos e a temperatura foi monitorada também em aproximadamente $25^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$.

Para determinar os pontos da curva IxV, a fonte de carga variável, varia de forma crescente a resistência de carga e os valores de tensão e corrente medidos pelos multímetros são registrados por um computador. O registro dos pontos medidos no computador é feito pelo *software* desenvolvido pelo CELSOL e necessita de alguns parâmetros iniciais para cálculo, tais como área do elemento sensor e irradiância incidente. Outros campos de preenchimento

do programa podem ser completados para melhor informação da medida, como por exemplo, nome de referência, espectro utilizado e temperatura de medida. A figura 3.10 mostra a interface de inserção dos parâmetros do programa.

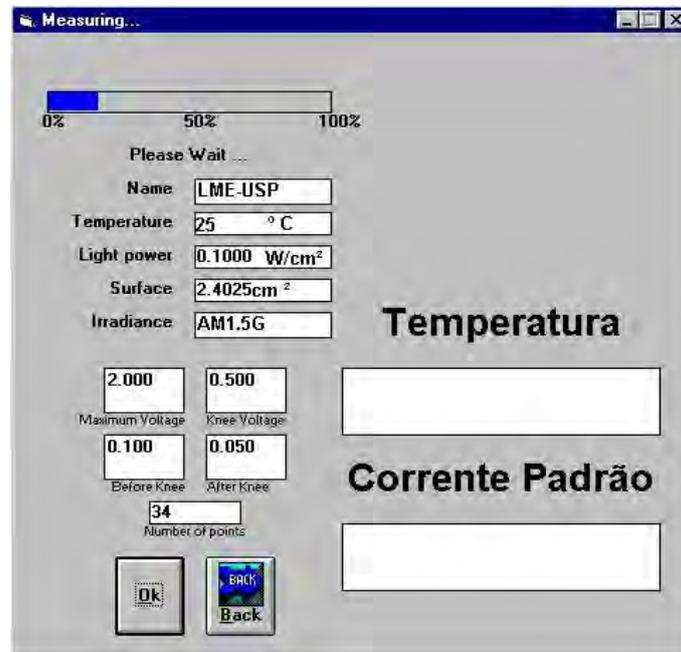


Figura 3.10 - Interface do programa de medida de curva IxV do CELSOL.

Outros campos de preenchimento vistos na figura 3.10 são de tensão máxima aplicada no elemento sensor, passos da variação da tensão antes e depois do joelho da curva. O número de pontos da curva é informado mediante aos valores de variação, pois define a resolução da curva.

No momento que se completa a aquisição da medida, o programa gera uma tabela IxV da corrente em Ampére com a respectiva tensão em Volts e plota a curva IxV do elemento sensor medido, como mostra a figura 3.11. A partir dos pontos medidos e dos parâmetros inseridos, o programa calcula a tensão de máxima potência V_{mp} , a corrente de máxima potência I_{mp} , a tensão de circuito aberto V_{ca} , a corrente de curto-circuito I_{cc} , a eficiência η e o fator de forma FF .

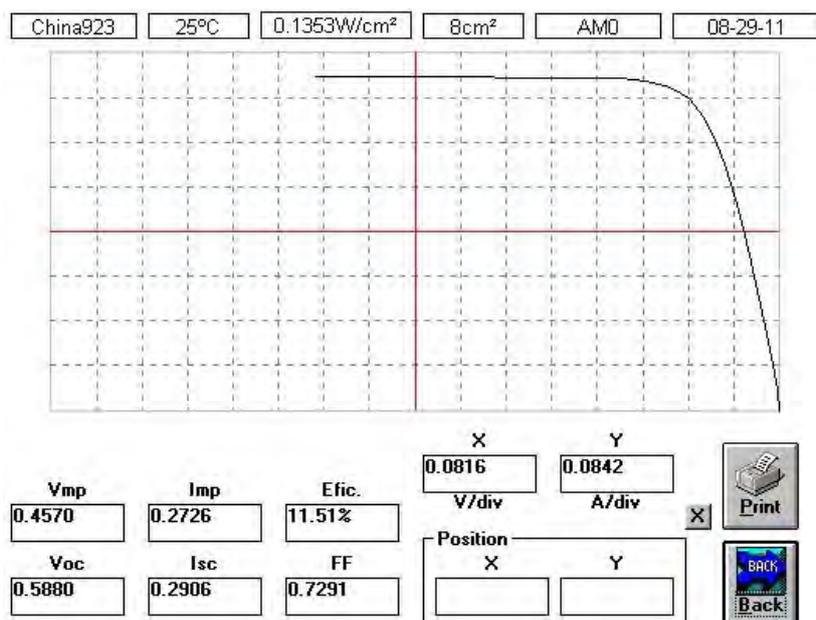


Figura 3.11 - Curva de corrente por tensão gerada pelo programa de medida de curva IxV do CELSOL.

Para obter a corrente de curto-circuito no gráfico do programa, a fonte de tensão reversa aplica uma pequena diferença de potencial invertida nos terminais do dispositivo fazendo com que o voltímetro meça valores negativos de tensão.

Esse sistema de medição foi utilizado para todos os elementos sensores em estudo. Apenas os multímetros do sistema atual de medida de curva IxV foram substituídos pelos multímetros da *Fluke* para medir e registrar os valores de tensão e de corrente dos fotodiodos TW30DY2 da ordem mV e μ A respectivamente.

3.5. Sistema de medidas de resposta espectral do CELSOL

Para obter a resposta espectral de um elemento sensor, o laboratório do CELSOL, possui um sistema de caracterização espectral montado em uma bancada ótica de 600x900mm² contendo um sistema ótico de entrada, composto por uma fonte de radiação, um espelho plano, uma lente convergente e um suporte para filtros óticos. Além da ótica de entrada, o sistema conta com um *chopper* ótico, um monocromador com grade de

difração, um amplificador *Lock-in* SR850-DSP para a aquisição de dados e suportes para os diferentes dispositivos. A figura 3.12 mostra o esquema do sistema de caracterização espectral do CELSOL.

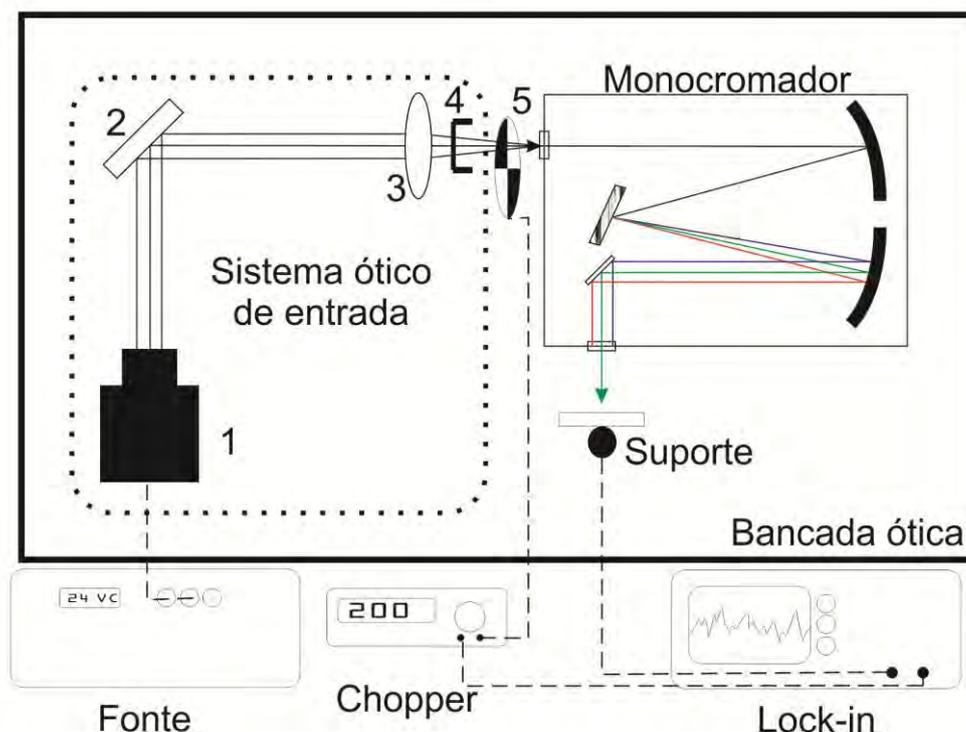


Figura 3.12 - Diagrama do sistema de medida de resposta espectral do CELSOL. 1- *Housing* da lâmpada, 2- espelho plano de primeira face, 3- lente convergente, 4- suporte para filtros óticos, 5- *chopper* ótico.

O sistema óptico de entrada é relativamente simples. A fonte de tensão para a alimentação da lâmpada é uma fonte DC estabilizada variável da *Suplitec*, modelo FA 30-20 que permite variar a tensão de 0 a 30V e variar a corrente de 0 a 20A. Para esse sistema, a fonte foi ajustada em 10A e 24V DC. A fonte de radiação é uma lâmpada halógena de tungstênio e quartzo de 250W de potência da *Newport*, modelo 6334NS. A lâmpada encontra-se instalada num *housing* da *Oriel*, modelo 6144-1, que possui um sistema próprio de ventilação para inibir superaquecimento. A estabilidade temporal da fonte foi medida com o mesmo radiômetro que mediu a estabilidade do feixe do simulador. A medição foi feita durante 15 minutos, tempo suficiente para uma lâmpada de

filamento. Essa medida de resposta temporal tem como objetivo determinar variações significativas de irradiância da fonte.

O espelho plano é de primeira face, metalizado em alumínio e possui $100 \times 100 \text{mm}^2$ de área. A lente convergente possui 75mm de diâmetro e 145mm de foco com o objetivo de focar o feixe de luz na fenda de entrada do monocromador. O suporte de filtros permite adaptar filtros óticos para impedir o aparecimento de frentes de onda de segunda ordem da grade de difração na saída do monocromador. O *chopper*, acoplado ao *Lock-in*, que se localiza antes do monocromador serve para modular o feixe incidente numa frequência pré-determinada. A figura 3.13 define com mais detalhe a montagem do *chopper* ótico.

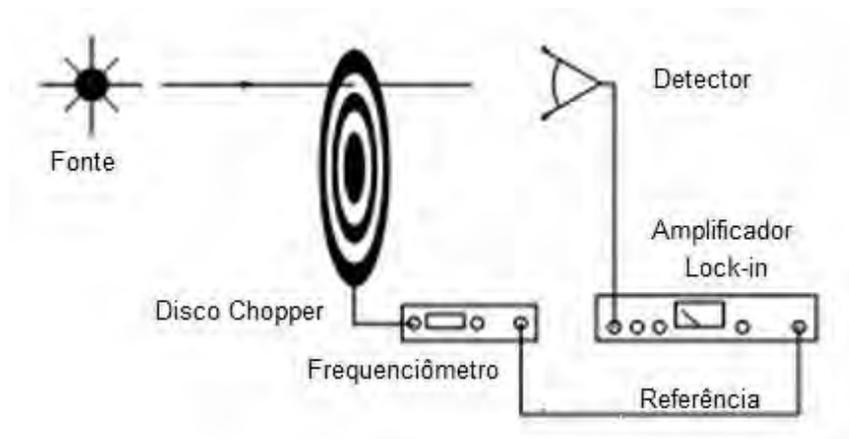


Figura 3.13 - Diagrama de montagem do chopper juntamente com o Lock-in.

O monocromador utilizado no trabalho é o modelo *Oriel 77200*. Possui uma distância focal de 250mm, uma grade de difração de 1200linhas/mm reproduzindo comprimentos de onda de 200 a 1200nm e uma resolução máxima de 0,1nm. A largura da fenda varia continuamente de 0 a 3mm.

O plano de configuração ótica do monocromador é assimétrica Czerny-Turner conforme a figura 3.14. Possui duas entradas e duas saídas com fendas frontais e laterais. As múltiplas entradas e saídas são uma característica da versatilidade de montagem do monocromador, que são selecionadas pelos

espelhos planos, M3 e M4. Além dos dois espelhos planos, o monocromador possui dois espelhos côncavos M1 e M2 (colimadores).

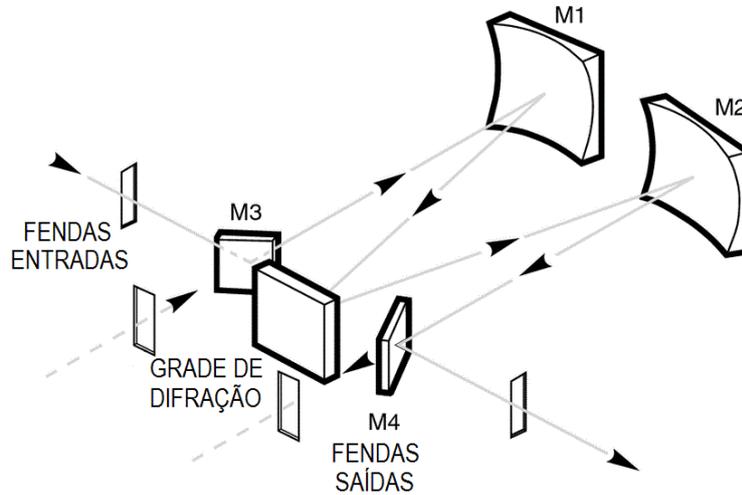


Figura 3.14 - Configuração óptica do monocromador *Oriel 77200*.
Fonte: Newport (2011).

A obtenção da radiação monocromática a partir do monocromador é definida por um caminho óptico, como mostra a figura 3.15. Parte da radiação divergente proveniente da fonte (A) é focada com a lente convergente na fenda de entrada (B) do monocromador, cujo é o foco do espelho côncavo (C). Esse feixe, após incidir no espelho côncavo, é refletido e colimado para a grade de difração móvel (D), onde novamente é refletido, porém já difratado. O feixe difratado é refletido por outro espelho côncavo (E), com foco na fenda de saída (F) do monocromador. O comprimento de onda da luz selecionado (G) é transmitido através da fenda. Esse comprimento de onda (G) depende do ângulo de rotação da grade de difração.

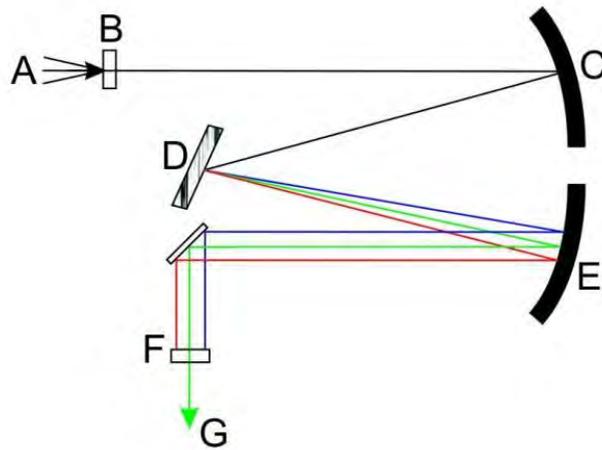


Figura 3.15 - Diagrama do caminho óptico da radiação através do monocromador.

A montagem do sistema de caracterização espectral foi arranjada de forma a aproveitar o máximo de radiação emitida pela fonte na fenda de entrada do monocromador sem superaquecer o sistema. Assim, foi possível minimizar a perda de potência da radiação monocromática na fenda de saída.

Para verificar a dispersão linear do monocromador, foi utilizado um laser de hélio-neônio com comprimento de onda de 632,8nm e 10mW de potência. Foram realizadas medidas com a potência do sinal de saída varrendo os comprimentos de onda desde o valor mínimo de potência, passando pelo valor máximo até o valor mínimo novamente para diferentes aberturas das fendas, utilizando um radiômetro espectral da *Oriel*, modelo 70286. Registradas as potências dos sinais em relação aos comprimentos de onda incidentes no sensor, foi possível ajustar uma curva na forma de uma gaussiana, permitindo o cálculo da largura a meia altura do sinal, em inglês *full width at half maximum* (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 $[nm \cdot mm^{-1}]$. Uma foto do sistema está ilustrada na figura 3.16.

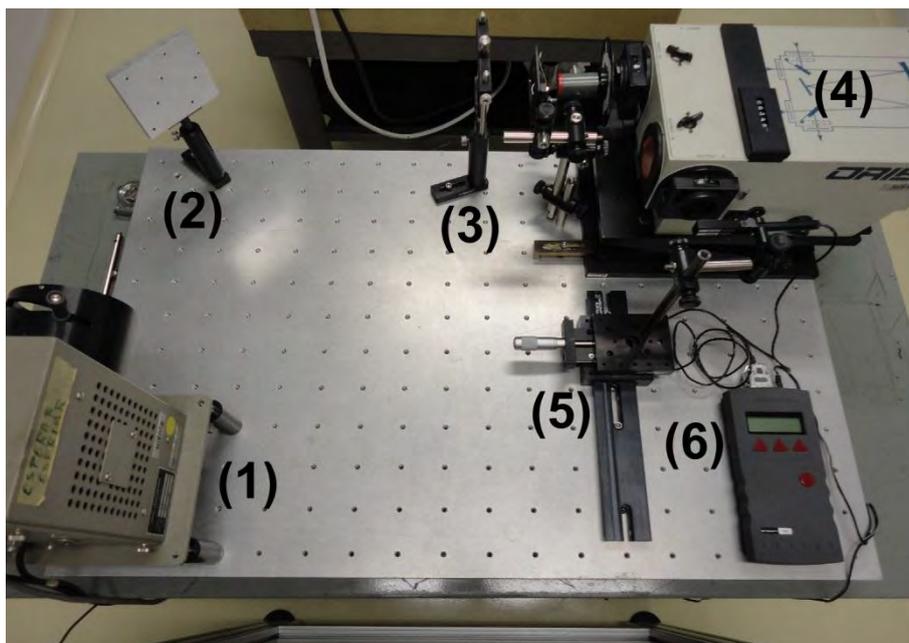


Figura 3.16 - Foto do sistema de medida de resposta espectral do CELSOL. (1) fonte de radiação; (2) espelho plano; (3) lente convergente; (4) monocromador; (5) suporte dos detectores; (6) espectrorradiômetro *Newport*.

3.5.1. Medidas de resposta espectral dos elementos sensores

As medidas de resposta espectral realizadas permitiram determinar a responsividade de cada detector. Os elementos sensores foram expostos à radiação monocromática, na saída do monocromador com abertura das fendas em 1mm, numa distância fenda-suporte de 180mm. O espectrorradiômetro calibrado, da *Newport*, foi utilizado para medir a potência da radiação, nessa posição, de cada comprimento de onda selecionado a partir do monocromador, na faixa de 350 a 400nm para o fotodiodo TW30DY2 e 380 a 1100nm para os demais detectores. A partir de 760nm, foi utilizado um filtro ótico passa-alta em cada medida para impedir que as frentes de onda de segunda ordem da grade de difração influenciassem na resposta do detector.

Para obter um valor próximo à corrente de curto-circuito, foi conectado em paralelo com os elementos sensores um resistor de precisão de $10\Omega \pm 1\%$ alto o suficiente para obter um valor estável no *Lock-in* e baixo o suficiente para obter um valor próximo à I_{cc} . O *chopper* foi ajustado em 200Hz, com o objetivo

de registrar no *Lock-in* apenas os sinais com essa frequência de referência. O *Lock-in* media a tensão nos terminais do resistor de carga e, utilizando a lei de Ohm, foi possível calcular a corrente que passava pelo resistor, ou seja, a corrente fotogerada pelo elemento sensor.

Para obter a curva da responsividade espectral dos elementos sensores, foi feita a razão entre a corrente fotogerada pela potência de cada comprimento de onda medida pelo espectrorradiômetro. As incertezas dos resultados foram calculadas a partir da estatística das medidas e dos erros instrumentais. A temperatura de todos os elementos sensores medidos foi monitorada em aproximadamente $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Não foi necessária a instalação de uma luz auxiliar (*bias*) para realizar as medidas pelo fato de que, para medidas de células solares de Si monocristalino não há variações significativas da resposta espectral (BOIVIN, 1986).

3.6. Sistema de medidas da resposta à lei dos cossenos do CELSOL

Com o objetivo de obter a resposta dos elementos sensores em relação ao ângulo de incidência da radiação e determinar o desvio referente à lei dos cossenos, o sistema de medida de resposta angular do CELSOL foi montado em uma mesa ótica de $910 \times 1830 \text{mm}^2$. O sistema possui duas fontes de radiação, um *housing* da *Newport*, com lâmpada de descarga em gás de mercúrio e xenônio de alta pressão 500W e outro *housing*, também da *Newport*, com lâmpada de filamento de tungstênio de 1000W. O caminho ótico percorrido pela luz é de 2,85m com cinco íris de 46mm de diâmetro para colimar o feixe, sendo que uma sexta íris tem diâmetro ajustável de 1 a 40mm. 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 luz de 0° a 180° , com um erro de $\pm 1^{\circ}$. A figura 3.17 mostra um diagrama da montagem do sistema de resposta angular.

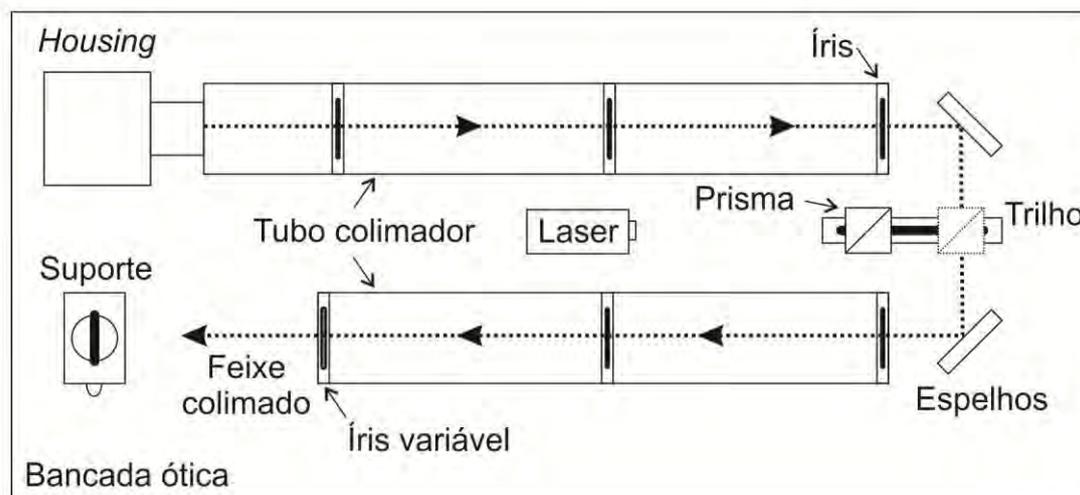


Figura 3.17 - Montagem do sistema de resposta angular do CELSOL sobre a bancada ótica.

O alinhamento ótico foi 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. Após a montagem e o alinhamento, foram realizadas medidas de uniformidade do feixe com as duas fontes de radiação, utilizando os dois espectrômetros da GetSpec e integrando todo o espectro obtido em várias regiões do spot. As divergências foram obtidas através de medidas com projeção do feixe sobre uma folha de papel milimetrado e os espectros do feixe na mesma posição dos elementos sensores, a uma distância de 140mm da íris variável. Uma foto do sistema montado no laboratório está ilustrada da figura 3.18.



Figura 3.18 - Foto do sistema de medida de resposta angular do CELSOL.

3.6.1. Medidas de resposta angular dos elementos sensores

Para fazer as medidas das curvas de resposta angular dos elementos sensores, foi utilizado o sistema de medidas da resposta à lei dos cossenos descrito no item 3.6. O diâmetro do feixe sobre os detectores foi de 48mm a uma distância suporte-íris de 140mm. Os valores foram medidos e registrados nos *data-loggers* DaqPRO para cada lâmpada utilizada (Hg(Xe) e filamento). Foram medidas as tensões entre os terminais da resistência de carga dos elementos sensores para cada ângulo de radiação incidente, entre 0° e 90°, em passos de 5° e para certificar o alinhamento angular, foram realizadas medidas de 0° a 180° também em passos de 5°. Cada elemento sensor foi medido três vezes sob radiação, além das medições realizadas no escuro.

O alinhamento ótico do suporte foi feito antes da medida de cada tipo de dispositivo colocando-se um espelho plano no lugar do elemento sensor e fazendo com que o feixe do laser de alinhamento do sistema retorne pelo mesmo caminho ótico de incidência, garantindo o alinhamento do dispositivo.

O erro em relação à resposta angular é dado pela diferença entre os valores medidos e os valores da curva ideal. As incertezas dos resultados também foram calculadas a partir da estatística das medidas e dos erros instrumentais. A temperatura de todos os elementos sensores medidos foi monitorada em aproximadamente 21°C não variando mais que $\pm 1^\circ\text{C}$.

4 RESULTADOS

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

4.1. Resultados da análise e estudo do sistema de medidas de corrente por tensão

Como principal equipamento para medidas de curvas $I \times V$, capaz de simular a radiação solar em laboratório, o simulador solar foi adequadamente analisado conforme as normas descritas anteriormente.

Foram realizadas três medidas da radiação em cada ponto ao longo da região especificada (figura 3.6). O mapeamento da uniformidade do feixe na área de trabalho, ilustrado na figura 4.1, permitiu determinar a não-uniformidade da radiação de acordo com a equação (2.21) estabelecida pela IEC 60904-9. Para a área maior ($152 \times 152 \text{ mm}^2$), a não-uniformidade do feixe é de 2,27%, classificando o simulador segundo a norma como classe B. Já para a área de $76 \times 76 \text{ mm}^2$, a não-uniformidade do feixe é de 1,70% classificando o simulador como classe A.

Na figura 4.1, a irradiância medida a partir do radiômetro calibrado está normalizada. Vemos que o gráfico compreende uma área de aproximadamente $152 \times 152 \text{ mm}^2$. A figura 4.2 mostra com mais detalhes os perfis da uniformidade X e Y em relação ao ponto central da área de trabalho onde o erro da medida é menor que 0,01.

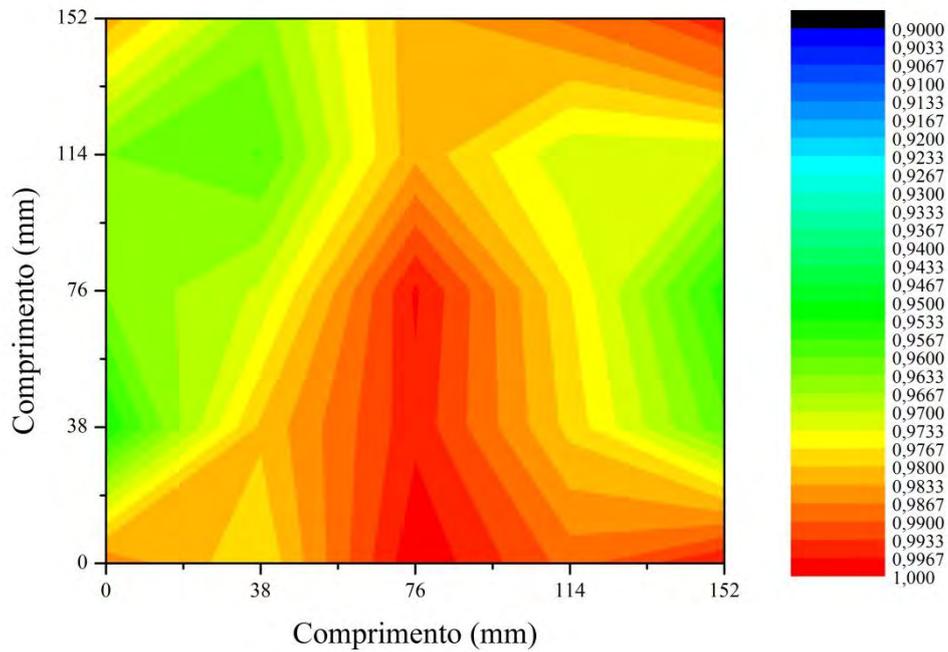


Figura 4.1 -Perfil da uniformidade do feixe do simulador solar.

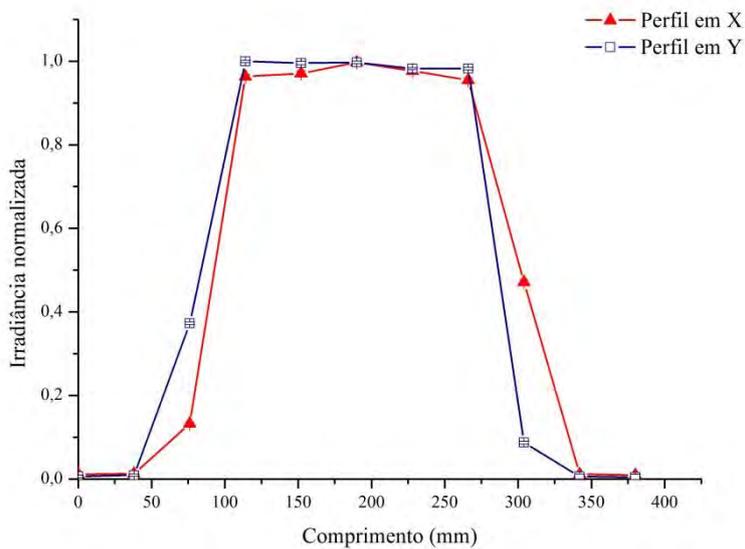


Figura 4.2 - Perfil X e Y da uniformidade do feixe do simulador solar em relação ao ponto central da área de trabalho.

A medida de resposta temporal permitiu determinar variações da irradiância incidente do simulador. O período de aquisição da medida da estabilidade

temporal foi de duas horas, contando desde a lâmpada apagada. A figura 4.3 mostra a variação da irradiância normalizada em relação ao tempo. Após a medida, vemos que há necessidade de aguardar pelo menos 30 minutos antes de realizar qualquer medida para que o simulador estabilize a radiação.

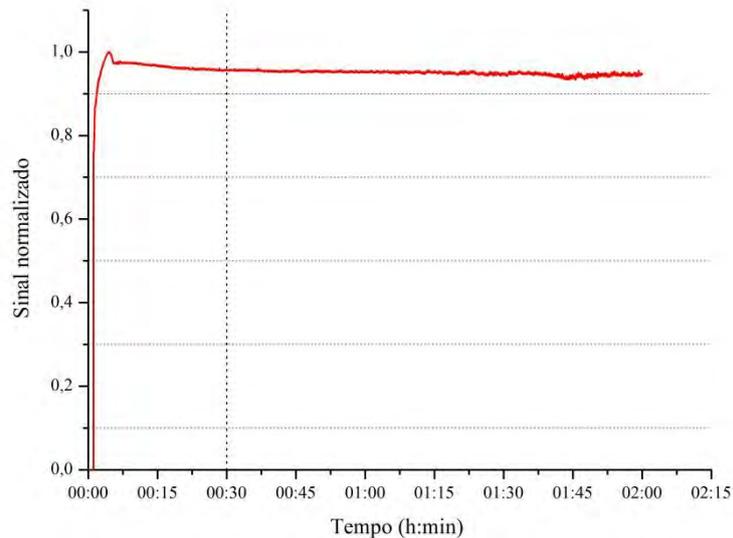


Figura 4.3 -Gráfico da estabilidade temporal do simulador solar.

A classificação do simulador referente a sua estabilidade temporal é classe A devido a sua instabilidade de 1,41% após 30 minutos, segundo a norma IEC 60904-9.

O cálculo de comparação para a classificação dos espectros AM0 (figura 3.7) e AM1.5G (figura 3.8), nos diferentes intervalos de comprimento de onda da tabela 2.2, mostra que o simulador solar do CELSOL é de classe C em relação à coerência espectral, tanto com filtro AM0 quanto AM1.5G de acordo com a tabela 2.1. A tabela 4.1 mostra a classificação de cada intervalo de comprimento de onda do espectro AM1.5G em relação aos valores das razões das porcentagens da radiação total do simulador no AM1.5G pela porcentagem da radiação total no AM1.5G padrão, já tabela 4.2 mostra a classificação dos diferentes intervalos de comprimentos de onda do espectro AM0 em relação às razões das porcentagens da radiação AM0 total do simulador pela porcentagem da radiação total no AM0 padrão.

Tabela 4.1 - Classificação dos diferentes intervalos de comprimento de onda referentes às razões das porcentagens do espectro AM1.5G medido sobre as porcentagens do espectro total de referência AM1.5G.

Intervalo de comprimento de onda [nm]	Porcentagem da radiação total no AM1.5G padrão (%)	Porcentagem da radiação total do simulador no AM1.5G (%)	Razão	Classificação
400 a 500	18,4	22,9	1,25	A
500 a 600	19,9	22,6	1,13	A
600 a 700	18,4	17,9	0,97	A
700 a 800	14,9	10,9	0,73	B
800 a 900	12,5	5,9	0,47	C
900 a 1100	15,9	19,8	1,24	A

Tabela 4.2 - Classificação dos diferentes intervalos de comprimento de onda referentes às razões das porcentagens do espectro AM0 medido sobre as porcentagens do espectro total de referência AM0.

Intervalo de comprimento de onda [nm]	Porcentagem da radiação total no AM0 (%)	Porcentagem da radiação total do simulador no AM0 (%)	Razão	Classificação
400 a 500	20,5	24,9	1,21	A
500 a 600	20,5	22,3	1,09	A
600 a 700	17,5	17,3	0,99	A
700 a 800	14,0	11,4	0,81	A
800 a 900	11,2	5,9	0,53	C
900 a 1100	16,3	18,2	1,12	A

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 152x152mm² e CAA para uma área de 76x76mm². 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.

4.2. Resultados da análise e estudo do sistema de medidas de resposta espectral

O sistema de caracterização espectral de elementos sensores permite obter com certa precisão a curva de resposta espectral dos dispositivos, mas para isso todo o sistema deve estar calibrado para realizar estas medidas.

A estabilidade temporal da fonte de radiação do sistema espectral foi medida durante 15 minutos com o radiômetro desenvolvido pelo CELSOL que possui célula solar como elemento sensor dando um tempo de resposta de sinal na ordem de [ms]. A figura 4.4 mostra a variação da irradiância normalizada da fonte de radiação em relação ao tempo. Percebe-se que após 3 minutos a fonte torna-se estável e a instabilidade a partir de 3 minutos é de 0,49%. Esse valor foi calculado pela equação (2.21) da não conformidade.

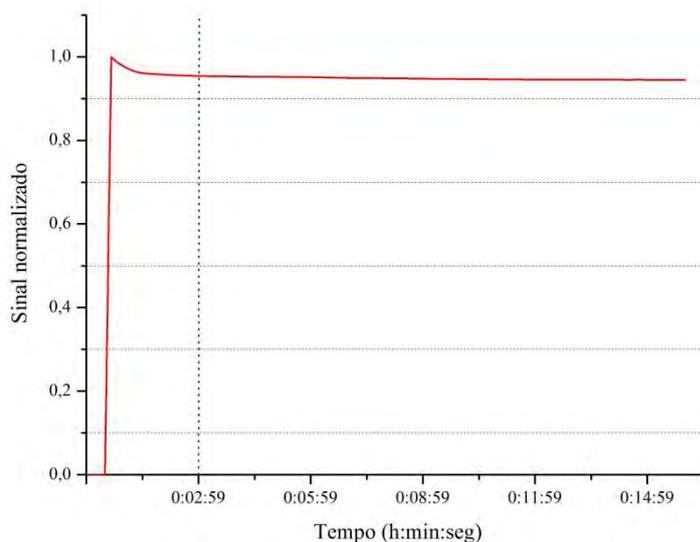


Figura 4.4 - Gráfico da estabilidade temporal da fonte de radiação do sistema de resposta espectral do CELSOL.

O espectro da fonte de radiação utilizada para obter a luz monocromática, ilustrado na figura 4.5, mostra que a lâmpada de filamento junto com o sistema ótico da bancada possui um espectro bem comportado.

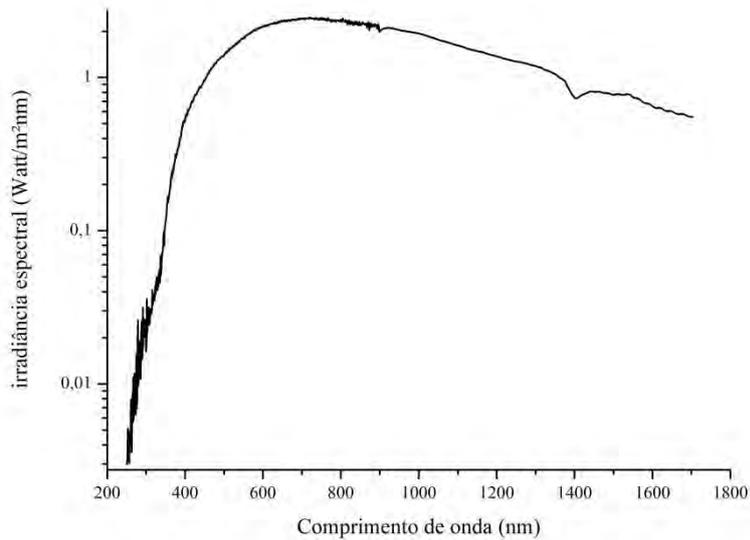


Figura 4.5 - Espectro da fonte de luz do sistema de medida de resposta espectral do CELSOL usando uma lâmpada de filamento de 250W.

O espectro da figura 4.5 foi obtido utilizando os dois espectrômetros da GetSpec, considerando o espelho plano e a lente convergente.

A curva de potência da radiação na saída do monocromador (figura 4.6) foi obtida a partir do espectroradiômetro calibrado da *Newport*, para cada comprimento de onda.

A dispersão linear do monocromador é uma das características mais importantes do sistema de medida da resposta espectral, pois determina a largura de banda da luz monocromática que sai no monocromador. A figura 4.7 mostra o ajuste de curva pelo método de Gauss sobre as medidas da potência nos diferentes comprimentos de onda em torno do comprimento de onda do laser He-Ne (632,8nm), para a abertura das fendas de 1mm do monocromador.

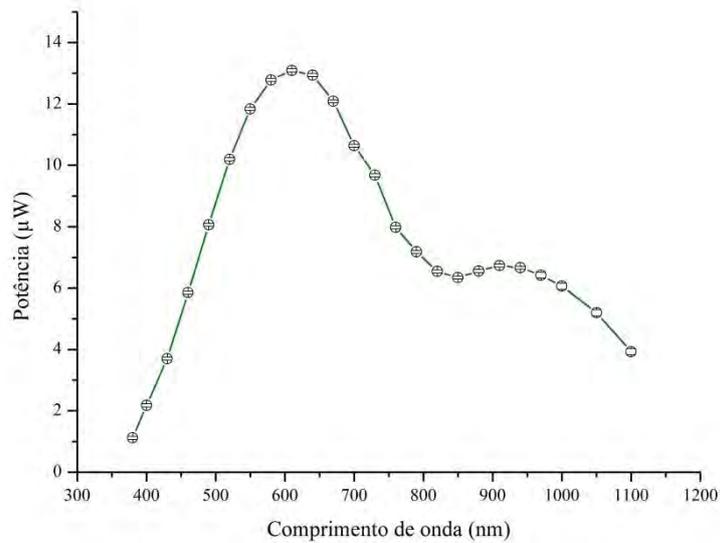


Figura 4.6 -Curva de potência da radiação na saída do monocromador.

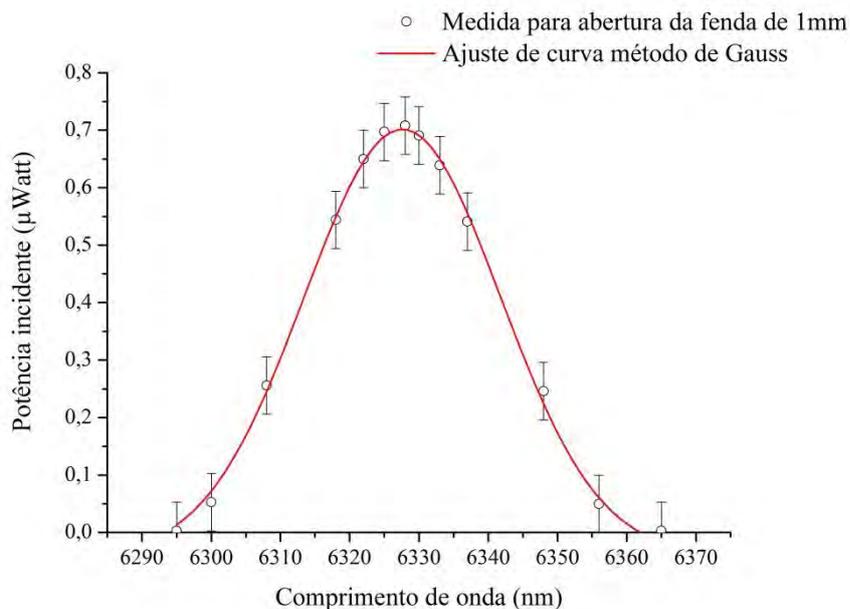


Figura 4.7 - Ajuste de curva pelo modelo de Gauss das medidas da potência de saída do sinal dos comprimentos de onda referente 1mm de abertura de fenda.

A partir do ajuste de curva, foi calculada a largura a meia altura do sinal de saída do monocromador para cada curva referente às aberturas das fendas: 0,1mm, 0,3mm, 0,5mm, 1mm, 1,5mm. A relação entre a FWHM e a abertura das fendas é linear e pode ser observada na figura 4.8, 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 $2,86 \text{ nm} \cdot \text{mm}^{-1}$.

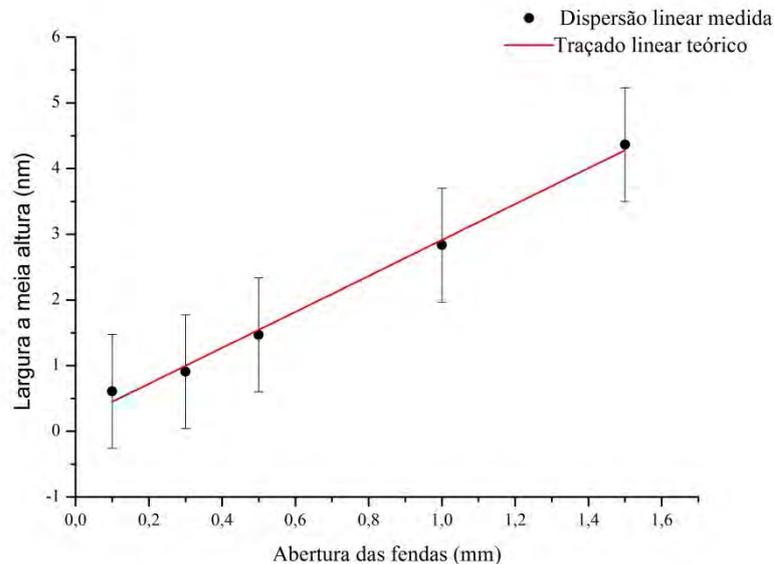


Figura 4.8 -Dispersão linear do monocromador *Oriel* do CELSOL.

Com as características do sistema de medida de resposta espectral do CELSOL podemos caracterizar células solares espaciais e terrestres, fotodiodos e radiômetros. O atual sistema não permite obter a curva de resposta espectral de uma célula solar de tripla junção devido à limitação do monocromador que compreende uma faixa espectral de 200 a 1200nm.

4.3. Resultados da análise e estudo do sistema de medidas de resposta angular

A especificação do sistema de medidas de resposta angular por luz incidente foi realizada após a montagem e alinhamento ótico com o laser. Foram medidas as uniformidades do feixe, as divergências, e os espectros para as duas fontes de radiação na posição do sensor.

Para garantir uma melhor estabilidade da fonte, 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 4mm, varrendo uma distância de 50mm na vertical e na horizontal sem sobrepor as medidas. A figura 4.9 mostra o perfil da uniformidade do feixe para a fonte de Hg(Xe) e a figura 4.10 mostra o perfil da uniformidade do feixe para a fonte de filamento. O erro das medidas foi inferior a 1%.

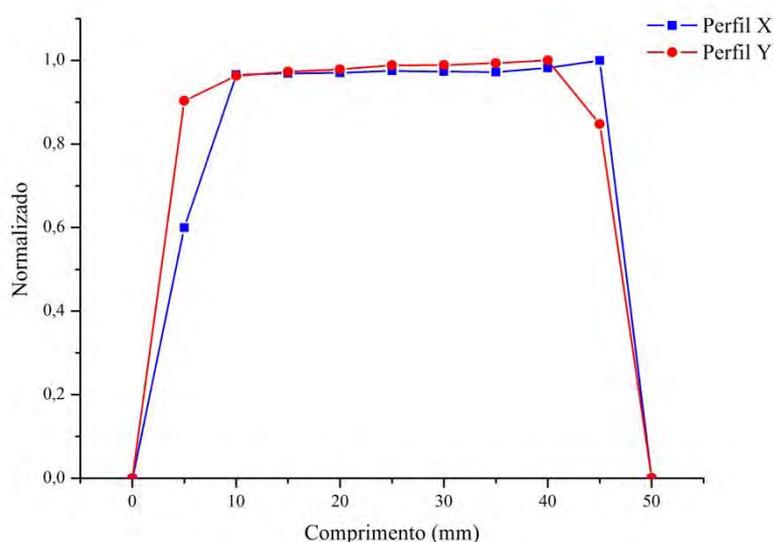


Figura 4.9 - Perfil da uniformidade do feixe na saída do tubo colimado para a fonte de luz de Hg(Xe).

Considerando uma área de $28 \times 28 \text{mm}^2$, a não-uniformidade calculada a partir da equação 2.21 para a fonte de Hg(Xe) é de 1,9% e para a fonte de filamento é de 3,6%.

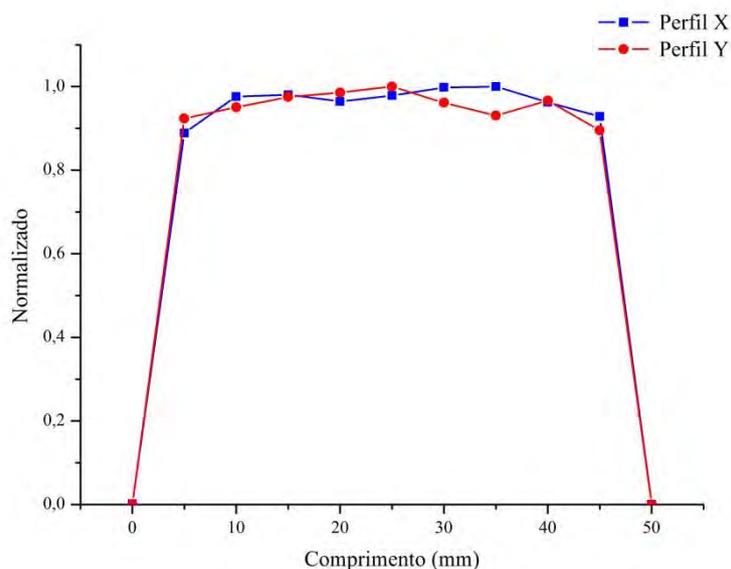


Figura 4.10 - Perfil da uniformidade do feixe na saída do tubo colimado para a fonte de luz de filamento de W.

Os espectros das fontes utilizando a lâmpada de 500W de Hg(Xe) e a lâmpada de 1000W de W estão ilustrados nas figuras 4.11 e 4.12 respectivamente, usando os dois espectrômetros da *GetSpec* a uma distância de 920mm da fonte.

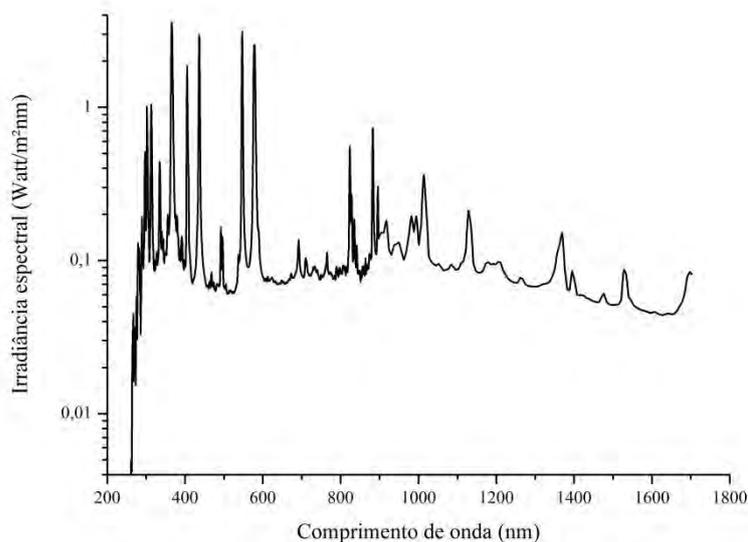


Figura 4.11 - Espectro da fonte de luz usando a lâmpada de 500W Hg(Xe).

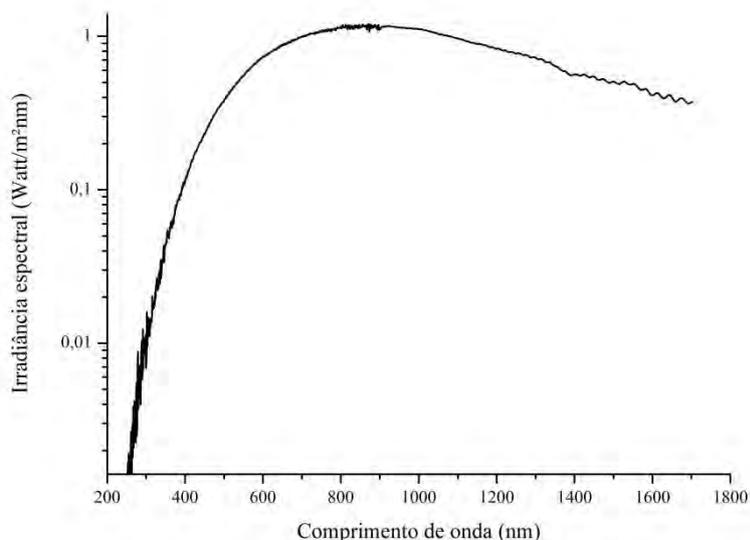


Figura 4.12 - Espectro da fonte de luz usando a lâmpada de filamento de 1000W.

Através do estudo do sistema de medida de resposta angular foi possível escolher as fontes de radiação para a caracterização dos elementos sensores, que para os fotodiodos TW30DY2 foi necessário utilizar a fonte de Hg(Xe) por ter um maior índice de radiação ultravioleta. Já para os outros elementos sensores, foi utilizada a fonte de filamento devido à resposta espectral dos dispositivos.

4.4. Resultados da caracterização dos elementos sensores

Os resultados das caracterizações dos elementos sensores foram representados pela média da medida de um único detector de cada lote de amostras e a dispersão das características de cada lote foi obtida 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.

4.4.1. Caracterização IxV dos elementos sensores

A calibração da irradiância do simulador solar com espectro AM0, em aproximadamente $1353\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, foi obtida utilizando a célula solar padrão de

referência CHINA-923, levando em consideração a I_{cc} e a temperatura na qual ela foi calibrada. A curva $I \times V$ média e as características estão apresentadas na figura 4.13 e na tabela 4.3 respectivamente.

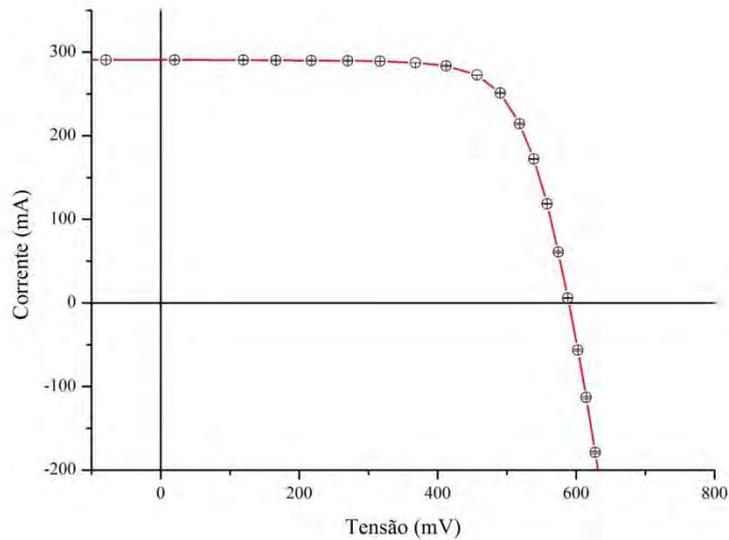


Figura 4.13 - Curva $I \times V$ média da célula solar padrão de referência CHINA-923.

Tabela 4.3 - Características elétricas da célula solar padrão de referência CHINA-923.

V_{mp} (mV)	V_{ca} (mV)	I_{mp} (mA)	I_{cc} (mA)	η %	FF	A (cm ²)
457 ±1	588,0 ±0,6	272,7 ±0,3	290,7 ±0,4	11,51 ±0,04	0,73 ±0,03	8,0

Após a calibração da irradiância do simulador solar com a célula solar padrão, foi possível medir os elementos sensores. Ainda com o espectro AM0, foram medidas as células solares espaciais de silício monocristalino. A figura 4.14 mostra a curva $I \times V$ média de uma célula solar *Spectrolab* do lote e a tabela 4.4 apresenta as médias das características das células de todo o lote e suas respectivas dispersões.

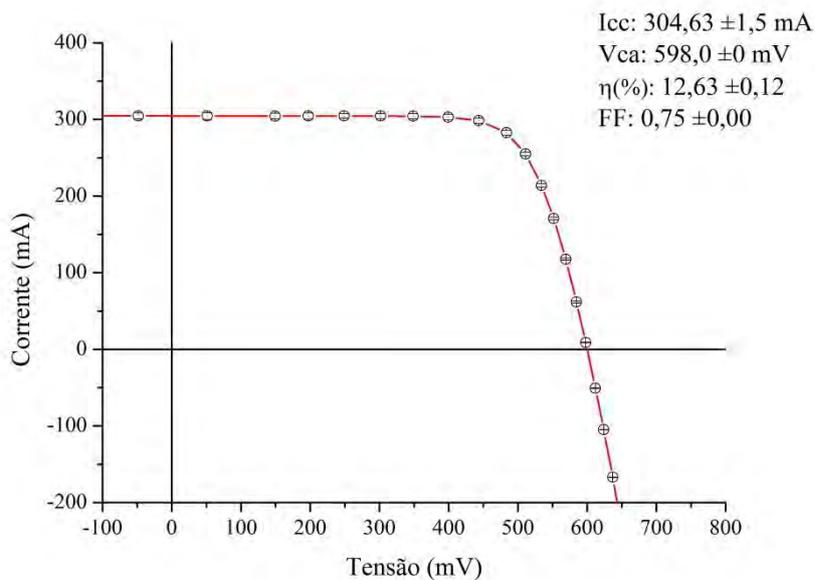


Figura 4.14 - Curva IxV média de uma célula solar espacial *Spectrolab*.

Tabela 4.4 - Características elétricas do lote de células solares *Spectrolab*.

V_{mp} (mV)	V_{ca} (mV)	I_{mp} (mA)	I_{cc} (mA)	η %	FF	A (cm ²)
452,5 ±18,0	594,9 ±1,6	287,2 ±10,0	311,4 ±5,1	12,00 ±0,40	0,70 ±0,03	8,0

Percebe-se uma semelhança entre os valores da célula de referência e das células *Spectrolab*, pois possuem semelhanças físicas e estruturais. A figura 4.15 mostra a curva IxV média de uma célula solar chinesa CAST escolhida do lote e a tabela 4.5 apresenta a média junto com a dispersão das características das células de todo o lote.

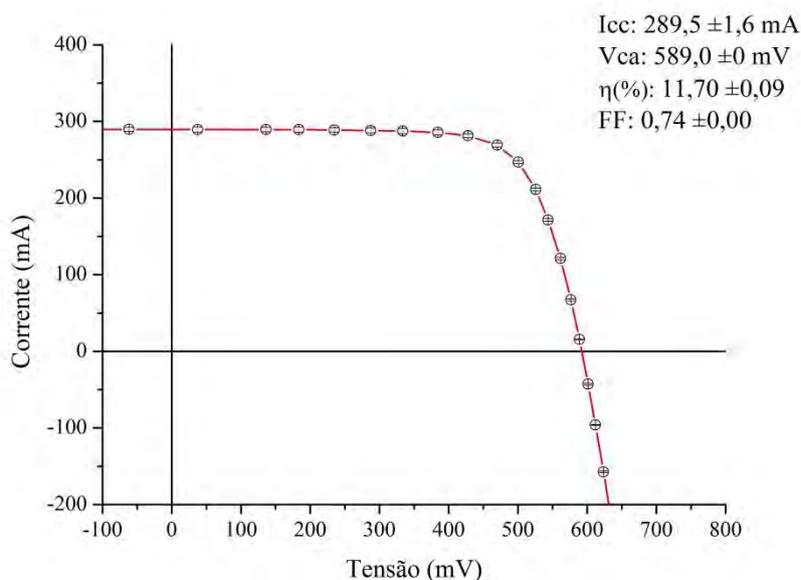


Figura 4.15 - Curva IxV média de uma célula solar espacial CAST.

Tabela 4.5 - Características elétricas do lote das células solares CAST.

V_{mp} (mV)	V_{ca} (mV)	I_{mp} (mA)	I_{cc} (mA)	η %	FF	A (cm ²)
467,0 ±9,5	588,0 ±3,2	256,7 ±9,2	292,3 ±8,2	11,08 ±0,55	0,70 ±0,02	8,0

Por possuírem as mesmas características físicas, a mesma técnica de fabricação e por serem da mesma empresa, as características das células CAST têm as mesmas características da célula solar padrão de referência CHINA-923. A mínima variação dos valores é devida aos lotes de fabricação.

Com o espectro AM1.5G do simulador solar, foram medidas as células solares LME e os fotodiodos S1336-8BK. A figura 4.16 mostra a curva IxV média de uma célula solar nacional fabricada no LME/USP e a tabela 4.6 apresenta os valores médios e a dispersão das características do lote de células LME. Já a figura 4.17, apresenta a curva IxV média de um fotodiodo de silício S1336-8B e os valores médios das características dos fotodiodos estão descritos na tabela 4.7.

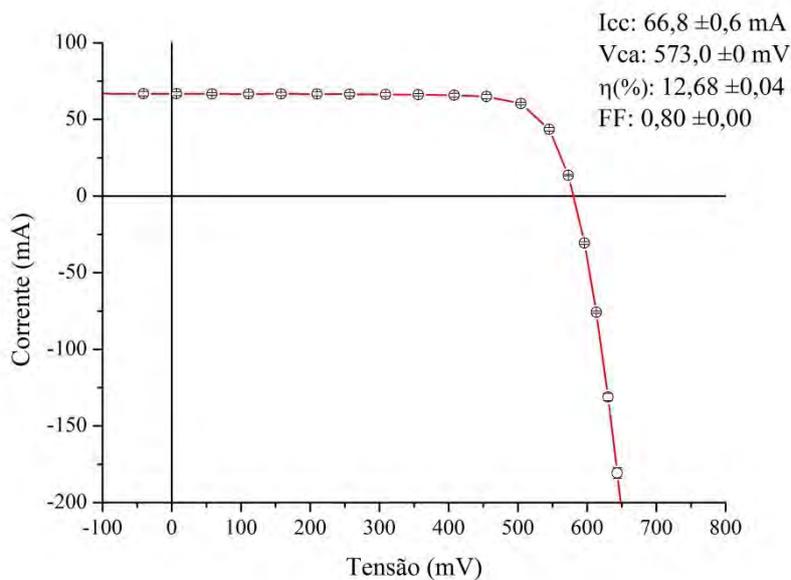


Figura 4.16 - Curva IxV média de uma célula solar terrestre LME.

Tabela 4.6 - Características elétricas do lote das células solares LME.

V_{mp} (mV)	V_{ca} (mV)	I_{mp} (mA)	I_{cc} (mA)	η %	FF	A (cm ²)
502,3 \pm 2,1	572,1 \pm 1,4	61,5 \pm 1,0	67,4 \pm 1,0	12,78 \pm 0,21	0,80 \pm 0,01	2,4025

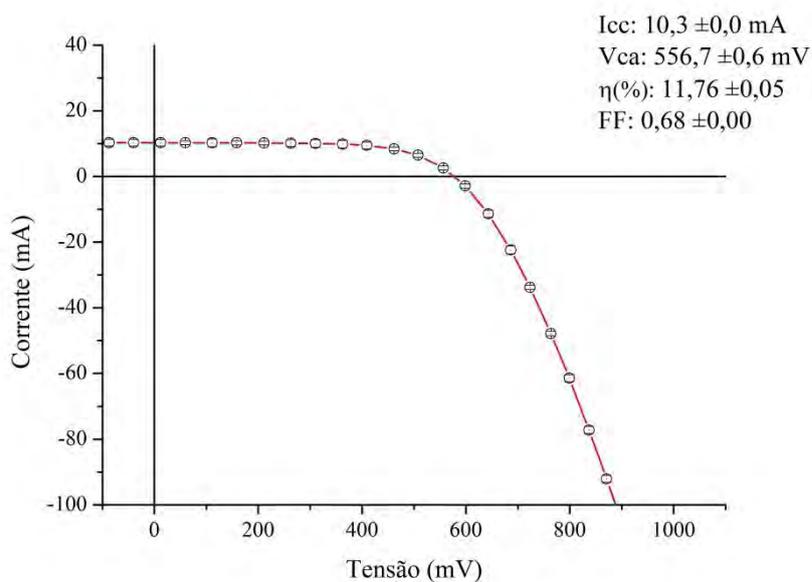


Figura 4.17 - Curva IxV média de um fotodiodo S1336-8BK.

Tabela 4.7 - Características elétricas do lote dos fotodiodos S1336-8BK.

V_{mp} (mV)	V_{ca} (mV)	I_{mp} (mA)	I_{cc} (mA)	η %	FF	A (cm ²)
422,3 ±16,1	559,2 ±3,5	9,2 ±0,3	10,3 ±0,1	11,75 ±0,12	0,68 ±0,01	0,33

As células solares LME comparadas com as outras células medidas não apresentam muitas diferenças em relação às características elétricas, porém a vantagem de utilizá-las como elementos sensores em radiômetros é de possuir uma área superficial menor, evitando grandes problemas de espaço interno do sensor

Um grande problema que encontramos para medir os fotodiodos foi a limitação do subsistema de aquisição de dados do sistema de medidas de curva IxV. Foi possível obter as características dos fotodiodos S1336-8BK, porque os valores estavam no limite da resolução do sistema. Mas para medir o fotodiodo TW30DY2 tivemos que adaptar os multímetros *Fluke* para registrar os valores no computador. A figura 4.18 mostra a curva IxV dos fotodiodos TW30DY2 com o perfil coerente a uma curva típica de um fotodiodo Schottky.

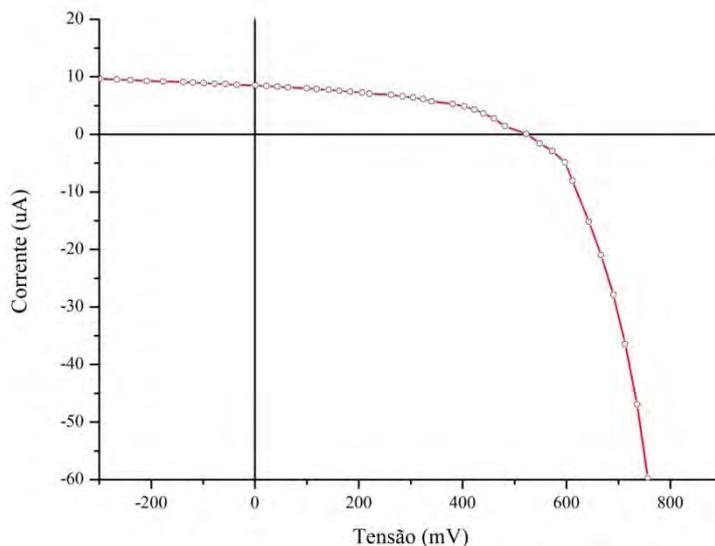


Figura 4.18 - Curva IxV média de um dos fotodiodos TW30DY2.

A tabela 4.8 mostra as características de um fotodiodo TW30DY2 calculadas a partir a curva de corrente por tensão da figura 4.18.

Tabela 4.8 - Características elétricas do lote dos fotodiodos TW30DY2.

V_{mp} (mV)	V_{ca} (mV)	I_{mp} (μA)	I_{cc} (μA)	η %	FF	A (cm^2)
381,13	522,5	5,30	8,28	0,013	0,4669	0,1566

A medida da célula solar espacial de tripla junção só foi possível com o auxílio de uma lâmpada de filamento para aumentar a concentração de infravermelho. A figura 4.19 mostra a comparação do espectro AM0 do simulador solar com o espectro AM0 juntamente com a radiação de uma lâmpada de filamento. Percebe-se que a região de infravermelho do espectro com a lâmpada auxiliar é mais intensa que a mesma região do espectro AM0 do simulador, porém se comparado com o espectro solar AM0 (figura 3.7) haveria necessidade de uma luz auxiliar apenas para a região compreendida entre 700nm a 900nm, onde a irradiância espectral do simulador está bem abaixo da irradiância espectral solar.

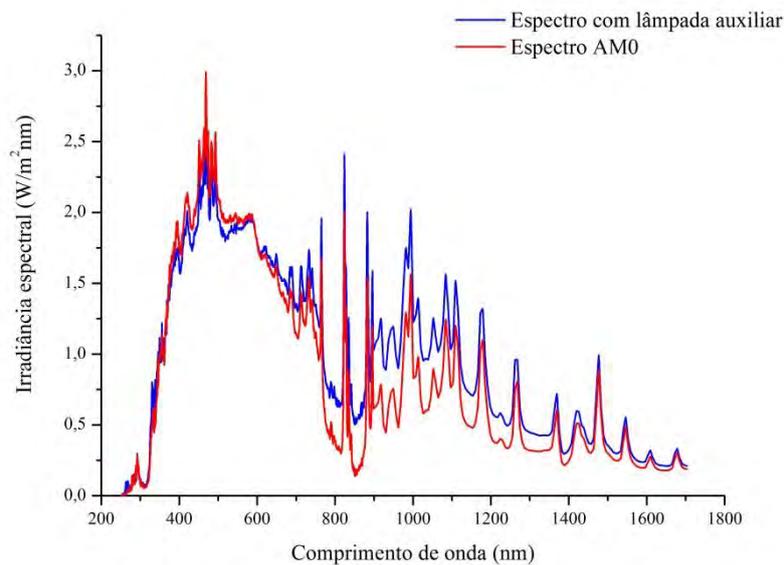


Figura 4.19 - Comparação do espectro do simulador AM0 com e sem lâmpada auxiliar.

A figura 4.20 representa a medida da curva IxV de uma das células solares 3J e a tabela 4.9 mostra as características elétricas do lote de células medidas, e seus valores são equivalente com os valores informados pelo fabricante.

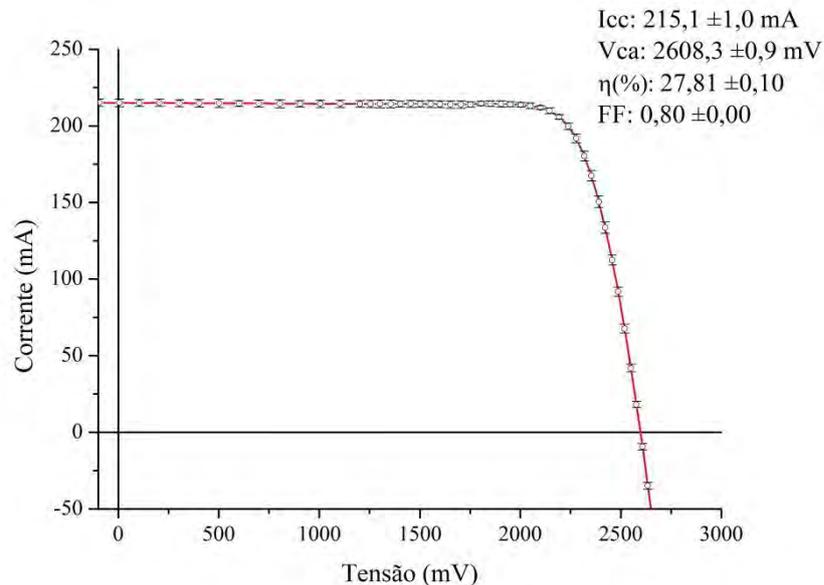


Figura 4.20 - Curva IxV média de uma das células solares 3J.

Tabela 4.9 - Características físicas e elétricas do lote das células solares 3J.

V_{mp} (mV)	V_{ca} (mV)	I_{mp} (mA)	I_{cc} (mA)	η %	FF	A (cm ²)
2189,2 ±4,2	2608,7 ±0,8	202,2 ±3,7	213,5 ±1,6	27,26 ±0,54	0,70 ±0,16	12,0

4.4.2. Caracterização da resposta espectral dos elementos sensores

O sistema de medida da resposta espectral do laboratório de Energia Solar do INPE permitiu obter as curvas de resposta espectral dos elementos sensores, sendo que as células solares de silício foram obtidas com maior precisão. As figuras 4.21, 4.22 e 4.23 mostram as respostas espectrais médias relativas extrínsecas de uma única célula de cada lote de células solares de silício *Spectrolab*, *CAST* e *LME* respectivamente.

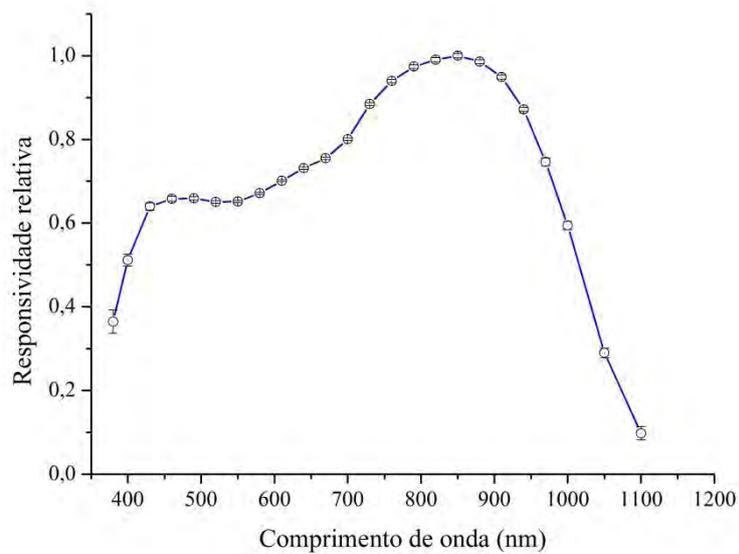


Figura 4.21 - Curva média da resposta espectral relativa de uma das células solares espaciais *Spectrolab*.

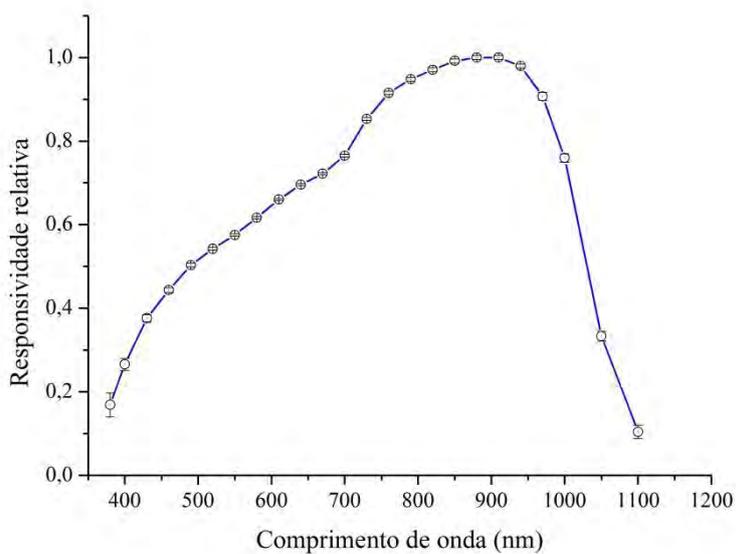


Figura 4.22 - Curva média da resposta espectral relativa de uma das células solares espaciais *CAST*.

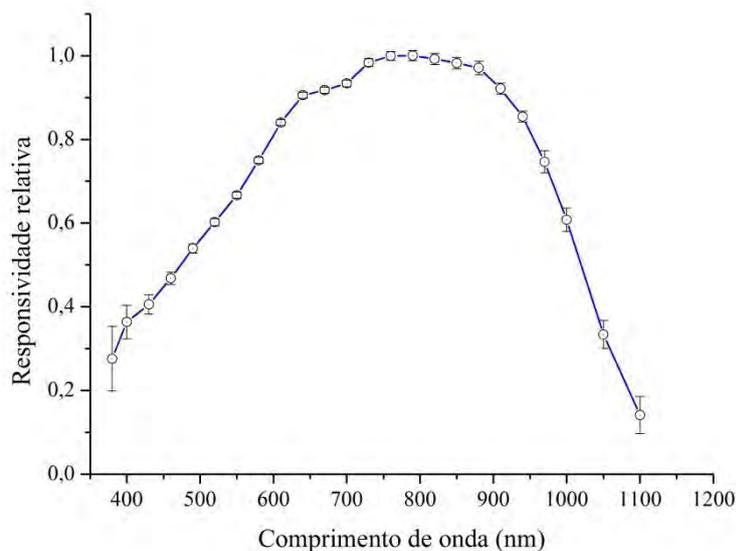


Figura 4.23 - Curva média da resposta espectral relativa de uma das células solares terrestres LME.

Todas as três células ilustradas acima se assemelham com o perfil de uma resposta espectral típica de uma célula solar de silício monocristalino (figura 2.16) com a máxima sensibilidade em torno de 900nm. A diferença da leve subida em torno dos 450nm na célula *Spectrolab* pode ser explicada pela menor profundidade da junção ($< 0,2\mu\text{m}$), para aproveitar a incidência da radiação ultravioleta do espaço, por ser uma célula solar espacial.

As respostas espectrais dos fotodiodos S1336-8BK e TW30DY2 estão representadas pelas figuras 4.24 e 4.25 respectivamente, juntamente com suas curvas típicas, seguidos os mesmos procedimentos das medidas das células solares de silício. 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 os *datasheet* dos fabricantes, mesmo considerando apenas a faixa espectral medida dos fotodiodos de UV.

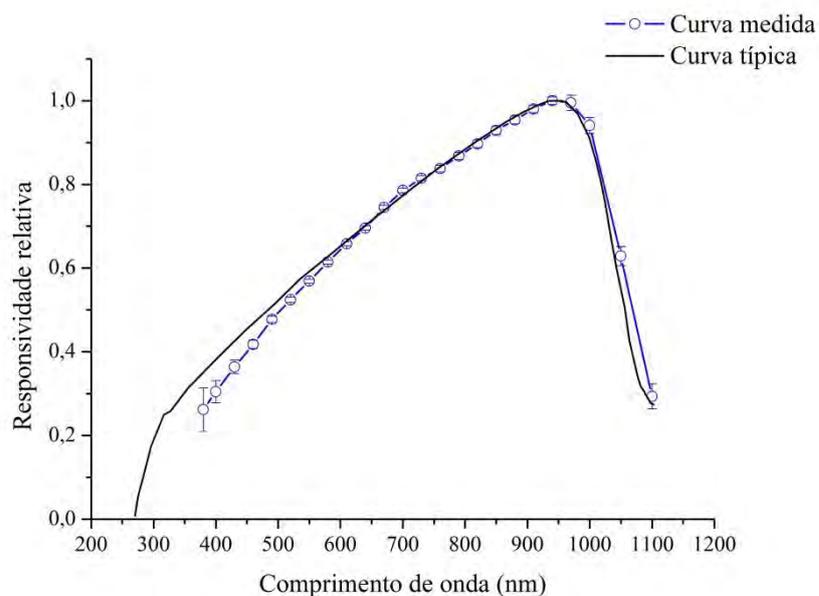


Figura 4.24 - Curva média da resposta espectral relativa de um dos fotodiodos S1336-8BK juntamente com sua curva típica.

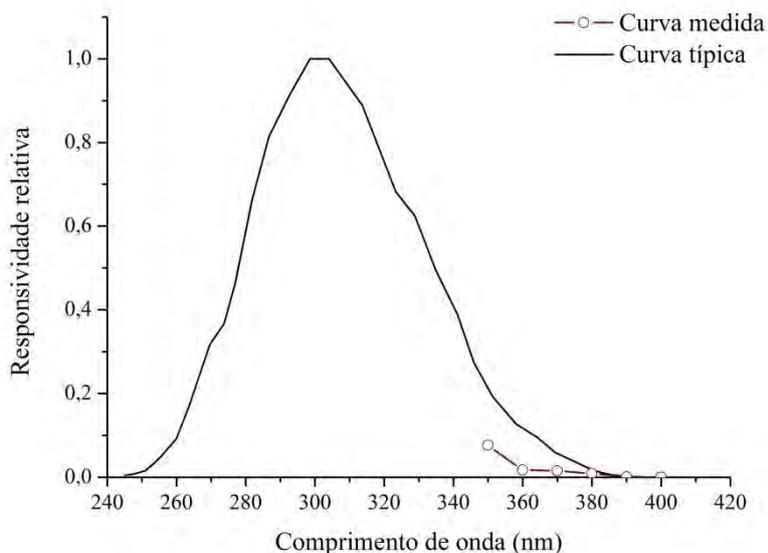


Figura 4.25 - Curva média da resposta espectral relativa de um dos fotodiodos TW30DY2 juntamente com sua curva típica.

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.

4.4.3. Caracterização da resposta angular dos elementos sensores

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 luz espúria caso seja observada. A figura 4.26 mostra as curvas da resposta angular dos diferentes elementos sensores considerando a média de um único dispositivo medido, levando em conta os erros estatísticos, utilizando a fonte de radiação de Hg(Xe) de 500W e comparando-as com a curva de resposta angular ideal.

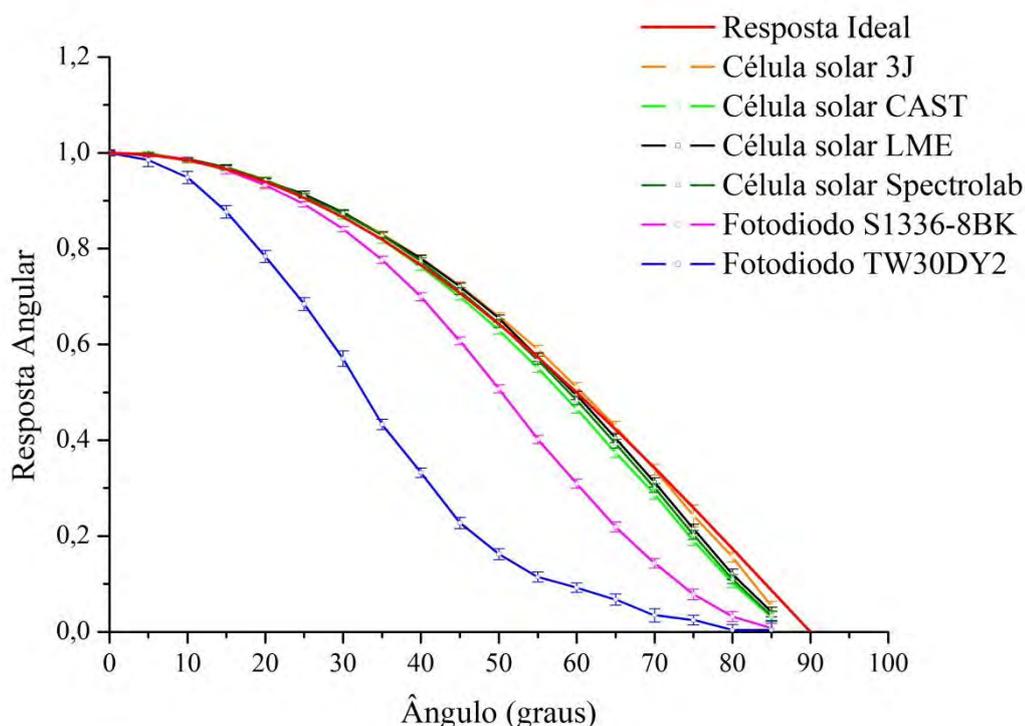


Figura 4.26 - Curvas médias da resposta angular de diferentes elementos sensores para a fonte de radiação Hg(Xe) comparado com uma resposta ideal.

Vemos na figura 4.26 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.

O erro da resposta angular é dado pela diferença entre a medida realizada e a curva de resposta angular ideal. A figura 4.27 mostra os erros dos elementos sensores em relação à lei do cosseno.

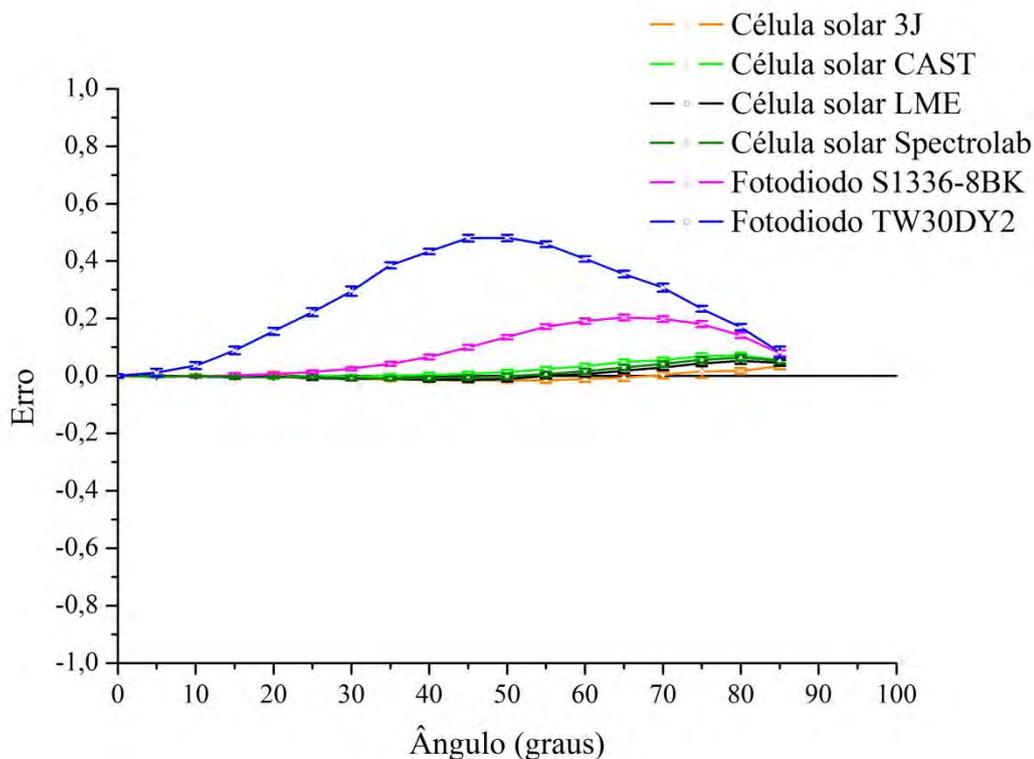


Figura 4.27 - Curvas de erro referente às respostas angulares dos elementos sensores para a fonte de radiação Hg(Xe).

Para ângulos inferiores a 75°, essa diferença para as células solares é menor que 7%. O erro dos fotodiodos em relação à lei do cosseno é maior que o erro das células por ter seu ângulo de visão limitado. 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 1000W. 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 figura 4.28 mostra as curvas de resposta angular dos diferentes elementos sensores, levando em conta os erros, utilizando a fonte de radiação de filamento de tungstênio de 1000W e comparando-as com a curva de resposta angular ideal.

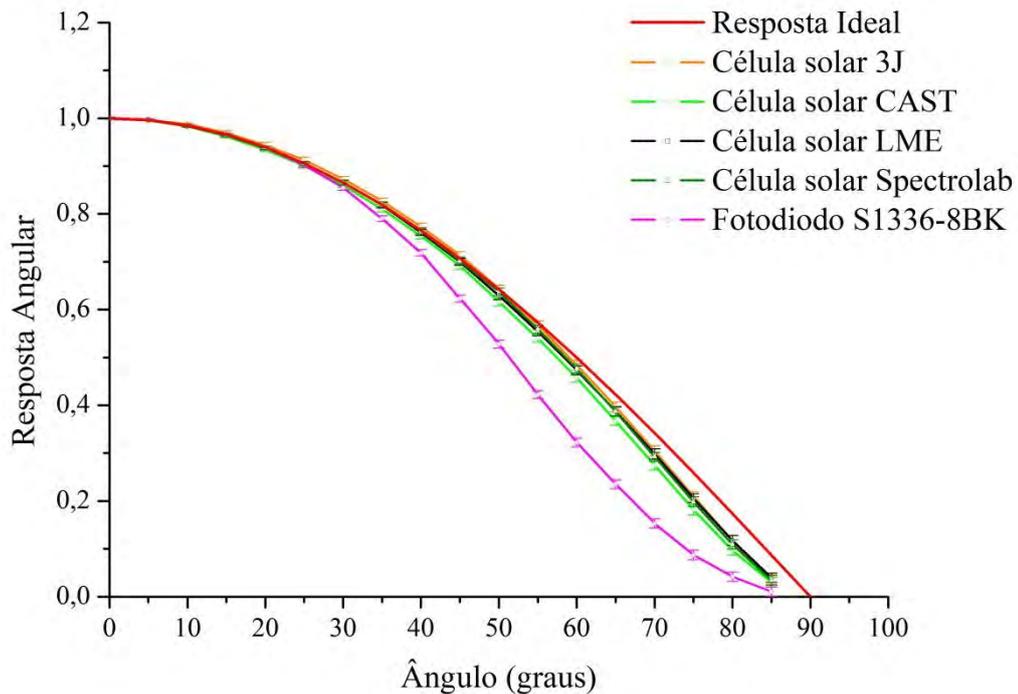


Figura 4.28 - Curvas de resposta angular dos diferentes elementos sensores para a fonte de radiação de filamento comparado com uma resposta ideal.

Não muito diferente dos valores dos erros em relação à lei do cosseno para a fonte de Hg(Xe) para ângulos menores que 75°, a diferença para as células solares é inferior a 7,7%. Para ângulos de incidência da radiação de até 65°, o erro associado ao fotodiodo de S1336-8BK é menor que 24,2%. A figura 4.29 mostra os erros dos elementos sensores em relação à lei do cosseno.

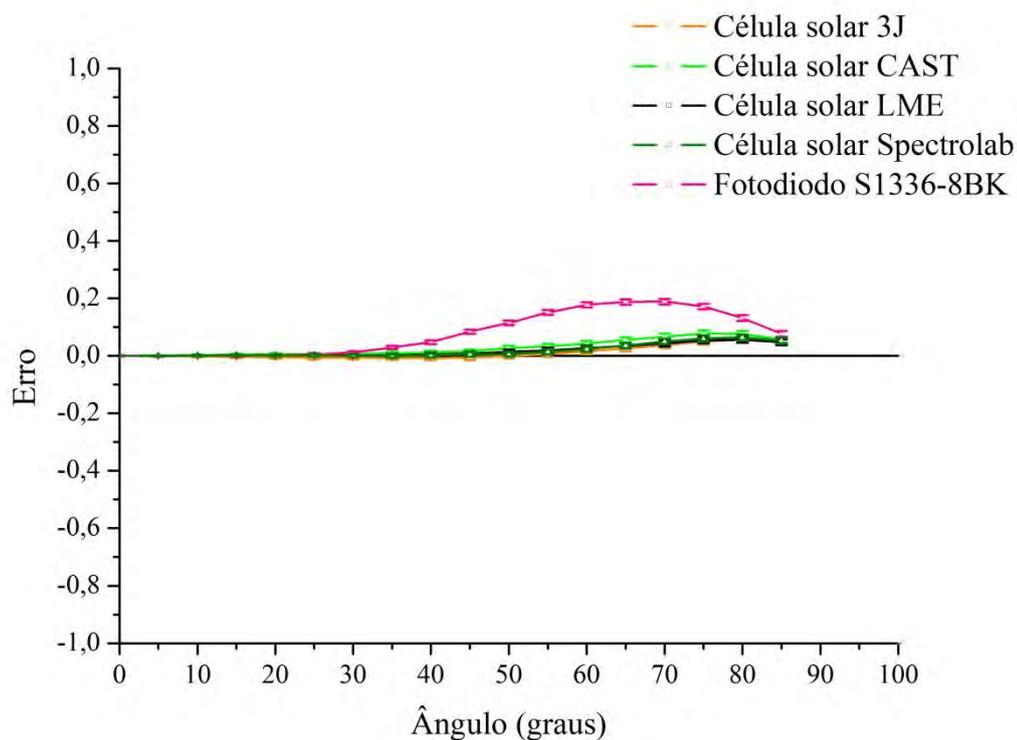


Figura 4.29 - Curvas de erro referente às respostas angulares dos elementos sensores para a fonte de radiação Hg(Xe).

A partir da análise dos resultados do trabalho, foi possível determinar os limites de medida de cada sistema do laboratório, que para elementos sensores à base de silício monocristalino todos os sistemas estão aptos a medi-los com boa precisão. Também foi possível auxiliar na elaboração de procedimentos de medidas elétricas e óticas de elementos sensores com fundamento em normas técnicas específicas para cada sistema.

5 CONCLUSÃO

Atualmente, a demanda de fontes de energia renováveis vem crescendo cada vez mais no setor energético mundial, por terem como principal consequência baixo impacto ambiental. A pesquisa em geração de energia, bem como o monitoramento da radiação solar na Terra, utilizando dispositivos fotovoltaicos está em constante evolução e aprimoramento, assim como os sistemas de caracterização elétricas e óticas desses dispositivos.

No Laboratório do Grupo de Células Solares (CELSOL) do LAS/INPE estão implementados três sistemas de caracterização de dispositivos fotovoltaicos: um sistema de medida de curva corrente por tensão, um sistema de medida de resposta espectral e um sistema de medida de resposta angular. Neste trabalho, 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. O sistema de curva IxV permite determinar parâmetros elétricos relacionados ao desempenho dos elementos sensores tais como corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, corrente de máxima potência, tensão de máxima potência, eficiência e o fator de preenchimento. Todo o sistema foi otimizado de acordo com normas técnicas específicas, classificando o simulador solar como CBA para uma área de trabalho de $152 \times 152 \text{mm}^2$ e CAA para uma área de $76 \times 76 \text{mm}^2$. O sistema apresenta limitações para medidas de células solares de tripla junção, devido à sua fonte de radiação e para os fotodiodos de UV, devido ao sistema de aquisição de dados. O sistema de medida da responsividade espectral está montado em uma bancada ótica utilizando uma fonte de luz de filamento de 250 Watts, um monocromador de grade de difração que garante radiação monocromática desde 350 a 1100nm, com uma resolução de $2,7 \pm 0,1 \text{nm} \cdot \text{mm}^{-1}$ e um amplificador *Lock-in* para registrar as medidas dos elementos sensores. O estudo do atual sistema também determinou algumas limitações como a

impossibilidade de medir células solares de tripla junção e de medir fotodiodos de UV, pois o monocromador é limitado à faixa espectral de 350 a 1100nm. O sistema de medida da resposta angular por radiação incidente, utilizado para medir a dependência da resposta dos elementos sensores com o ângulo de incidência da radiação, permitindo determinar o erro relacionado à lei do cosseno de Lambert, está montado numa bancada ótica de 910x1830mm² podendo utilizar uma lâmpada de descarga em gás de mercúrio e xenônio de alta pressão 500W ou uma lâmpada de filamento de tungstênio de 1000W. A radiação é colimada por um caminho ótico de 2,85m com cinco íris de 46mm de diâmetro e uma sexta íris que tem seu diâmetro ajustável de 1 a 40mm. Suportes foram desenvolvidos para fixar as células solares e os fotodiodos na vertical para permitir a variação gradual do ângulo de incidência da luz de 0° a 180° com um erro de ±1°. O sistema de aquisição de dados permite medir tanto o sinal gerado quanto a temperatura do suporte. Através da análise dos resultados dos dispositivos medidos não foi possível medir os fotodiodos de UV com a lâmpada de filamento, pois a intensidade de radiação ultravioleta dessa lâmpada foi insuficiente para obter uma resposta coerente do dispositivo.

Com os resultados obtidos neste estudo, o laboratório do CELSOL mantém atualmente a capacitação para caracterização e calibração de elementos sensores fotovoltaicos e de radiômetros. Como continuidade deste trabalho, sugere-se implementar novos equipamentos e sistemas de aquisição de dados para ampliar a variedade de elementos sensores a serem caracterizados nos três sistemas de medidas, como por exemplo a substituição do subsistema de aquisição de dados atual do sistema de curva IxV por um subsistema utilizando a plataforma LabVIEW, além de adaptar lâmpadas auxiliares ou comprar um novo simulador solar (ex: TS-Space Systems,) para possibilitar medidas de células solares de tripla junção. Para o sistema de resposta espectral é necessário ampliar a faixa espectral de medida mudando o monocromador que possua uma torre com duas ou três redes de difração e acoplar ao sistema uma lâmpada de deutério para emissão de UV. Obter a resposta espectral a partir de filtros de interferência também deve ser considerada uma alternativa, embora a medida com monocromador seja mais prática. Atualmente está em

fase de implementação um sistema automatizado para aquisição e registro dos dados da medida de resposta angular dos elementos sensores e de radiômetros.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, R. A. S. **CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE CÉLULAS SOLARES DE TRIPLA JUNÇÃO-GaInP/GaAs/Ge**. 2006. 185 p. (INPE-14169-TDI/1086).

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

Disponível em: < <http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/05.30.17.22/doc/publicacao.pdf> Acesso em: 19 mar. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília, 2008.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard tables for reference solar spectral irradiances**: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface. West Conshohocken, PA, 2008.

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.

BOIVIN, L. P. et all. **Spectral response measurement apparatus for large area solar cells**. Appl. Opt. 25, 2715-2719 (1986)

EMERY, K. A. **Solar Simulators and I-V measurements methods**. Solar Energy Institute. 1986.

FIELD, H. **Solar Cell Spectral Response Measurement Errors Related to Spectral Band Width and Chopped Light Waveform**. National Renewable Energy (NREL), 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, California, 1997.

FRADEN, J. **Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications**. Springer, 2003.

HEWITT, P. G. **Conceptual Physics**. Perason, San Fransisco, 2006.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC) **60904-9 Ed.2: Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements**. 2007.

ISO/DIS 15387 - 2002. Space systems - Space solar cells - Requirements, measurements and calibration procedures.

LA ROVERE, E. L., do Valle, C., Pereira, A. **PROJETO “A CARTA DO SOL”:** SUBSÍDIOS PARA O PLANEJAMENTO DA PROMOÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL. Rio de Janeiro, 2011 58 p.

MAURER, R. J. **The Electrical Properties of Semi-Conductors.** J. Appl. Phys. V. 32 16, 563 (1945), DOI:10.1063/1.1707506

MCCLUNEY, W. R. **Introduction to radiometry and photometry.** Artech House, inc. Boston / London, 1994. ISBN 0-89006-678-7.

MICHALSKY, J.J. Harrison, L.C. Berkheiser, W.E. **Cosine response characteristics of some radiometric and photometric sensors.** Solar Energy, Volume 54, num 6, pag 397-402, 1995.

Newport. **Introduction to Solar Radiation.** Acesso em: 10/11/2011. Disponível em: <http://www.newport.com/Introduction-to-Solar-Radiation/411919/1033/content.aspx>

Norma NBR 11879 da ABNT 1991. **Dispositivos Fotovoltaicos – Simulador Solar – Requisitos de Desempenho**, pp. 1-3.

OSSENBRINK, H. **Calibration Procedures – State of the Art.** Institute for Environment and Sustainability, Renewable Energies Unit, Ispra, Italy, 2003.

PALMER, Christopher. **Diffraction Grating Handbook.** 6th edition, Newport Corporation (2005).

PALMER, J. M. Barbara G. Grant. **The Art of Radiometry.** SPIE Press, Bellingham, Washington, 2009. ISBN: 9780819472458

SCIENCE FACTS. **The Origins of Modern Day Renewable Energy.** Acesso em 10/11/2011. Disponível em: <http://www.sciencefacts.us/the-origins-of-modern-day-renewable-energy/>

SRS, Inc. Revision 2.0. **Model SR850 - DSP Lock-in Amplifier Manual.** (01/2009).

TIBA, C. et. al. (Coords.). **Atlas Solarimétrico do Brasil:** banco de dados terrestres. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111p.

VEISSID, N.; C. Costa Vaz. **Desenvolvimento de Simulador Solar de Baixo Custo.** In: I Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2007, Fortaleza. Anais do I Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2008.

VEISSID, Nelson ; NUBILE, P. ; BELOTO, A. F. ; ANDRADE, A. M. . **The Solar Cell Experiment of the First Brazilian Complete Space Mission Satellite.** In:

TWENTY-FIRST IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, 1990, Kissimmee-Florida. Proceedings, 1990. p. 1184-1187.

VEISSID, N. D. Bonnet, H. Richter. **Experimental investigation of the double exponential model of a solar cell under illuminated conditions: considering the instrumental uncertainties in the current, voltage and temperature values**, *Solid-State Electronics*. 38(11) (1995), p. 1937.

VILELA, W. A. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar**. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos - SP, 2010.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Guide to meteorological instruments and methods of observation**. 7. ed. Geneva 2: 2008. WMO-n.8. ISBN 978-92-63-100085.

WURFEL, P. **Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts**. Wiley-VCH, Weinheim, 2005.