



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m19/2010/09.17.18.50-TDI

## **ESTUDO, DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE RADIÔMETROS PARA MEDIDAS DA RADIAÇÃO SOLAR**

Waldeir Amaral Vilela

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Antonio Fernando Beloto, e Célio Costa Vaz, aprovada em 09 de agosto de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/389G8B5>>

INPE  
São José dos Campos  
2010

**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:**

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

**Membros:**

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr<sup>a</sup> Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

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

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

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

**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 E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m19/2010/09.17.18.50-TDI

## **ESTUDO, DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE RADIÔMETROS PARA MEDIDAS DA RADIAÇÃO SOLAR**

Waldeir Amaral Vilela

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Antonio Fernando Beloto, e Célio Costa Vaz, aprovada em 09 de agosto de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/389G8B5>>

INPE  
São José dos Campos  
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Vilela, Waldeir Amaral.

V711e      Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar / Waldeir Amaral Vilela. – São José dos Campos : INPE, 2010.

xxx + 178 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2010/09.17.18.50-TDI)

Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Orientadores : Drs. Antonio Fernando Beloto, e Célio Costa Vaz .

1. Radiômetro. 2. Sistema de aquisição de dados. 3. Radiação solar. 4. Piranômetro. 5. Célula solar. I.Título.

CDU 551.521.31)

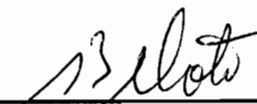
---

Copyright © 2010 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 © 2010 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 Doutor(a) em  
ETE/Ciência e Tecnologia de Materiais e  
Sensores**

Dr. Antônio Fernando Beloto



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

Dr. Celio Costa Vaz



Orientador(a) / OE / SJCampos - SP

Dr. Luiz Angelo Berni



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

Dr. Nelson Veissid



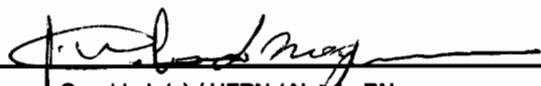
Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Manuel Cid Sánchez



Convidado(a) / EPUSP / São Paulo - SP

Dr. José Wilson L. Nogueira



Convidado(a) / UFRN / Natal - RN

  
Aluno (a): Waldemar Amaral Vilela

São José dos Campos, 09 de agosto de 2010



“Sempre chega a hora em que descobrimos que sabíamos muito mais do que antes  
julgávamos.”

**José Saramago**





## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Antonio Fernando Beloto, orientador desta tese, pela oportunidade da realização deste trabalho, pela orientação precisa em todos os momentos e também pela amizade, confiança depositada, apoio e incentivo em todos os momentos.

Ao Dr. Célio Costa Vaz, também orientador desta tese, pelo empenho e dedicação dispensada para o sucesso deste trabalho em detrimento a inúmeras outras atividades em sua empresa, pelo conhecimento compartilhado e principalmente pelo exemplo de pessoa dinâmica, solidária e dedicada.

À minha esposa Miria, que abrindo mão de seus momentos de descanso me ajudou na digitação desta tese e também pelo carinho e paciência em todos os momentos difíceis.

Ao Prof. Dr Nelson Veissid e Dr. Luiz Ângelo Berni, pela amizade, pela ajuda e por inúmeras sugestões neste trabalho.

Ao Dr. Marcos Dias da Silva, pelas discussões técnicas e sugestões durante o desenvolvimento do projeto FINEP do qual este trabalho teve origem.

Ao Sr. Francisco Augusto Souza Ferreira, pela anodização das diversas peças de alumínio utilizadas neste projeto e por compartilhar a sua experiência.

Ao Júlio Cesar Peixoto e Marco Antônio da oficina mecânica do LAS, pela confecção de inúmeras peças mecânicas utilizadas neste projeto.

Ao Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS por ter disponibilizado a infraestrutura necessária para a execução desta tese.

À Universidade de São Paulo, especificamente ao Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica, na pessoa do Dr. Manuel Cid Sánchez e Carlos Alberto Santos Ramos, pelo desenvolvimento das células solares de silício utilizadas neste trabalho.

Ao Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), pela realização dos testes ambientais de névoa salina.

Ao Laboratório de Integração e Testes LIT/ INPE pela realização de medidas de FTIR nas amostras de difusores e dos testes ambientais.

À Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, pelo apoio financeiro neste projeto.

E a todos aqueles que não foram citados, mas que de alguma forma contribuíram para com este trabalho.



## RESUMO

O estudo da radiação solar que chega à superfície da terra é de fundamental importância dentro do contexto das mudanças climáticas globais e suas aplicações vão desde a compreensão do clima do planeta até a otimização de sistemas de energia. A importância do tema pode ser estimada pelo grande número de pesquisas que tem como escopo o estudo da radiação solar e de suas componentes, tanto em abordagem teórica como experimental. O Brasil possui um potencial energético solar imenso e o seu aproveitamento se apresenta como uma excelente alternativa devido ao baixo impacto ambiental, mas para a utilização desta forma de energia em larga escala é necessário um esforço para que haja domínio tecnológico e capacitação do parque industrial nacional na produção de dispositivos capazes de medir e monitorar a radiação solar. A ausência de uma indústria nacional destes dispositivos faz com que eles sejam importados com custos elevados. Com o objetivo de atender as necessidades de engenheiros, pesquisadores, meteorologistas e ambientalistas, foi desenvolvido neste trabalho um radiômetro para medida da radiação solar global de baixo custo e um dispositivo de aquisição de dados dedicado ao monitoramento da radiação solar. O desenvolvimento destes dispositivos se deu através de uma parceria entre LAS/INPE, LME/USP e a empresa Orbital Engenharia Ltda., tendo como objetivo a transferência da tecnologia ao setor produtivo privado. Para isso, foi utilizada de forma pioneira na área acadêmica uma metodologia de desenvolvimento que é utilizada comumente no INPE nos projetos de satélites e de outros componentes de aplicações espaciais. Dentro da metodologia utilizada, o projeto nasceu com a concepção dos produtos que foram definidos a partir das especificações feitas com auxílio de uma intensa pesquisa e através de sugestões de colaboradores e usuários destes dispositivos. O radiômetro desenvolvido é destinado à medida de radiação solar global e tem como característica particular o uso de uma célula solar de silício monocristalino convencional como elemento sensor. A célula solar utilizada foi produzida no LME/USP, e possui tipicamente uma tensão de circuito aberto de 580 mV, corrente de curto circuito de 70 mA e 13,5% de eficiência. A resposta espectral do radiômetro desenvolvido é de 400 nm a 1100 nm, sensibilidade típica de  $20 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ , tempo de resposta menor que 10 ms, resposta compatível com a lei dos cossenos e precisão de  $\pm 3\%$ . O dispositivo de aquisição de dados é um *datalogger* dedicado para medida da radiação, de 12 bits, 5 Mbyte de memória e 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 são enviados para memória. Os dados também podem ser simultaneamente apresentados no mostrador do dispositivo ou enviados a um microcomputador. Para que o radiômetro tenha valor como um instrumento de medida confiável, ele foi calibrado por comparação com um padrão de referência que tem certificação e rastreabilidade. Para os testes e caracterizações dos radiômetros foram montados no laboratório de células solares do LAS/INPE três sistemas básicos: 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. Nos protótipos desenvolvidos do radiômetro também foram realizados testes ambientais de umidade, radiação ultravioleta e névoa salina para determinar a conformidade dos dispositivos em relação aos requisitos de qualidade.



# **STUDY, DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF RADIOMETER FOR SOLAR RADIATION MEASUREMENT**

## **ABSTRACT**

The study of solar radiation on the earth's surface is considered of fundamental importance within the global context of climate change. Its applications range from the understanding of the planet's climate to the optimization of energy systems. Such importance can be estimated by the extensive existing research on the study of solar radiation and its components, both theoretically and experimentally. Brazil has a great solar energy potential and its exploitation is presented as an excellent energy source alternative due to its low environmental impact. On the other hand, to use this energy on a large scale, it is necessary to develop appropriate technology and training of the national industrial park in order to produce devices capable of measuring and monitoring solar radiation. As a result of the absence of domestic industry, these devices have to be imported at high costs. Aiming to support the needs of engineers, researchers, meteorologists and environmentalists, a radiometer was developed in this work to measure solar radiation at low cost as well as a data acquisition device to monitor solar radiation. The development of these devices was carried out through a partnership among LAS/INPE, LME/USP, and Orbital Engenharia Ltda, in order to transfer technology to the private sector. To do so, a pioneer methodology in the academic area, which is commonly used in projects of INPE satellites and other components for space application, was used. The project was conceived taking into consideration the design of products that have been defined based on the specifications of intensive research and on the suggestions from developers and users of these devices. The developed radiometer is used for the measurement of global solar radiation. Its specific feature is the use of a single crystal silicon solar cell as sensor element. The solar cell was produced at the LME/USP and has a typical open circuit voltage of 580 mV, short circuit current of 70 mA and 13,5% efficiency. The spectral response of the radiometer was developed for 400 nm to 1100 nm, typical 20  $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$  sensitivity, response time less than 10 ms, which is consistent with the law of cosines, and typical precision error of  $\pm 3\%$ . The data acquisition device, used to measure radiation, is a datalogger of 12 bits, 5 Mbyte of memory and low power consumption, able to acquire and store data from four radiometers and two thermocouples for over a year. The measured signs are converted into appropriate units and are sent to memory. Data can also be simultaneously shown on the device display or sent to a microcomputer. The radiometer was calibrated by comparison with a certified and traceable reference standard in order to assure its measuring reliability. For testing and characterization, three basic systems were assembled in the laboratory of solar cells LAS: a system for measuring radiation by comparison with a standard sensor or relative characterization, a system for measuring the response to the law of cosines, and a system for measuring spectral response. The developed prototypes were also submitted to the following environmental tests: humidity, salt spray, and ultraviolet radiation to determine the conformity of the devices in relation to quality requirements.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de uma onda eletromagnética .....	13
Figura 2 - Curva espectral da radiação solar. Fonte: WOLFGANG PALZ (1981).....	17
Figura 3 - Ilustração da órbita da terra .....	18
Figura 4 - Ilustração do coeficiente “Air Mass” (AM).....	22
Figura 5 - Relações geométricas para determinação da radiação solar direta em um plano inclinado. ....	23
Figura 6 - Curvas de variação do coeficiente de absorção de vários materiais. Fonte: RESENDE (2004). ....	33
Figura 7 - Curvas I x V características de um fotodiodo para várias condições de iluminação. Fonte: RESENDE (2004). ....	35
Figura 8 - Curva típica de resposta de um sensor fotovoltaico. Fonte: RESENDE (2004). ....	36
Figura 9 - Regiões de uma célula solar de silício. ....	43
Figura 10 - Circuito equivalente de uma célula solar real e iluminada .....	46
Figura 11 - Efeitos da resistência série sobre a curva I x V de uma célula de silício monocristalino. Fonte: PRIEB (2002). ....	48
Figura 12 - Efeitos da resistência em paralelo na curva I x V da célula solar (Fonte: Prieb, 2002).....	49
Figura 13 - Curvas I x V de células solares de silício para diferentes intensidades de radiação (Fonte: Prieb, 2002).....	50
Figura 14 - Curva típica de resposta espectral de uma célula solar de silício comparada com o espectro solar (AM 1,5G).....	51
Figura 15 - Curvas I x V de células Solares de silício monocristalino para diferentes temperaturas. Adaptado: PRIEB (2002). ....	53
Figura 16 - Etapas do processo de fabricação de uma célula solar de silício convencional .....	55
Figura 17 - Células solares de silício no formato final do processo.....	56

Figura 18 - Partes e componentes do radiômetro desenvolvido: (1) base do elemento sensor, (2) tampa, (3) difusor, (4) base, (5) chave para montagem, (6) anel de fixação do difusor, (7) corpo principal, (8) nível de bolha.....	74
Figura 19 - Desenho do corpo principal do radiômetro desenvolvido. ....	75
Figura 20 – Desenho esquemático do difusor do radiômetro desenvolvido no LAS. ....	76
Figura 21 - Anel de fixação do difusor.....	77
Figura 22 - Suporte do elemento sensor .....	78
Figura 23 - Elemento sensor do radiômetro. ....	78
Figura 24 - Base do radiômetro. ....	80
Figura 25 - Desenho da ferramenta para fixação e remoção das partes do radiômetro .....	82
Figura 26 - Protótipos de radiômetros fotovoltaicos desenvolvidos. (a) Protótipo anodizado e tingido. (b) Protótipo anodizado sem tingimento. ....	84
Figura 27 - Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados automático digital. ....	88
Figura 28 - Conversor analógico para digital. ....	90
Figura 29 - Erro sistemático de medida apresentado em relação ao valor lido. ....	97
Figura 30 - Erro sistemático percentual em relação ao valor lido. ....	98
Figura 31 - Erro de quantização .....	99
Figura 32 - Diagrama de blocos do dispositivo DataRad.....	103
Figura 33 - Foto do protótipo do DataRad .....	107
Figura 34 - Tela principal do programa de interface com o usuário. ....	109
Figura 35 - Tela do modo de apresentação de dados em tempo real.....	110
Figura 36 - Diagrama ilustrativo do sistema de caracterização I x V de células solares do LAS/INPE.....	113
Figura 37 - Imagem do sistema de caracterização I x V do LAS/INPE.....	114
Figura 38 - Desenho esquemático do sistema de medida da lei dos cossenos. ....	115
Figura 39 - Foto da primeira montagem do sistema de caracterização da lei dos cossenos. ....	116
Figura 40 - Detalhe do novo sistema de caracterização da lei dos cossenos.....	117
Figura 41 - Diagrama esquemático do sistema de caracterização espectral.....	120
Figura 42 - Detalhe da montagem do sistema de caracterização espectral .....	122



Figura 43 - Diagrama esquemático do sistema de caracterização por comparação. ....	124
Figura 44 - Sistema de caracterização por comparação. ....	125
Figura 45 - Espectros FTIR das amostras de difusores .....	129
Figura 46 - Curva de transmissão direta da radiação nas amostras .....	130
Figura 47 - Curvas de transmissão total das amostras.....	132
Figura 48 - Curva de espalhamento.....	132
Figura 49 - Curva típica das células produzidas pelo LME .....	134
Figura 50 - Curvas de uma das células produzidas pelo LME.....	135
Figura 51 - Curvas de uma das células produzidas pelo LME .....	136
Figura 52 - Protótipo para teste da lei dos cossenos.....	137
Figura 53 - Exemplos de modelos de difusores estudados.....	137
Figura 54 - Resposta a lei dos cossenos de modelos de difusores de acrílico.....	138
Figura 55 - Resposta a lei dos cossenos de modelos de difusores de teflon .....	139
Figura 56 - Bancada de calibração ao ar livre para calibração de protótipos de radiômetros desenvolvidos no LAS.....	143
Figura 57 - Curva de calibração do radiômetro LAS 106. ....	145
Figura 58 - Curva de calibração do radiômetro LAS 107. ....	145
Figura 59 - Efeito da temperatura medida ao ar livre.....	148
Figura 60 - Efeito da temperatura medida no laboratório para o protótipo LAS130 ....	149
Figura 61 – Gráfico da lei dos cossenos do protótipo LAS103.....	150
Figura 62 - Resposta espectral do protótipo LAS106. ....	151
Figura 63 - Bancada de medida de radiação solar .....	152
Figura 64 - Curvas espectrais da radiação solar obtidas em horários diferentes pelo espectro radiômetro. ....	153
Figura 65 - Ensaio ambiental de nevoa salina. Esquerda: câmara de névoa salina. Direita: radiômetros dentro da câmara. ....	155
Figura 66 - Ensaio ambiental termoclimáticos. (a) Câmara Heraeus Votsch. (b) protótipos dentro da câmara após o termino do teste.....	156
Figura 67 - Foto de ensaio ambiental de exposição a radiação ultravioleta.....	157
Figura 68 - Foto da plataforma de teste de coleta de dados de radiômetros. ....	159
Figura 69 - Resultado da medida diária de irradiação solar global obtido com o uso do radiômetro protótipo LAS102 no dia 13 de dezembro de 2009.....	160

Figura 70 - Medida da irradiação diária solar global obtido com o uso do radiômetro protótipo LAS102 no dia 8 de abril de 2010.....	161
Figura 71 - Irradiância medida no dia 24/03/10 com o DataRad .....	162
Figura 72 - Irradiância medida no dia 07/04/10 com o DataRad .....	163
Figura 73 - Curvas de irradiância obtidas no dia 27/07/10 com o DataRad e com o DaqPro 5300 simultaneamente. ....	164
Figura 74 - Detalhe da medida de irradiação solar do dia 27/07/10 obtidas simultaneamente com o DataRad e com o DaqPro 5300.....	164

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Divisão da radiação eletromagnética (segundo a CIE) .....	16
Tabela 2 - Classificação de radiômetros especificados pela WMO. ....	39
Tabela 3 - Modelos de desenvolvimento .....	65
Tabela 4 - Documentos gerados do projeto .....	71
Tabela 5 - Exemplos de resolução de diversos conversores A/D.....	91
Tabela 6 - Relação dos filtros de interferência utilizados no sistema de caracterização espectral.....	121
Tabela 7 - Constantes de calibração determinada por dois métodos diferentes .....	144
Tabela 8 - Comparação de medidas de irradiação .....	154
Tabela 9 - Comparação da sensibilidade dos protótipos LAS antes e após os ensaios ambientais.....	158



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A/D	-	Analógico/ Digital
AM	-	Air Mass
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
AWG	-	American Wire Gauge
BCD	-	Binary Coded Decimal
CBEE	-	Centro Brasileiro de Energia Eólica
CD	-	Compact Disc
CEPEL	-	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CIE	-	Commission Internationale de l'Eclairage
CISC	-	Complex Instruction Set Computer
CPTEC	-	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
DCTA	-	Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
DIN	-	Deutsches Institut für Normung
DVD		Digital Video Disc
ECS	-	Experimento Célula Solar
EPROM	-	Erasable programmable read-only memory
EUV	-	Ultravioleta Extremo
FINEP	-	Financiadora de Estudos e Projetos
FTIR	-	Fourier Transform Infrared
GEF	-	Global Environment Facility
HP	-	Hewlett Packard
IAE	-	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IEC	-	International Electrotechnical Commission
IECEE	-	Worldwide System for Conformity Testing and Certification of Electrotechnical Equipment and Components
IECQ	-	Quality Assessment System for Electronic Components.

INMETRO	-	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
INPE	-	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IR-A	-	Infravermelho Próximo
IR-B	-	Infravermelho Médio
IR-C	-	Infravermelho Distante
ISO	-	International Organization for Standardization
LAB SOLAR	-	Laboratório de Energia solar
LAS	-	Laboratório Associado de Sensores e Materiais
LIN	-	Laboratório de Instrumentação Meteorológica
LIT	-	Laboratório de Integração e Testes
LME/USP	-	Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP
MD	-	Modelos de desenvolvimento
ME	-	Modelos de Engenharia
MECB	-	Missão Espacial Completa Brasileira
MQ	-	Modelos de Qualificação
MVP	-	Matriz de Verificação do Projeto
NREL	-	National Renewable Energy Laboratory
OMM	-	Organização Meteorológica Mundial
PAR	-	Photosynthetically Active Radiation
PCD	-	Plataforma de Coleta de Dados
PCS	-	Protótipo Cabeça de Série
PC	-	Personal Computer
PMMA	-	polimetil-metacrilato
PNUMA	-	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PUCRS	-	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
PTFE	-	Politetrafluoretileno
PV	-	Photovoltaic
PVC	-	Polyvinyl chloride
QTH	-	Quartzo Tungstênio Halogênio
RC	-	Revisão de Concepção

RCP	-	Revisão Crítica do Projeto
RISC	-	Reduced Instruction Set Computing
RPP	-	Revisão do Projeto Preliminar
RQ	-	Revisão de Qualificação
RTC	-	Real Time Clock
SCD -1(2)	-	Satélite de Coleta de Dados
Si	-	Silício
SI	-	Sistema Internacional
SONDA	-	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais
SWERA	-	Solar and Wind Energy Resource Assessment
TSI	-	Total Solar Irradiance
UA	-	Unidade astronômica
UFSC	-	Universidade Federal de Santa Catarina
UNICAMP	-	Universidade Estadual de Campinas
USART	-	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter,
USB	-	Universal Serial Bus
USP	-	Universidade de São Paulo
UV	-	Ultravioleta
UV-A	-	Ultravioleta Próximo
UV-B	-	Ultravioleta Médio
UV-C	-	Ultravioleta Distante
VIM	-	Vocabulário Internacional de Metrologia
VIS	-	Visível
VUV	-	Vácuo Ultravioleta





## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	- Área sensível do sensor
$A_0$	- Fator de perfeição da junção semicondutora
$\vec{B}$	- Vetor campo magnético
$c$	- Velocidade da luz no vácuo $c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ .
$\bar{d}$	- Distância média entre o centro do Sol e o centro da Terra
$E$	- Energia
$\vec{E}$	- Vetor campo elétrico
$e$	- Carga do elétron
$E_q$	- Erro de quantização
$E_\lambda(\lambda)$	- Espectro da radiação incidente
FF	- Fator de forma ou fator de preenchimento
$h$	- Constante de Plank
$I$	- Intensidade da radiação
$I_{\text{int}}$	- Intensidade da radiação dentro do material semicondutor
$I$	- Corrente elétrica
$I_{\text{cc}}$	- Corrente de curto circuito
$I_e$	- Corrente de escuro
$I_L$	- Corrente gerada pelos fótons absorvidos,
$I_P$	- Corrente paralela
$I_S$	- Corrente de saturação reversa do diodo no escuro
$I_s$	- Corrente de saturação
$I_T$	- Corrente Total
$I_0$	- Intensidade da radiação incidente na superfície
$J$	- Densidade de corrente
$k$	- Constante de calibração do sensor
$k_B$	- Constante de Boltzmann,

$m$	-	Fator de qualidade do diodo
$n$	-	Semicondutor portador de carga majoritária negativa (elétrons)
$n$	-	Índice de refração do meio
$p$	-	Semicondutor portador de carga majoritária positiva (lacunas)
$pn$	-	Junção semicondutora $pn$
$P_L$	-	Potência incidente na área efetiva da junção,
$P_{max}$	-	Potência de saída máxima
$Q(\lambda)$	-	Eficiência quântica
$RE(\lambda)$	-	Resposta espectral absoluta
$R_p$	-	Resistência paralela
$R_s$	-	Resistência série
$R(\lambda)$	-	Resposta espectral do sensor
$R(\lambda)$	-	Refletividade da superfície da célula.
$\bar{S}$	-	Vetor de Poynting
$S$	-	Sinal de saída de um sensor
$S_0$	-	Sinal de saída de escuro de um sensor,
$T$	-	Temperatura absoluta (K)
$T$	-	Temperatura (°C)
$T(\lambda)$	-	Transmitância espectral
$\nu$	-	Frequência da radiação
$V_R$	-	Sinal de tensão medido no radiômetro de referência
$V$	-	Tensão elétrica
$V_{ca}$	-	Tensão de circuito aberto
$V_{FE}$	-	Tensão de fundo de escala
$V_P$	-	Sinal de tensão medido no radiômetro protótipo
$V_{ep}$	-	Valor esperado
$V_{er}$	-	Valor de erro
$V_{lido}$	-	Valor lido

$\alpha$	-	Coefficiente de absorção de radiação do material
$\alpha_s$	-	Ângulo solar de Altitude
$\beta$	-	Ângulo de Inclinação
$\beta$	-	Coefficiente de temperatura de uma célula
$\gamma$	-	Ângulo Azimutal
$\delta$	-	Declinação solar
$\epsilon_0$	-	Permissividade elétrica do vácuo
$\eta$	-	Eficiência quântica da conversão
$\theta_s$	-	Ângulo de Incidência
$\theta$	-	Ângulo da radiação incidente
$\theta_z$	-	Ângulo de Zênite
$k_r$	-	Constante de calibração do radiômetro de referência
$k_p$	-	Constante de calibração do radiômetro protótipo
$\lambda$	-	Comprimentos de onda
$\mu_0$	-	Permeabilidade magnética do vácuo.
$\Upsilon$	-	Ângulo de Azimute solar
$\phi$	-	Ângulo de Latitude
$\Phi$	-	Fluxo de radiação incidente
$\omega$	-	Ângulo Horário



# SUMÁRIO

Pág.

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos .....	8
<b>2. RADIAÇÃO SOLAR E GRANDEZAS RADIOMÉTRICAS.....</b>	<b>11</b>
2.1. Radiação .....	12
2.2. Radiação emitida pelo Sol.....	15
2.3. Localização do disco solar .....	17
2.4. Radiometria .....	18
2.4.1. Constante solar.....	19
2.4.2. Declinação solar.....	20
2.5. Radiação solar na superfície terrestre.....	20
2.6. Algumas definições para a determinação da radiação solar.....	23
<b>3. SENSORES DE RADIAÇÃO.....</b>	<b>25</b>
3.1. Classificações dos sensores de radiação.....	32
3.2. Sensores Semicondutores .....	32
3.3. Sensores para medida de radiação solar .....	36
<b>4. CÉLULA SOLAR.....</b>	<b>41</b>
4.1. O desenvolvimento de células solares no INPE.....	41
4.2. Células fotovoltaicas de silício monocristalino.....	43
4.3. Circuito equivalente de uma célula solar .....	45
4.3.1. Efeito da resistência série na curva I x V da célula solar.....	48

4.3.2.	Efeitos da resistência em paralelo na curva I x V da célula solar.....	49
4.3.3.	Efeito da intensidade da radiação solar sobre a curva I x V da célula .....	50
4.3.4.	Resposta espectral da célula solar de silício .....	51
4.3.5.	Efeito da temperatura na célula solar.....	52
4.4.	Processo de fabricação de células de silício.....	54
4.5.	Caracterização da célula de silício monocristalino .....	56
4.5.1.	Sistema de caracterização I x V de célula solar.....	57
4.6.	Células fotovoltaicas como elemento sensor de radiação solar .....	58
<b>5.</b>	<b>METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>59</b>
5.1.	Estratégias para o Desenvolvimento do Radiômetro .....	60
5.2.	Fases de Desenvolvimento .....	62
5.2.1.	Especificação e Concepção.....	62
5.2.2.	Projeto Preliminar .....	62
5.2.3.	Projeto Detalhado .....	63
5.2.4.	Qualificação .....	63
5.2.5.	Pré-Industrialização .....	63
5.3.	Definições de Modelos.....	64
5.3.1.	Modelo de Desenvolvimento .....	64
5.3.2.	Modelo de Engenharia .....	66
5.3.3.	Modelo de Qualificação.....	67
5.3.4.	Modelo de Fabricação.....	67
5.4.	Plano de Verificação e Testes .....	67
5.5.	Documentos do Projeto do Radiômetro .....	70
<b>6.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO RADIÔMETRO FOTOVOLTAICO .....</b>	<b>73</b>
6.1.	Descrição do radiômetro desenvolvido.....	73
6.1.1.	Corpo principal .....	75
6.1.2.	Difusor .....	75
6.1.3.	Anel de fixação do difusor.....	76
6.1.4.	Suporte do elemento sensor .....	77

6.1.5.	Elemento sensor .....	78
6.1.6.	Tampa .....	79
6.1.7.	Base do radiômetro .....	79
6.1.8.	Nível de bolha .....	80
6.1.9.	Cabo de saída do sinal .....	80
6.2.	Ferramenta especial para fixação e remoção das partes do radiômetro .....	81
6.3.	Anodização das peças do radiômetro .....	82
6.4.	Montagem dos radiômetros.....	82
<b>7.</b>	<b>SISTEMAS DE AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS .....</b>	<b>85</b>
7.1.	Aquisição de dados.....	87
7.1.1.	Transdutores.....	88
7.1.2.	Condicionador de sinal .....	89
7.1.3.	Conversor analógico para digital .....	90
7.1.4.	Microprocessadores .....	<b>93</b>
7.2.	Qualidade dos dados adquiridos.....	95
7.3.	Sistema de aquisição de dados dedicado – DataRad.....	100
7.3.1.	Descrição do DataRad .....	101
7.3.2.	Arquitetura .....	102
7.3.3.	Interface para Transdutores.....	103
7.3.4.	Unidade Microcontrolada .....	104
7.3.5.	Teclado.....	105
7.3.6.	Mostrador digital.....	105
7.3.7.	Interfaces USB .....	106
7.3.8.	Projeto elétrico .....	106
7.3.9.	Programa interno do DataRad.....	107
7.4.	Operação do DataRad.....	108
7.5.	Programa de interface com o usuário .....	108
<b>8.</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO, CALIBRAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>111</b>

8.1.	Sistemas de caracterização .....	112
8.1.1.	Sistema de Caracterização I x V .....	112
8.1.2.	Sistema de Caracterização Lei dos Cossenos .....	114
8.1.3.	Sistema de Caracterização Resposta Espectral .....	117
8.1.4.	Sistema de caracterização por comparação com padrão.....	123
8.2.	Resultados experimentais da fase de desenvolvimento do radiômetro .....	126
8.2.1.	Testes do difusor .....	126
8.2.2.	Medida de transmissão de radiação dos difusores .....	129
8.2.3.	Caracterização do elemento sensor .....	133
8.2.3.1.	Condições de medidas das curvas I x V .....	133
8.2.3.2.	Variação das características I x V em função da área iluminada do elemento sensor .....	134
8.2.4.	Resposta à lei dos cossenos .....	137
8.3.	Resultados experimentais da fase de qualificação do radiômetro.....	140
8.3.1.	Calibração do Radiômetro .....	140
8.3.2.	Efeito da temperatura sobre a sensibilidade dos protótipos.....	146
8.3.3.	Teste do cosseno nos protótipos LAS qualificado.....	149
8.3.4.	Resposta Espectral dos protótipos .....	151
8.3.5.	Efeito da resposta espectr,al nos protótipos.....	152
8.4.	Ensaio Ambientais nos protótipos .....	154
8.5.	Teste de funcionamento em campo.....	158
8.6.	Resultados experimentais para qualificação do DataRad .....	161
<b>9.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>165</b>
<b>10.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>171</b>



# 1. INTRODUÇÃO

O interesse pela medida de radiação solar vem aumentando significativamente a cada dia, sua aplicação é ampla e seu interesse científico vem sendo estimulado por causa principalmente das questões ambientais emergentes. Hoje em dia os dados de radiação solar estão sendo utilizados nas mais diversas áreas do conhecimento humano, como por exemplo, em pesquisas meteorológicas, sensoriamento remoto, na agricultura, no planejamento de edificações (aquecimento e iluminação natural de ambientes) e no setor de energia para o correto dimensionamento de sistema de captação de energia entre outras. Por outro lado, a utilização da energia solar é uma das alternativas para conter as mudanças climáticas devido ao baixo impacto ambiental e, principalmente, por ser um processo de geração de energia sem resíduos como CO e CO<sub>2</sub>. Na agricultura, os dados de radiação solar ou de insolação são utilizados no planejamento das culturas; nos centros de meteorologias os dados de radiação são utilizados em modelos de previsão climática; em sistemas aéreos portuários os sensores de radiação solar são utilizados na determinação da transparência da atmosfera; na indústria os sensores de radiação são utilizados para determinação de absorção de radiação em diversos materiais como, por exemplo, em pinturas de veículos e equipamentos expostos à radiação solar; na construção civil os dados de radiação são importantes na determinação de conforto de ambientes e para fins de proteção radiológica é preciso conhecer a sua componente ultravioleta.

Saber medir a radiação solar, descrever a fonte emissora e seus campos de radiação, assim como entender os processos de interação da radiação com a matéria é importante para utilização desta forma de energia tão abundante e para compreensão dos fenômenos meteorológicos.

A radiação solar é essencial para vida na superfície da Terra, ela causa bem estar, ilumina, aquece, participa da fotossíntese e da síntese de vitamina D. Porém, sua componente ultravioleta causa danos em materiais e efeitos biológicos indesejáveis no organismo humano, principalmente na pele e no aparelho ocular. A exposição inadvertida sem proteção adequada é cancerígena para a pele, leva à depressão

imunológica e ao fotoenvelhecimento, além de causar lesões oculares, tais como ceratoconjuntivite, pterígio e catarata (OKUMO, et al., 2005).

A radiação solar pode ser utilizada pelo homem diretamente como fonte de energia térmica em sistemas de aquecimento de ambiente, aquecimento de água, aquecimento de fluidos, refrigeração, secagem de grãos e outros materiais. Também pode ser convertida diretamente em energia elétrica através do efeito fotovoltaico ou termoelétrico.

A utilização da energia solar para aquecimento de fluídos tem apresentado um forte crescimento nos últimos anos. Os coletores solares são usados principalmente para aquecimento de água em residências ou estabelecimentos comerciais tais como hotéis, clubes e restaurantes com uma significativa redução de consumo das fontes de energia convencionais. Os concentradores solares para conversão térmica destinam-se a aplicações industriais, principalmente para produção de vapor, onde temperaturas mais elevadas são necessárias. O vapor gerado por concentradores solares também pode ser utilizado para gerar energia mecânica ou elétrica através de turbinas e geradores.

Atualmente, a conversão de energia solar em eletricidade através de painéis fotovoltaicos (PV) é uma das formas de aproveitamento da energia solar que mais desperta interesse em pesquisadores e ambientalistas, devido a inúmeras vantagens que este sistema apresenta em relação aos tradicionais meios, embora esta ainda seja a forma de geração de energia elétrica comercial mais cara que existe se comparadas a outras formas de geração energia não convencionais. Nos últimos anos, os custos de capital por kWh instalado de energia fotovoltaica vêm sofrendo uma significativa redução e isto se deve, principalmente, pela queda dos preços na produção de células solares e no aumento de sua eficiência.

Devido a incentivos governamentais em diversos países, a tecnologia energética que apresenta maior crescimento atualmente no mundo é a de sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica. Pequenas instalações fotovoltaicas, até mesmo domésticas, são acopladas a rede elétrica. Elas geram energia elétrica durante o dia, que é vendida às grandes concessionárias gerando créditos que são abatidos na conta do consumidor.

No Brasil, os valores de irradiação solar global anual incidente em qualquer região do seu território na horizontal (1500-2500 kWh/m<sup>2</sup>) são superiores aos da maioria dos países da Europa, como por exemplo, Alemanha (900-1250 kWh/m<sup>2</sup>), França (900-1650 kWh/m<sup>2</sup>) e Espanha (1200-1850 kWh/m<sup>2</sup>), aonde projetos para aproveitamento de recursos de energia solar vem sendo desenvolvidos em grande escala, com fortes incentivos, alguns contando com recursos governamentais (MARTINS, 2008). Apesar do potencial energético solar imenso, no Brasil esta forma de energia tem uma participação incipiente na matriz energética e isso se deve a uma série de fatores, dos quais podemos citar: o baixo custo na produção de energia hidroelétrica comum no país, ausência de política de incentivo, questões sociais e culturais e inexistência de fabricantes nacionais. Mas esta realidade vem mudando nos últimos anos, por exemplo, a conversão de energia solar em energia térmica para aquecimento de água já apresenta um desenvolvimento nacional consolidado e tem tido grande expansão nas regiões sul e sudeste do país. Por outro lado, a geração fotovoltaica ainda é insignificante e restrita ao Norte e Nordeste em comunidades isoladas da rede de energia elétrica.

As perspectivas de utilização da energia solar no Brasil em termos de exploração comercial implicam em vários fatores. Promover o desenvolvimento deste setor energético depende principalmente de informações confiáveis sobre o potencial solar e sobre a sua variabilidade em razão de fatores naturais e antropogênicos (SCHEER, 2002). Normalmente, os dados de irradiação solar fornecidos pelas estações solarimétricas tem como aplicação principal o uso em modelos para previsão meteorológica, por isso estes dados de irradiação solar em geral são obtidos na horizontal. Em princípio, painéis solares e coletores solares, no hemisfério sul, devem ser instalados no plano inclinado, com ângulo igual à latitude do local e voltados para o norte, pois é nesta condição fixa que se obtém a maior captação de energia ao longo do dia. Dados de irradiação no plano inclinado não são comuns, exigindo dos projetistas destes dispositivos, adaptações dos dados disponíveis na horizontal ou realização destas medidas nesta condição.

O ideal para dimensionar um sistema de captação de energia solar para uma determinada área, seja ele térmico ou fotovoltaico, é que sejam feitos estudos do local

através de medidas sistemáticas de radiação solar por certo período de tempo. A radiação solar em uma determinada área específica está intimamente relacionada às condições climáticas da região e às condições de irradiação do local. Fatores como transparência da atmosfera, presença de sombras e alterações climáticas devido a fatores locais como montanhas, lagos e outros, só são detectados se houver um monitoramento contínuo da irradiação solar no local.

No Brasil e na América do Sul, devido a questões econômicas e culturais, existe uma crônica carência de dados de medidas de radiação solar em virtude do reduzido número de estações solarimétricas. Visando diminuir esta carência, o INPE tem desempenhado nos últimos anos atividades de pesquisa e desenvolvimento de produtos com aplicação direta ou indireta nesta área. Entre os projetos do INPE com maior destaque ultimamente, podemos citar o projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais), que teve como principal objetivo implementar uma infra-estrutura física e de recursos humanos destinada à montagem e melhoramento da base de dados de superfície necessária ao levantamento dos recursos de energia solar e eólica no Brasil (MARTINS, 2007). Outro grande projeto relacionado a energia solar gerenciado pelo INPE, como agência regional para América Latina, foi o projeto denominado SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment), que teve como parceiros diretos a Universidade Federal de Santa Catarina/Laboratório de Energia solar (UFSC/LAB SOLAR), o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e o Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL). O projeto conta com financiamento do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e do Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF) (MARTINS, 2005; MARTINS, et al., 2004).

Como produto destes projetos, além da formação de recursos humanos, conhecimento científico, bancos de dados, modelos computacionais e infra-estrutura houve a publicação do primeiro Atlas Brasileiro de Energia Solar em outubro de 1989 (MARTINS, 2005; MARTINS, et al., 2004). Esta publicação foi um marco na história da energia solar no Brasil. Este atlas foi produzido com o objetivo de suprir parte da demanda de informações e promover o desenvolvimento para aproveitamento da energia solar no Brasil, apresentando os valores médios das estimativas do total diário

de irradiação solar fornecidas por modelo computacional de transferência radiativa. Através deste mapa pode-se aferir que a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo país (PEREIRA, et al., 2006).

Embora mapas de radiação solar e modelos computacionais que utilizam dados obtidos por satélites sejam ferramentas de grande importância e úteis para promover o aproveitamento da radiação solar, principalmente no que diz respeito à elaboração de políticas para o setor energético, eles não devem substituir as medidas feitas no solo. As medidas feitas em solo refletem melhor a realidade local e são ideais quando se pretende instalar dispositivos de captação de energia solar.

Para realizar as medidas de radiação solar, tanto por satélite como no solo, são utilizados dispositivos denominados detectores ou sensores, que permitem relacionar a potência de energia solar que chega a uma determinada área com um sinal mensurável, seja ele elétrico, térmico, variação linear de uma barra metálica ou qualquer outro.

Um detector de radiação é genericamente definido como um dispositivo sensível a uma dada radiação, ou seja, o detector recebe e responde a um estímulo ou sinal de radiação. Existe uma grande diversidade de detectores de radiação. Eles podem ser naturais ou desenvolvidos pelo homem para uma dada finalidade. O olho humano é um exemplo de detector natural de radiação eletromagnética (luz visível), porém limitado a uma pequena faixa do espectro da radiação eletromagnética. As células fotoelétricas responsáveis por acender as luzes da iluminação pública nas cidades são um exemplo de detector de radiação eletromagnética desenvolvido pelo homem.

Alguns detectores respondem ao calor produzido quando a radiação é absorvida por uma dada superfície. Em muitos detectores o calor absorvido é convertido em movimento mecânico, em outros o calor é convertido em energia elétrica. Outros detectores geram eletricidade por efeito fotovoltaico em seus terminais e existem também os detectores cujo princípio de funcionamento é a alteração química, como por exemplo, as emulsões fotográficas que convertem a radiação eletromagnética recebida em reações químicas alterando as suas propriedades visuais. Muitos dispositivos são

desenvolvidos para detectar os diversos tipos de radiação ou faixas de radiação. Neste trabalho, abordaremos apenas os sensores que são detectores de radiação eletromagnética desenvolvidos para medida e caracterização da radiação solar na faixa espectral de 300 nm a 1100 nm.

Os transdutores de radiação solar são sensores que convertem diretamente a radiação recebida do Sol em energia elétrica (FRITSCHEN, et al., 1979). Eles podem ser fotovoltaicos ou termoeletricos. Os radiômetros fotovoltaicos são transdutores de radiação solar que tem como elemento sensor uma fotocélula ou um fotodiodo. Eles fornecem dados de irradiância com respostas quase instantâneas. São de utilização simples, fáceis de instalar e transportar e tem como principal vantagem em relação aos radiômetros de termopilhas o baixo custo, por isso eles são muito utilizados na realização de medidas que não exigem alta precisão. Trabalhos com grande consistência científica, de Michalsky, Harrison e Lebaron (1987) apontam que este tipo de instrumento apresenta boas condições de utilização, tanto pelo desempenho apresentado, como pelo baixo custo (MICHALSKY, et al., 1987).

No Brasil, a ausência de uma indústria nacional de sensores de radiação solar faz com que estes sensores sejam importados com custos elevados. Usualmente, os radiômetros fotovoltaicos importados para medidas da radiação solar global e fotossinteticamente ativa utilizam como elemento sensor fotodiodos de silício com área ativa menor que 25 mm<sup>2</sup>. Neste trabalho é proposto o desenvolvimento de radiômetro com tecnologia totalmente nacional, com baixo custo de produção que utiliza como elemento sensor uma célula solar de silício monocristalino especialmente desenvolvida para esta aplicação, com área de 15,5 mm x 15,5 mm, possuindo tipicamente uma corrente de curto-circuito de 70 mA, tensão de circuito aberto de 580 mV e rendimento em torno de 13,5%, com valores máximos encontrados da ordem de 14% (VILELA, et al., 2008).

O desenvolvimento do radiômetro proposto está baseado em “fases de desenvolvimento”, iniciadas pela especificação e concepção do dispositivo até chegar-se ao desenvolvimento de um protótipo cabeça de série para industrialização. Durante as fases de desenvolvimento foram feitas várias revisões formais do projeto com a

elaboração de documentação pertinente a cada uma e também foram confeccionados diversos modelos e protótipos para testes funcionais e ambientais.

Para que o radiômetro tenha valor como um instrumento de medida confiável, ele deve ser submetido a uma calibração por comparação com um padrão que tenha certificação e rastreabilidade. Para os testes e caracterizações dos radiômetros acima mencionados, foram montadas no laboratório de células solares do LAS três sistemas básicos: 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. O método de medida da radiação relativa, também é utilizado para determinar a constante do radiômetro, fator pelo qual a indicação do sensor deve ser multiplicada para se obter o valor mensurado.

Um dos elementos estratégicos no estudo e aproveitamento da energia solar é o domínio da tecnologia de aquisição automática de dados. A grande dificuldade enfrentada para realizar a aquisição de dados de radiação solar em campo é, além dos altos custos dos equipamentos devido à necessidade de importação, a ausência de um dispositivo que seja prático de usar e forneça dados que não exijam grandes manipulações matemáticas para serem utilizados. O DataRad é um dispositivo eletrônico de aquisição e armazenamento de dados, que também foi desenvolvido dentro do contexto desta tese, concebido especialmente para atender a demanda de mercado e ser uma alternativa aos engenheiros e pesquisadores da área de energia solar que necessitem de um sistema para medida e monitoramento de radiação solar em campo. Este dispositivo é um "datalogger" dedicado à medida da radiação solar, mas também possui flexibilidade para monitorar outras grandezas físicas que possam ser de interesse, como temperatura, velocidade do vento, umidade e outras. Possui uma série de características que o torna o instrumento ideal para o levantamento de dados de radiação solar e ambientais em regiões remotas, onde não se dispõem de energia elétrica e sistemas de comunicação. É um instrumento simples de usar, compacto, porém robusto o suficiente para o trabalho em campo, possui grande capacidade de armazenamento de dados, baixo consumo de energia podendo operar com baterias por longos períodos e capacidade de suportar as intempéries de operação em campo. Acoplado a um sistema de alimentação por painéis

solares, este sistema pode operar em campo sem assistência, realizando funções equivalentes a uma pequena plataforma de coleta de dados ambientais.

A metodologia adotada para o desenvolvimento do DataRad foi a mesma adotada para o desenvolvimento do radiômetro fotovoltaico. A concepção do dispositivo foi definida a partir das especificações feitas com auxílio de uma intensa pesquisa de produtos similares no mercado e através de sugestões de uma equipe de especialistas e também estão de acordo com as recomendações da Organização Meteorológica Mundial (OMM) cujos limites das faixas de trabalho dependem das condições climatológicas locais para cada variável (WMO, 2008).

### **1.1. Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um radiômetro para medida da radiação solar global, cujo elemento sensor é uma célula fotovoltaica de silício monocristalino especialmente desenvolvida para esta aplicação. Para isso, foi utilizada de forma pioneira na área acadêmica uma metodologia de desenvolvimento de projetos que é comum na área espacial, empregada pelo INPE no desenvolvimento de satélites e outros dispositivos espaciais. Esta metodologia permitiu gerar um controle rigoroso no processo de desenvolvimento e fabricação dos dispositivos. Através da documentação sistemática e diversas revisões com reuniões técnicas e também da montagem de radiômetros com o objetivo de facilitar o processo de transferência tecnológica para o setor industrial nacional, procuramos desenvolver um produto com qualidade compatível aos importados, porém com custos inferiores.

Um sistema de aquisição de dados, concebido com o propósito de contribuir para o desenvolvimento de soluções autônomas nacionais para o monitoramento da radiação solar e de dados ambientais, capaz de fazer aquisição por longos períodos em campo também faz parte deste trabalho e foi desenvolvido com a mesma metodologia utilizada para o desenvolvimento do radiômetro.



Os centros científicos no Brasil, principalmente institutos e universidades públicas, que representam uma parcela significativa da produção científica e tecnológica nacional enfrentam um antigo dilema. O Brasil é um país que produz ciência de fronteira, mas o setor acadêmico não consegue interagir, em um nível adequado, com o setor produtivo. Muitas das tecnologias de ponta desenvolvidas não são transferidas para os setores produtivos devido a vários fatores, entre eles podemos citar: a falta de tradição, a cultura de importação de tecnologias e a falta de incentivos governamentais. Mas esta realidade vem mudando nos últimos anos. Através da Lei de Inovação Tecnológica de 2004 e dos esforços dos centros de pesquisas e das agências de fomento, hoje se vislumbra um novo cenário (lei federal nº 10.973/2004).

A transferência de tecnologia ao setor produtivo não é uma tarefa trivial, ela não se dá meramente através de uma receita de como fazer, é necessário uma profunda interação entre o setor produtivo e o setor gerador da tecnologia. É a experiência que realmente transfere tecnologia e cria competência tecnológica e este trabalho vem ao encontro desta realidade, pois tem como objetivo criar um modelo de relacionamento entre o setor produtivo e o setor acadêmico que servirá de referência para outros projetos. O sucesso da transferência da tecnologia se deve a interação intensa entre estes dois setores, com intercâmbio constante de informações visando não somente a transferência de conhecimento acadêmico, mas a criação de uma vivência de fusão de duas habilidades, a acadêmica e a produtiva, a capacidade de pensar e a experiência de produzir em escala comercial. Este trabalho certamente contribuirá não somente para reduzir a carência no país de dispositivos para monitoramento de radiação solar e a sua dependência ao mercado internacional, mas terá implicações que nortearão a criação de tecnologias genuinamente nacionais com transferência de tecnologia ao setor produtivo.



## 2. RADIAÇÃO SOLAR E GRANDEZAS RADIOMÉTRICAS

Toda a radiação eletromagnética importante em termos de energia que chega a Terra é proveniente do Sol. Ele é a nossa principal fonte de calor e luz e é hoje, sem sombra de dúvida, uma das alternativas energéticas mais promissoras principalmente quando se consideram as questões de impacto ambiental. Quando se fala em energia é importante salientar que o Sol é responsável direta ou indiretamente por quase todas as outras formas de energia utilizadas pelo homem. É a partir da energia solar que se dá a evaporação, origem dos ciclos das águas que possibilita a geração da hidroeletricidade, o movimento das massas de ar responsável pela energia eólica e por todo o clima no planeta. Petróleo, carvão, gás natural e biomassas têm a sua existência graças à radiação solar responsável pela existência dos vegetais e de toda vida neste planeta.

A radiação proveniente do Sol é responsável pelos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no sistema terra-atmosfera. As alterações que ocorrem no fluxo incidente de radiação solar resultam em diferentes respostas na atmosfera e na superfície da Terra, podendo haver alterações em vários processos meteorológicos e climáticos no planeta (LORENZZETTI, 2009). Assim como a radiação solar afeta o meio, o meio também afeta o campo de radiação. Além de fatores externos como atividades solares e o movimento da Terra, a radiação solar sofre vários processos de interações com a atmosfera e com a superfície terrestre que podem alterar a intensidade e o espectro de radiação.

O Sol fornece anualmente para atmosfera terrestre  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia. Isto corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial de energia neste mesmo período (Grupo de Trabalho de Energia Solar - GTES CEPEL - CRESESB, 2004). O conhecimento dos dados de irradiação solar ou de insolação é de suma importância, considerando o seu potencial de aplicação nas mais diversas áreas do conhecimento humano, mas para uma correta interpretação destes dados precisamos também conhecer um pouco sobre a natureza desta radiação e as relações básicas entre a Terra, ponto onde se desejam captar ou medir a radiação, e o Sol.

Há dois sistemas paralelos de grandezas e unidades relativas à radiação eletromagnética: o sistema radiométrico e o fotométrico. O sistema radiométrico consiste em grandezas e unidades que se aplicam a todas as componentes do espectro da radiação eletromagnética. O sistema fotométrico só se aplica para a radiação visível e se referem à luz tal qual é percebida pelo olho humano, considerando que a sensibilidade do olho varia com a frequência da radiação e está limitada a uma pequena faixa do espectro eletromagnético. Para cada grandeza em um sistema há uma correspondência no outro sistema, com nomes e unidades diferentes. Por exemplo, na fotometria a quantidade de luz que atinge uma superfície é chamada luminância e é medida em lúmen por metro quadrado ( $\text{lm/m}^2$ ). Em radiometria a grandeza correspondente é a irradiância, cuja unidade é  $\text{W/m}^2$  (OKUMO, et al., 2005).

Neste trabalho abordaremos somente o sistema de grandezas radiométricas. Procurou-se utilizar a nomenclatura recomendada pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e para indicar as unidades das grandezas radiométricas foi adotado o Sistema Internacional (SI).

## **2.1. Radiação**

A radiação emitida pelo Sol é uma radiação eletromagnética que se propaga no vácuo em todas as direções. Essa radiação é denominada eletromagnética, por se tratar do transporte de energia por meio da flutuação dos campos elétrico e magnético. Um corpo em qualquer temperatura emite radiações eletromagnéticas e essa radiação se propaga no espaço por meio de ondas, que não necessitam de um meio físico para serem transportadas. Porém, na presença de um meio físico essas ondas podem interagir com ele gerando fenômenos como: reflexão, refração, difração e interferências. Podemos obter muita informação a respeito da atmosfera terrestre, clima e da superfície da Terra a partir do estudo da radiação solar tanto no solo quanto a partir de satélites no espaço.

A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas (variação do campo elétrico  $\mathbf{E}$  e do campo magnético  $\mathbf{B}$ ) é, no vácuo, uma constante e independente do referencial.

Maxwell mostrou que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética, no vácuo, é dada pela Expressão (2.1):

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

Onde  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica do vácuo e  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo. Aplicando-se os valores de  $\epsilon_0$  e de  $\mu_0$  na expressão (2.1), encontra-se a velocidade de propagação no vácuo para qualquer onda eletromagnética e vale  $V = 2,99792458 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ . Uma das conseqüências da Equação (2.1), é que a velocidade  $V$  da radiação eletromagnética não depende da velocidade do objeto que emite a radiação, por exemplo, a velocidade da radiação emitida pelo Sol em relação a um referencial em alta velocidade é a mesma que a de outra fonte estacionária em relação ao mesmo referencial. Esta velocidade é também conhecida como a velocidade da luz no vácuo e é simbolizada pela letra  $c$ . A velocidade da luz é considerada uma constante física fundamental. Na Figura 1, temos uma representação de uma onda eletromagnética.

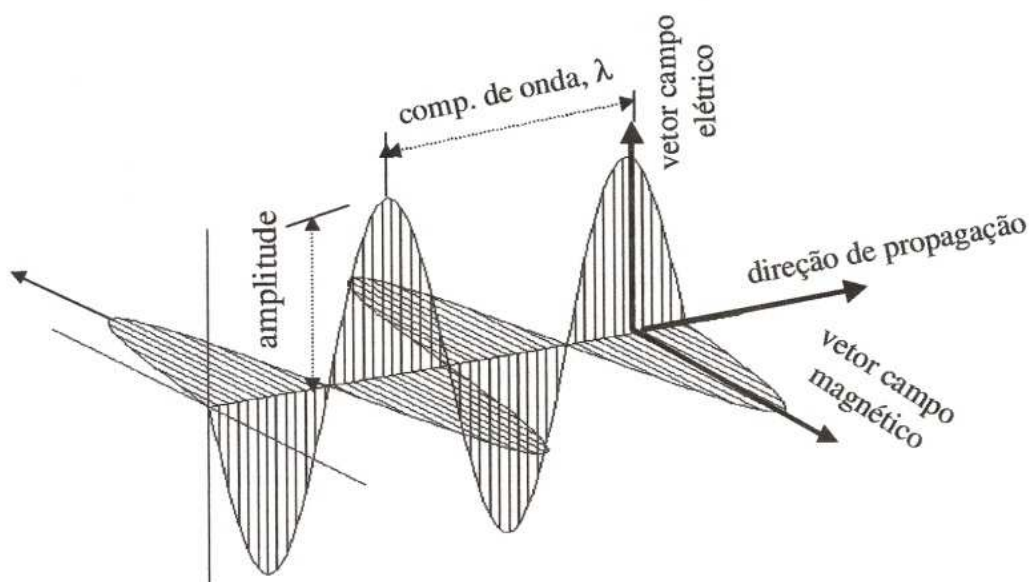


Figura 1 - Representação de uma onda eletromagnética

Na presença de um meio, a velocidade de propagação da radiação eletromagnética depende deste meio e do comprimento de onda da radiação. Esta velocidade é dada por  $v = \frac{c}{n}$ . Onde “c” é a velocidade da luz no vácuo e “n” é o índice de refração do meio, que depende do comprimento de onda.

A direção de oscilação do campo elétrico **E**, juntamente com a direção de propagação definem o plano de polarização. A polarização é importante porque nos permite conhecer o meio por onde a radiação se propaga.

Além dos fenômenos puramente ondulatórios da radiação solar, também ocorrem outros processos como, por exemplo, a interação da radiação com a matéria. Tais processos requerem que a radiação solar tenha características discretas, na forma de pacote de energia ou quanta (plural de quantum).

No caso da radiação solar visível os quanta são denominados de fótons e sua energia é dada por  $E = h\nu$ . Onde E é a energia, h é a constante de Plank e  $\nu$  é a frequência da radiação. Uma das características mais importantes de uma onda eletromagnética é a de poder transportar energia de um ponto para outro. A energia do Sol é transportada para a Terra por ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo na velocidade da luz até atingir a atmosfera terrestre.

Podemos associar um vetor **S** à quantidade de energia transportada por unidade de tempo e por unidade de área de uma onda eletromagnética. Esse vetor **S** é chamado de vetor de Poynting, em homenagem a John Henry Poynting (1852 - 1914) que foi o primeiro físico a definir as propriedades deste vetor (HALLIDAY, et al., 1984). A Equação (2.2) nos permite calcular este vetor.

$$\bar{S} = \frac{1}{\mu} \bar{E} \times \bar{B} \quad (2.2)$$

No sistema internacional,  $\bar{S}$  se expressa em  $W/m^2$ . A direção e o sentido de  $\bar{S}$  coincidem com a direção de propagação da energia. Os vetores  $\bar{E}$  e  $\bar{B}$  representam os campos elétricos e magnéticos no ponto considerado (HALLIDAY, et al., 1984).

## 2.2. Radiação emitida pelo Sol

Por critérios fundamentados no modelo ondulatório, a radiação eletromagnética emitida pelo Sol pode ser discriminada em diferentes comprimentos de onda ( $\lambda$ ) e cada comprimento de onda é emitido pelo Sol com certa intensidade. Dada à temperatura da superfície do Sol ser da ordem de 5.770 K, o espectro solar tem sua maior intensidade na região do visível.

Graças às intensas pesquisas realizadas ao longo de anos, hoje temos um mapeamento completo do espectro solar nas mais diversas situações. Foram realizadas medidas do espectro solar em várias altitudes, acima da camada de atmosfera e no solo, incluindo medidas extra-atmosféricas realizadas por foguetes. De acordo com o vocabulário da *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE) a radiação eletromagnética solar é dividida em diversas faixas de comprimentos de onda conforme mostrado pela Tabela 1. Esta divisão é meramente didática e existem diferenças entre as várias publicações sobre como são definidos exatamente os limites onde acaba uma faixa e começa outra.

O espectro solar é predominantemente térmico, tendo 99% dos comprimentos de onda da radiação solar entre 220 nm a 4.000 nm, sendo esta região denominada de ondas curtas (PALZ, 1981). Acima de 4000 nm são denominada ondas longas. Do total da energia, as regiões do visível e o infravermelho próximo contêm a maior fração da energia solar. 46% da radiação está entre 400 nm a 700 nm, que é o visível, 9% encontram-se na faixa do ultravioleta e 45% na faixa do infravermelho, sendo que na faixa do infravermelho a maior concentração está no infravermelho próximo, compreendido entre os comprimentos de onda de 750 nm a 4.000 nm, No infravermelho distante, de 4.000 nm a 10.000 nm, a contribuição no espectro solar não é significativa.

A Figura 2 mostra um gráfico típico do espectro solar onde se pode observar a curva teórica de um corpo negro na temperatura equivalente a do Sol, a curva do espectro solar acima da atmosfera ou extraterrestre e a curva do espectro solar abaixo da atmosfera, ao nível do mar, com seus respectivos picos de absorção pela atmosfera. Os picos de absorção na curva ocorrem por causa da seletividade de determinados

componentes da atmosfera, para dadas bandas do espectro. A própria natureza do componente determina esta seletividade e os mais importantes são: o vapor d'água, o oxigênio, o ozônio e o dióxido de carbono.

Tabela 1 - Divisão da radiação eletromagnética (segundo a CIE)

<b>Comprimento de onda</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Faixa de comprimento de onda (nm)</b>
Ultravioleta extremo	EUV	1 - 100
Vácuo ultravioleta	VUV	100 - 200
Ultravioleta distante	UV-C	200 - 280
Ultravioleta médio	UV-B	280 - 315
Ultravioleta próximo	UV-A	315 - 400
Visível	VIS	400 - 780
Infravermelho próximo	IR-A	780 - 1400
Infravermelho médio	IR-B	1.400 - 3.000
Infravermelho distante	IR-C	3.000 - 10 <sup>6</sup>



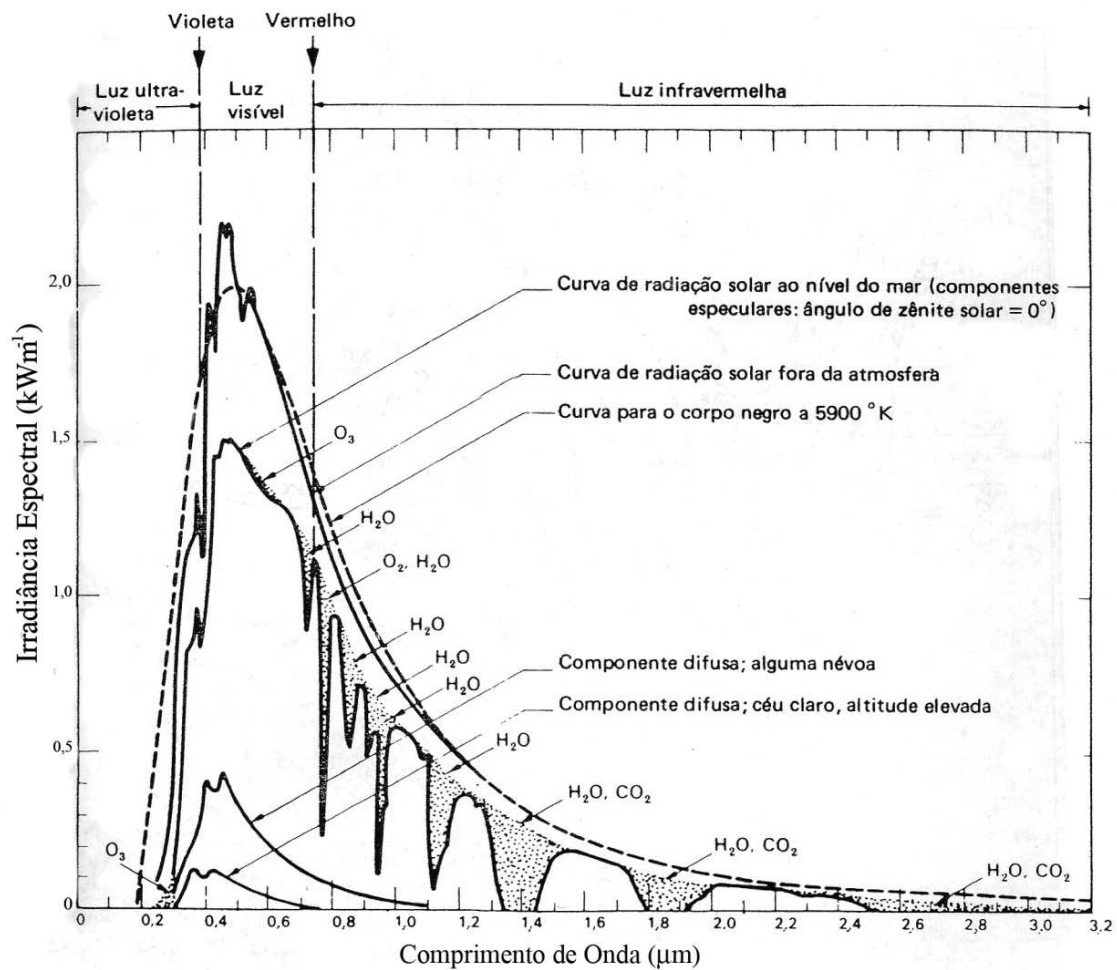


Figura 2 - Curva espectral da radiação solar. Fonte: WOLFGANG PALZ (1981).

### 2.3. Localização do disco solar

A determinação da posição do Sol é utilizada em solarimetria para o cálculo da intensidade da radiação solar que chega a um determinado ponto do globo terrestre e é também muito importante para a calibração dos radiômetros solares, principalmente os radiômetros para medida de radiação global, pois esta parcela de irradiação depende do valor do cosseno do ângulo zenital solar (HAAG, 2007).

A radiação solar que atinge a Terra é colimada e a sua origem é uma fonte de radiação pontual. A órbita da Terra ao redor do Sol é elíptica, mas muito próxima de um círculo, a excentricidade desta órbita é tal que a distância entre a Terra e o Sol varia apenas

1,7%. O plano que contém a órbita da Terra ao redor do Sol é denominado plano da eclíptica e a distância média entre o centro da Terra e o centro do Sol é de  $\bar{d} = 149.597.870 \text{ km} \pm 2 \text{ km}$  ou 1 UA (Unidade astronômica). O Sol possui dois movimentos aparentes em relação a um ponto na superfície da Terra, sendo um movimento de leste para oeste decorrente da rotação, outro de norte para o sul devido ao movimento de translação. Na Figura 3, temos uma ilustração da órbita da terra (PALTRIDGE, et al., 1976).

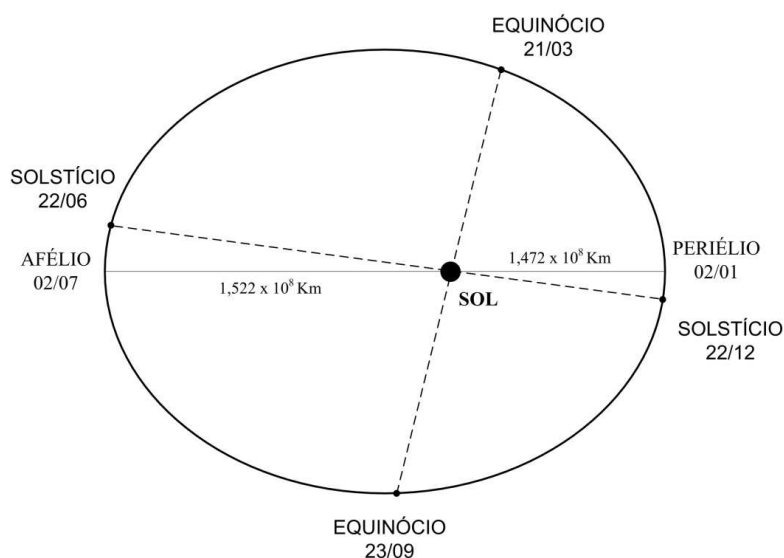


Figura 3 - Ilustração da órbita da terra

Durante os equinócios (21/03 e 23/09), quando o Sol está sobre o plano do equador, o fotoperíodo será de 12 horas em todos os locais da Terra. No solstício de verão para o hemisfério sul (22/12) o fotoperíodo é maior que no hemisfério norte. No solstício de inverno (23/06) a situação inverte e teremos no hemisfério norte um fotoperíodo maior que no hemisfério sul.

## 2.4. Radiometria

Radiometria pode ser definida como a técnica de quantificar a medida da radiação eletromagnética. O início da radiometria como ciência quantitativa é atribuída a Henrich Hertz em 1887 (MCCLUNEY, 1994). A radiação solar é uma radiação eletromagnética

que se propaga pelo espaço em todas as direções e sua medida tem grande importância devido a inúmeras aplicações. Normalmente, os dados de radiação solar são fornecidos pelos serviços meteorológicos através da coleta em estações solarimétricas distribuídas por diversas áreas em diversos países. Estes serviços geralmente oferecem dados de alta precisão e os seus aparelhos de medida são periodicamente calibrados. No Brasil, os sensores de radiação solar são importados e de alto custo e por não termos serviços de calibração, a calibração periódica destes equipamentos é feita em países que oferecem esse tipo de serviço. Os instrumentos utilizados para medir a radiação solar são genericamente denominados de radiômetros. A seguir apresentamos alguns conceitos básicos relacionados à radiometria e as principais grandezas radiométricas, partindo-se da energia radiante ou eletromagnética. De acordo com Paltridge e Platt (PALTRIDGE, et al., 1976) a nomenclatura dos termos associados à radiação atmosférica resultou originalmente de distintas disciplinas. Dessa forma, alguns termos podem ter diferentes significados dependendo do autor (PLANA-FATTORI, et al., 1996). Neste trabalho, procuramos adotar a nomenclatura recomendada pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

#### **2.4.1. Constante solar**

A irradiância solar integrada em todos os comprimentos de onda que compõem o espectro solar que chega ao topo da atmosfera terrestre recebeu a denominação de constante solar  $E_0$  e tem grande aplicação em modelos teóricos de previsão de irradiância no solo e no dimensionamento de sistemas de potência em satélites.

No início do século XX, a determinação precisa da constante solar despertou grande interesse na comunidade científica e motivou os trabalhos de pioneiros no campo da radiação solar como Langley e Abbott (HOYT, et al., 1997). Com o monitoramento sistemático durante anos da radiação solar, feita fora da atmosfera terrestre, realizada por experimentos a bordo de vários satélites, pôde-se obter dados confiáveis sobre a constante solar e constatou-se que a radiação solar possuía variações ao longo do tempo e que o termo “constante solar ” não era então adequado para tal valor. Atualmente, o

termo constante solar melhor se aplica quando se deseja referir ao valor médio da irradiância solar extraterrestre total – TSI (Total Solar Irradiance) ao longo de vários anos (SCHMIDTKE, 2006). Estudos recentes mostram que os valores de TSI estão entre 1363 e 1368 W/m<sup>2</sup> com um valor médio de 1366,1 W/m<sup>2</sup>. A ASTM (American Society for Testing and Materials) padronizou a constante solar igual a 1366,1 W/m<sup>2</sup> (ASTM 2000).

#### **2.4.2. Declinação solar**

O planeta Terra, em seu movimento anual ao redor do Sol, descreve uma trajetória elíptica em um plano inclinado de aproximadamente 23,5° em relação ao plano equatorial. Essa inclinação é responsável pela variação da elevação do Sol no horizonte em relação à mesma hora, ao longo dos dias. A declinação solar ( $\delta$ ) é o ângulo de vértice no centro da Terra, formado pela semi-reta determinada pela direção do Sol e o plano do equador neste ponto. Por convenção, é positivo a partir do equinócio de março e durante os meses seguintes até o equinócio de setembro (MARTINAZZO, 2004). Este ângulo varia de acordo com o dia do ano dentro dos limites:

$$-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$$

A soma da declinação com a latitude local determina a trajetória do movimento aparente do Sol para um determinado dia em uma dada localidade na Terra (MAGGI, 2007).

#### **2.5. Radiação solar na superfície terrestre**

A radiação solar ao ser transmitida do espaço extraterrestre para a atmosfera da Terra sofre interações com as partículas da atmosfera através dos seguintes fenômenos: absorção, difusão (seletiva e não seletiva) e reflexão (MAGGI, 2007). Com modificações nas condições de absorção e reflexão da atmosfera, teremos variações no fluxo de energia e também na composição espectral da radiação solar em períodos diurnos, mensais e estacionais. Para radiação solar medida na superfície da Terra,

próximo ao nível do mar, as variações serão tanto mais efetivas quanto maior for a massa ótica (espessura da atmosfera) atravessada pelo feixe de radiação.

O ozônio presente na alta atmosfera (ionosfera) absorve as radiações que tem comprimentos de onda inferiores a 300 nm (ultravioleta). Estudos do espectro mostram que o ozônio também tem bandas de absorção no infravermelho nos comprimentos de onda próximo de 3.000 nm, 6.000 nm, 8.000 nm e 10.000 nm. A absorção total, percentual em relação ao espectro solar desta componente é em média de 1%.

A atmosfera é composta por um grupo de gases com concentração praticamente constante denominados gases permanentes e um grupo de gases com concentração variável. Praticamente 99% da atmosfera seca é constituída por  $N_2$  e  $O_2$ . Os gases permanentes e poeiras presentes na atmosfera não atuam nos processos de absorção e emissão de radiação. No caso de vulcões e poluição industrial, a absorção pode atingir valores da ordem de 20% a 30%, principalmente no faixa do infravermelho. O gás carbônico ( $CO_2$ ) em particular, possui absorção seletiva no infravermelho para os comprimentos de onda 1.500 nm, 2.800 nm, 4.300 nm e 15.000 nm. O vapor d'água tem uma proporção de 2,0% na constituição gasosa da atmosfera e apresenta vários pontos de absorção de radiação no espectro solar. Embora tendo uma contribuição relativamente baixa na composição da atmosfera, o vapor d'água é um dos mais importantes absorventes. A absorção se processa principalmente na região do infravermelho entre 800 nm e 2.700 nm; 5.500 nm e 7.000 nm e 15.000 nm para cima, sendo em média de 15%. Como o vapor d'água situa-se nas baixas regiões da troposfera, as perdas podem sofrer variações dependendo da latitude, estações do ano e da espessura da atmosfera considerada.

Um dos processos mais importantes da interação da radiação solar com as partículas da atmosfera é a difusão que a radiação sofre. Neste caso, parte da radiação dirige-se para a Terra e parte retorna ao espaço. A difusão pode ser seletiva ou não seletiva. A difusão seletiva ocorre quando o diâmetro médio das partículas difusoras for da ordem de um décimo do comprimento de onda incidente. Este tipo de radiação é responsável pela cor azulada do céu, pois difunde mais intensamente comprimentos de onda menores do

espectro solar. Os gases constituintes do ar atmosférico são os principais responsáveis por este fenômeno. A difusão não seletiva ocorre quando o diâmetro médio das partículas for igual ou maior que o comprimento de onda da radiação incidente. Neste caso, a radiação incidente apenas muda de direção conservando todas as suas características. Os principais responsáveis por este fenômeno são as nuvens, poeiras e aerossóis.

Medidas de radiação solar realizadas em várias condições, tais como diferentes altitudes, posições geográficas e horárias, mostram que, em geral, são dependentes da espessura da camada atmosférica “massa ar” (AM), do ângulo zenital do Sol, distância Terra e Sol e das condições atmosféricas e meteorológicas (KREIDER, 1981). Na Figura 4, podemos observar um esquema que ilustra o conceito de coeficiente denominado “Air Mass” (AM). Este conceito refere-se ao caminho que a radiação solar atravessa ao incidir na superfície terrestre em relação ao ângulo zênite.

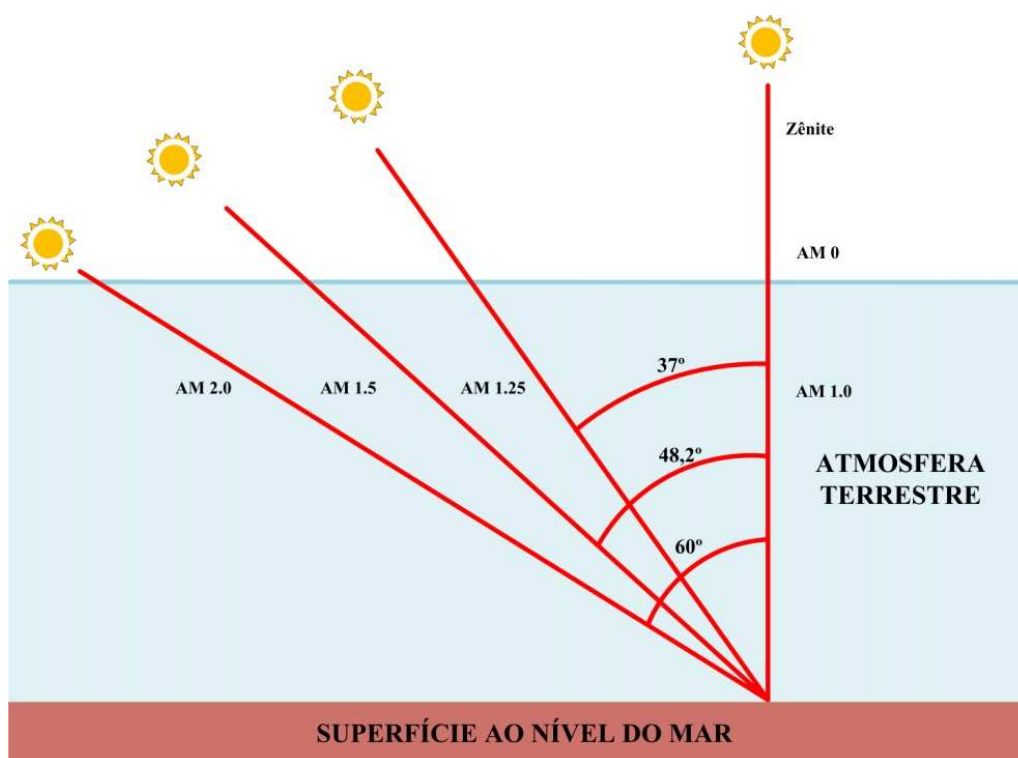


Figura 4 - Ilustração do coeficiente “Air Mass” (AM)

## 2.6. Algumas definições para a determinação da radiação solar

A radiação solar medida na superfície terrestre é constituída por uma componente direta e por uma componente difusa. A soma das duas componentes é denominada de radiação global (KREIDER, 1981). Para a determinação da radiação solar direta ou mesmo a radiação global que chega a um ponto na superfície da Terra é necessário conhecer algumas definições importantes que relacionam o ponto e a fonte de radiação incidente. Esta relação pode ser escrita em termos de alguns ângulos e a relação geométrica entre o ponto, num plano na superfície da Terra, e o vetor da radiação direta incidente neste ponto para qualquer orientação relativa da Terra em qualquer instante (MARTINAZZO, 2004). Na Figura 5, é mostrada a relação entre o deslocamento do Sol e alguns destes ângulos.

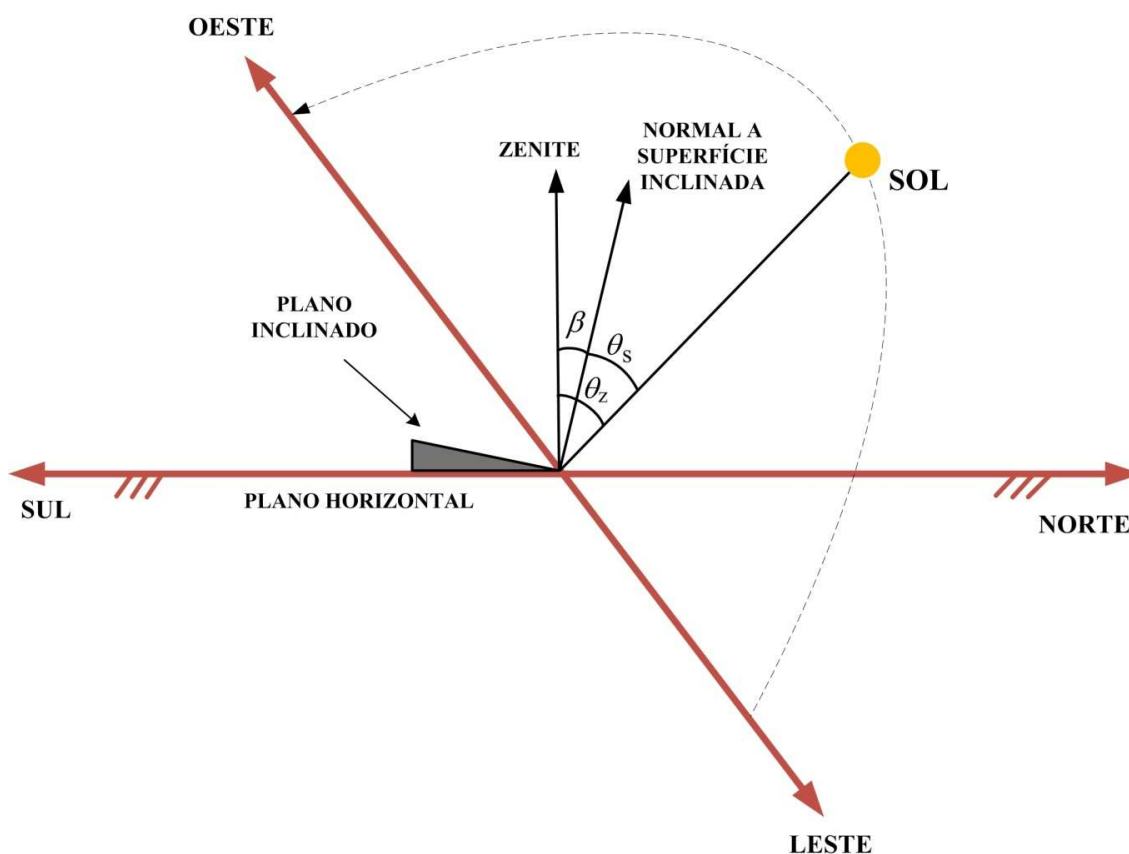


Figura 5 - Relações geométricas para determinação da radiação solar direta em um plano inclinado.

Os principais ângulos utilizados nos cálculos de grandezas da radiação solar são:

$\phi$  - Ângulo de Latitude – É o ângulo que determina a posição de um ponto entre o extremo norte ou sul e a linha do equador. Por convenção, consideram-se os ângulos entre a linha do equador e o pólo norte como positivo.

$$-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$$

$\beta$  - Ângulo de Inclinação – É o ângulo formado pela normal de um plano inclinado e a normal do plano horizontal.

$$0^\circ \leq \beta < 180^\circ$$

$\gamma$  - Ângulo Azimutal – É o ângulo da projeção normal de uma superfície no plano horizontal em relação ao meridiano local.

$\omega$  - Ângulo Horário – É o ângulo formado pela projeção normal de uma superfície horizontal e o pólo celeste. Vale  $15^\circ$  para cada hora pela manhã e soma  $15^\circ$  a cada hora da tarde e vale  $0^\circ$  ao meio dia solar verdadeiro.

$\theta_s$  - Ângulo de Incidência – É o ângulo formado pela projeção da radiação solar direta sobre uma superfície e a normal desta superfície.

$\theta_z$  - Ângulo de Zênite – É o ângulo formado entre a projeção da radiação solar em relação à normal do plano horizontal.

$\alpha_s$  - Ângulo solar de Altitude – É o complemento do ângulo de zênite – é o ângulo entre a linha horizontal e a linha do Sol.

$\Upsilon$  - Ângulo de Azimute solar – É o ângulo formado pela linha que indica o pólo norte e a projeção da radiação solar direta sobre o plano horizontal. A declinação solar pode ser calculada pela Equação de Cooper (1969) (MARTINAZZO, 2004). Onde  $n$  é o número de dias do ano.

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen} \left( \frac{360}{365} (n + 284) \right) \quad (2.9)$$



### 3. SENSORES DE RADIAÇÃO

Um sensor de radiação é geralmente definido como um dispositivo que recebe e responde com sinal elétrico a um estímulo de radiação. Um transdutor, por sua vez, é um dispositivo que converte um tipo de energia em outra, não necessariamente em um sinal elétrico (MCCLUNEY, 1994). São inúmeras as aplicações de sensores de radiação, que podem ser utilizados como dispositivos acionadores de processos automáticos, indicadores de radiação, dispositivos de medidas de radiação e em muitas outras aplicações. Neste capítulo, discutiremos apenas os sensores utilizados para medida da radiação solar.

Na descrição da resposta de um sensor de radiação utilizado para medida de radiação solar, estamos interessados na proporção entre o sinal de saída e o fluxo de radiação incidente sobre o sensor. Para um bom sensor, esta proporção chamada de responsividade ou sensibilidade é constante sobre todo o intervalo do nível de radiação incidente. Para estes sensores são ditos que tem uma boa linearidade. Isto significa que eles possuem uma resposta linear (plana) para o fluxo incidente de radiação. Para tais sensores, podemos utilizar a seguinte relação entre a radiação incidente e o sinal elétrico de saída (MCCLUNEY, 1994):

$$S = K\Phi \quad (3.1)$$

Onde:  $S$  é o sinal de saída;  $k$  é a constante de calibração do sensor e  $\Phi$  é o fluxo da radiação incidente.

Se a saída do sensor é dada em volts, proporcional para o fluxo incidente de radiação e o fluxo de radiação é medido em Watt, então  $K$  tem unidade em V/W. Se a saída do sensor for uma corrente,  $K$  terá unidades de A/W.

A palavra sinal é utilizada unicamente para a parte da resposta do sensor que corresponde unicamente (monotonicamente) com a radiação incidente do sensor. Desta forma, não é correto falar que o ruído na saída do sensor também é um sinal, mas sim que o sinal na saída do sensor contém o ruído. Muitos sensores têm em sua saída um

sinal diferente de zero quando o fluxo incidente de radiação é zero. Esta saída é denominada de saída de escuro ou sinal de escuro. Este sinal de escuro pode ter a mesma polaridade do sinal devido ao fluxo de radiação ou ter sinal contrário. Também devemos ter o cuidado de não chamar a saída de escuro de sinal, pois esta não é parte do sinal, mas uma saída espúria que não está relacionada ao sinal verdadeiro devido à radiação incidente (WAGNER, et al., 1992).

Se  $S_0$  é saída de escuro, então re-escrevendo a expressão (3.1) temos:

$$S - S_0 = K\Phi \quad (3.2)$$

$$S = K\Phi + S_0 \quad (3.3)$$

Embora o ideal de um sensor seja ter uma resposta estritamente linear relacionada com o fluxo de radiação incidente, na prática muitos sensores possuem respostas não lineares. Respostas que dependem de parâmetros tais como temperatura, comprimento de onda do fluxo incidente, magnitude do sinal incidente e outros. Conseqüentemente, é mais adequado termos uma expressão matemática que represente a dependência da resposta do sensor em relação ao fluxo incidente de radiação e todos os outros parâmetros variáveis envolvidos.

Seja então a resposta do sensor representada por  $R(\Phi, x, y, z, \dots)$ , onde  $\Phi$  é o fluxo incidente de radiação e  $x, y, z$  os outros parâmetros variáveis adicionais presentes no sinal. Tendo unidades volts, amperes, coulomb ou outra por Watt (ou Joule) para o fluxo de radiação incidente, a equação do sensor então fica:

$$S = K(\Phi, x, y, z, \dots) + S_0 \quad (3.4)$$

Sensores geralmente têm uma resposta variável em função da superfície sensível tais como índice de reflexão, impedâncias internas devido a não uniformidade da radiação incidente na superfície, entre outros, e isso pode ser considerado no desenho estrutural do sensor. Por exemplo, uma maneira de resolver muitos destes problemas é sobrepor a

superfície sensível do dispositivo com um difusor, uma esfera integradora ou qualquer outro componente óptico que espalhe uniformemente a radiação incidente sobre toda a área sensível do dispositivo.

Em muitos casos de uso de sensores de radiação, o fluxo incidente de radiação pode variar a sua intensidade numa faixa muito larga e é necessária a utilização de circuitos eletrônicos automáticos para controle de ganho. O uso destes circuitos muitas vezes não é desejável ou é economicamente inviável, então nestes casos pode ser preferível o uso um sensor que tenha uma resposta não linear. Por exemplo, a radiação solar global sofre diariamente variações significativas. Pelo menos duas vezes durante as transições entre o dia a noite, ela pode variar algo em torno de sete a onze ordens de grandeza em sua intensidade. Para uma medida automática desta radiação durante este período de transição é preferível o uso de um sensor que tenha uma resposta logarítmica para o fluxo incidente. Deste modo, não requer nenhum mecanismo de controle de ganho nem circuitos eletrônicos complexos (DEFELICE, 1998).

Na maioria das aplicações, cuidados devem ser tomados para determinar qualquer não linearidade na resposta de um sensor que se pretende usar para medir determinada faixa de radiação. Uma alternativa para se acomodar uma larga faixa do nível do fluxo de radiação em um sensor que tenha uma faixa de resposta limitada é utilizar um filtro de densidade neutra (filtro com transmitância espectral plana sobre a faixa espectral de radiação a ser medida) como atenuador ou quaisquer outros meios que sejam precisos para atenuar o fluxo de radiação incidente sobre o sensor, sem que ocorram alterações na distribuição espectral ou no comportamento temporal da radiação incidente. É importante que a radiação incidente seja atenuada uniformemente ao longo de todo o espectro que esta sendo medido e que a atenuação seja adequada para que caiba dentro dos limites de operação do sensor, limites estes onde o sensor tem uma resposta linear.

Muitos sensores também têm uma resposta dependente com o ângulo de incidência da radiação. Sendo  $\theta$  o ângulo de incidência da radiação, a função da dependência do ângulo da radiação incidente pode ser mostrada explicitamente como  $R(\Phi, \theta, x, y, z, \dots)$ . Onde  $\Phi$  é o fluxo da radiação incidente.

A radiação que atinge uma superfície plana através de um feixe colimado decresce com o cosseno do ângulo de incidência. Por esta razão, o fluxo recebido por uma superfície sensível de um sensor ideal, sem difusor, tem uma resposta proporcional ao cosseno do ângulo de incidência. Por exemplo, a radiação solar que chega à superfície da Terra obedece à lei dos cossenos ou lei de Lambert. A lei dos cossenos estabelece que a radiação que incide sobre uma superfície varia de acordo com o cosseno do ângulo.

Para que o sensor indique corretamente a intensidade da radiação que está sendo incidida sobre ele é fundamental que obedeça à lei dos cossenos, se não obedecer é necessário que haja um mecanismo de correção dos valores medidos de radiação. A resposta do sensor considerando a dependência do ângulo de incidência pode ser expressa por:

$$S = K(\Phi, \cos(\theta), x, y, z, \dots) \Phi + S_0 \quad (3.5)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo de incidência da radiação no sensor.

A dependência da resposta do sensor com o comprimento de onda tem especial interesse, pois como já vimos a radiação solar é composta por uma larga faixa espectral. Esta dependência pode ser expressa genericamente na resposta do sensor como:

$$S(\lambda) = K(\lambda, \Phi, \cos(\theta), x, y, z, \dots) \Phi + S_0 \quad (3.6)$$

Onde  $\lambda$  é o comprimento de onda.

Para uma análise mais detalhada do comportamento do sensor em relação à dependência do comprimento de onda da radiação incidente, vamos considerar o nível do fluxo de radiação incidente constante sobre toda a faixa espectral que iremos trabalhar. Consideraremos também que o sensor tem uma resposta linear para uma faixa larga de intensidades de radiação incidente e é independente a todas as outras variáveis tais como temperatura, transmitância, etc. Para a nossa análise vamos considerar também

que a radiação é normal à superfície sensível, ou seja, que  $\theta = 0$ . Então neste caso,  $R$  é uma função que depende somente do comprimento de onda  $R(\lambda)$ .

Se  $E_\lambda(\lambda)$  é o espectro de radiação incidente sobre a área sensível do sensor  $A$ , então o sinal do sensor pode ser expresso por:

$$S = A \int_0^\infty E_\lambda(\lambda)R(\lambda)d\lambda + S_0 \quad (3.7)$$

Se igualmente, o fluxo espectral ou a resposta espectral do sensor é zero fora de um determinado intervalo de comprimento de onda os limites da integral em (3.7) podem ser restritos a este intervalo. Para calcularmos a integral, necessitamos conhecer a distribuição espectral da resposta do sensor, comumente denominado de resposta espectral do sensor  $R(\lambda)$  e conhecer também a distribuição espectral da Irradiância incidente  $E_\lambda(\lambda)$ . Se houver também sobre a superfície sensível do sensor uma janela ótica ou um sistema ótico qualquer, é necessário conhecer também a transmitância espectral desta janela ou do sistema ótico e incluir na integral (3.7).

$$S = A \int_0^\infty E_\lambda(\lambda)T(\lambda)R(\lambda)d\lambda + S_0 \quad (3.8)$$

Existem quatro casos especiais a serem considerados em um sistema de medidas com um sensor de radiação [11]. O primeiro caso é onde o sensor tem uma resposta plana sobre toda a faixa espectral a ser medida  $[\lambda_1, \lambda_2]$ . O fluxo incidente sobre o sensor tem uma resposta espectral tal que  $R(\lambda) = R_0$  para a faixa de espectro entre  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  e  $R(\lambda) = 0$  fora deste intervalo. Para  $T(\lambda) = 1$  teremos:

$$S = AR \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda(\lambda)d\lambda + S_0 \quad (3.9)$$

Então a equação pode ser resolvida para a irradiância incidente  $E_\lambda$ :

$$E_\lambda = \frac{1}{AR_0} (S - S_0) + K(S - S_0) \quad (3.10)$$

Onde  $K = 1/(AR_0)$  é a constante de calibração usada para o sensor com uma radiação incidente normal média.

Alguns fabricantes de sensores para radiação solar oferecem radiômetros com resposta espectral quase constante para uma faixa espectral específica  $[\lambda_1, \lambda_2]$ . Em muitos casos esta faixa cobre a maior parte do espectro solar. Estes sensores têm essencialmente resposta zero fora da faixa de comprimento de onda em que são especificados (DEFELICE, 1998).

O segundo caso especial é aquele cujo sensor tem uma resposta espectral não linear (não plana), porém a maior parte da irradiância incidente é constante dentro da faixa espectral da resposta do sensor.

$$S = AE_e \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda d\lambda + S_0 \quad (3.11)$$

$$S = AE_e R + S_0 \quad (3.12)$$

$$E_e = \frac{S - S_0}{AR} \quad (3.13)$$

Poucas fontes de fluxo de radiação são constantes para uma faixa de comprimento de onda significativa, assim a Equação (3.13) é incluída aqui não por causa de seu valor prático, mas sim como um complemento da análise teórica que estamos fazendo.

O terceiro caso ocorre quando o sensor tem uma resposta sobre uma região do espectro de radiação muito estreito, onde podemos considerar a incidência de radiação

praticamente constante. Neste caso, temos sobre a superfície sensível do elemento sensor um filtro passa banda, com uma faixa espectral de passagem bem estreita ou é utilizado um monocromador entre o sensor e a fonte de radiação. A faixa de comprimento de onda é tão estreita tal que podemos dizer que o espectro da fonte é constante dentro desta faixa.

O quarto caso ocorre quando a distribuição espectral do fluxo de radiação incidente no sensor não é uniforme na forma de sua distribuição, mas o seu formato nunca varia. Neste caso, a não uniformidade da resposta do sensor irá gerar na saída do mesmo um sinal que será proporcional à integral ou à média do fluxo de radiação da fonte. É possível calibrar tal sensor para determinar a partir de seu sinal de saída uma integral do fluxo total de radiação, até mesmo para uma fonte cuja intensidade do fluxo varia, contanto que a distribuição espectral relativa ao fluxo incidente de radiação permaneça constante.

Se a forma de distribuição não é constante, teremos um erro de calibração significativo devido a variação do formato da distribuição espectral. Neste caso, é mais adequado o uso de um sensor que tenha uma resposta linear sobre toda a faixa espectral em que a radiação esta sendo medida.

Outro parâmetro que afeta a resposta ou sensibilidade de um sensor de radiação é a temperatura. Em alguns sensores a temperatura também afeta a resposta espectral. Nos fotodiodos de silício, por exemplo, sabe-se que a sua sensibilidade altera modestamente com a temperatura para o intervalo espectral entre 500 nm a 900 nm, abaixo de 500 nm sofre uma alteração de  $-0.4\%/C$  e aumenta significativamente acima de 900 nm chegando a  $1,5\%/C$ . Muitos dispositivos de precisão utilizados para medida de radiação solar fazem uso de sistemas de compensação térmica evitando assim efeitos indesejáveis.

### 3.1. Classificações dos sensores de radiação

Os sensores de radiação eletromagnética podem ser classificados de acordo com o princípio físico ou mecânico envolvido na conversão do fluxo de radiação em um sinal mensurável (MCCLUNEY, 1994). Também podemos classificar os sensores de radiação conforme a sua aplicação. Na medida de radiação solar os diversos tipos e propriedades dos sensores empregados receberam toda uma nomenclatura e classificação especial (DEFELICE, 1998). Abordaremos aqui inicialmente uma classificação geral dos tipos de sensores e em seguida de forma resumida, sem entrar nos detalhes de construção, os sensores e detectores de radiação solar e suas principais aplicações.

### 3.2. Sensores semicondutores

Os sensores semicondutores, também conhecidos como sensores de estado sólido, são análogos aos sensores fotoemissivos. A diferença essencial é que usam um meio sólido semicondutor que absorve a radiação incidente e gera um sinal elétrico proporcional.

Os foto-sensores semicondutores mais utilizados atualmente são os fotodiodos, as fotocélulas e os foto-resistores que tem resposta espectral nas regiões do ultravioleta, visível e infravermelho próximo. Estes dispositivos não operam no infravermelho médio ou distante, pois os fótons neste comprimento de onda não têm energia suficiente para gerar elétrons-lacunas. Nestes dispositivos, o mecanismo fundamental de conversão da radiação incidente em corrente elétrica é a geração de pares de elétron-lacuna por absorção de fótons. O processo de absorção de radiação provoca a diminuição da intensidade da radiação à medida que ela penetra no material. Na Equação (3.14), temos a relação da intensidade em função da penetração no material (RESENDE, 2004).

$$I(X) = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (3,14)$$

Onde:  $I(x)$  – intensidade da radiação dentro do material



$I_0$  - intensidade da radiação na superfície

$\alpha$  – coeficiente de absorção do material no comprimento de onda da radiação

Como a intensidade varia exponencialmente com a distância, para que todos os fótons sejam absorvidos é preciso que a espessura do material seja muito maior que  $\alpha^{-1}$ . A Figura 6 mostra a variação do coeficiente de absorção com o comprimento de onda para vários semicondutores. Normalmente, utilizam-se materiais com  $\alpha \sim 10^6 \text{ m}^{-1}$ . Nesta condição, vê-se pelo gráfico que os materiais mais adequados para sensores de radiação na região do visível e do infravermelho próximo são Si e GaAs.

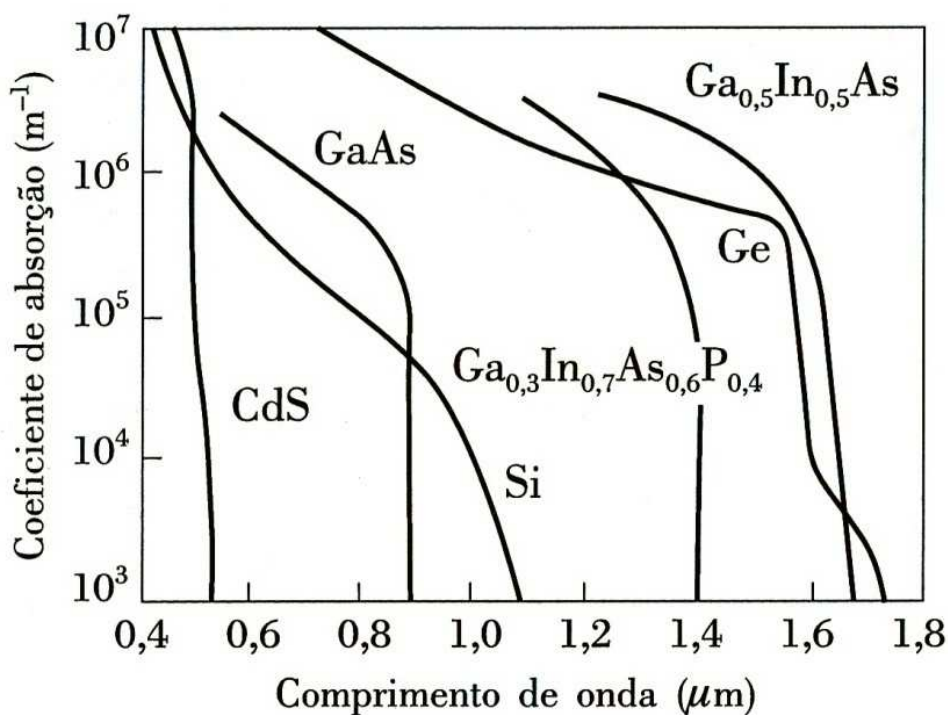


Figura 6 - Curvas de variação do coeficiente de absorção de vários materiais. Fonte: RESENDE (2004).

Os sensores semicondutores utilizados para medida de radiação solar mais comum são os fotodiodos e as fotocélulas de silício monocristalino. Nos fotodiodos, o sinal elétrico proporcional à radiação incidente é produzido pela geração de pares elétrons - lacunas causadas pela absorção de fótons na região de depleção de uma junção  $pn$ . A detecção de radiação por um fotodiodo pode ser feita em dois modos distintos de operação: no modo fotovoltaico, o fotodiodo opera em circuito aberto ( $I = 0$ ) e a tensão pode ser

medida nos seus terminais; no modo fotocondutivo, o dispositivo é curto-circuitado ( $V = 0$ ) e nesta situação uma corrente flui no sentido reverso e pode ser medida. A escolha dos modos de operação dos fotodiodos depende de sua aplicação.

Em qualquer modo de operação, o fotodiodo sob incidência de radiação comporta-se como uma junção *pn* cuja corrente tem duas componentes. A primeira é aquela que existe sem a geração de pares por absorção de fótons, ela é denominada de corrente de escuro e é dada pela Equação (3.15).

$$I_e = I_S (e^{eV/k_B T} - 1) \quad (3.15)$$

Onde  $I_e$  é a corrente de escuro,  $I_S$  é a corrente de saturação reversa,  $e$  a carga do elétron,  $k_B$  constante de Boltzmann,  $T$  temperatura e  $V$  é a tensão na junção. Esta equação é chamada de equação do diodo. A outra componente é aquela devida a graduação de elétron-lacuna gerado por fótons absorvidos nas proximidades da junção que é dado por:

$$I_L = \frac{\eta e P_L \lambda}{hc} \quad (3.16)$$

Sendo  $I_L$  a corrente gerada pelos fótons absorvidos,  $P_L$  igual à potência incidente na área efetiva da junção,  $\eta$  é a eficiência quântica da conversão,  $\lambda$  comprimento de onda da radiação incidente,  $c$  velocidade da luz e  $h$  constante de Plank. A eficiência quântica da conversão depende do material utilizado e também do comprimento de onda  $\lambda$  da radiação. Como  $I_L$  tem sentido reverso, a corrente total no fotodiodo é dada por:

$$I_e = I_S \left( e^{\frac{eV}{k_B T}} - 1 \right) - I_L \quad (3.17)$$

No modo fotocondutivo o fotodiodo opera em curto-circuito,  $V = 0$  e  $I_{cc} = -I_L$ . O Ponto de operação é mostrado na Figura 7 correspondente a curva de potência  $P_2$ . No modo

fotovoltaico o fotodiodo opera em circuito aberto,  $I = 0$  e  $V = V_{ca}$ . Nesta situação a absorção de radiação dá origem a uma tensão nos terminais do diodo dado por:

$$V_{ca} = \frac{k_B T}{e} \ln \left( \frac{I_L}{I_S} + 1 \right) \quad (3.18)$$

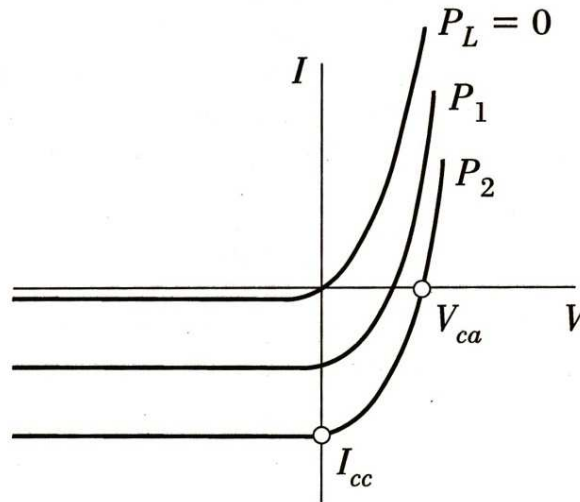


Figura 7 - Curvas  $I \times V$  características de um fotodiodo para várias condições de iluminação. Fonte: RESENDE (2004).

A principal diferença entre um fotodiodo e um diodo semicondutor comum é a abertura existente para exposição da junção  $pn$  a radiação incidente denominada janela óptica. É comum também depositar sobre a janela óptica camadas anti-refletoras para aumentar a absorção de radiação.

Como os pares elétrons e lacunas são criados na região de depleção ou em sua proximidade, deve-se fazer a espessura do lado  $P+$  a menor possível, para que não haja perdas da radiação por absorção no material antes de chegar à junção. Também é possível construir emissores pouco recombinantes apenas evitando a zona morta que ocorre em emissores do tipo Ercf, ou seja, fabricando emissores de tipo Gaussiano, diminuindo a concentração de dopantes. O material mais empregado na fabricação de fotodiodos para região espectral no visível é o silício. Na Figura 8, temos a curva de responsividade de um fotodiodo comercial de silício em função do comprimento de onda da radiação incidente. A responsividade ou resposta espectral é um parâmetro

muito usado para caracterizar a resposta de sensores de radiação, ela é a razão entre a fotocorrente e a potência da radiação incidente. A linha tracejada mostrada na Figura 8 é a resposta de um sensor ideal obtida da Equação 3.16, com  $\eta = 1$  para qualquer comprimento de onda da radiação incidente (RESENDE, 2004).

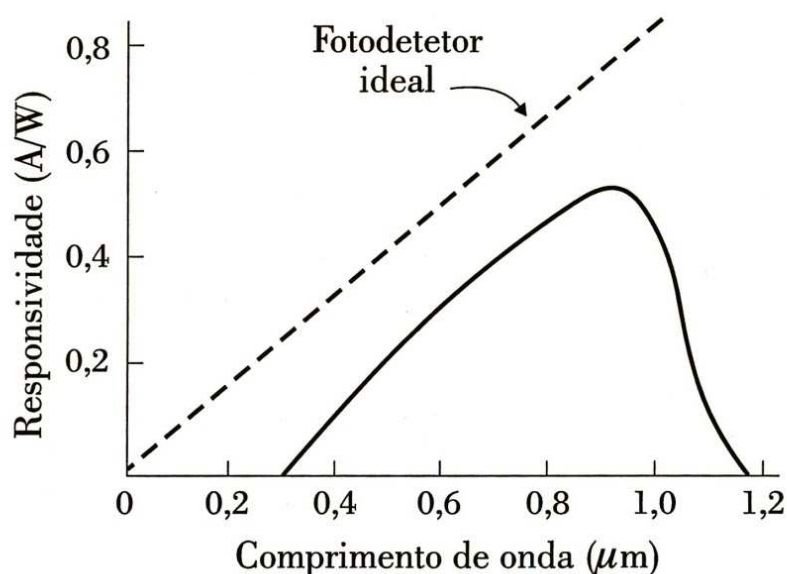


Figura 8 - Curva típica de resposta de um sensor fotovoltaico. Fonte: RESENDE (2004).

### 3.3. Sensores para medida de radiação solar

Cada tipo de sensor ou detector de radiação solar é especificado de acordo com a sua aplicação, podendo receber uma denominação específica. Genericamente os sensores de radiação solar receberam a denominação de radiômetros. Esta denominação se refere aos primórdios do desenvolvimento dos sensores de radiação. Os primeiros sensores de radiação solar consistiam em um dispositivo simples constituído de duas lâminas metálicas dentro de um invólucro de vidro que com a absorção da radiação solar punha-se a girar.

A terminologia aplicada aos vários tipos de instrumentos para medição da radiação solar vem sofrendo mudanças ao longo dos anos (ROCHA, 1992) (Squitter Equipamentos Profissionais do Brasil Ltda.). Por isso, um determinado instrumento já teve diversos

nomes. Também se observa na literatura que um determinado nome já foi aplicado em diferentes tipos de instrumentos, por exemplo, um radiômetro dedicado a medir a irradiação solar global tem sido denominado de radiômetro global, piranômetro, solarímetro, heliógrafo e actinógrafo. Esta diferença de terminologia aplicada aos instrumentos de medida de radiação solar se deve a vários fatores, entre eles podemos citar a própria evolução desta instrumentação que exigiu novas denominações talvez por parte dos fabricantes para diferenciar seu produto no mercado. Outro fator que provavelmente influenciou nesta diversidade de nomes atribuídos aos sensores de radiação solar, foi o fato da radiação eletromagnética, seja ela de origem solar ou não, ter aplicação nas mais diversas áreas das atividades humanas.

Na agricultura os sensores de radiação solar recebem a denominação de radiômetro PAR (*Photosynthetically-active radiation*) por causa da radiação de interesse ser a responsável pela fotossíntese das plantas. O radiômetro PAR tem como principal característica o seu espectro de resposta limitado ao visível de 400 nm a 700 nm (Squitter Equipamentos Profissionais do Brasil Ltda.).

Os radiômetros de ultravioleta, como o nome indica, são sensores destinados à medida da radiação solar apenas da parcela do espectro que contém o UV. Esta classe de sensores também pode ser subdividida em radiômetros UV-A, UV-B e UV-AB, que são especificados para medir conforme a subdivisão do espectro da radiação ultravioleta. O radiômetro global mede as componentes da radiação direta e difusa recebida em todo o hemisfério. O radiômetro denominado piroheliômetro mede a componente direta da radiação solar, normalmente é um dispositivo que possui um tubo colimador e um estreito ângulo de visão para captar somente a componente direta da radiação (MARTÍNEZ, 2007).

Para medida da radiação difusa, utiliza-se um dispositivo que consiste em um radiômetro com um anel de sombreamento. Este anel tem a finalidade de bloquear a radiação solar direta de tal forma que somente a componente difusa seja captada pelo sensor (FRITSCHEN, et al., 1979).

Quando a componente da radiação solar de interesse é a refletida pelo solo, denominada de albedo, o sensor utilizado pode ser o mesmo utilizado para medida da radiação global, sendo este, porém, voltado para o solo (VICTORIA, 2008). Também é muito comum o interesse pelo saldo de radiação. Neste caso, utiliza-se um dispositivo denominado saldo radiômetro. O saldo radiômetro é um dispositivo composto por dois piranômetros de termopilha, sendo um para medir albedo e o outro para medir a radiação total incidente (ESCOBEDO, et al., 1997). Eles são instalados numa configuração elétrica em série, tal que, o sinal final na saída do dispositivo é a diferença entre radiação incidente e a radiação refletida.

Com objetivo de padronizar os tipos de instrumento para medida de radiação solar, a Organização Meteorológica Mundial, através da Comissão para Instrumentos e Métodos, definiu a seguinte nomenclatura para os sensores de radiação solar (WMO, 2008).

- **Pireliômetro** - Instrumento dedicado a medição da intensidade de radiação solar direta em incidência normal.

- **Piranômetro** - Instrumento para medida da radiação global (direta + difusa) recebida em todo hemisfério.

- **Pirgeômetro** - Instrumento destinado a medir a radiação atmosférica com todas as suas componentes absorvida por uma superfície negra na temperatura ambiente.

- **Pirradiômetro** - Instrumento para medida da radiação total (solar + atmosférica).

- **Pirradiômetro absoluto** - Instrumento de medida do fluxo de radiação absoluto, ascendente e descendente total, em uma superfície horizontal. O pirradiômetro absoluto também recebe a denominação de pirradiômetro de balanço.

Os sensores de medida de radiação solar também podem ser classificados de acordo o tipo de variável que se pretende medir, o campo de visão, a resposta espectral e o emprego principal a que se destina. As principais propriedades dos radiômetros que são motivo de preocupação na avaliação da incerteza e da qualidade de medição de radiação

solar são: a sensibilidade, a estabilidade, tempo de resposta, a resposta a lei dos cossenos, a resposta azimutal, linearidade de resposta, dependência com a temperatura e a resposta espectral. A Tabela 2 apresenta uma classificação de radiômetros baseada nestas propriedades, de acordo com a norma internacional ISO 1990a e nas informações sobre o uso de radiômetros dado pela Organização Mundial de Meteorologia - OMM (WMO, 2008).

Tabela 2 - Classificação de radiômetros especificados pela WMO.

<b>CARACTERISTICAS</b>	<b>Qualidade Alta</b>	<b>Qualidade Boa</b>	<b>Qualidade Moderada</b>
Tempo de resposta	< 15s	< 30s	< 60s
Resolução (menor variação detectável)	1 W/m <sup>2</sup>	5 W/m <sup>2</sup>	10 W/m <sup>2</sup>
Estabilidade (variação por ano em relação ao fundo de escala)	0,8 %	1,5 %	3,0 %
Resposta a lei dos cossenos. (faixa de erro para um feixe de 1.000W/m <sup>2</sup> em qualquer direção)	10 W/m <sup>2</sup>	20 W/m <sup>2</sup>	30 W/m <sup>2</sup>
Resposta à temperatura (variação da resposta em função da variação de temperatura numa faixa de 50 °C)	2 %	4 %	8 %
Não Linearidade	0,5%	1%	3%
Sensibilidade espectral (desvio da absorptância média dentro do intervalo de 300 a 3.000 nm)	2 %	5 %	10 %
Resposta a inclinação (porcentagem do desvio da resposta em relação à resposta a horizontal)	0,5 %	2 %	5%
Desvio máximo do valor real esperado para			
Totais horários	3%	8%	20%
Totais diários	2%	5%	10%





## **4. CÉLULA SOLAR**

Este capítulo é dedicado ao estudo das células solares, especificamente as de silício monocristalino que foram desenvolvidas no LME/USP para serem utilizadas como elemento sensor nos radiômetros. Mostraremos os conceitos básicos sobre célula solar, a técnica de fabricação e também os métodos para determinação dos principais parâmetros de seu desempenho.

### **4.1. O desenvolvimento de células solares no INPE**

Historicamente, o INPE sempre teve interesse e preocupação com o desenvolvimento de células solares devido a sua aplicação em satélites e, principalmente, a dependência com relação ao mercado internacional que é muito instável para o fornecimento destes dispositivos. Por ser uma área estratégica para o Brasil, o setor espacial vem impulsionando a pesquisa e a indústria nacional na produção de partes e componentes para satélites e veículos lançadores. A produção de células solares de aplicação espacial é uma tecnologia crítica que exige do INPE uma intensa pesquisa e um constante intercâmbio com empresas e instituições nacionais, que fazem o desenvolvimento deste dispositivo (VEISSID, 1989).

Desde 1980, o grupo de células Solares do LAS/INPE atua na área de pesquisa de dispositivos fotovoltaicos, voltadas principalmente para uso espacial. O INPE foi a instituição pioneira, no Brasil, a desenvolver tecnologia na área de fotoconversão para o setor espacial. Por isso, conta hoje com uma sofisticada infra-estrutura de pesquisa e testes destes dispositivos. A equipe de pesquisa sobre células solares do LAS/INPE também dispõe de ampla experiência na área de garantia da qualidade para componentes de utilização em satélites. Os estritos requisitos de confiabilidade necessários em aplicações espaciais, onde uma falha pode representar o fracasso de uma missão com grande desperdício de recursos, exige do grupo de células solares do LAS uma freqüente atualização diante das novas tecnologias que surgem a cada momento. O aperfeiçoamento científico na área de fotoconversão é uma necessidade constante, pois

a utilização de painéis solares em satélites impõe rígidas metodologias na fabricação e integração deste dispositivo.

No Brasil, a pesquisa com células solares começou há alguns anos e conta hoje com a participação de diversas instituições, destacando-se centros como USP, PUCRS, UNICAMP e o INPE. O laboratório de microeletrônica (LME) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) é um dos pioneiros tanto na pesquisa com células solares quanto na pesquisa com silício de alto grau de pureza (GTES - Grupo de Trabalho de Energia Solar, 1999).

Em 1983, foi estabelecido um convênio entre o grupo de células solares do LAS/INPE e o LME-EPUSP. Este intercâmbio foi muito importante, pois promoveu tanto a formação de pessoal qualificado como a realização de trabalhos de desenvolvimento de células solares de silício para uso em satélites no Brasil. Um marco importante deste intercâmbio foi a produção de células solares do Experimento Célula Solar (ECS), que foi incorporado aos satélites de coleta de dados SCD1 e SCD2 do programa MECB (Missão Espacial Completa Brasileira), que foram lançados em 1993 e 1998, respectivamente, sendo que o SCD2 ainda continua em estado operacional (VEISSID, 1989). Os dados gerados por este experimento não somente foram utilizados para qualificação das células solares desenvolvidas no Brasil, como tem sido utilizado no estudo de albedo planetário (VEISSID, 2003).

Em 2004, a cooperação entre as duas instituições foi restabelecida com o objetivo de produzir células solares de silício monocristalino para aplicação como sensores de radiação solar. Este projeto denominado “Desenvolvimento de Radiômetro para Medida da Radiação Solar Global”, reativou o intercâmbio do INPE com o LME/USP. Com apoio financeiro da FINEP, foram produzidos vários lotes de células de silício de altíssima qualidade e com tecnologia totalmente nacional.

A escolha da célula solar de silício monocristalino convencional como elemento sensor dos radiômetros neste trabalho se deve a vários motivos: o domínio tecnológico na produção pelo LME/USP; o baixo custo na produção; a eficiência deste tipo de célula para uso como elemento sensor atende as especificações, os sinais gerados na saída do

sensor dispensam o uso de amplificadores; boa estabilidade e a disponibilidade de sistema de caracterização no LAS.

#### 4.2. Células fotovoltaicas de silício monocristalino

Células solares são dispositivos semicondutores que geram energia elétrica através do efeito fotovoltaico quando a radiação eletromagnética ioniza a região dentro ou próxima da barreira de potencial formada no interior do semicondutor. Os pares elétrons-lacunas gerados pela radiação, ao invés de se recombinarem, são separados pelo campo elétrico interno e originam uma corrente elétrica, denominada fotocorrente (BELOTO, 1983).

Uma célula solar de silício pode ser dividida didaticamente em quatro regiões, a superfície, a região de depleção, a base e as regiões consideradas quase neutras que ficam a um comprimento de difusão de portadores minoritários além das bordas da região de depleção e só existem quando do desequilíbrio provocado pela incidência da radiação (luz), caracterizado por uma região de excesso de portadores. A Figura 9 ilustra um diagrama de uma célula solar e suas regiões.

Para entender como se dá a absorção de radiação e como os pares elétrons-lacunas são separados e conduzidos até o circuito ex-terno, precisamos analisar os semicondutores e os mecanismos de corrente, através dos diagramas de bandas de energia.

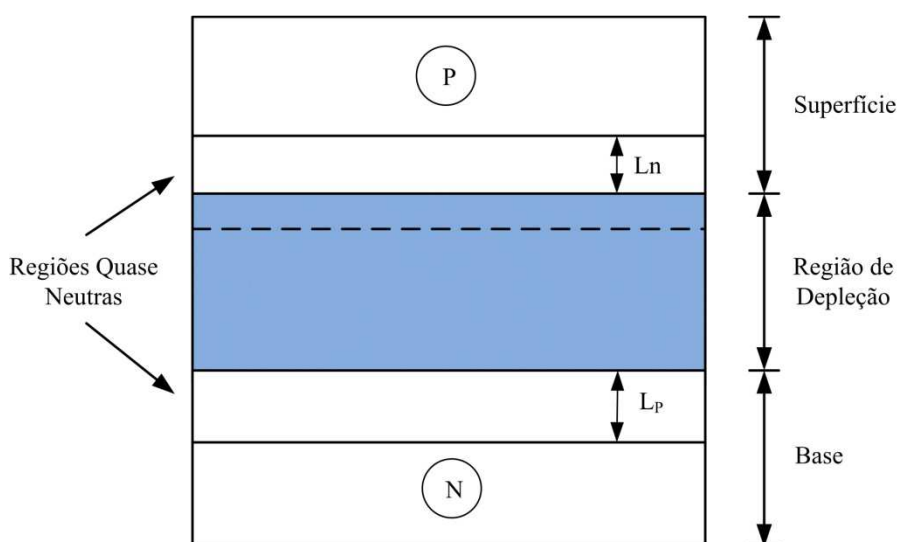


Figura 9 - Regiões de uma célula solar de silício.

A geração de pares elétrons-lacunas por absorção de radiação (fótons) em um semicondutor se deve à sua estrutura de bandas de energia. A corrente gerada por este dispositivo se dá num processo de absorção de fótons cuja energia ( $h\nu$ ) seja igual ou maior do que a largura da banda proibida (“gap”) do semicondutor utilizado. Os fótons absorvidos excitarão os elétrons do material que se encontra na banda de valência. Os elétrons ao absorver a energia do fóton saltam de onde estão, sendo que uma grande parte deles irá para banda de condução do material. Esse processo se repete em cadeia e é tão mais intenso quanto maior for a intensidade da radiação que atinge o semicondutor.

Os elétrons e as lacunas criados pela radiação são acelerados em sentidos opostos pelo campo elétrico da junção. Na junção, o campo formado tem sentido da banda  $n$  para banda  $p$ . As lacunas são aceleradas no mesmo sentido do campo e os elétrons movem-se em sentido contrário de  $p$  para  $n$ . Nas células solares, as fotocorrentes são geradas pela radiação e não há necessidade de aplicação de um campo elétrico externo para extração dos elétrons-lacunas.

O número total de fótons que podem ser absorvidos pela célula será determinado pela banda proibida do semicondutor e pela distribuição energética dos fótons da radiação incidente. Podemos identificar dois modos de transição que podem ocorrer: transição direta, onde a energia do fóton é suficiente para gerar a transição e a transição indireta, onde a energia de um fóton não é suficiente para realizar a transição, sendo necessária a emissão ou absorção de um ou mais fônons na rede cristalina do semicondutor. Muitos materiais semicondutores utilizados na fabricação de células solares são absorvedores diretos (GaAs e CdS), que precisam de espessuras muito pequenas ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ). Os absorvedores indiretos (Si) precisam de espessuras grandes ( $\sim 100 \mu\text{m}$ ).

O silício tem uma absorção na faixa do espectro eletromagnético que vai de 200 nm a 1100 nm. O coeficiente de absorção aumenta com a energia do fóton, ou seja, a absorção depende do comprimento de onda da radiação. Para comprimentos de ondas na faixa do UV a absorção dos fótons se dará próxima à superfície. Já para comprimentos

de ondas na faixa do infravermelho, os fótons penetram mais no material antes de serem absorvidos.

Da física de semicondutores, sabe-se que o desequilíbrio provocado pela radiação na célula altera profundamente a população de portadores minoritários, sem alterar significativamente os portadores majoritários. Sabemos que os portadores minoritários possuem um tempo de vida médio dentro do qual os mesmos se recombinam deixando de existir como portadores de carga. Se houver uma concentração excessiva de portadores em alguma região, esses portadores tenderão a se difundir para regiões com concentrações mais baixas. A incidência de radiação na célula gera um excesso de portadores minoritários por toda a sua extensão. Esses minoritários difundem-se e, se dentro do período de vida média eles conseguirem atingir a borda da região de depleção, então o campo elétrico aí existente os acelerará para o outro lado da junção onde são portadores majoritários e, portanto não se recombinarão.

Do que foi exposto acima, podemos concluir que a corrente fotogerada em uma célula depende somente dos portadores gerados a uma distância menor ou igual ao seu comprimento de difusão a partir da borda da região de depleção. Os demais portadores sofrerão recombinação e não contribuirão para a corrente fotogerada. Na região de depleção, todos os portadores gerados são acelerados para a região onde são majoritários por causa do campo elétrico alto. A corrente total em uma célula fotovoltaica é a soma da contribuição da corrente dos portadores gerados nas duas regiões da célula. A máxima corrente do dispositivo ocorre quando os seus terminais são postos em curto-circuito ( $I_{cc}$ ). Por outro lado, a máxima diferença de potencial ocorre para o circuito aberto ( $V_{ca}$ ).

### **4.3. Circuito equivalente de uma célula solar**

O circuito equivalente de uma célula solar real mostrado na Figura 10 é um modelo que contempla dois diodos, uma fonte de corrente, uma resistência série e uma resistência paralela. O diodo  $D_1$  tem as características de um diodo ideal que representa a

componente da célula solar no escuro e o diodo  $D_2$  representa o efeito de recombinação na junção, a fonte de corrente representa a corrente fotogerada quando a célula é iluminada. No diodo  $D_1$ , considera-se somente a corrente de difusão, sem recombinação. O modelo de uma célula solar ideal não contempla as componentes tecnológicas do dispositivo. Os defeitos intrínsecos ao processo de fabricação da célula solar resultam em perdas de corrente e tensão do dispositivo e conseqüentemente perda da eficiência (HOVEL, 1975). Os defeitos na junção  $pn$ , imperfeições na estrutura cristalina do semiconductor, discordância de rede, descontinuidade devida à superfície lateral da célula, ou riscos na superfície do dispositivo, contribuem para reduzir a corrente fotogerada e a tensão da célula.

As correntes de fuga através da junção ou na periferia da célula por causa das imperfeições são devidas à baixa resistência ôhmica nestas regiões. Na situação ideal esta resistência é infinita. Esta corrente de fuga é proporcional a tensão da junção  $pn$  e pode ser representada como uma resistência em paralelo com a junção. A resistência do caminho da corrente da junção até os terminais da célula deveria ser zero, mas perdas de corrente devido à resistividade da base da célula, resistência de folha da camada difundida e resistência de contato dos coletores faz com que esta resistência seja finita. Em uma célula ideal, esta resistência deve ser menor que 1 ohm e a queda de tensão sobre ela é proporcional a corrente elétrica na saída da célula e pode ser representada como uma resistência série com a saída do circuito (FONSECA, 1985).

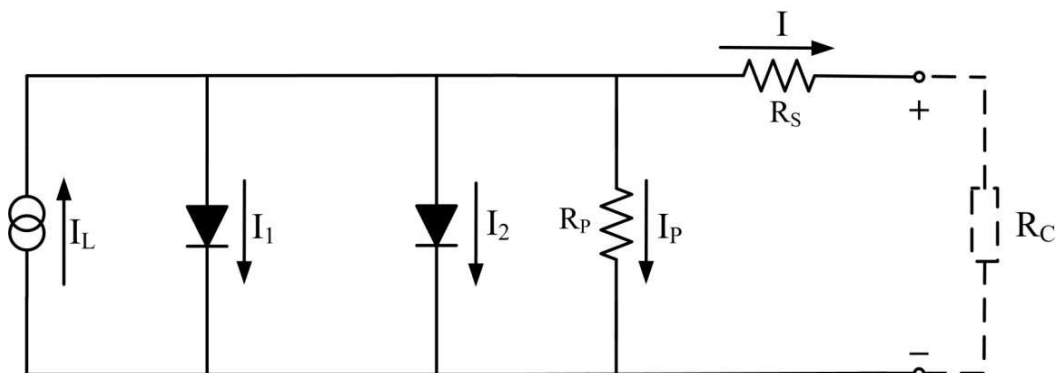


Figura 10 - Circuito equivalente de uma célula solar real e iluminada

A primeira componente da corrente da célula é aquela que existe sem a geração de pares elétrons-lacunas por absorção de radiação. Ela é denominada de corrente de escuro e pode ser determinada pela equação do diodo ideal.

$$I_1 = I_S \cdot (e^{eV/kT} - 1) \quad (4.1)$$

Onde  $I_S$  é a corrente de saturação reversa do diodo no escuro,  $V$  é a tensão aplicada aos terminais do diodo,  $e$  é a carga do elétron,  $K$  é a constante de Boltzmann e  $T$  é a temperatura absoluta da célula.

A Equação (4.1) descreve somente a corrente de escuro originada da difusão de portadores na região de carga espacial vindas das regiões do tipo  $p$  e tipo  $n$ , uma segunda contribuição para a corrente da célula no escuro vem da própria região de carga espacial. Nesta região, ocorre recombinação de portadores através de centros de defeitos, que pode ser representada por um diodo com a seguinte equação.

$$I_2 = I_S \cdot (e^{eV/mkT} - 1) \quad (4.2)$$

A diferença dentre as Equações (4.1) e a (4.2) é o fator “ $m$ ” que representa a idealidade da junção. Podemos considerar  $m = 2$  quando os centros de recombinação tendem ao meio da banda proibida e são uniformemente distribuídos. Para outras condições, ele pode assumir valores de 1 a 6. Com base na análise do circuito da Figura 10, temos que:

$$I_T = I_L - I_1 - I_2 - I_P \quad (4.3)$$

Onde  $I_P$  é a corrente de fuga devido à resistência em paralelo a junção.

A expressão geral para a corrente da célula solar para uma dada carga externa pode ser escrita substituindo  $I_1$  e  $I_2$  pelas Equações (4.1) e (4.2) na Equação (4.3). Para simplificar a expressão geral de corrente, podemos escrever as correntes nos diodos como uma única expressão na seguinte forma:

$$I_D = I_S \left[ e^{\frac{e \cdot (V + I \cdot R_S)}{mKT}} - 1 \right] \quad (4.4)$$

Onde  $I_s$  é a corrente de saturação efetiva da junção e  $m$  é o fator de qualidade do diodo. A equação resultante é:

$$I = I_L - I_s \left[ e^{\frac{e(V+I.R_S)}{mKT}} - 1 \right] - \frac{V+I.R_S}{R_P} \quad (4.5)$$

onde  $R_s$  é a resistência série e  $R_p$  a resistência em paralelo. Esta equação nos dá os principais parâmetros de especificação da célula solar e a relação corrente e tensão de uma célula solar (VEISSID, et al., 1995). É através dela que obtemos a curva  $I \times V$  quando a resistência de carga  $R_C$  varia de zero a infinito.

#### 4.3.1. Efeito da resistência série na curva $I \times V$ da célula solar

A resistência série no circuito da célula solar afeta as características da curva  $I \times V$ , degradando o fator de preenchimento, resultando na perda de potência. Esta resistência não altera a tensão de circuito aberto ( $V_{ca}$ ) da célula, mas o fator de potência é seriamente reduzido com o seu aumento. A corrente de curto circuito também pode sofrer uma redução, assumindo valores abaixo do valor da fotocorrente, causada pela queda de tensão através desta resistência. A Figura 11 mostra os efeitos da resistência série sobre a curva  $I \times V$  de uma célula de silício monocristalino (PRIEB, 2002).

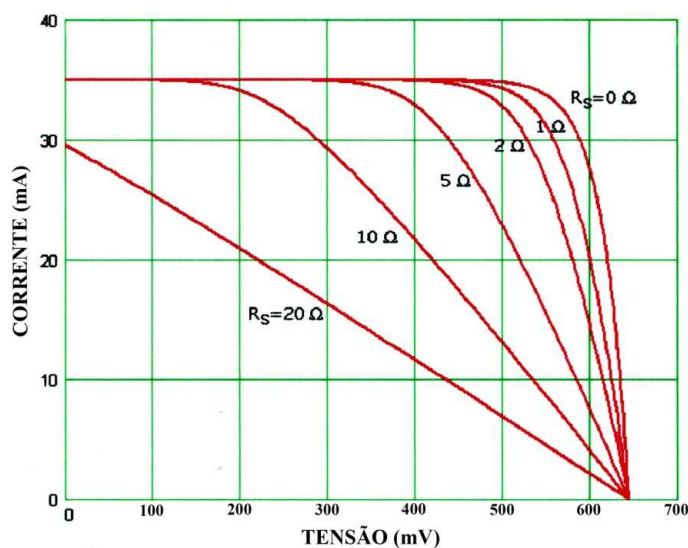


Figura 11 - Efeitos da resistência série sobre a curva  $I \times V$  de uma célula de silício monocristalino. Fonte: PRIEB (2002).



Para minimizar os efeitos de  $R_s$ , são necessários alguns procedimentos tecnológicos com implicações muitas vezes na eficiência da célula. Modernas tecnologias de fabricação de células buscam produzir células cuja região de difusão seja fina, mas altamente dopada, e ao mesmo tempo otimizando a forma da grade de contato, como por exemplo, a utilização de metalizações enterradas em canaletas formadas a laser. Com isso, consegue-se células com  $R_s$  relativamente mais baixo e boa eficiência (BELOTO, 1983).

#### 4.3.2. Efeitos da resistência em paralelo na curva I x V da célula solar

A resistência paralela originada em consequência da fuga de corrente através da junção pn, na superfície das bordas da célula e microdefeitos na estrutura cristalina do silício, alteram a forma da curva I x V conforme podemos ver na Figura 12 (PRIEB, 2002).

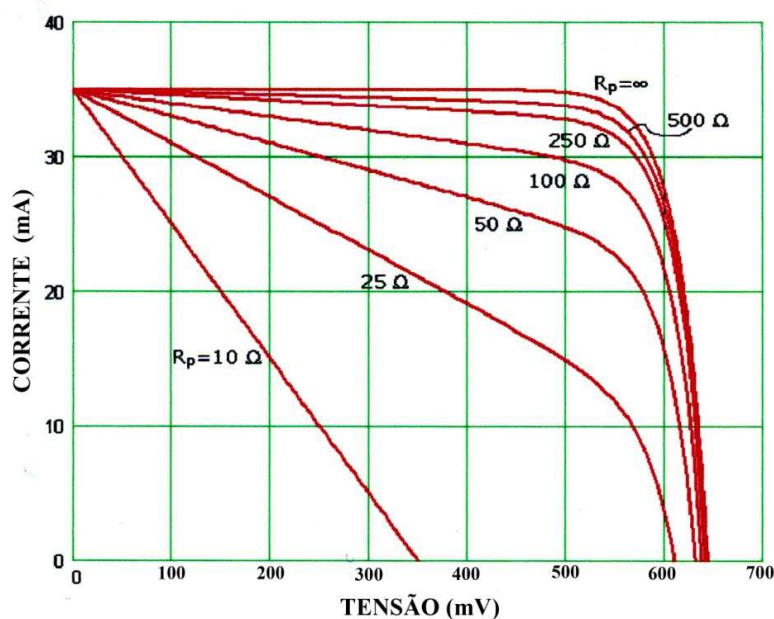


Figura 12 - Efeitos da resistência em paralelo na curva I x V da célula solar (Fonte: Prieb, 2002)

A resistência em paralelo  $R_p$ , não afeta a corrente de curto circuito, mas reduz a tensão de circuito aberto e o fator de preenchimento. A  $R_p$  oferece um caminho alternativo para corrente fotogerada reduzindo a eficiência da célula. A perda de eficiência em uma

célula devido à resistência em paralelo pode ser minimizada tornando  $R_p > 1 \text{ k}\Omega \cdot A$ , onde  $A$  é a área do dispositivo em  $\text{cm}^2$ .

#### 4.3.3. Efeito da intensidade da radiação solar sobre a curva I x V da célula

A propriedade da célula solar de maior importância na sua utilização como elemento sensor para medida da radiação solar é a variação da corrente de curto circuito em função da intensidade da radiação incidente (ZANESCO, 1991).

Curvas típicas de uma célula solar de silício monocristalino de uso terrestre, mantida à temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  constante para diferentes intensidades de irradiação são mostradas na Figura 13. Podemos observar que a corrente de curto circuito depende linearmente da irradiância enquanto que a tensão de curto circuito aberto aumenta logaritmicamente, ficando constante enquanto a irradiância muda.

Apenas quando a irradiância fica muito baixa, menor que  $100 \text{ W/m}^2$  a tensão sofre uma queda mais acentuada. Podemos concluir que o ideal para utilização de uma célula solar como elemento sensor de radiação solar é operar próxima a corrente de curto circuito.

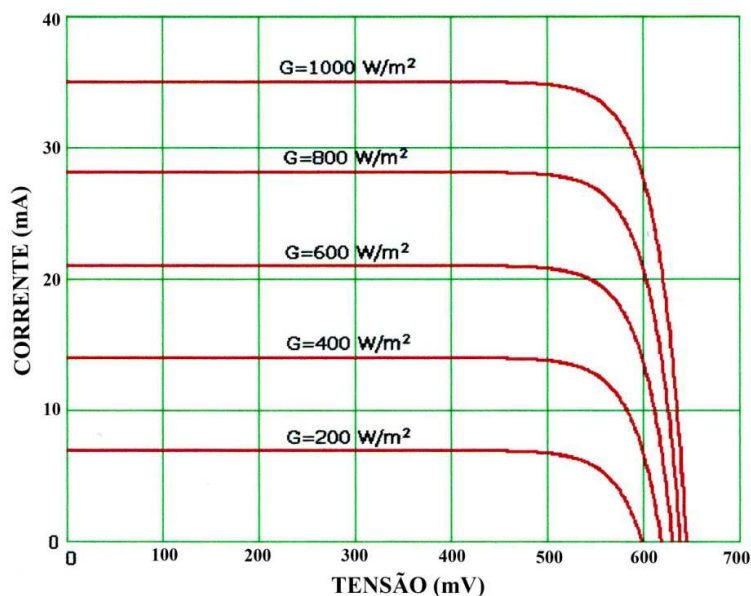


Figura 13 - Curvas I x V de células solares de silício para diferentes intensidades de radiação (Fonte: Prieb, 2002)

#### 4.3.4. Resposta espectral da célula solar de silício

A sensibilidade espectral de uma célula solar é o sinal elétrico que célula gera para cada comprimento de onda eletromagnética que incide sobre ela. Esta sensibilidade depende do material e da tecnologia utilizada na sua fabricação. A célula de silício monocristalino tem resposta espectral tipicamente entre 350 nm à 1100 nm. Dependendo do processo de fabricação, pequenas alterações podem ocorrer nos extremos da resposta espectral. A Figura 14 mostra uma curva típica da resposta espectral de uma célula solar de silício monocristalino, onde podemos comparar com o espectro solar terrestre (AM 1,5).

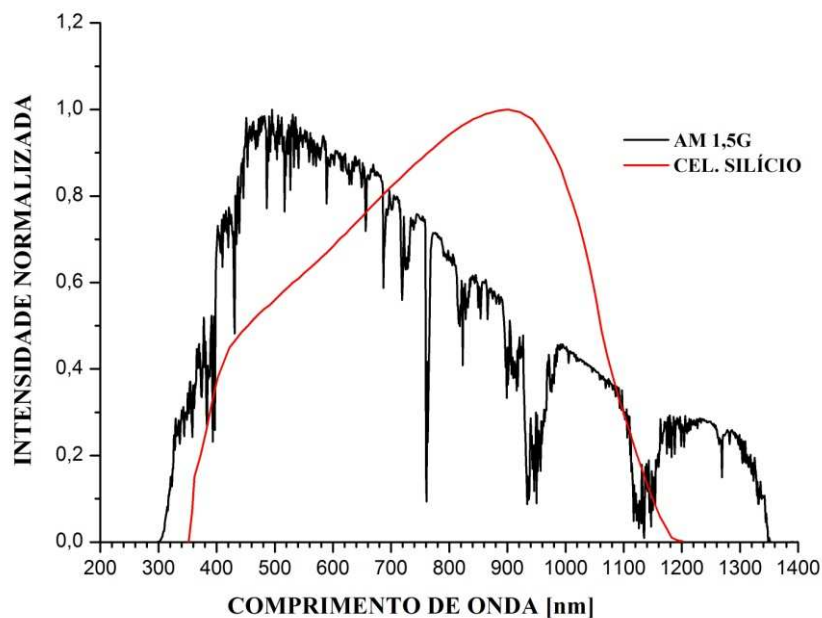


Figura 14 - Curva típica de resposta espectral de uma célula solar de silício comparada com o espectro solar (AM 1,5G)

A medida da resposta espectral de uma célula permite obter além da sensibilidade espectral, outros parâmetros úteis para a caracterização desta célula, como por exemplo, o comprimento de difusão dos portadores minoritários e os efeitos da profundidade da junção e o efeito da camada antirefletora sobre o desempenho da célula (BELOTO, 1983).

A resposta espectral absoluta ( $RE(\lambda)$ ) de uma célula solar é definida como a razão entre a densidade de corrente de curto circuito ( $A/cm^2$ ) e a radiação incidente ( $W/cm^2$ ) em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ). A resposta espectral interna considera somente a radiação incidente absorvida pela célula ( $RE(\lambda)_{int}$ ), que é proporcional à transmitância, a qual se expressa por  $1 - R(\lambda)$ , onde  $R(\lambda)$  é a refletividade da superfície da célula (BELOTO, 1983). A relação entre a resposta espectral interna e externa é dada por:

$$RE(\lambda)_{int} = \frac{RE(\lambda)}{1-R(\lambda)} \quad (4.6)$$

A figura de mérito denominada eficiência quântica ( $Q(\lambda)$ ) é definida como o número de pares elétron-lacuna coletados no regime de curto circuito, relativos ao número de fótons incidentes sobre a célula (FONSECA, 1985).

Podemos relacionar a eficiência quântica com a resposta espectral da célula por:

$$Q(\lambda) = \frac{hc}{\lambda e} \cdot RE(\lambda) \quad (4.7)$$

Onde  $h$  é a constante de Plank,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $e$  a carga do elétron.

Tecnicamente, o máximo da eficiência quântica de uma célula é  $Q(\lambda) = 1$  sobre toda a faixa espectral em que o material da célula é sensível.

#### **4.3.5. Efeito da temperatura na célula solar**

Uma célula solar em operação sofre alteração de seu desempenho em função da variação da temperatura. A tensão de circuito aberto tende a diminuir em função do aumento da temperatura de forma linear, principalmente devido ao forte aumento da corrente de saturação. A corrente de saturação é composta da corrente de injeção, da corrente de recombinação na região de carga espacial e da corrente de tunelamento. A corrente de injeção e a corrente de recombinação são fortemente influenciadas pela

temperatura, enquanto que a corrente de tunelamento é praticamente independente da temperatura (BELOTO, 1983).

O coeficiente de temperatura  $\beta$  de uma célula é dado pela taxa de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura. Para células de silício, esse coeficiente assume valores próximos de  $-2,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ . O fator de preenchimento diminui com o aumento da temperatura devido tanto a diminuição da tensão  $V_{ca}$  quanto ao arredondamento do "joelho" da curva  $I \times V$  relativo ao termo  $e^{eV/mkT}$  (BOGADO, 2004).

A corrente de curto-circuito -  $I_{cc}$  sofre levemente um aumento com o aumento da temperatura, em parte devido à melhora do comprimento de difusão dos portadores minoritários da base e em parte devido ao desvio do limiar de absorção para baixas energias. Para células de silício o fator de temperatura  $\alpha$  é da ordem de  $0,06\% / ^\circ\text{C}$ . Esse acréscimo na corrente é relativamente pequeno e insuficiente para compensar a perda de potência devido ao decréscimo da tensão de  $V_{ca}$ , conforme podemos observar na Figura 15.

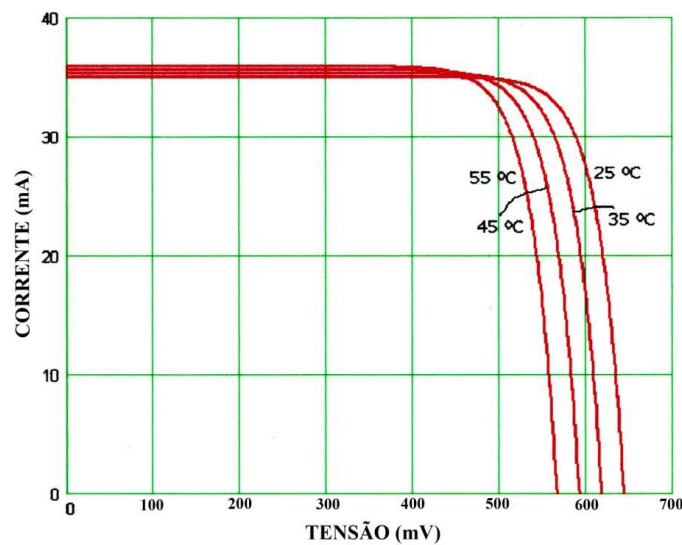


Figura 15 - Curvas  $I \times V$  de células Solares de silício monocristalino para diferentes temperaturas. Adaptado: PRIEB (2002).

#### **4.4. Processo de fabricação de células de silício**

O processo de fabricação de células solares vem ao longo dos últimos anos sofrendo aprimoramentos, visando obter células cada vez mais eficientes e com menor custo possível. A Figura 16 mostra as etapas do processo convencional de fabricação de células solares de silício monocristalino. O processo convencional aqui apresentado é semelhante ao que foi utilizado no LME/USP para fabricação das células empregadas como elemento sensor de radiação solar nos radiômetros deste trabalho.

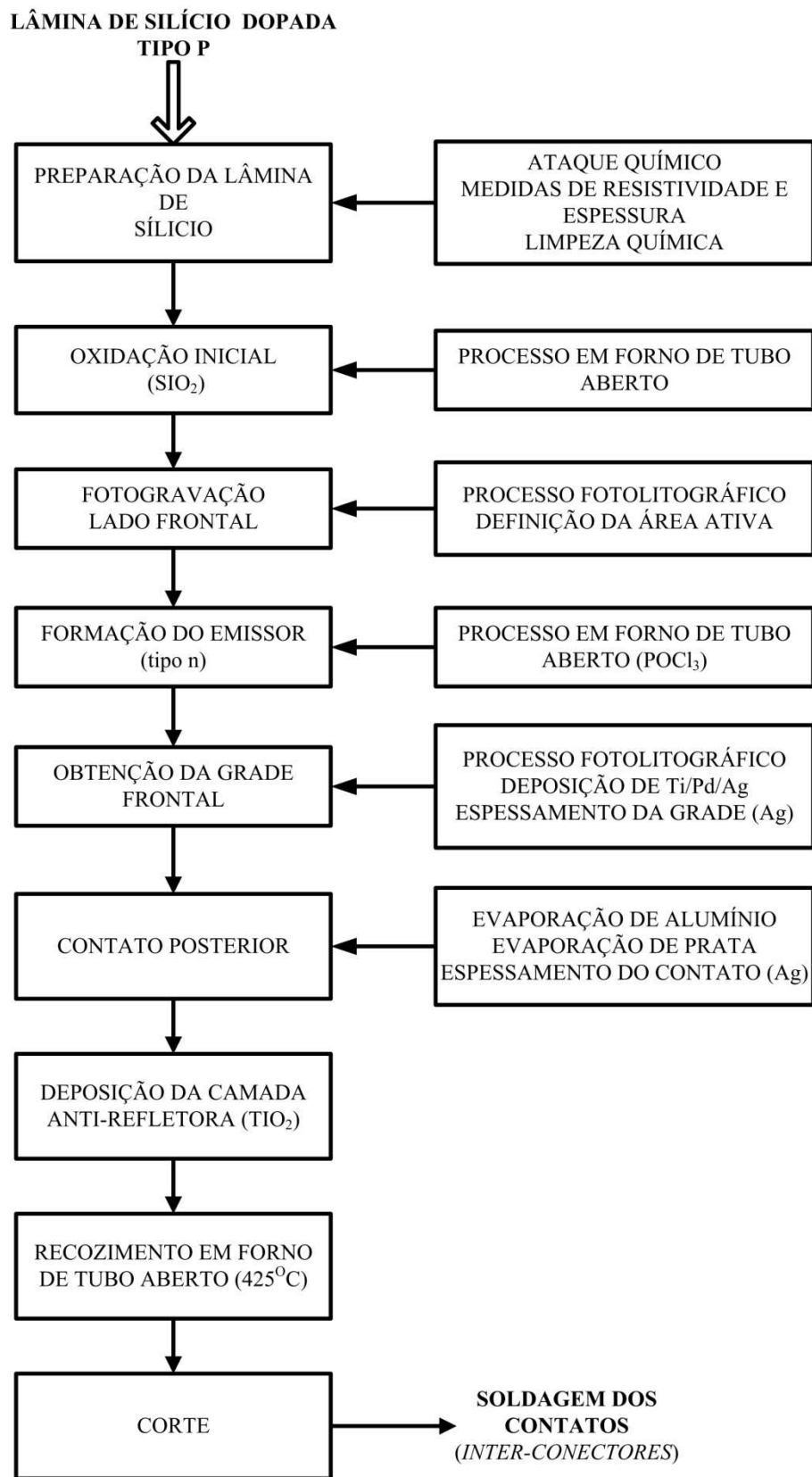


Figura 16 - Etapas do processo de fabricação de uma célula solar de silício convencional

Ao final do processo as células são cortadas como mostra a Figura 17.

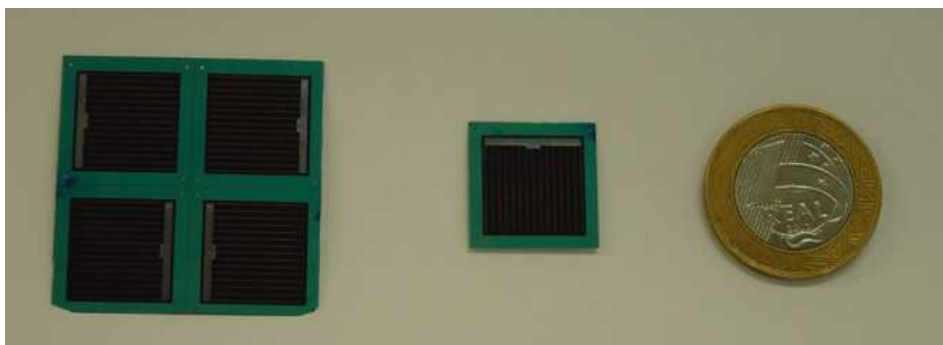


Figura 17 - Células solares de silício no formato final do processo

#### 4.5. Caracterização da célula de silício monocristalino

Os parâmetros de desempenho da célula fotovoltaica são determinantes para qualificar uma célula para uso como elemento sensor de radiação solar. Em um radiômetro, as propriedades da célula utilizada como sensor afetam diretamente a qualidade das medidas. A caracterização da célula também é muito importante para determinar as condições relacionadas ao processo de fabricação. Normalmente, faz-se o controle ou a especificação do processo de fabricação de célula através da caracterização de células testes construídas especificamente para testar as etapas do processo (EBERHARDT, 2005).

De uma maneira geral, o objetivo da caracterização de células neste trabalho é verificar o seu funcionamento para diferentes intensidades de radiação, detectar defeitos de fabricação e demonstrar que as células desenvolvidas podem ser utilizadas com segurança como elemento sensor dos radiômetros solares.

Os parâmetros: eficiência de conversão ( $\eta$ ); tensão circuito aberto ( $V_{ca}$ ); corrente de curto circuito ( $I_{cc}$ ); fator de preenchimento de forma (FF); potência de saída máxima ( $P_{max}$ ); corrente de saturação ( $I_0$ ); resistência série ( $R_s$ ); resistência paralela ( $R_p$ ) e o fator de perfeição da junção ( $A_o$ ); são determinados através do levantamento da curva corrente versus tensão ( $I \times V$ ) da célula.



#### **4.5.1. Sistema de caracterização I x V de célula solar**

Para fazer a caracterização I x V de uma célula solar sob iluminação, precisamos de uma fonte de luz adequada que nos forneça as condições iguais ou similares à radiação solar. Basicamente o sistema utilizado para medida da curva I x V de células solares em laboratório é constituído por um simulador solar, uma base de fixação da célula com temperatura controlada, uma carga variável para célula e um sistema de medida de corrente e tensão. O sistema completo deve obedecer às normas internacionais, como as normas da IEC (International Electrotechnical Commission), que estabelece normas relativas a caracterização de dispositivos elétricos, eletrônicos e sistemas relacionados. Os procedimentos para caracterização de células solares e os sistemas relacionados são encontrados nas normas IEC60904-1; IEC60904-2. Para medidas das características I x V de células solares de silício monocristalino aplica-se a norma IEC 904-1, que estabelece as condições necessárias para realizar esta medida (IEC; IEC , 2006).

As condições para realizar as medidas da curva I x V de uma célula solar de uso terrestre dentro das normas, são basicamente as seguintes: o simulador solar utilizado deve obedecer à norma IEC 60904-9; a instrumentação utilizada (Voltímetro e Amperímetro) deve ser calibrada com certificação e rastreabilidade; a irradiância deve ter a distribuição espectral similar ao padrão AM 1,5G (IEC 60904-7, IEC 60904-3); as células, a padrão e a de teste, devem estar em  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; a impedância do voltímetro deve ser maior que  $20\text{ K}\Omega$ ; a irradiância deve ter intensidade de  $1000\text{ W/m}^2$ ; a precisão da medida I x V deve ser 0,2%, ou melhor; a precisão da medida de temperatura deve ser  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ou melhor; a temperatura das células de referência e a sob teste deve ter uma uniformidade de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  e o padrão de referência deve ser uma célula calibrada com certificação e similar a que está sendo medida (IEC , 2006; IEC, 2007).

O dispositivo mais importante no processo de caracterização I x V é a fonte de irradiação. Devido às dificuldades diversas para medir a célula diretamente exposta ao Sol, foram desenvolvidas fontes artificiais de irradiação solar, também denominadas simuladores solares, que dentro de certas limitações recriam em laboratório as condições similares à irradiação solar na superfície terrestre e fora da atmosfera.

Existem no mercado diversos modelos de simuladores solares com diversos preços. A norma IEC 60904-9 estabelece as características deste dispositivo.

#### **4.6. Células fotovoltaicas como elemento sensor de radiação solar**

As principais características de um sensor de radiação solar são a estabilidade de resposta, sensibilidade, tempo de resposta e linearidade. Por isso, as células fotovoltaicas para uso como sensor de radiação solar exigem alguns cuidados no seu processo de fabricação.

A corrente de curto circuito de uma célula solar de silício apresenta um comportamento linear em relação ao aumento da intensidade da radiação incidente para a principal faixa espectral da radiação solar e isso a torna um dispositivo possível de ser utilizado como elemento sensor para medir este tipo de radiação. Além disto, a célula solar de silício apresenta uma resposta da ordem de 10  $\mu$ s a uma dada variação da radiação incidente (MICHALSKY, 1987).

O ideal de operação de uma célula fotovoltaica como elemento sensor de radiação solar é operar na condição de curto-circuito, como vimos anteriormente, porque a corrente de curto-circuito ( $I_{CC}$ ) é linearmente dependente da intensidade da radiação incidente na célula. Porém, tecnicamente a condição de curto-circuito não é adequada, porque o sinal necessitaria ser condicionado através da utilização de circuitos amplificadores para ser medido. Normalmente, procura-se trabalhar próximo da corrente de curto-circuito, sobre a região linear da curva  $I \times V$  da célula através da medida da queda de tensão sobre uma carga resistiva previamente escolhida.

## **5. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO**

Para o desenvolvimento do radiômetro e do sistema de aquisição de dados empregou-se a metodologia comumente utilizada no INPE nos projetos de satélites e de outros componentes de aplicação espacial. Embora esta metodologia possua critérios rígidos de avaliação e exigências no cumprimento de prazos e metas, aqui ela foi adaptada e aplicada com certo grau de flexibilidade, necessário para que não impedisse a criatividade que é tão necessária em trabalhos acadêmicos e de pesquisa.

Esta metodologia consiste basicamente numa técnica de gerenciamento de projeto onde o objetivo final é previamente estabelecido e um plano de metas e atividades é criado para atingi-lo. Diferentemente do que ocorre nos projetos de tese de doutorado, onde geralmente os resultados finais são vagamente pré-definidos e os caminhos para atingi-lo vão se fazendo ao longo do projeto. Na metodologia utilizada, o projeto nasce com a concepção do produto que é normalmente definido a partir das especificações feitas com auxílio do usuário final e, através de uma equipe de especialistas e colaboradores da área correlata do produto, se elabora o plano de metas para o desenvolvimento do produto.

A metodologia aplica-se perfeitamente em projetos de pesquisas tecnológicas, principalmente de inovações tecnológicas, onde se deseja desenvolver um produto, seja ele um dispositivo, um material, um processo ou mesmo a melhoria ou adequação a uma nova necessidade de algo que já existe cujas características finais podem ser previstas ou desejadas.

Neste trabalho, os radiômetros fotovoltaicos desenvolvidos foram concebidos para atender uma necessidade do mercado nacional, especificados e construídos segundo critérios pré-estabelecidos pela metodologia utilizada. Através da documentação sistemática e diversas revisões do projeto, procuramos desenvolver um produto com as características necessárias às exigências do usuário final, com qualidade compatível aos importados, porém com custos inferiores.

Apresentaremos a seguir a estratégia e as fases do desenvolvimento do projeto do radiômetro fotovoltaico na metodologia acima mencionada onde citaremos os diversos documentos gerados em cada fase. Esses documentos sofreram várias revisões ao longo do projeto, conforme era previsto, e tiveram sua forma final definida após a revisão de qualificação do radiômetro. Esta documentação final está devidamente organizada de tal forma que através dela é possível implantar uma linha de produção do radiômetro fotovoltaico em uma empresa nacional.

### **5.1. Estratégias para o Desenvolvimento do Radiômetro**

Uma das grandes dificuldades enfrentadas por pesquisadores, meteorologistas, engenheiros e especialistas em energia solar no Brasil para realizar medidas de radiação solar é o alto custo dos radiômetros, principalmente os radiômetros ditos de primeira classe, devido à necessidade de importá-los. Embora o Brasil tenha competência para produzir este tipo de sensor, conforme podemos observar através de inúmeras publicações acadêmicas, esta competência está restrita aos centros acadêmicos e de pesquisa e não geram produtos que possam estar disponíveis no mercado. Constatada a demanda para sensores para medida de radiação solar que fosse de baixo custo e disponível no mercado nacional e que havia a possibilidade de desenvolvê-lo no INPE com transferência de toda a tecnologia para uma empresa nacional de iniciativa privada conforme prevê a da lei de inovação tecnológica, o grupo de células solares do LAS/INPE contactou a Empresa Orbital Engenharia Ltda., para formar uma parceria e enfrentar o desafio de desenvolver este tipo de radiômetro. Foi afirmado um convênio entre o LAS/INPE, o LME/USP, Orbital Engenharia Ltda. e com apoio financeiro da FINEP (projeto FINEP nº 01.04.1001.00), definiu-se a metodologia a ser utilizada e os parâmetros básicos para o desenvolvimento do radiômetro.

A partir de modelos de radiômetros convencionais, utilizados pelo INPE, foram feitas análises sobre os tipos de configurações mecânicas e eletrônicas utilizadas e estudos dos principais problemas de funcionamento. Os resultados obtidos das análises foram usados como parâmetros para a definição da configuração dos modelos a serem

desenvolvidos. O desenvolvimento do radiômetro foi baseado em “fases de desenvolvimento”, sendo estas iniciadas pela especificação e concepção do dispositivo, até chegar-se ao desenvolvimento dos protótipos cabeça de série que foram disponibilizados junto com toda a documentação para a empresa que irá produzir os dispositivos em escala comercial. Foram realizadas várias revisões críticas do projeto registradas em atas e com a elaboração de documentação pertinente a cada fase do projeto. Estas revisões foram feitas através de reuniões abertas com a presença de pessoas interessadas e de uma banca examinadora formada por especialistas convidados.

Para a qualificação do radiômetro e do sistema de aquisição de dados foi elaborado uma matriz de conformidade do projeto. A verificação foi realizada por análise, por inspeção e por testes, incluindo testes ambientais e testes feitos em campo. A qualificação foi realizada através de reunião aberta, onde todos os resultados foram apresentados a uma banca examinadora.

Durante as fases do desenvolvimento do projeto foram criados diversos modelos e protótipos para testes que são apresentados no item 5.3. Também foram desenvolvidos sistemas de caracterização e de calibração de radiômetros, contratados serviços de terceiros para elaboração de testes ambientais e foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados dedicado para medida de radiação solar em campo.

Para o plano de verificação e testes utilizados para elaborar a matriz de conformidade foram aplicadas análises elétrica funcional, térmica, confiabilidade, inspeção visual, inspeção dimensional e de massa, testes elétricos, testes funcionais, testes ambientais e testes de comportamento do radiômetro em campo.

## **5.2. Fases de Desenvolvimento**

O desenvolvimento do radiômetro pode ser dividido, segundo a metodologia utilizada, em cinco fases. Em cada fase foram desenvolvidas atividades específicas. A seguir apresentamos cada fase do projeto.

### **5.2.1. Especificação e Concepção**

Durante a fase de Concepção do radiômetro foi elaborada uma extensa pesquisa bibliográfica sobre o assunto. Nesta fase foram adquiridos os equipamentos necessários ao projeto, inclusive sensores de radiação solar de diversos tipos, para análises e comparação com os modelos desenvolvidos. Após estudos preliminares, foram desenvolvidas as atividades necessárias para se definir uma configuração elétrica e mecânica para o radiômetro. Esta fase também envolveu o estudo e comparação de alternativas para o elemento sensor e para o difusor. Durante esta fase puderam ser desenvolvidos e testados os modelos de desenvolvimento (MD). Também foram tomadas decisões sobre as configurações a serem efetivamente utilizadas para a próxima fase de projeto, fase preliminar, e elaboradas versões preliminares dos seguintes documentos: Especificação Técnica do Radiômetro, Árvore do Produto, Documento de Controle de Interface; Plano de Desenvolvimento e Testes, Descrição da Concepção do Radiômetro Resultados dos Testes dos Modelos de Desenvolvimento. Esta fase encerrou-se com a realização da Revisão de Concepção - (RC).

### **5.2.2. Projeto Preliminar**

Durante a fase de projeto preliminar, com base na concepção aprovada na fase anterior, foi desenvolvido o projeto preliminar do radiômetro que resultou na elaboração dos seguintes documentos: Árvore do Produto, Lista de Partes Materiais e Componentes, Projeto Mecânico (Desenhos), Projeto Elétrico (Diagramas de blocos funcionais e elétricos), Documento de Controle de Interface, Análise de Simulação Funcional,

Análise Térmica, Análise de Confiabilidade, Análise de Risco, Lista de Itens Críticos, Fluxo de Fabricação, Matriz de Verificação e Teste, Projeto dos Modelos de Engenharia, Análise de Viabilidade Técnica e Industrial.

Esta fase encerrou-se com a realização da Revisão do Projeto Preliminar (RPP)

### **5.2.3. Projeto Detalhado**

Durante a fase de projeto detalhado foram desenvolvidas as atividades de detalhamento do projeto, com base no projeto preliminar aprovado através da revisão, onde foram redigidos os seguintes documentos: Atualização dos documentos da RPP; Projeto Detalhado da Configuração Mecânica; Projeto Detalhado da Configuração Elétrica; Especificações de Teste; Procedimentos de Teste; Relatórios dos Testes dos Modelos de Engenharia. Esta fase encerrou-se com a realização da Revisão Crítica do Projeto (RCP).

### **5.2.4. Qualificação**

O objetivo desta fase foi demonstrar que o radiômetro projetado era capaz de atender aos requisitos especificados e demonstrar as margens de projeto. Durante esta fase foram fabricados e testados os modelos de qualificação (MQ) elaboraram-se os seguintes documentos: atualização dos documentos da RCP; resultados dos testes dos modelos de qualificação; relatórios de não-conformidade e ações corretivas. Esta fase encerrou-se com a realização da Revisão de Qualificação (RQ).

### **5.2.5. Pré-Industrialização**

O objetivo desta fase foi detalhar o projeto de fabricação e disponibilizar os meios (ferramentais) necessários para a fabricação seriada do Radiômetro. Nesta fase foi desenvolvido um protótipo denominado “cabeça-de-série” que foi elaborado com base

no modelo de qualificação aprovado. O protótipo cabeça de série é assim denominado por ser o modelo do qual todos os outros radiômetros industrializados serão cópias.

### **5.3. Definições de modelos**

Os modelos são estruturas, componentes ou parte de estrutura do radiômetro que foram desenvolvidas para testes. Eles serviram para definir os materiais a serem utilizados, formas geométricas das partes, desempenho elétrico, vida útil e o comportamento dos dispositivos em campo.

#### **5.3.1. Modelo de desenvolvimento**

Os modelos de desenvolvimento (MD) foram concebidos de modo a oferecer opções de configuração para a definição dos modelos de engenharia. Foi assegurada uma quantidade mínima de configurações, suficientes para reunir dados para a identificação das características relevantes do sensor. Estes modelos permitiram ajustes nas dimensões e mudanças de material utilizado na confecção dos difusores. Na tabela temos a relação de modelos desenvolvidos nesta fase.



Tabela 3 - Modelos de desenvolvimento

Modelo	Especificação		
	Tipo	Material	Dimensões
MD1A	Difusor cilíndrico	Acrílico BR815 / Teflon	$h = 5 \text{ mm}$ , $\phi = 8 \text{ mm}$
MD1B	Difusor cilíndrico	Acrílico BR815 / Teflon	$h = 10 \text{ mm}$ $\phi = 8 \text{ mm}$
MD1C	Difusor cilíndrico	Acrílico BR815 / Teflon	$h = 15 \text{ mm}$ $\phi = 8 \text{ mm}$
MD2A	Difusor cônico	Acrílico BR815 / Teflon	$h = 5 \text{ mm}$ , $\phi_{\text{topo}} = 8 \text{ mm}$ , $\phi_{\text{base}} = 20 \text{ mm}$
MD2B	Difusor cônico	Acrílico BR815 / Teflon	$h = 10 \text{ mm}$ , $\phi_{\text{topo}} = 8 \text{ mm}$ , $\phi_{\text{base}} = 20 \text{ mm}$
MD2C	Difusor cônico	Acrílico BR815 / Teflon	$h = 15 \text{ mm}$ , $\phi_{\text{topo}} = 8 \text{ mm}$ , $\phi_{\text{base}} = 20 \text{ mm}$
MD3	Sensor	Célula solar de silício monocristalino	$20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0,3 \text{ mm}$
MD4A	MD3 + MD1A	Combinação de modelos	
MD4B	MD3 + MD1B	Combinação de modelos	
MD4C	MD3 + MD1C	Combinação de modelos	
MD5A	MD3 + MD2A	Combinação de modelos	
MD5B	MD3 + MD2B	Combinação de modelos	
MD5C	MD3 + MD2C	Combinação de modelos	

### 5.3.2. Modelo de engenharia

Os modelos de engenharia (ME) foram projetados e fabricados a partir dos dados obtidos do modelo de desenvolvimento. A finalidade principal dos modelos de engenharia foi o levantamento das características elétricas funcionais do radiômetro. As partes que integram o sensor foram definidas e identificadas. Estes modelos permitiram ajustes mecânicos e elétricos para que fosse possível através de testes e análises a definição do modelo de qualificação. As opções dos modelos de engenharia aqui estabelecidas foram concebidas em função dos resultados dos modelos de desenvolvimento (MD). Inicialmente dois modelos foram desenvolvidos e testados, porém, devido à necessidade de ajuste em função a lei dos cossenos outros modelos foram necessários e com o desenvolvimento dos modelos de engenharia foram estabelecidos os processos e os procedimentos de fabricação do radiômetro.

**Modelo ME1A** - Este modelo de radiômetro utilizou como sensor uma célula de silício monocristalino convencional 20 x 20 mm e o difusor do tipo DM1A, montados dentro de uma estrutura de alumínio.

**Modelo ME1B** - Este modelo de radiômetro utilizou um sensor de célula de silício monocristalino convencional de 20 x 20 mm e difusor do tipo DM1B, montados dentro de uma estrutura de alumínio.

**Modelo ME 2A** - Este modelo de radiômetro utilizou o modelo MD5A, montados dentro de uma estrutura de alumínio.

**Modelo ME2B** - Este modelo de radiômetro utilizou o modelo MD5B, montados dentro de uma estrutura de alumínio.

**Modelo ME2C** - Este modelo de radiômetro utilizou o modelo MD5B, montados dentro de uma estrutura de alumínio onde o difusor foi adaptado para ter um volume externo a estrutura de alumínio, sendo o prolongamento da área de topo do difusor com uma altura de 3 mm.

**Modelo ME2D** - Este modelo de radiômetro utilizou o modelo MD5B, montados dentro de uma estrutura de alumínio onde o difusor foi adaptado para ter um volume externo a estrutura de alumínio, sendo o prolongamento da área de topo do difusor com uma altura de 5 mm.

### **5.3.3. Modelo de qualificação**

Os modelos de qualificação (MQ) são protótipos dos radiômetros em sua forma final e foram fabricados de modo a garantir que o sensor atendessem às normas, às especificações do radiômetro e às condições para a certificação. A principal finalidade dos modelos de qualificação foi à utilização destes na realização dos testes de desempenho antes, durante e após a realização dos testes ambientais. Observa-se que os testes realizados nesta fase do projeto foram em nível de qualificação. Os modelos de qualificação receberam a denominação de protótipo LAS seguido da numeração referente à série. A numeração de série dos protótipos está constituído de três dígitos, o primeiro dígito da esquerda para direita refere-se ao lote produzido, sendo o primeiro lote foi identificado pelo número zero.

### **5.3.4. Modelo de fabricação**

O modelo de fabricação ou protótipo cabeça de série (PCS) tem por finalidade testar o projeto de fabricação seriada do radiômetro. O mesmo é fabricado utilizando o ferramental e processos de fabricação seriada e possui as mesmas características do protótipo qualificado.

## **5.4. Plano de Verificação e Testes**

O plano de verificação e testes foi elaborado dentro da metodologia estabelecida para verificar se o projeto atende ou não as especificações e aos quesitos pré-estabelecidos. Este plano foi de grande importância para o desenvolvimento do projeto e para

certificação do produto, pois ele permitiu determinar quais os quesitos que não estavam em conformidade e determinar ações de correções. O principal elemento do plano de verificação e testes é a Matriz de Verificação do Projeto (MVP), onde é mostrado o atendimento ou não aos requisitos especificados. Na Revisão de Qualificação (RQ) esta matriz foi preenchida com todos os dados atendidos e com os números dos relatórios de inspeção e de testes.

Os testes e as verificações foram elaborados tendo como referência as normas nacionais e internacionais aplicáveis, natureza do produto, aplicação e condições esperadas de funcionamento do dispositivo. Neste caso, trata-se de um dispositivo eletrônico que utiliza um semicondutor como elemento sensor, destinado á medida da radiação solar global, cuja operação deve ser ininterrupta por longos períodos e exposto as condições ambientais naturais. Foram consultadas diversas normas aplicáveis a radiômetros e componentes eletrônicos em geral. São normas relacionadas ao desempenho, testes e técnicas de caracterização e calibração. A principal organização regulamentadora de sensores e sistemas de medidas de grandezas meteorológicas é a OMM, por isso as normas e recomendações sugeridas por esta organização foram referências imprescindíveis na elaboração dos testes e das verificações aplicadas. Também foram consideradas as normas nacionais e internacionais relacionadas a componentes eletrônicos, como por exemplo, as normas da série IEC (IECEE e IECQ). O estudo destas normas proporcionou informações importantes no contexto da confiabilidade do produto desenvolvido, as quais poderão auxiliar em trabalhos futuros a serem desenvolvidos e algumas delas deverão ser aplicadas rotineiramente no caso de comercialização dos radiômetros desenvolvidos.

Foi definido que a verificação aplicada aos produtos deveria ser por análise, por inspeção e por teste. A verificação por análise consistiu em análise elétrica funcional, térmica e de confiabilidade, a verificação por inspeção consistiu em inspeção visual, dimensional e de massa e a verificação por testes, consistiu em testes funcionais, elétricos e ambientais.

A análise elétrica funcional teve como objetivo demonstrar por meio de simulação as características de desempenho elétrico do radiômetro quando submetido a condições padrões de testes de desempenho elétrico. A análise térmica teve como objetivo demonstrar o comportamento térmico dos protótipos desenvolvidos quando submetidos a condições de variação de temperatura dentro da faixa de operação especificada. Em particular esta análise teve a função de determinar a dependência da temperatura do elemento sensor. A análise de confiabilidade consistiu em demonstrar a conformidade do radiômetro desenvolvido em relação aos requisitos de confiabilidade, tanto de durabilidade quanto de funcionamento, considerando a vida útil do dispositivo mínima de cinco anos em operação contínua.

A verificação por inspeção visual, dimensional e de massa foi realizada para verificar a conformidade em relação às especificações dos materiais, componentes e acabamento superficial utilizados na fabricação dos dispositivos desenvolvidos. Esta verificação ocorreu durante o processo de desenvolvimento e após a conclusão do projeto na fase de qualificação do produto. Para validação da conformidade foi criado um padrão dentro das especificações. Este padrão foi utilizado para comparação de protótipos após os ensaios ambientais aplicados para qualificá-los.

Para verificação por teste, foram definidos vários ensaios com a finalidade de mensurar as características dos dispositivos desenvolvidos e determinar se as propriedades elétricas, mecânicas e funcionais do dispositivo estavam dentro das especificações estabelecidas para o projeto. Os testes aplicados foram testes funcionais, testes elétricos, testes mecânicos e testes ambientais. No processo de verificação por testes foi possível determinar materiais e componentes a serem utilizados ou refugados, determinar as propriedades funcionais de protótipos e estabelecer fatores de correção e calibração a serem aplicados para que o produto pudesse atender aos requisitos de especificação.

Para a realização dos diversos testes definidos no plano de verificação, foi necessária a definição de instrumentação e tipos de testes. Para os testes elétricos foram utilizados apenas multímetros de precisão e para os testes funcionais dos protótipos e dos componentes foram utilizados multímetros de precisão, sistemas de aquisição de dados

de 16 bits com vários canais, radiômetros padrões calibrados de primeira classe, simuladores solares, espectrofotômetros, espectralradiômetros e sistemas de caracterização e calibração especialmente desenvolvidos tais como: sistema de caracterização da lei dos cossenos, resposta espectral e calibração em laboratório e ao ar livre.

Para aplicação dos testes ambientais se utilizou de serviços de outros departamentos do INPE e do DCTA que já realizam estes tipos de ensaios. No caso específico do ensaio ambiental de ultravioleta, por não ser disponível na região próxima a São José dos Campos, foi definido que este ensaio deveria ser montado no próprio LAS.

### **5.5. Documentos do projeto do radiômetro**

Uma das características fundamentais da metodologia de desenvolvimento aqui apresentada é a geração da documentação detalhada do projeto. É através da documentação que o projeto é avaliado nas revisões e é também através desta documentação que se pretende viabilizar a transferência tecnológica de todo o processo de produção e calibração de radiômetros a iniciativa privada nacional. Esta documentação surgiu ao longo do processo de desenvolvimento, tendo como documento básico a especificação do produto e o plano de desenvolvimento que foram os documentos iniciais. Em cada revisão do projeto a documentação foi devidamente atualizada e revisada. A tabela 4 mostra toda a documentação com suas respectivas numerações.

Tabela 4 - Documentos gerados do projeto

<b>Documentos do projeto do radiômetro</b>	
<b>Número do documento</b>	<b>Título</b>
12621000-AN-022	Análise de Risco
12621000-AN-023	Análise de Viabilidade Técnica Industrial
12621000-AN-029	Análise de Simulação Funcional do Radiômetro
12621000-AN-036	Análise de Confiabilidade do Radiômetro
12621000-CH-005	Árvore de Produto
12621000-CH-007	Descrição da Concepção do Radiômetro
12621000-DI-004	Documento de Controle de Interfaces do Radiômetro
12621000-ET-001	Especificação de Radiômetro
12600000-CH-002	Estrutura da Divisão do Trabalho – Radiômetro
12621000-LI-009	Lista de Documentos Configurados – CIDL
12621000-LC-034	Lista de Itens Críticos
12621000-LC-006	Lista de Partes, Materiais e Componentes
12621000-PL-003	Plano de Desenvolvimento e Testes do Radiômetro
12621000-RC-006	Relatório de Laboratório/Calibração
LIT-LAS-TR-001	Relatório de Ensaio Térmico
Nº22-AMR-1/2006	Relatório de Ensaio de Névoa Salina
12621000-LAS-002	Relatório de Ensaio de Ultravioleta





## **6. DESENVOLVIMENTO DO RADIÔMETRO FOTOVOLTAICO**

Os radiômetros desenvolvidos neste trabalho foram concebidos com o objetivo de disponibilizar no mercado nacional sensores de radiação solar que apresentasse qualidade e baixo custo. Para a concepção dos modelos dos radiômetros houve uma intensa interação com a equipe de funcionários e pesquisadores do LIN - Laboratório de Instrumentação Meteorológica, situado no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC em Cachoeira Paulista - SP.

Para atender o quesito de qualidade, além da preocupação no desenvolvimento do sensor e na qualidade das partes e componentes do dispositivo, foi contatada uma empresa de alta tecnologia da área espacial para que juntos pudéssemos viabilizar o processo de industrialização. Um dos fatores que diferencia uma empresa que presta serviços ao setor aéreo espacial é o seu rígido controle de qualidade, característica esta fundamental para o desenvolvimento de dispositivos que estão em satélites onde a manutenção no espaço é praticamente impossível ou inviável. No quesito baixo custo, os radiômetros que utilizam sensores fotovoltaicos são os que apresentam um custo significativamente mais baixo do que os que utilizam sensores do tipo termopilhas. O uso de célula solar de silício como elemento sensor de radiação solar apresenta vantagens como, por exemplo, nível de sinal relativamente alto dispensando o uso de amplificadores, além de ser um dispositivo com custo menor que os fotodiodos e domínio nacional da tecnologia de produção.

### **6.1. Descrição do radiômetro desenvolvido**

O radiômetro desenvolvido neste trabalho é composto basicamente por duas partes, o corpo principal, onde ficam alojados o elemento sensor e o difusor e a base onde o corpo principal é fixado.

As partes que compõem o radiômetro são: corpo principal, difusor, porca de fixação do difusor, sensor, suporte do sensor, resistor, fiação, tampa, base com nível de bolha,

parafusos de nivelamento e parafusos de fixação. A Figura 18 mostra todas as partes e componentes que compõem o radiômetro desenvolvido no LAS.

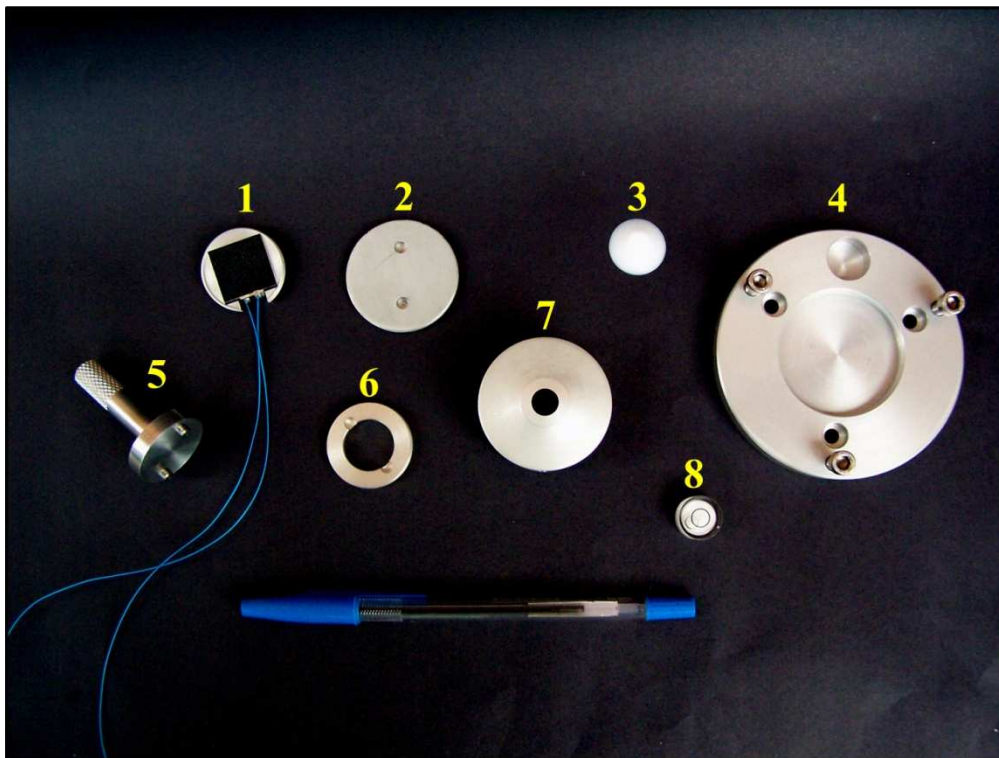


Figura 18 - Partes e componentes do radiômetro desenvolvido: (1) base do elemento sensor, (2) tampa, (3) difusor, (4) base, (5) chave para montagem, (6) anel de fixação do difusor, (7) corpo principal, (8) nível de bolha.

Todas as partes metálicas do radiômetro são confeccionadas em alumínio anodizado de alta qualidade com exceção dos parafusos de fixação que são de aço inoxidável. A liga de alumínio escolhida para esta finalidade foi a 6060 que apresenta magnésio e silício na sua composição, possui média resistência mecânica, porém, boa resistência a corrosão e a maresia, sendo muito utilizado na indústria naval e é ideal para anodização fosca. A utilização de alumínio confere leveza ao dispositivo e praticidade para transporte. O tipo de alumínio escolhido permite que ele seja utilizado em condições ambientais mais diversas possíveis. O alumínio também é o segundo metal mais utilizado no mundo devido a sua abundância na natureza e principalmente por causa de suas propriedades mecânicas. Sua resistência à corrosão é devida à camada aderente e impermeável de óxido de alumínio que se forma sobre a superfície do metal. Essa

camada protetora se forma naturalmente, mas pode ser tornada mais aderente e espessa usando-se processos de anodização.

### 6.1.1. Corpo principal

O corpo principal do radiômetro é constituído por uma estrutura cilíndrica com base de 45 mm e altura 25 mm com uma cavidade interna onde é alojado o elemento sensor, resistor de carga, difusor e peças de fixação. O topo do cilindro tem um formato de cone para evitar que se forme depósito de sujeira e acúmulo de água, que possa atrapalhar o funcionamento do dispositivo em campo. A Figura 19 mostra um desenho do corpo principal do radiômetro. A parede do cilindro possui espessura de 6 mm e na montagem dos protótipos foi utilizada resina para garantir a impermeabilização.

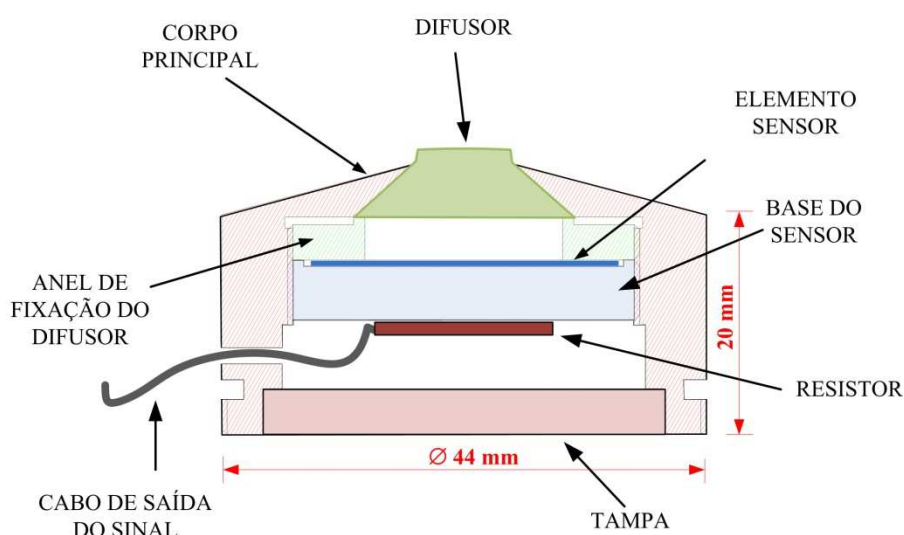


Figura 19 - Desenho do corpo principal do radiômetro desenvolvido.

### 6.1.2. Difusor

O difusor utilizado no radiômetro é um sólido cônico com prolongamento cilíndrico, fabricado em teflon. O difusor tem a finalidade de espalhar a radiação solar uniformemente sobre o sensor e promover uma correção a lei dos cossenos. A geometria do difusor e o tipo de material utilizado foram estudados e testados para atender uma

série de quesitos. O teflon foi o material que apresentou os melhores resultados como dispositivo difusor de radiação solar, além de ser um material que apresenta baixa degradação quando exposto ao ar livre e a radiação solar. Seu custo é relativamente mais alto que o acrílico, outro material avaliado, porém a quantidade deste material utilizado na fabricação dos difusores é pequena e sua vida útil como difusor é maior do que os outros materiais, o que justifica o seu emprego. Na figura 20 é mostrado um desenho esquemático do difusor, as dimensões deste dispositivo bem como a sua geometria foram obtidas experimentalmente (item 6.2).

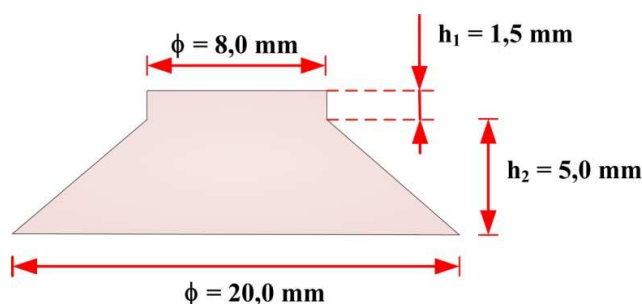


Figura 20 – Desenho esquemático do difusor do radiômetro desenvolvido no LAS.

### 6.1.3. Anel de fixação do difusor

Para fixação do difusor em sua posição foi desenvolvida uma peça em formato de um anel conforme o desenho na Figura 21, com 32 mm de diâmetro e 4 mm de espessura, com rosca métrica na lateral externa. Este anel comprime o difusor contra a parede da base superior interna do corpo principal do radiômetro, garantindo uma boa vedação. O furo central do anel tem 20 mm de diâmetro, para passagem da radiação que irá incidir sobre o elemento sensor instalado logo abaixo deste anel. A Figura 21 mostra este suporte. A instalação do anel de fixação do difusor ao corpo principal do radiômetro é feita com uma ferramenta especialmente desenvolvida para esta finalidade.

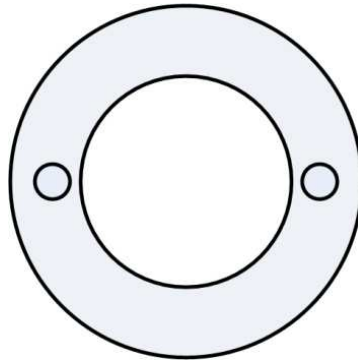


Figura 21 - Anel de fixação do difusor

#### 6.1.4. Suporte do elemento sensor

O suporte do elemento sensor é fabricado em alumínio anodizado no formato de um disco de 32 mm de diâmetro e 5 mm de espessura, com rosca métrica nas laterais para fixação interna junto ao corpo principal do radiômetro. Este suporte é instalado logo abaixo do anel de fixação do difusor e o elemento sensor é colado com uma cola especial sobre este suporte. Para evitar que o elemento sensor se danifique durante a montagem do suporte ao corpo principal do radiômetro, existe na borda deste disco uma saliência na forma de um anel de 2 mm de espessura com altura de 1,5 mm que impede que o elemento sensor seja comprimido contra o anel de fixação do difusor. A área circular interna do suporte com espaço delimitado para a instalação do sensor tem diâmetro de 30 mm, dimensões estas ligeiramente superiores as do elemento sensor, para garantir que pequenas variações nas dimensões deste não impeça sua instalação. Para passagem da fiação que conecta o elemento sensor ao resistor de carga que fica instalado na parte inferior do suporte, existe uma passagem na lateral do suporte. Neste suporte existe também na parte inferior uma pequena região no formato circular sem anodização com um parafuso para conexão da malha de aterramento. A Figura 22 mostra um desenho deste suporte.

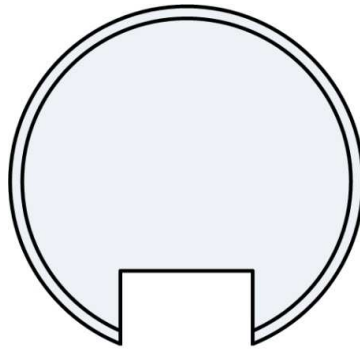


Figura 22 - Suporte do elemento sensor

#### 6.1.5. Elemento sensor

O elemento sensor utilizado é uma célula solar de silício monocristalino convencional de uso terrestre, dimensões de 18 x 18 mm com área ativa de 15,5 mm x 15,5 mm, especialmente desenvolvida para esta finalidade. A Figura 23 mostra o elemento sensor no suporte com dois terminais de prata, sendo um soldado na parte frontal e outro soldado na parte traseira da célula, fazendo a interligação da célula ao resistor de carga e ao cabo de saída de sinal.

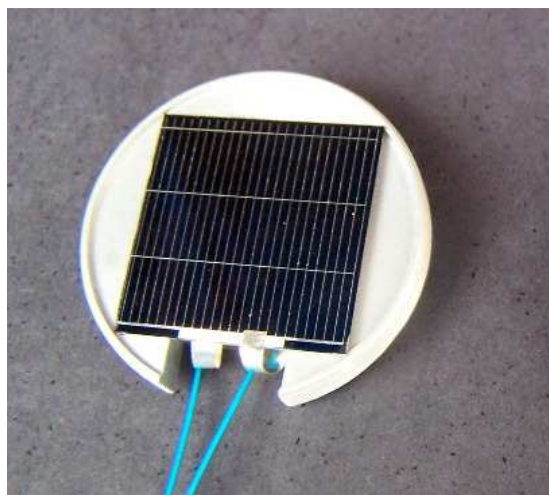


Figura 23 - Elemento sensor do radiômetro.

### **6.1.6. Tampa**

A tampa tem a finalidade de isolar a cavidade interna do corpo principal do radiômetro, onde estão alojados o elemento sensor e o resistor para leitura do sinal, do meio ambiente externo. Ela é confeccionada em alumínio no formato de disco com rosca métrica na lateral para ser rosqueada na base do corpo principal. Entre a tampa e o suporte do elemento sensor é introduzido uma resina de silicone com a finalidade de vedação. A fixação da tampa ao corpo principal é feita com uma ferramenta especialmente desenvolvida para esta finalidade (item 6.2).

### **6.1.7. Base do radiômetro**

A base do radiômetro tem a finalidade de fixá-lo na plataforma de coleta de dados (PCD) e permitir o seu nivelamento. É constituída de quatro partes: disco da base, nível de bolha, parafusos de nivelamento e parafusos de fixação. O disco da base é uma peça em alumínio, com 90 mm de diâmetro e 10 mm de espessura. Possui dois furos passantes com diâmetros de 6 mm, distanciados de 180° para a passagem dos parafusos de fixação. Possui também três furos com roscas distanciados de 120°, onde são instalados os parafusos de ajuste de nível. No centro deste disco foi feito um rebaixo com diâmetro de 42 mm com rosca métrica para instalação do corpo principal do radiômetro. A Figura 24 mostra um desenho desta base, onde pode se observar o nível de bolha próximo a lateral da base e a disposição dos parafusos de nivelamento e fixação.

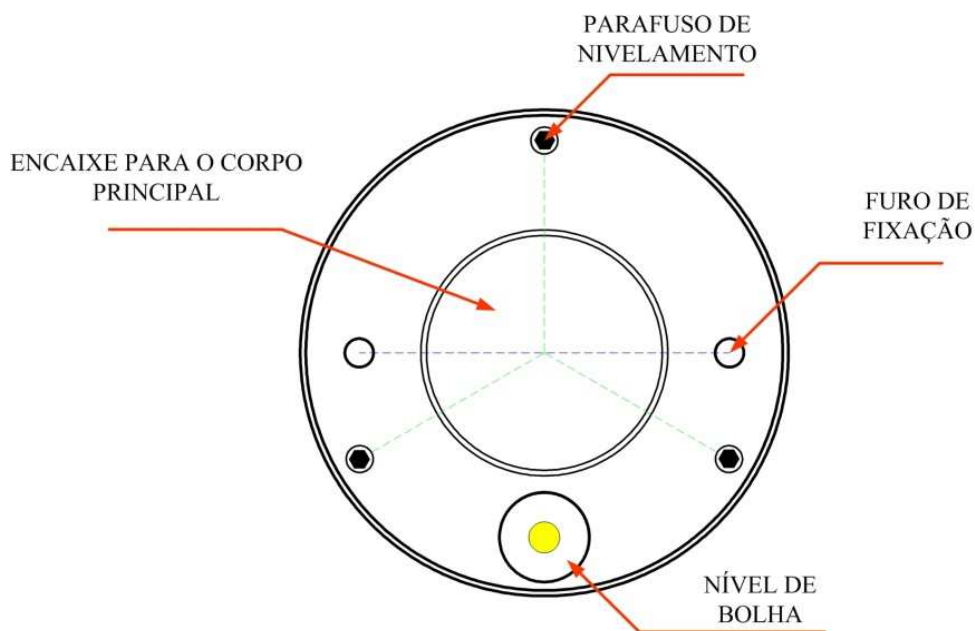


Figura 24 - Base do radiômetro.

#### 6.1.8. Nível de bolha

O nivelamento do radiômetro é feito ajustando a altura dos parafusos de nivelamento na base do dispositivo. Estes parafusos são confeccionados em aço inoxidável com cabeça cilíndrica recartilhada, que dispensa o uso de ferramenta para seu ajuste. Nesta base também é instalado o nível de bolha. Para auxiliar nesta atividade foi instalado um nível de bolha de 360° no disco da base. O nível de bolha é uma estrutura sólida de acrílico resistente, circular com diâmetro externo 15 mm, de leitura fácil em todas as direções.

#### 6.1.9. Cabo de saída do sinal

Um dos problemas mais frequentes de danos em dispositivos de medida de radiação solar está relacionado à fiação utilizada para saída do sinal, principalmente quando esta fiação fica exposta ao ar livre. Normalmente, a isolamento tende a se degradar provocando curto circuito ou oxidação dos condutores afetando as conexões elétricas.



Os radiômetros desenvolvidos utilizam uma fiação especial, especificada para as condições de trabalho de campo, onde a fiação pode ficar exposta à radiação solar e às intempéries climáticas. Ela é constituída por um cabo especial de acordo com as normas DIN VDE 0245 e IEC 60228, marca Helukabel, flexível, blindado, com dois condutores internos de 0,14 mm<sup>2</sup> (26 AWG) torcido que confere baixo efeito de diafonia, diâmetro externo aproximadamente 3,6 mm, temperatura de trabalho -40 °C a +80 °C, indutância aproximada de 0,65 mH/km e impedância de 78 Ω/km. O isolamento dos condutores internos é em PVC especial Y12, e está de acordo com a norma DIN VDE 0207. A malha de blindagem interna é estanhada com 85% de cobertura. A cobertura externa é em PVC YM2, segundo DIN VDE 0207, de cor cinzenta. Este cabo é resistente ao óleo e a agentes químicos, auto-extinguível e não propagador de chama segundo DIN VDE 0482 e IEC 60332. Os materiais empregados para produzir estes cabos são isentos de silicone, cádmio e substâncias que prejudiquem o meio ambiente ou podem causar danos a saúde, segundo o fabricante.

## **6.2. Ferramenta especial para fixação e remoção das partes do radiômetro**

A ferramenta para fixação e remoção das partes do radiômetro foi especialmente desenvolvida para esta atividade. Ela tem a finalidade de proporcionar facilidade e segurança na instalação da porca de fixação do difusor, do suporte do sensor e da tampa no corpo principal. É confeccionada em alumínio resistente e constituída por uma haste fixada em um pequeno disco com dois pinos que se encaixam nos furos nas peças removíveis do radiômetro. A Figura 25 mostra um desenho desta ferramenta. A remoção das peças se dá girando a haste no sentido convencional da maioria dos parafusos. A haste é recartilhada para que não fique escorregadia nas mãos do montador.

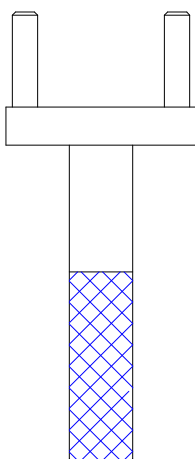


Figura 25 - Desenho da ferramenta para fixação e remoção das partes do radiômetro

### **6.3. Anodização das peças do radiômetro**

Para anodizar e tingir as peças de alumínio do radiômetro foi desenvolvido no laboratório de química do LAS/INPE um pequeno processo de anodização. Embora a técnica de anodização de alumínio seja comum e existem muitas empresas que oferecem este tipo de serviço no mercado, ele foi desenvolvido dentro do contexto deste trabalho com a finalidade de agregar valor ao dispositivo desenvolvido e também determinar os parâmetros de qualidade para que, no caso da industrialização do dispositivo, este serviço seja terceirizado (BERNARD S., 2006).

### **6.4. Montagem dos radiômetros.**

A montagem dos radiômetros desenvolvidos neste trabalho pode ser classificada como concentrada, onde o produto final é quase totalmente montado por um só grupo de técnicos especializados. Este grupo realiza todas as operações de montagem, desde a classificação e seleção das partes e componentes até os testes de qualidade necessários. Neste tipo de estrutura orgânica todas as atividades são realizadas num único local de trabalho e mostra ser muito eficiente para montagem em pequena escala.

A montagem de diversos protótipos de radiômetros foi realizada na Empresa Orbital Engenharia Ltda., que possui todas as condições necessárias, garantido a qualidade do produto final. A montagem dos protótipos também permitiu avaliar o grau de complexidade deste processo e pode estabelecer os procedimentos necessários para uma produção seriada.

A montagem do radiômetro fotovoltaico, a partir das partes e componentes fabricados, é uma operação delicada, pois a célula solar é frágil e a montagem exige além de pessoal qualificado, ambiente isento de partículas de pó e equipamento especial para soldagem dos conectores nas células solares. O procedimento para montagem consiste basicamente na seleção e classificação das partes e componentes, avaliação de funcionamento por testes do elemento sensor, preparação do elemento sensor com soldagem dos inter-conectores e colagem no suporte, fixação do resistor de leitura e do cabo da saída de sinal, instalação do difusor e do elemento sensor no corpo principal do dispositivo, aplicação de resina para selagem, fechamento do corpo principal do dispositivo e fixação da etiqueta contendo a marca e o número de série do produto.

A base do radiômetro é um acessório à parte e sua montagem consiste somente na fixação do nível de bolha e dos parafusos de nivelamento. Após montado o corpo principal do radiômetro, ele é fixado na base e então o dispositivo é calibrado e uma etiqueta plastificada contendo o número de série e a constante de calibração e anexada na ponta do cabo de saída de sinal.

A Figura 26 mostra dois protótipos de radiômetros fotovoltaicos com a estrutura de alumínio anodizado e tingido. Ambos os protótipos tiveram seus difusores e estruturas desenvolvidas e anodizadas no LAS/ INPE. Os elementos sensores foram desenvolvidos no LME/USP e foram montados na Orbital Engenharia Ltda..



(a)



(b)

Figura 26 - Protótipos de radiômetros fotovoltaicos desenvolvidos. (a) Protótipo anodizado e tingido. (b) Protótipo anodizado sem tingimento.

## **7. SISTEMAS DE AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS**

Um dos elementos estratégicos no estudo e aproveitamento da energia solar no Brasil é o domínio da tecnologia de aquisição automática de dados. Neste capítulo, vamos apresentar um sistema de aquisição e armazenamento de dados, denominado DataRad, que foi desenvolvido dentro do escopo desta tese e tem como objetivo, assim como o radiômetro de célula solar, disponibilizar no mercado nacional um sistema completo para medir e monitorar a radiação solar, especificamente projetado para adquirir e armazenar dados ambientais por longos períodos (mais que um ano).

A descrição da radiação solar para uso em meteorologia ou para dimensionamento de sistema de energia envolve a realização de medidas que devem ser obtidas seguindo protocolos pré-estabelecidos e expressa de uma maneira clara. Uma medida consiste em determinar uma grandeza física por sua relação com outra grandeza que pode ser quantificada de forma mais fácil. Nos dias atuais, as medidas de radiação solar são feitas por sensores térmicos ou fotovoltaicos que geram em seus terminais um sinal elétrico que é proporcional a radiação incidente. Este processo apresenta diversas vantagens, entre elas podemos citar flexibilidade para transmissão da informação, confiabilidade e grande versatilidade de aplicações.

O uso de radiômetros para medida instantânea da radiação solar ou séries de medidas em curtos períodos é de pouco interesse e sua aplicação se restringe a uso em laboratórios, caracterização de fontes, monitoramento de radiação em estufas e em processos de calibração de outros radiômetros. Em solarimetria, tanto para uso em meteorologia quanto no mapeamento da radiação para dimensionamento de dispositivos de captação de energia, o interesse pelos dados de radiação consiste no levantamento de séries de insolação, integrais e médias diárias, mensais e anuais da irradiação solar. Para o levantamento destes dados, é necessária a realização de um número muito grande de medidas o que exige um processo que seja feito automaticamente através de sistema de aquisição e armazenamento de dados (WMO, 2008).

Uma das dificuldades na determinação das séries de irradiação solar é o registro das medidas obtidas. O registro das medidas de radiação solar por sistemas automáticos possibilita a eliminação de erros humanos na leitura dos instrumentos, erros de digitação, perdas de dados, sincronismo de leitura entre vários instrumentos, além de propiciar dados mais confiáveis, com frequências maiores e intervalos de tempo melhor definidos (DIAS, 2007).

Os primeiros registradores de radiação solar utilizavam meios mecânicos e óticos para registrar a radiação solar. Estes instrumentos ainda são utilizados nos dias atuais, devido ao grande número deles espalhados pelo mundo, como os heliógrafos e actinógrafos. Eles foram os precursores dos sistemas de aquisição de dados modernos. O heliógrafo, instrumento utilizado para medir a duração da insolação, registra a duração do brilho do Sol através de manchas enegrecidas em uma fita de papel graduada em frações de tempo. Através de um sistema mecânico, similar a um relógio, a fita de papel é deslocada continuamente ao longo do dia sobre um ponto onde é feito o foco da radiação solar obtido através de uma esfera de cristal. Diversas correlações desenvolvidas permitem o cálculo da radiação solar a partir do registro deste dispositivo. O actinógrafo, também conhecido como piranógrafo, é outro dispositivo mecânico também utilizado para medição da radiação solar. Este dispositivo consiste em um sensor que utiliza pares bimetálicos que tem uma pena (ponta com tinta) como elemento registrador. Com a incidência da radiação o par bimetálico gera movimento que é transmitido mecanicamente para a pena que irá marcar uma carta de papel graduada em frações de tempo. A carta de papel é fixada sobre um cilindro que gira lentamente ao longo do dia, com deslocamentos proporcionais ao tempo em sistema semelhante ao heliógrafo. Com o surgimento dos microprocessadores integrados, em meados dos anos 70, os sistemas eletrônicos de aquisição de dados começaram a substituir os dispositivos com registradores de papel. No início do desenvolvimento destes sistemas, devido à baixa confiabilidade dos circuitos eletrônicos e ao alto custo dos computadores, o processamento digital se resumia a fazer coletas e gerar lista de dados. Com o crescimento vertiginoso do uso de microprocessadores nas últimas décadas nas mais diversas áreas, o custo dos sistemas de aquisição reduziu

consideravelmente, permitindo o desenvolvimento de sistemas confiáveis para aplicações que necessitam de medidas acuradas, além de processar grandes quantidades de informações, com pequena necessidade de manutenção (TIBA, et al., 2000).

Com o uso de microprocessadores digitais foi possível integrar as diversas partes que compõem um sistema de aquisição e armazenamento de dados, que anteriormente era individualizado, dando origem a um dispositivo programável compacto, com grande versatilidade de uso. Este sistema integrado recebeu a denominação em inglês de "datalogger" sistema que integra em um único dispositivo a conversão e representação dos sinais elétricos de sensores externos, associados a unidade de armazenamento, processamento e comunicação de dados. Estes dispositivos têm a capacidade de operar (coletando, processando e armazenando dados) independente de um computador, mas normalmente permitem a conexão a sistema de transmissão de dados, impressoras, gravadores de dados e mesmo computadores, para visualizações em tempo real ou recuperação de dados armazenados em sua memória (FRAMÇA, 1997).

Os dispositivos normalmente utilizados na aquisição e armazenamento de dados de radiação solar são de uso geral e projetados para uma grande variedade de sensores. Os programas destes dispositivos são desenvolvidos para atender uma gama enorme de necessidades. Isso torna estes dispositivos complexos, com necessidade de treinamento de operadores do sistema, exigindo técnicos treinados para instalação dos equipamentos e custos muitas vezes elevados por causa de sua capacidade de atender diversos usuários.

### **7.1. Aquisição de dados**

Um sistema de aquisição de dados automático digital é composto por várias partes, conforme podemos observar na Figura 27, onde temos um diagrama em bloco de uma configuração padrão, comum nas plataformas de coletas de dados meteorológicos e solarimétricos.

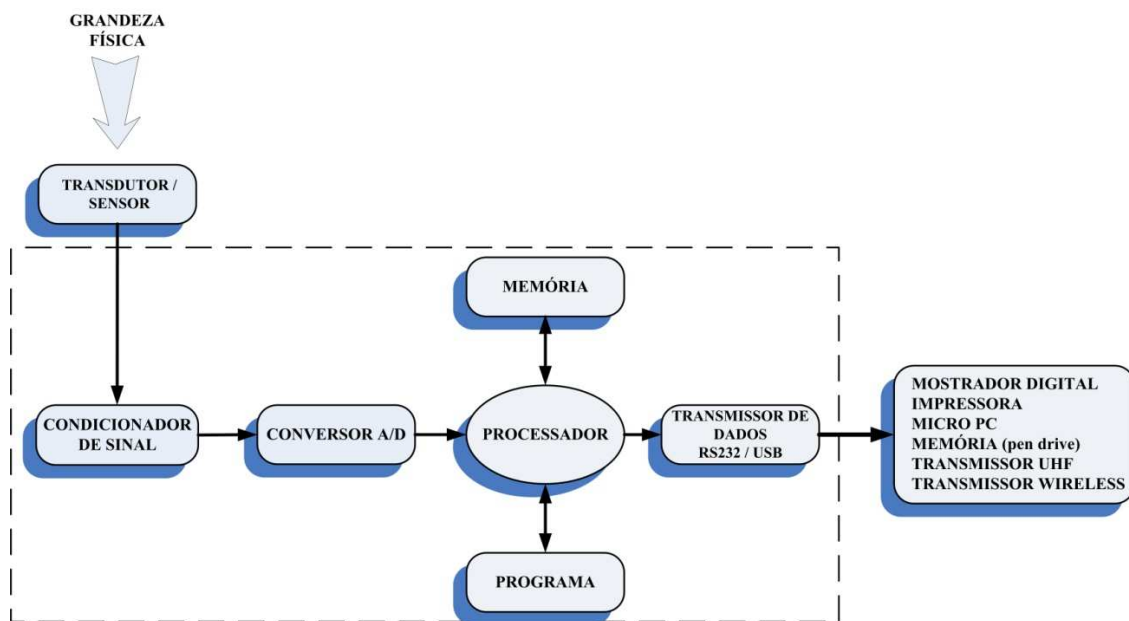


Figura 27 - Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados automático digital.

### 7.1.1. Transdutores

O sensor é o elemento sensível que capta a informação da grandeza física que está sendo medida (ALLOCCA, et al., 1984). Em sistemas de aquisição de dados utiliza-se o termo transdutor que genericamente significa um dispositivo que transforma um sinal medido em outro (geralmente um sinal elétrico) o sensor seria apenas a região do transdutor que fica exposta a grandeza a ser medida. Para medida de radiação solar, existe uma grande variedade de transdutores, em todos eles o sinal elétrico gerado é proporcional a uma quantidade física que é característica da radiação solar.

Nos radiômetros desenvolvidos neste trabalho, o sinal elétrico gerado inicialmente é a corrente, que é convertida em tensão através de um resistor apropriadamente escolhido, instalado dentro do próprio dispositivo. O sinal de tensão é proporcional ao fluxo da radiação solar por unidade de área. O elemento conversor primário é o resistor, que irá converter a corrente em um sinal de tensão adequado para ser lido pela próxima etapa do sistema de medida. Muitos radiômetros comerciais não possuem o conversor primário, ficando o dimensionamento deste a cargo do usuário.



O sinal de tensão gerado pelo radiômetro, por si só, é desprovido de significado. Para que ele represente a grandeza medida, é necessário calibrar o radiômetro e transformar matematicamente o valor medido na grandeza desejada, multiplicando o valor da tensão obtida pela constante de calibração. Então teremos o valor da grandeza desejado com as suas respectivas unidades.

### **7.1.2. Condicionador de sinal**

O sinal elétrico gerado pelos transdutores, muitas vezes não é adequado a próxima etapa do sistema de aquisição de dados. Isto se deve a grande variedade de transdutores e a falta de padronização. Para que o sinal seja lido pelo próximo estágio do sistema de aquisição de dados é necessário condicioná-lo. Os condicionadores de sinais são circuitos eletrônicos que adéquam os sinais analógicos para a conversão digital. Para condicionar o sinal adequadamente, uma série de procedimentos é executada por circuitos como: amplificadores, filtros, casadores de impedância, isoladores e no caso dos sensores do tipo termopares são utilizados circuito de compensação denominados junções a frio. Os amplificadores têm a função de ajustar a faixa da intensidade do sinal com a entrada do conversor analógico digital (A/D). Os filtros têm a função de melhorar a relação sinal/ruído, inerente a qualquer sinal elétrico e evitam interferências de sinais de outras fontes não desejáveis. Os casadores de impedância, quando presentes, têm a função de garantir a máxima transferência do sinal do transdutor para o próximo estágio. Em muitos casos é desejável proteger o estágio de aquisição de dados do transdutor e para isso, utilizam-se circuitos de proteção como isoladores ou limitadores de tensão e corrente que tem a função de impedir que sobrecargas de tensão e corrente causem danos aos circuitos eletrônicos que são sensíveis a estes intempéries (PARK, et al., 2003).

Para dispositivos de medida que utilizam transdutores do tipo termopar ou termopilhas é necessário um cuidado especial com as conexões elétricas. Nos termopares o sinal elétrico é função da diferença de temperatura das junções de medida e de referência, qualquer outra junção que venha aparecer devido às conexões irá causar erros na

medida. Uma maneira de evitar isso é o uso de cabos especiais para a conexão dos termopares ou o uso de circuitos de compensação, também denominados de junta fria. Os condicionadores de sinais para transdutores do tipo termopar também utilizam circuitos para compensar a não linearidade da função tensão/temperatura (DIAS, 2007).

### 7.1.3. Conversor analógico para digital

O conversor A/D (conversor analógico para digital) é o elemento que converte o sinal elétrico na saída do circuito condicionador em uma representação numérica binária compatível com o processador digital. Ele é um circuito eletrônico básico em qualquer instrumentação digital de medida. Existem várias topologias deste circuito, cada uma delas com características específicas, sendo que as principais variações estão na velocidade de conversão e na resolução (PARK, et al., 2003).

Existem disponíveis no mercado circuitos conversores A/D de oito bits, 10 bits, 12 bits, 16 bits e assim por diante. Um conversor de  $n$  bits, significa que ele é capaz de gerar  $2^n$  níveis do sinal analógico. Um conversor A/D de 12 bits, por exemplo, gera em sua saída até 4096 níveis discretos na sua saída. Os conversores A/D são os responsáveis diretamente pelo significativo aumento nos níveis de precisão e exatidão dos atuais instrumentos de medidas.

Na Figura 28, temos um diagrama em blocos que representa o conversor A/D. Inicialmente, o sinal analógico  $V(t)$  é amostrado em tempos discretos, o quantificador irá aproximar o valor amostrado a um dos  $2^n$  níveis possíveis, por arredondamento e truncagem. Em seguida, o sinal amostrado é convertido em um código digital, normalmente um código binário. Com o código digital gerado o processador pode então manipular este dado.

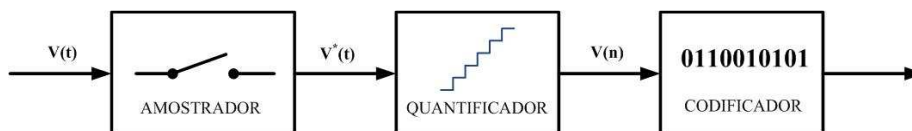


Figura 28 - Conversor analógico para digital.

As características mais importantes e comuns nos conversores A/D são basicamente a resolução, tempo de conversão, erro de quantização e a precisão. O sinal analógico aplicado a entrada de um conversor A/D deve possuir uma faixa de amplitude compatível com a faixa que o conversor trabalha, denominada faixa dinâmica de trabalho do conversor A/D. Por isso, na maioria das vezes o sinal de entrada tem que ser condicionado por um circuito eletrônico de forma a possibilitar o máximo aproveitamento dentro da região linear de operação do conversor.

A resolução é uma terminologia adotada para indicar a menor unidade legível que o conversor A/D consegue gerar em sua saída. Ela determina a menor quantidade de sinal analógico que pode ser convertido dentro da faixa dinâmica de entrada do quantizador em um conversor A/D. Por isso, podemos dizer que a qualidade de informação obtida do sinal analógico é determinada pela resolução do conversor A/D.

Podemos expressar a resolução de um conversor A/D ou de um dispositivo de aquisição de dados em função do fundo de escala da faixa dinâmica de entrada ou pela resolução percentual. A resolução percentual só depende do número de bits na entrada do conversor, por isso os fabricantes preferem especificar a resolução de seus produtos através do número máximo de bits que o conversor possui em sua entrada. Na tabela 5, temos exemplos de resolução para diversos números de bits de conversores.

Tabela 5 - Exemplos de resolução de diversos conversores A/D

<b>NÚMERO DE BITS</b>	<b>RESOLUÇÃO %</b>
4	6.67
8	0.392
10	0.0977
12	0.0244
14	0.00610
16	0.00153
32	$2,3 \times 10^{-8}$

A resolução em função do fundo de escala da faixa de tensão em que está sendo digitalizado pode ser calculada pela expressão (8.1), onde  $V_{FE}$  é a tensão de fundo de escala, ou seja, é o maior sinal da faixa dinâmica de entrada do conversor A/D e  $n$  é o número de bits do conversor:

$$Resolução = \frac{V_{FE}}{2^n - 1} \quad (8.1)$$

Observe que  $V_{FE}$  depende da escala escolhida e pode assumir qualquer valor dependendo do condicionador de sinal utilizado. Por exemplo, considerando o radiômetro de célula solar desenvolvido neste trabalho, ele apresenta uma resposta típica de 15 mV para uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> que é a irradiância padrão para AM1,5G. Se utilizarmos um conversor A/D de 12 bits e um condicionador de sinal que nos permita ter uma faixa dinâmica de entrada de zero a 20 mV para leitura do nosso radiômetro, obtém uma resolução de 4,9 μV (0,02%). Isto significa que o conversor A/D consegue ler sinais em sua entrada para uma incidência menor que 0,5 W/m<sup>2</sup>. Naturalmente, a precisão do radiômetro deve ser considerada quando falamos em sinais desta ordem de grandeza.

O tempo de conversão é o tempo gasto pelo conversor A/D para obter em sua saída o valor digital a partir do momento em que o sinal analógico é aplicado a sua entrada. Este tempo depende da topologia do circuito utilizado e da resolução. Em geral, conversores de maior resolução apresentam tempos maiores de conversão. Na prática, encontra-se uma grande variedade de tempos de conversão, desde frações de segundos até sub-nanosegundos. O tempo de conversão afeta diretamente o custo do circuito e é um critério importante quando se quer converter para digital sinal variante no tempo. Ele determina a máxima frequência possível que o conversor A/D consegue converter a partir do sinal de entrada variante no tempo.

#### **7.1.4. Microprocessadores**

O microprocessador é o principal componente de um sistema de aquisição de dados, porém o desempenho do sistema de aquisição não é determinado apenas pelo microprocessador e sim pelo conjunto de todos os seus componentes. O microprocessador é um dispositivo eletrônico complexo que executa funções lógicas, aritméticas e de controle. Ele é formado por um conjunto de circuitos que são integrados em um único componente. Seu funcionamento é coordenado por um programa especial interno que o usuário do sistema de aquisição de dados não tem acesso. Este programa é específico para cada modelo de microprocessador e consiste num conjunto de instruções que controlam todas as funções que o microprocessador deve executar e quando deve ser executado.

A diferença entre microprocessador e microcontrolador é devida alguns aspectos funcionais. Para que um microprocessador possa funcionar, ele necessita de outros circuitos externos tais como memórias e interfaces para receber e enviar dados. Com a evolução tecnológica, principalmente na confecção de circuitos integrados, os fabricantes de microprocessadores começaram a incorporar memórias e dispositivos periféricos na mesma pastilha de seus microprocessadores. Surgiram então os microcontroladores que são mais versáteis e simples de serem usados.

Existem diversos tipos de microprocessadores disponíveis no mercado, com várias características que o diferem entre si, entre elas a mais importante é o fato de cada processador ter o seu próprio conjunto de instruções que são previamente gravados em uma memória especial que permite apenas a leitura, ou seja, as suas informações são gravadas uma única vez e após isso não podem ser alteradas ou apagadas, somente acessadas. O conjunto de instruções do microprocessador pode ser dividido em duas categorias, instruções de controle e instruções de processamento. As instruções de controle têm a função de busca, interpretação e controle da execução das instruções e dos demais componentes do microprocessador. As instruções de processamento têm a função de execução das operações do microprocessador

Dentro de um microprocessador temos vários conjuntos de dispositivos que permitem que ele execute suas operações tais como: a unidade de aritmética e lógica que executa as operações matemáticas com os dados, os registradores que funcionam como uma memória auxiliar e serve para armazenar os dados, a unidade de controle recebe instruções da unidade de entrada e saída e controla qual etapa do programa está sendo executado, o relógio interno que é o gerador de ciclos do microprocessador, memórias, registradores e outros circuitos que tem funções específicas relacionadas à operação do dispositivo. A velocidade de um microprocessador está relacionada com o número de bits internos. Quanto maior a quantidade de bits maior será a velocidade de processamento. A quantidade de bits que o microprocessador consegue transferir e recuperar da memória depende do número de bits externos.

Para os microprocessadores comerciais, existem dois tipos básicos de arquiteturas, a Von Nuemann e a Harvard. A maioria dos microprocessadores possui a arquitetura Von Nuemann, que é composta por um conjunto de blocos funcionais gerenciados por uma máquina seqüencial através de um único controle central que determina os tempos em que cada sinal de controle está presente nos barramentos internos e externos. Neste tipo de arquitetura não temos distinção entre a memória de programa, dados e instruções, o que é vantagem, pois a memória não é um fator limitante no desempenho do processador e, por terem um menor número de circuitos interno, pode trabalhar com clocks mais altos (PARK, et al., 2003).

Quanto às plataformas, os processadores podem ser CISC (“Complex Instruction Set Computer”) ou RISC (“Reduced Instruction Set Computing”). Os processadores CISC são capazes de executar várias centenas de instruções complexas, sendo extremamente versáteis, por outro lado os RISC são capazes de executar apenas algumas poucas instruções simples. Justamente por isso, os chips baseados nesta arquitetura são mais simples e muito mais baratos. Outra vantagem dos processadores RISC é que por terem um menor número de circuitos internos, podem trabalhar com *clocks* mais altos. Atualmente existem também os processadores híbridos, que são essencialmente processadores CISC, porém possuem internamente núcleos RISC. Assim, à parte CISC

do processador pode cuidar das instruções mais complexas, enquanto que o núcleo RISC pode cuidar das mais simples, nas quais é mais rápido.

O microprocessador é com certeza o dispositivo tecnológico que mais rápido evoluiu nos últimos anos, em pouco mais de 20 anos a capacidade deles cresceu de forma espantosa. Usando somente a velocidade como elemento comparativo, temos que os primeiros processadores na década de setenta possuíam uma velocidade de 4 MHz e os atuais já alcançam os 10 GHz.

## **7.2. Qualidade dos dados adquiridos**

Um sistema de aquisição de dados automático é uma ferramenta muito útil para obtenção de medidas da radiação solar, pois, permite automatizar o processo, reduzir custos e erros devido a enganos de leitura e de anotações. Mas, a qualidade dos sistemas de aquisição de dados por si só não garante a qualidade dos dados adquiridos (DIAS, 2007).

Para representarmos adequadamente a medição de uma grandeza física é necessário conhecermos os conceitos sobre erro, precisão e acurácia. Por melhor que seja o instrumento utilizado para medir uma grandeza física, naturalmente o valor medido não será igual ao valor real da grandeza, pois todo processo de medida introduz erros. Alguns dados tidos como de má qualidade, podem ser aproveitados desde que se conheçam a natureza dos erros destes dados.

Geralmente, ocorrem erros de vários tipos em um processo de medida que podem ou não ser desprezíveis. Erro é um conceito quantitativo que altera o valor de uma medida e pode até invalidá-la. Os diferentes tipos de erros podem ser classificados como erros sistemáticos e erros estatísticos. O erro sistemático é sempre constante para todas as medidas e a diferença do valor lido para o valor verdadeiro da medida é sempre a mesma. Os erros estatísticos se distribuem aleatoriamente em torno do valor verdadeiro da medida (VUOLO, 1998).

A precisão de uma medida indica o grau de dispersão dos dados obtidos da medição em relação à medida, é um conceito qualitativo utilizado para caracterizar erros estatísticos com pequena dispersão em relação ao valor médio verdadeiro.

A acurácia ou exatidão também é um conceito qualitativo utilizado para descrever quanto representa o afastamento do valor medido em relação ao valor verdadeiro e dá idéia do erro sistemático associado à medida. Um valor acurado é um valor que tem um erro total muito pequeno e está muito próximo do valor verdadeiro da medida (VUOLO, 1998).

Para se ter uma boa exatidão de uma medida, é necessária que a precisão do instrumento seja boa e, ainda, que os erros sistemáticos sejam pequenos. A precisão é uma condição necessária num instrumento de medida, mas não o suficiente, para obtenção de dados com boa qualidade (VUOLO, 1998).

Os erros estatísticos resultam de variações aleatórias do valor medido, devido a fatores que não podem ser controlados. Em geral, estes erros se devem somente ao processo de medida, mas em certos casos estes erros são intrínsecos ao próprio mensurando (VUOLO, 1998). Por exemplo, a medida da irradiação solar na superfície da Terra possui inúmeros erros aleatórios intrínsecos, tais como erros devido a mudanças atmosféricas, fumaça, nuvens, turbidez, variação da densidade da camada de ar que está sobre o radiômetro por causa da temperatura, atividades solares, ou mesmo sombras transitórias devido à passagem de pássaros ou sujeiras sobre o radiômetro. Além de erros aleatórios intrínsecos ao mensurando, existem os erros aleatórios intrínsecos do próprio sistema de medida, como ruídos térmicos, eletromagnéticos e outros.

Em certos casos, os erros estatísticos podem ser reduzidos ou eliminados, atuando sobre as fontes dos erros aleatórios. Consideramos que um erro foi eliminado de um processo de medida quando ele se torna muito menor que os outros erros envolvidos. Quando não é possível eliminar os erros aleatórios, podemos reduzi-los a partir da obtenção de um valor médio da medida através de repetidas medições. O valor médio de um grande número de resultados tem um erro estatístico menor.



O erro sistemático de uma medida não é aleatório, ele é a diferença entre o valor lido e o valor verdadeiro da medida e é o mesmo para qualquer resultado quando a medição é repetida. O erro sistemático mais comum em medidas realizadas diretamente com um transdutor é o erro de calibração. O erro de calibração pode ser devido à determinação errada do valor da constante de calibração ou a degradação natural da calibração. Por exemplo, o radiômetro fotovoltaico pode ter sua constante de calibração alterada devido a fatores como degradação do elemento sensor, degradação do difusor e degradação da eletrônica interna e outros. Por isso, é recomendável a recalibração destes radiômetros periodicamente. Outro erro sistemático comum em radiômetros solares, além do erro de calibração, é o erro devido à lei de cossenos.

Os erros sistemáticos presentes em instrumentos de medidas podem ser reduzidos ou eliminados por meio de re-calibrações, melhorias no instrumento de medida ou por correção dos resultados. O erro sistemático que um instrumento de medida apresenta pode ser apresentado em relação ao valor lido, ao fundo de escala ou em relação uma faixa de valor (INAMASU, 1996). Por exemplo, no caso do radiômetro fotovoltaico, o erro de leitura pode ser de  $\pm 10 \text{ W/m}^2$  dentro de uma escala de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Isso significa que quando tivermos uma leitura de  $100 \text{ W/m}^2$ , apesar de o valor esperado ser  $100 \text{ W/m}^2$ , o valor real da grandeza medida está entre  $90 \text{ W/m}^2$  e  $110 \text{ W/m}^2$ . A Figura 29 ilustra graficamente o erro instrumental.

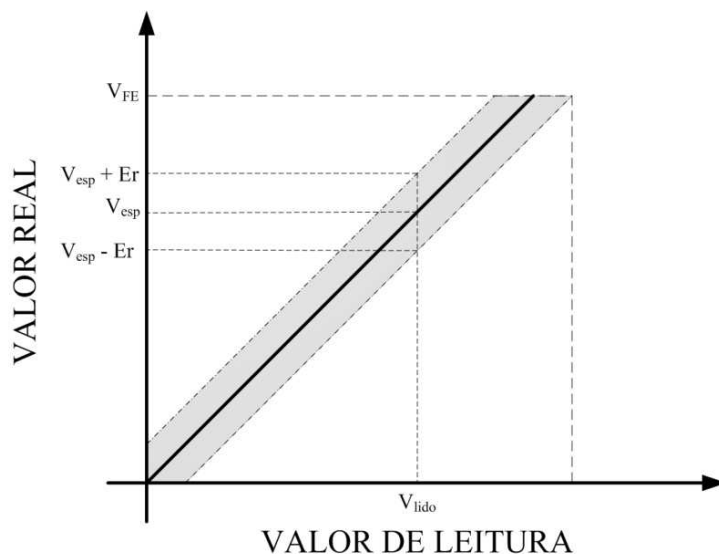


Figura 29 - Erro sistemático de medida apresentado em relação ao valor lido.

O erro sistemático instrumental pode também ter um valor percentual em relação ao valor medido. Considerando o exemplo anterior com um erro percentual de 5% em toda escala de medida, se tivermos uma medida de  $90 \text{ W/m}^2$ , teremos um erro de  $\pm 4,5 \text{ W/m}^2$  e o valor real da grandeza medida será de  $(90 \pm 4,5) \text{ W/m}^2$ . A Figura 30 mostra graficamente a distribuição do erro percentual para medidas em toda a faixa de leitura.

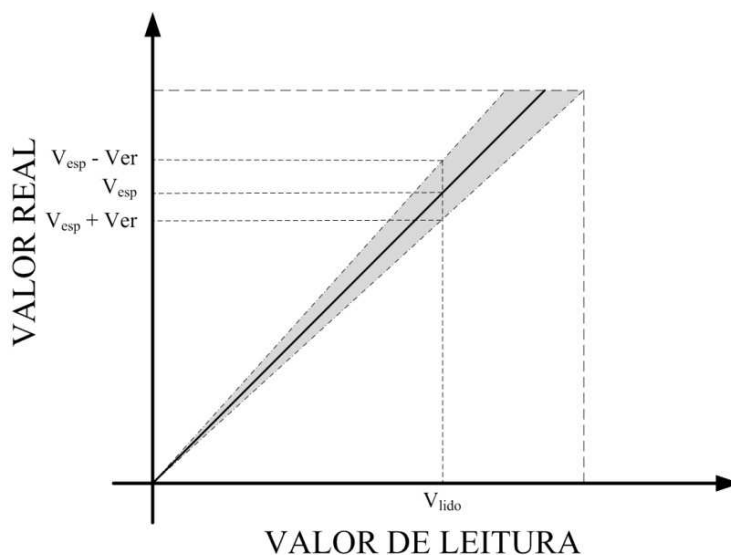


Figura 30 - Erro sistemático percentual em relação ao valor lido.

Onde:  $V_{\text{esp}}$  é o valor esperado,  $V_{\text{r}}$  é valor real,  $e$  é o erro de medida,  $V_{\text{l}}$  é o valor lido e  $V_{\text{r}}$  é igual  $V_{\text{esp}} \pm e$ .

Para realização de medidas com elevada exatidão, por exemplo, a medida de radiação solar, é necessário que se tenha dados com pequena dispersão, ou seja, que sejam dados obtidos com elevada precisão, mas também que sejam valores próximos ao valor real da grandeza. Um bom sistema de aquisição de dados é capaz de realizar medidas com elevada exatidão e precisão.

Os transdutores também contêm erros sistemáticos e aleatórios que devem ser considerados quando se está avaliando os dados obtidos por um sistema de aquisição de dados. A precisão de um transdutor está relacionada ao erro que o sinal elétrico tem na sua saída. O erro é um dos principais critérios que qualifica um transdutor e um sistema

de aquisição de dados, pois um sistema mais preciso apresenta um erro menor que um menos preciso (PARK, et al., 2003).

Entre os efeitos não ideais de um sistema de aquisição de dados dois são os mais importantes: o erro de quantização e o erro devido a não exatidão do instante de amostragem. O erro de quantização é o erro devido ao processo de conversão do sinal analógico para o digital. O sinal analógico é contínuo no tempo, portanto ele pode assumir qualquer quantidade no tempo. O conversor A/D transforma o sinal analógico em um sinal discreto no tempo, onde cada amostra gerada pelo quantizador tem uma precisão finita. Existe uma relação de proporcionalidade entre o sinal analógico e o código ou palavra digital que foi gerada pela aproximação do valor amostrado no processo de quantização. O processo de quantização através da aproximação introduz um erro que varia em função do número de bits do conversor e da tensão de entrada e este erro é intrínseco a qualquer sistema de conversão de analógico para digital. A Figura 31 ilustra o erro de quantização e podemos determinar este erro através da Equação (8.2), onde  $V_{FE}$  é a tensão de fundo de escala.

$$E_q = \frac{V_{FE}}{2(2^n - 1)} \quad (8.2)$$

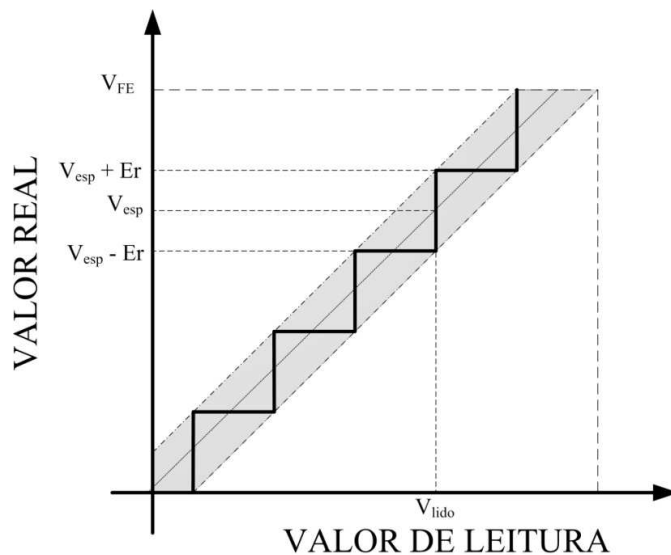


Figura 31 - Erro de quantização

### **7.3. Sistema de aquisição de dados dedicado – DataRad**

Uma das grandes dificuldades enfrentadas para realizar aquisição de dados de radiação solar em campo é, além dos altos custos dos equipamentos, devido à necessidade de importação, a ausência de um dispositivo que seja prático de usar e forneça dados que não exijam grandes manipulações matemáticas para serem utilizados. O DataRad é um dispositivo eletrônico de aquisição e armazenamento de dados que foi concebido especialmente para atender a demanda de mercado e ser uma alternativa para os engenheiros e pesquisadores da área de energia solar que necessitam de um sistema para medida e monitoramento de radiação solar em campo. Este dispositivo é um "datalogger" dedicado à medida da radiação solar, mas também possui flexibilidade para monitorar outras grandezas físicas que possam ser de interesse como: temperatura, velocidade do vento, umidade e outras. Ele possui uma série de características que o torna o instrumento adequado para o levantamento de dados de radiação solar e ambientais em regiões remotas, onde não se dispõem de energia elétrica e sistemas de comunicação. É um instrumento simples de usar, compacto, porém robusto o suficiente para o trabalho em campo, possui grande capacidade de armazenamento de dados, baixo consumo de energia podendo operar com baterias por longos períodos e capacidade de suportar as intempéries de operação em campo. Acoplado a um sistema de alimentação por painéis solares este sistema pode operar em campo sem assistência, realizando funções equivalentes a uma pequena plataforma de coleta de dados ambientais.

A metodologia adotada para o desenvolvimento foi a mesma utilizada para o desenvolvimento dos radiômetros, conforme apresentado no capítulo dois, com algumas adaptações necessárias, devido à natureza do produto. Para o acompanhamento sistemático das atividades, durante o desenvolvimento do DataRad, além das revisões pré-estabelecidas no projeto básico, foram realizadas diversas reuniões com a empresa contratada, estabelecendo itens de ação e soluções tecnológicas. Em cada reunião, o trabalho realizado ao longo da fase era avaliado quanto a sua qualidade e atendimento aos prazos e objetivos. A aceitação foi realizada após uma minuciosa verificação por testes do dispositivo e de toda a documentação pertinente ao projeto. Para aplicação de

testes ao DataRad foi elaborado um documento denominado Plano de Testes, onde foi definido como deveria ser testado o DataRad incluindo testes funcionais e integrados. Os testes funcionais foram realizados em etapas, que consistiram da validação do funcionamento das partes e componentes do sistema, tais como: o mostrador digital, do teclado de entrada de parâmetros, da comunicação serial, do teste de gravação no dispositivo externo (“Pen Drive”), do teste do circuito de aquisição e condicionamento de sinal analógico, a apresentação do resultado da aquisição no mostrador digital (“display”). Os testes integrados consistiram na avaliação do desempenho do dispositivo já em sua forma final. Para isso, o dispositivo foi conectado a um microcomputador, onde foi instalado o programa de operação do dispositivo e conectado radiômetros e circuitos que simulavam outros tipos de transdutores ao DataRad . Através do programa foram definidos os parâmetros ajustáveis e enviados ao DataRad. Após um determinado período de aquisição, foi realizada a leitura da memória com a geração do arquivo .txt. Em seguida, este arquivo foi avaliado quanto à consistência dos dados através do aplicativo Excel da “Microsoft Corporation”. Para validar os testes, além de obedecer aos quesitos pré-estabelecidos no documento Plano de Testes, o processo foi repetido várias vezes.

### **7.3.1. Descrição do DataRad**

O DataRad é um “datalogger” com resolução de 12 bits que possui seis entradas analógicas para a conexão de transdutores, sendo quatro entradas para transdutores do tipo radiômetros ou similar e duas entradas para termopares. Ele é capaz de periodicamente amostrar, adquirir, condicionar, digitalizar e armazenar os sinais provenientes dos transdutores. Estes sinais são convertidos em valores e unidades adequadas a grandeza física que está sendo medida, podendo ser apresentadas no mostrador digital do próprio dispositivo ou serem transferidas via interface de comunicação do tipo USB (“Universal Serial Bus”) para um microcomputador ou a um dispositivo de armazenamento de dados como, por exemplo, uma memória flash (pen drive).

O dispositivo possui diversos parâmetros, que são ajustáveis tanto em modo local, via teclado do próprio dispositivo, como de forma remota, via interface USB, conectada a um microcomputador. Os parâmetros ajustáveis são:

- Identificação do tipo de radiômetro
- Escalas de medição
- Constante de calibração, conforme as características dos radiômetros.
- Período de Varredura ou Taxa de Aquisição (1 min, 5 min, 10 min).
- Data no formato dd/mm/aa
- Hora no formato hh:mm:ss
- Período de aquisição (início e fim diário de aquisição no formato hh:mm:ss)

As medidas de intensidade da irradiação solar são apresentadas com as unidades em  $\text{mW/cm}^2$  e  $\mu\text{mol/m}^2\text{s}$ . Para o caso de usar outro tipo de transdutor a unidade é mV e as medidas de temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ . Os transdutores do tipo radiômetro solar podem ser identificados através de uma lista com alguns tipos pré-estabelecidos como: Global, PAR, UV e Saldo radiômetro.

### **7.3.2. Arquitetura**

O DataRad é composto basicamente por uma interface para sensores, uma unidade micro-controlada, um conjunto de teclas para programação, um mostrador digital e uma interface de comunicação, conforme representado no diagrama de blocos da Figura 32.

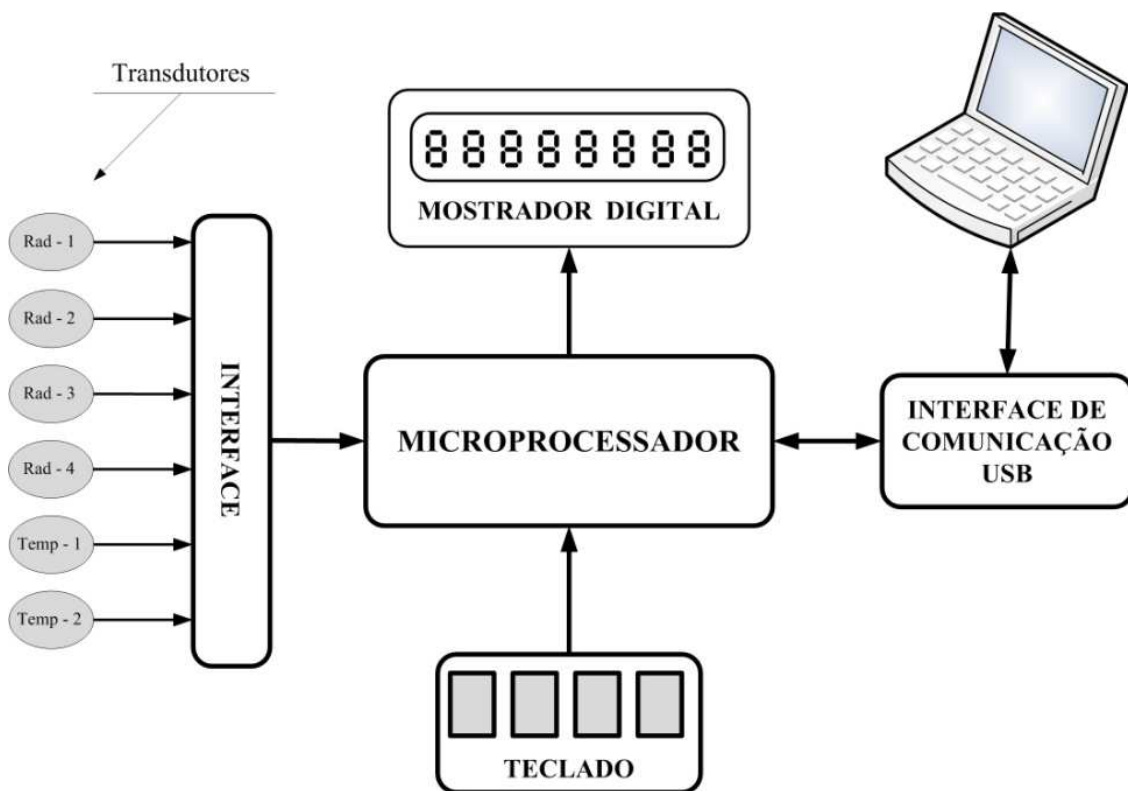


Figura 32 - Diagrama de blocos do dispositivo DataRad.

### 7.3.3. Interface para transdutores

A interface para os transdutores são circuitos condicionadores que foram desenvolvidos para permitir a conexão de até quatro transdutores de radiação solar ou qualquer outro transdutor que tenha sua saída dentro da faixa de operação do dispositivo. Os sinais provenientes dos transdutores são selecionados seqüencialmente através do multiplexador analógico de seleção de canal. A saída deste multiplexador é conectada a um demultiplexador de seleção de escala, que dispõe de sete saídas, cada saída é ligada a um amplificador de instrumentação de ganho fixo correspondente a uma das sete escalas disponíveis. A interface para transdutores permite também a conexão de até dois termopares tipo T na faixa de  $-20^{\circ}\text{C}$  até  $+80^{\circ}\text{C}$  e com compensação de junção fria. As saídas dos amplificadores de instrumentação são ligadas ao circuito integrado do microcontrolador através das entradas do multiplexador analógico e do conversor

analógico-digital de 12 bits. A interface para os transdutores permite operação nas escalas de 5 mV, 10 mV, 20 mV, 50 mV, 100 mV, 200 mV e 500 mV.

#### **7.3.4. Unidade microcontrolada**

A unidade microcontrolada tem a função de executar o software interno, de armazenar as medidas e de controlar os demais periféricos. É constituída basicamente por um microcontrolador, um contador de endereço, uma memória de dados de 2 Mbytes tipo *Flash EPROM* e um gerador de data e hora (RTC).

O microcontrolador contém toda a lógica de processamento, portas de entrada e saída, memória de programa e memória de parâmetros. Ele recebe do teclado externo os parâmetros ajustáveis e os armazena na memória de parâmetros, recebe também o comando para enviar os dados a uma unidade de gravação externa como, por exemplo, um pen drive que esteja conectado à interface USB (host). Ele pode também receber os comandos de um microcomputador tipo PC via interface USB (device) e lhe envia os parâmetros ajustáveis e as medidas armazenadas ou adquiridas em tempo real.

O microcontrolador também atua no multiplexador e demultiplexador analógico para selecionar o sensor e a sua escala correspondente, realiza a varredura dos sensores, efetua a leitura das medidas, armazena os dados na memória e envia os dados a um mostrador digital para serem apresentadas ao usuário.

As principais características do microcontrolador utilizado são: processador RISC de 16 bits e de baixo consumo, frequência de operação de 8 MHz, memória de programa de 48 Kbytes, memória de parâmetros de 10 Kbytes, conversor AD interno de 12 bits, nove entradas analógicas, duas interfaces seriais USART, 48 pinos de entrada / saída e contador de tempo interno.

A capacidade da memória de dados foi dimensionada tendo por base uma periodicidade de aquisição de 5 minutos e uma autonomia de 13 meses (396 dias). Das 24 horas do dia, consideraram-se 16 horas iluminadas e 8 horas escuras, por exemplo, o DataRad



poderá ser programado para fazer medidas das 04:00 até as 20:00 horas e permanecer em estado de espera das 20:01 até as 03:59 horas. Desta forma, serão realizadas 192 varreduras por dia e 76.032 varreduras no período de 396 dias. A cada varredura, deverão ser armazenados 16 bytes, uma vez que as medidas serão armazenadas já calculadas em unidade de medida e convertidas para BCD. O horário de início e de fim do período diário de aquisição assim como a periodicidade são parâmetros ajustáveis a serem definidos pelo usuário na configuração da operação do dispositivo. Por isso, o tempo para que a memória atinja sua capacidade máxima de armazenamento poderá ser maior ou menor.

### **7.3.5. Teclado**

O teclado permite ajustar os parâmetros do DataRad sendo composto por quatro teclas ou chaves sendo uma chave para seleção de modo (data, horário, definir radiômetro, escala, constante de calibração, período de varredura, período de aquisição, transferir medidas para *pen drive* e apagar a memória *flash EPROM*), uma chave para retornar ao modo anterior, uma chave para incrementar e uma chave para decrementar

### **7.3.6. Mostrador digital**

O mostrador digital tem a função de auxiliar na interface homem-máquina de ajuste dos parâmetros de operação. O mostrador do DataRad é constituído por um *display* padrão de cristal líquido de 2 linhas com 16 caracteres cada. Para cada passo de definição de parâmetro informa qual parâmetro está sendo modificado e mostra o valor ajustado pelo teclado. Além disso, quando solicitado pelo usuário, o mostrador também pode apresentar o resultado das medidas, sendo a irradiância solar em  $\text{mW}/\text{cm}^2$  ou  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ , a temperatura em  $^{\circ}\text{C}$  e o sensor genérico em mV. A cada 1/6 do período de varredura a medida referente a um dos sensores é apresentada no mostrador.

### **7.3.7. Interfaces USB**

O DataRad possui duas interfaces de comunicação, podendo desempenhar tanto o papel de servidor (*Host*) como o de dispositivo (*device*). Na comunicação com o *pen drive*, atua como servidor e na comunicação com o microcomputador tipo PC, atua como dispositivo. Portanto, a interface USB provê duas conexões: uma para a função de host e uma para a função de device. Para tanto, a interface USB está conectada às duas USARTs do microcontrolador. Através da conexão para a função host o DataRad consegue transferir os dados das medidas adquiridas para o *Pen Drive*. Esta função está disponível apenas quando não há comunicação com o microcomputador. Através do microcomputador é possível programar os parâmetros ajustáveis, iniciar e parar o processo de medidas e apagar a memória *Flash EPROM*. Além disso, é possível obter as medidas em tempo real, as medidas armazenadas e os parâmetros ajustáveis armazenados. A interface serial constitui-se de um controlador USB. Portanto o nível físico será USB com uma taxa de 1,5 Mbps.

### **7.3.8. Projeto elétrico**

O circuito do DataRad é montado em duas placas separadas, sendo uma placa dos circuitos analógicos e a outra dos circuitos digitais. A placa digital contém o microcontrolador, a memória de armazenamento de dados, a interface com o teclado e o mostrador digital. A placa de circuitos analógicos contém a interface com os transdutores e a interface de comunicação externa (USB). A Figura 33 mostra uma foto do protótipo do DataRad que encontra-se em operação no Laboratório de Energia Solar do LAS/INPE.

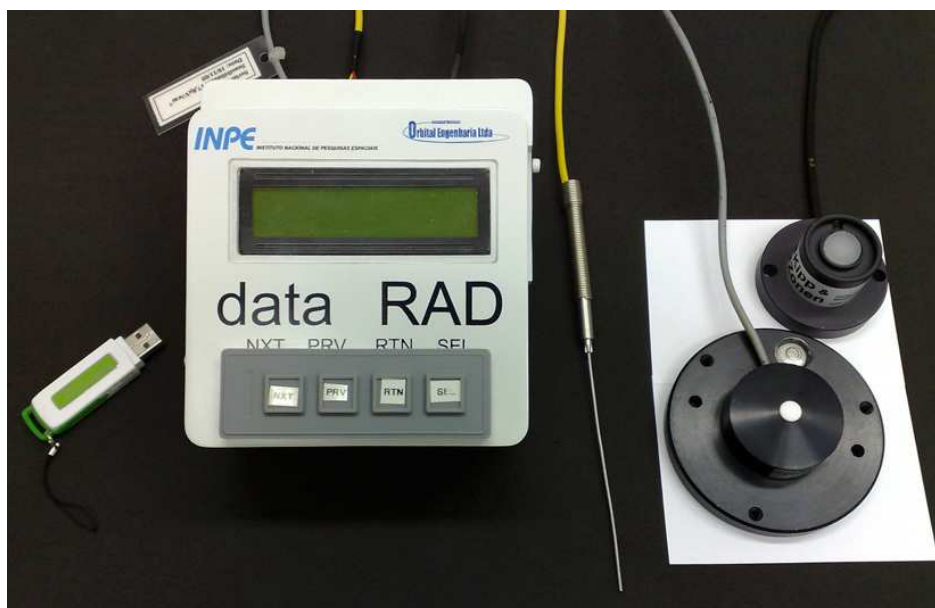


Figura 33 - Foto do protótipo do DataRad

### 7.3.9. Programa interno do DataRad

O programa interno do DataRad propicia o controle de todas as partes constituintes do dispositivo, bem como a comunicação com o computador tipo PC e com o *pen drive*. Este programa reconhece os comandos do teclado para a definição dos parâmetros ajustáveis e os armazena em depósitos de dados apropriados. Analogamente, reconhece comandos provenientes de um microcomputador quando no modo dispositivo e armazena os parâmetros ajustáveis recebidos nos depósitos de dados correspondentes ou envia os resultados das medidas solicitados, seja em um grande lote, com todas as medidas armazenadas, ou em tempo real, onde cada medida é enviada logo após a aquisição ser feita.

Ao reconhecer um dispositivo de armazenamento de dados externo, como por exemplo, um *pen, drive*, o programa entra no modo servidor e habilita o comando via teclado para o envio das medidas para o dispositivo de armazenamento externo.

Uma vez definidos os parâmetros, o programa realiza o ciclo de aquisição, varrendo os sensores de entrada, lendo o seu valor, convertendo a leitura para unidades de medida, armazenando-as e apresentando-as no mostrador do DataRad ou no microcomputador.

#### **7.4. Operação do DataRad**

A operação do DataRad é simples. Ele foi concebido para ser operado facilmente, não exigindo nenhuma qualificação especial além de um rápido treinamento de operação do dispositivo e do uso do programa em um microcomputador. Basicamente, a operação do sistema consiste em conectar os sensores e fornecer os parâmetros de operação do sistema. O dataRad possui quatro modos de operação ao ligar o dispositivo, ele já se encontra no modo de definição de parâmetros, estado este no qual não realiza medidas e aguarda que o usuário defina os parâmetros ajustáveis através do teclado ou através de um computador via interface USB. Através de um comando SEL (seleção), ele entra no modo medidas. Para entrar no modo de comunicação USB, para comunicação com o *pen drive*, o DataRad deve receber um comando do teclado da unidade microcontrolada. Uma vez iniciada esta comunicação, operando em modo *host*, a comunicação com o computador tipo PC é inibida. O DataRad só volta ao modo de medidas, habilitando novamente a comunicação com o microcomputador quando a transferência de dados for concluída. Para entrar no modo de comunicação com o microcomputador, o DataRad deve receber um comando deste. Uma vez iniciada esta comunicação, operando em modo *device*, a comunicação com o *pen drive* é inibida. O DataRad só volta ao modo de medidas, habilitando novamente a comunicação com o *pen drive*, quando a transferência de dados for concluída ou a comunicação cancelada.

#### **7.5. Programa de interface com o usuário**

Para ajustar remotamente os parâmetros de operação do DataRad, bem como para solicitar as medidas adquiridas, foi desenvolvido um programa específico para o DataRad, com uma interface visual de comunicação com o usuário fácil de ser utilizada

que permita programar os parâmetros ajustáveis de forma análoga ao teclado do dispositivo, bem como de descarregar as medidas gravadas ou visualizar em tempo real os sinais medidos.

Esta interface é composta por um conjunto de telas e é executada em um microcomputador do tipo PC utilizando a plataforma Windows. A tela principal é composta por um conjunto de campos para a definição de todos os parâmetros ajustáveis previstos e oito botões, conforme é mostrado na Figura 34. Alguns campos são próprios para digitar o valor desejado, como é o caso de data, horário, constantes de calibração, início diário de aquisição e fim diário de aquisição. Já outros campos são do tipo caixa de seleção, como é o caso escala, período de varredura e tipo de transdutor. Os botões são para realização de várias atividades relacionadas a interface. O botão "Ler Parâmetros", resulta no envio do comando que solicita a demonstração na tela dos parâmetros que estão ajustados no dispositivo. O botão "Receber Medidas", resulta no envio do comando solicitar dados ao dispositivo que então apresenta na tela os dados medidos no monitor do micro. Estes dados são apresentados na forma de tabela que é automaticamente aberta no programa Excell do Windows Office.



Figura 34 - Tela principal do programa de interface com o usuário.

Ao acionar o botão "Enviar Parâmetros" os parâmetros ajustados na tela são enviados ao DataRad substituindo os parâmetros anteriormente ajustados. Ao definir o "Início Diário de Aquisição", o "Fim Diário de Aquisição" será automaticamente definido como o horário de início mais 16 horas, mas poderá ser alterado pelo usuário para qualquer outro horário de término. Para um funcionamento contínuo é necessário colocar um valor ligeiramente menor que o horário de início como fim diário da aquisição, assim o dispositivo irá desligar e reiniciará imediatamente podendo gastar menos de um minuto para essa operação. O botão "Parar Medidas" coloca o DataRad no modo definir parâmetros, o que faz com que o dispositivo paralise as medidas. Com as medidas paralisadas, o botão "Parar Medidas" modifica tornando-se o botão "Iniciar Medidas". O botão "Ler/Exportar Dados Pen Drive" permite transferir todo o conteúdo da memória de dados do DataRad para uma unidade externa de gravação que pode ser um pen drive, um gravador de CD ou DVD ou qualquer outro dispositivo até mesmo um sistema de transmissão de dados sem fio. O botão "Alterar Porta Serial" deve ser utilizado para selecionar a porta de comunicação do micro em que o dispositivo foi conectado. Esta função é importante principalmente quando se tem mais de um dispositivo conectado ao mesmo computador. O botão "Tempo Real" quando acionado e se o dispositivo estiver adquirindo dados irá mostrar uma outra tela no monitor. Esta tela permite visualizar os valores adquiridos pelo dispositivo em tempo real. Na Figura 35 é mostrada uma imagem desta tela.

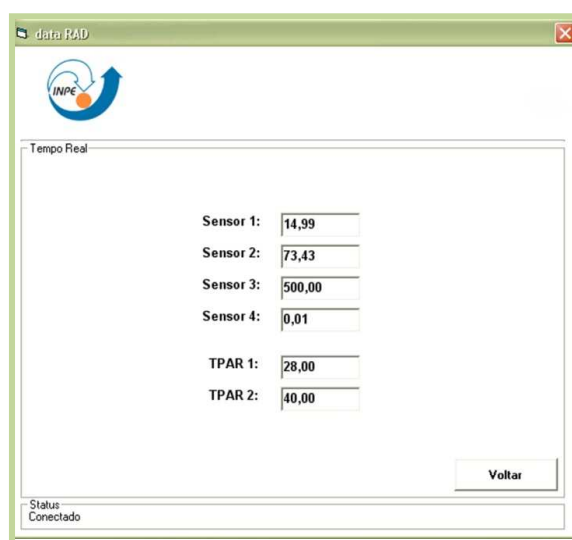


Figura 35 - Tela do modo de apresentação de dados em tempo real.

## **8. CARACTERIZAÇÃO, CALIBRAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Neste capítulo serão apresentados os resultados de diversos testes, as dificuldades e as soluções encontradas para o desenvolvimento do radiômetro. Apresentaremos inicialmente os sistemas de caracterização principais que foram utilizados no laboratório para os testes dos modelos e dos protótipos, e algumas alternativas empregadas na montagem destes sistemas. Em seguida, apresentaremos os resultados experimentais mais relevantes durante a fase de desenvolvimento e por último a caracterização dos protótipos de qualificação. Também serão discutidos os processos sobre calibração e apresentaremos os resultados obtidos dos testes com o sistema de aquisição de dados DataRad.

Muitos dos resultados aqui apresentados são úteis para demonstrar as características gerais dos fenômenos observados e serviram de parâmetros de referência para ajustes dos sistemas de medidas, estudos ou para avaliação de um material ou componente. Por isso, não apresentaremos na maioria das medidas as estimativas dos erros e a sua imprecisão, embora tenhamos tomado todo o cuidado no processo de obtenção destes dados e foram utilizados instrumentos de medidas com boa precisão e devidamente calibrados. Nas medidas relacionadas à caracterização final dos protótipos de qualificação, procuramos apresentar os resultados com indicação quantitativa da qualidade das medidas.

Podemos classificar os resultados experimentais em duas fases. A primeira fase consistiu nos testes e estudos que ocorreram durante o desenvolvimento do radiômetro e dos sistemas de caracterização. A segunda fase consistiu na obtenção de dados experimentais para qualificação dos radiômetros desenvolvidos e do sistema de aquisição de dados.

Para a qualificação dos radiômetros desenvolvidos foram montados 40 protótipos similares ao protótipo que se tornou o “cabeça de série”. Destas quarenta unidades foram escolhidos aleatoriamente 12 dispositivos para serem calibrados, caracterizados e testados, sendo 06 unidades anodizadas na cor preta e 06 unidades anodizadas na cor

natural do alumínio. Das doze unidades, duas foram separadas para servir de referência em caso de comparações após os testes se necessárias. Estas unidades que foram separadas receberam a denominação de “testemunhos” e não foram submetidas a nenhum tipo de teste que pudesse alterar suas propriedades elétricas, mecânicas e ópticas. Apenas verificou-se o seu estado de funcionamento e foram guardadas em ambientes secos, protegidos de poeira e da luz.

## **8.1. Sistemas de caracterização**

Para o desenvolvimento do projeto foi necessário a caracterização de partes, componentes, modelos e de protótipos de radiômetros. Para estas atividades, o LAS e o INPE possuem uma excelente infra-estrutura, sendo uma das melhores do Brasil, com laboratórios modernos, dispondo assim, de uma gama enorme de equipamentos e pessoal devidamente qualificado que permitem a caracterização e testes de materiais e componentes ópticos e eletrônicos. Mas, alguns dos sistemas de medidas tiveram de ser desenvolvidos ou adaptados para atender as necessidades específicas deste projeto. Também foi utilizado serviço de outros laboratórios, como, por exemplo, o ensaio ambiental de névoa salina que foi realizado no DCTA (Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial),

### **8.1.1. Sistema de caracterização I x V**

Para medir as características da curva I x V sob iluminação de células solares e elementos sensores fotovoltaicos, o grupo de célula solar do LAS/INPE dispõem de um sistema constituído por um simulador solar da Oriel Instruments, modelo 81190, que utiliza uma lâmpada de xenônio de 1000 W, dois multímetros que são utilizados para medida da corrente (I) e da tensão (V) da célula, marca HP (Hewlett Packard), modelo 3478A de 5½ dígitos de resolução que permitem medir tensões de até 100 nV na escala de 30 mV e correntes com resolução de 1 µA na menor escala. Para simular a resistência de carga variável aplicada aos terminais da célula neste sistema, utiliza-se



uma carga dinâmica que é uma fonte programável da *Hewlett-Packard* (HP), modelo 6632A (0 - 20V/0 - 5A). Esta fonte gera uma rampa de tensão que é aplicada nos terminais da célula com polarização reversa. O sistema possui também uma placa de controle e aquisição de dados acoplada a um micro computador tipo PC. Esta placa GPIB realiza leitura nos multímetros e controla a carga dinâmica. Através de um programa especialmente desenvolvido para o sistema é possível fazer o levantamento da curva  $I \times V$  automaticamente. O sistema também possui uma base com temperatura controlada onde são fixadas por sucção a vácuo as células de testes e a de referência. Os contatos elétricos são feitos na base da célula através do suporte de fixação e na região de topo da célula através de pontas metálicas especiais sobre pressão. Tanto o suporte como os pontos de medidas são de metal bom condutor, para diminuir a resistência de contato. As superfícies da ponta de medida e a área do suporte que faz contato com a base da célula são constantemente limpas para remoção de camadas de óxidos. Esta base possui controle de temperatura que permite manter a temperatura entre 5 °C a 75 °C, constante no valor estabelecido, com variações inferiores a 1 °C. O controle de temperatura é feito através de um sistema com circulação forçada de água pela placa de fixação das células da marca Farma Scientific Inc., modelo 2006. Um diagrama ilustrativo do sistema de caracterização  $I \times V$  do LAS/INPE é mostrado na Figura 36.

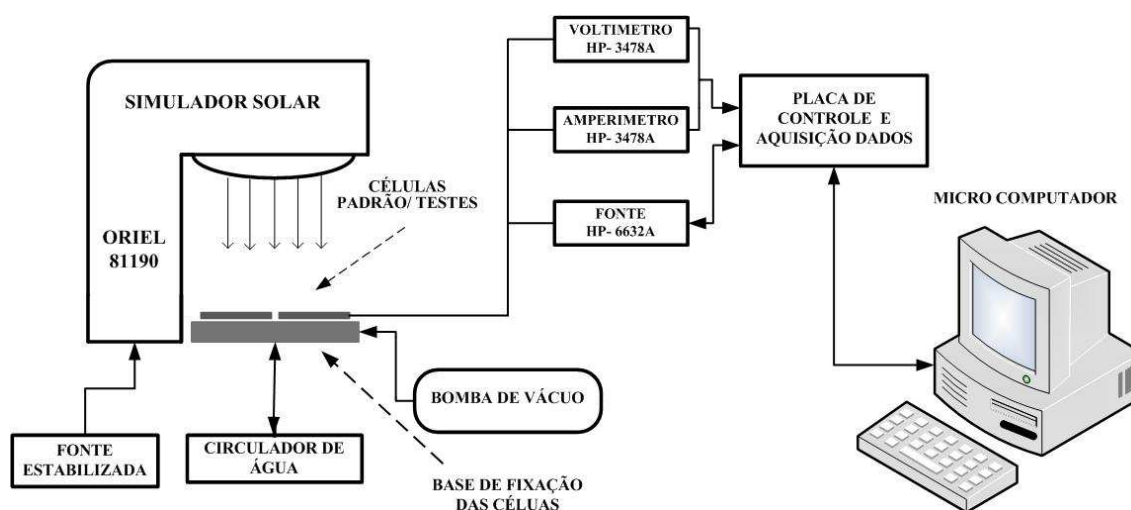


Figura 36 - Diagrama ilustrativo do sistema de caracterização  $I \times V$  de células solares do LAS/INPE.

Este sistema permite caracterizar células solares nas dimensões de até 50 x 50 mm e também foi utilizado para testes de modelos protótipos de radiômetros. Na Figura 37, podemos observar uma imagem do sistema de caracterização I x V do LAS/INPE.



Figura 37 - Imagem do sistema de caracterização I x V do LAS/INPE.

### **8.1.2. Sistema de caracterização lei dos cossenos**

O objetivo deste sistema de caracterização é determinar o comportamento de um sensor de radiação em função da variação do ângulo de incidência da radiação. Por exemplo, a radiação solar que incide em um plano horizontal na superfície terrestre muda constantemente o ângulo de incidência ao longo do dia solar, por isso os radiômetros dedicados à medida desta radiação devem ter uma boa resposta independente do ângulo de incidência da radiação. O sinal de saída de um instrumento ideal para medida de radiação solar é proporcional ao cosseno do ângulo de incidência. Desvios da resposta

do cosseno ideal em radiômetros podem levar a erros significativos de medidas, principalmente em relação à medida da radiação direta.

A caracterização do sensor segundo a lei dos cossenos consiste em gerar a curva normalizada da resposta do sensor em teste, em função da variação do ângulo de incidência da radiação (BERNI, 2010). Para estas medidas foi montado um sistema de caracterização da resposta a lei dos cossenos no laboratório de células solares do LAS. Na Figura 38 é mostrado um diagrama esquemático deste sistema. Basicamente ele é constituído por uma lâmpada, um tubo colimador, um sistema rotativo de posicionamento do sensor com uma escala graduada em graus e um multímetro com boa precisão para medida do sinal na saída do sensor em teste.

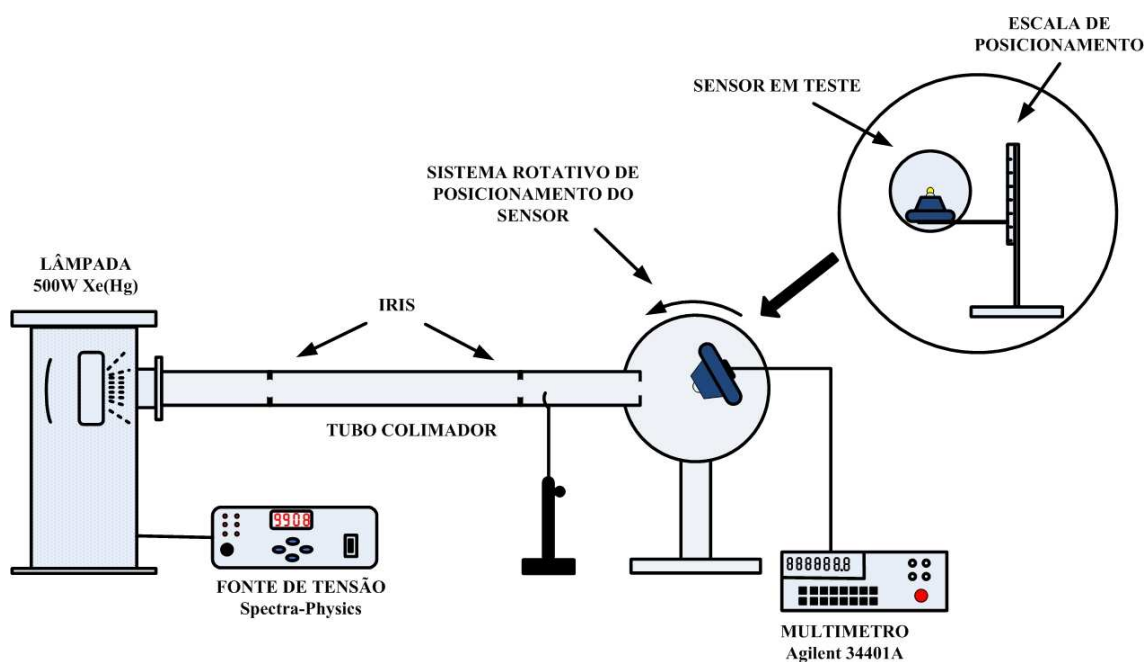


Figura 38 - Desenho esquemático do sistema de medida da lei dos cossenos.

O sistema foi montado em uma bancada óptica conforme mostrado na Figura 39. A fonte de radiação é uma lâmpada de descarga em arco em alta pressão de mercúrio e xenônio com bulbo de 29 mm de diâmetro e potência de 500 W da marca Newport, modelo 66142.

Para melhorar a colimação do feixe e deixá-lo mais homogêneo foi construído um colimador utilizando tubos de PVC de cinco polegadas de diâmetro com 2 metros de comprimento, pintados internamente com tinta preta. Dentro do tubo foram colocados íris de 35 mm com o objetivo de melhorar a colimação do feixe. Na saída do colimador foi colocado uma iris com diâmetro fixo de oito mm para diminuir o feixe e assim obter um melhor casamento deste com o difusor em teste.

O sistema de posicionamento do radiômetro tem a finalidade de girar o radiômetro de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ , mantendo o ponto de captação da radiação fixo. O giro do radiômetro é feito manualmente com incrementos de cinco em cinco graus através de um disco graduado e com um sistema de trava.

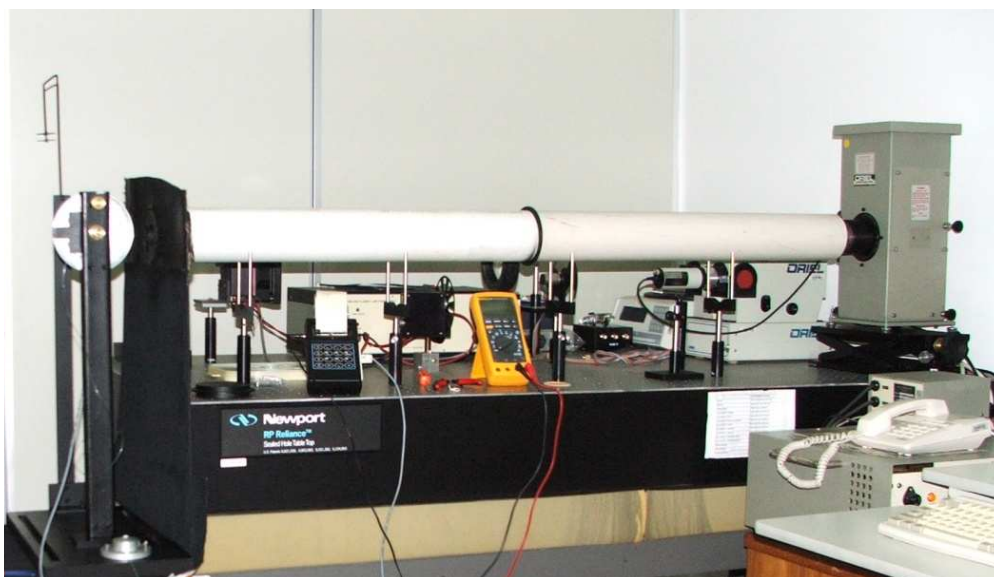


Figura 39 - Foto da primeira montagem do sistema de caracterização da lei dos cossenos.

Para a caracterização e melhoria do sistema, foram realizadas medidas para diversos ângulos utilizando um radiômetro comercial cujo comportamento em relação à lei dos cossenos era conhecido. A colimação do feixe foi obtida por tentativas experimentais.

Atualmente, este sistema foi melhorado para atender o desenvolvimento de radiômetros de ultravioleta. A Figura 40 mostra uma foto, onde pode se observar o detalhe do posicionador do radiômetro do novo sistema.

No novo sistema o feixe percorre um caminho de 2,85 m, passando por seis íris, sendo que a última delas, na saída do tubo colimador, possui abertura ajustável entre um a quarenta milímetros, permitindo ajustar a saída do feixe de acordo com os dispositivos em teste. Neste trabalho, o sistema atual foi utilizado somente na caracterização dos protótipos de qualificação, visando uma análise mais precisa de seu desempenho (BERNI, 2010).

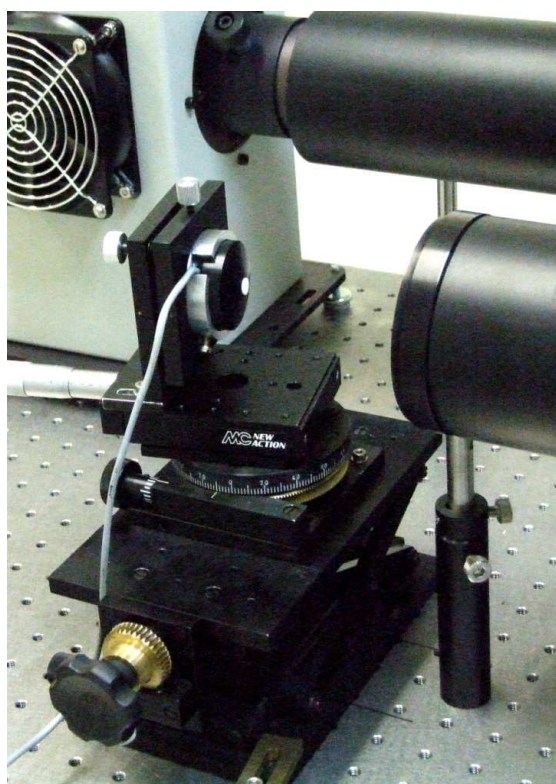


Figura 40 - Detalhe do novo sistema de caracterização da lei dos cossenos.

### 8.1.3. Sistema de caracterização resposta espectral

Para detecção e medição da radiação solar, que possui uma faixa espectral entre 220 nm a 4.000 nm, com intensidades distribuídas não uniformemente ao longo desta faixa, são utilizados sensores que possuem resposta espectral que sejam capazes de detectar a maior parte deste espectro. Também a medida da radiação solar pode ser realizada para determinadas faixas de interesse do espectro solar, por exemplo, um radiômetro para medida da radiação PAR, deve ter uma resposta espectral restrita para medir a radiação

solar entre 400 nm a 700 nm, já um radiômetro para medida UV-A, deve ter uma resposta espectral específica para os comprimentos de onda entre 315 nm a 400 nm.

As medidas da radiação solar global, direta, difusa ou albedo, devem ser realizadas preferencialmente com radiômetros que apresentem uma resposta independente do comprimento de onda da radiação solar, que abranja a maior parte do espectro solar e que tenha uma resposta que seja plana para que tenha uma boa precisão.

Os sensores fotovoltaicos apresentam limitações devidas principalmente à sua resposta espectral seletiva. Este fato está relacionado, conforme vimos no capítulo quatro, ao tipo de semicondutor utilizado. Para os radiômetros que possuem como elemento sensor células solares de silício monocristalino, como no caso dos sensores desenvolvidos neste trabalho, a resposta espectral é tipicamente entre 350 nm a 1100 nm e não é plana, com pico intenso em 900 nm. Fora desta faixa, a intensidade é insignificante. Por isso, estes tipos de radiômetros quando utilizados para medida de radiação solar global e difusa, podem apresentar erros da ordem de 2% a 5% em situações extremas, como por exemplo, as medidas realizadas com céu totalmente encoberto.

O uso de sensores fotovoltaicos para medidas de albedo pode apresentar erros ainda mais elevados, porque as características espectrais desta componente de radiação dependem das características das superfícies refletoras (HAAG, 2007).

A maior dificuldade no uso de sensores fotovoltaicos na medida de radiação solar está relacionada à determinação da sua calibração, pois a constante de calibração para estes tipos de sensores é uma função da distribuição espectral da fonte de radiação utilizada. Por isso, um radiômetro fotovoltaico solar deveria possuir uma constante de calibração para cada tipo de situação espectral da radiação solar medida, o que seria na prática tecnicamente inviável, considerando que existe uma grande variabilidade do espectro solar. Normalmente, a calibração destes sensores é feita para uma determinada situação espectral padronizada e quando utilizamos estes sensores para medida de radiação solar com espectros diferentes do padrão utilizado para calibração haverá um erro na medida. Esse erro poderá ser maior ou menor dependendo da diferença entre o espectro da radiação medida e o espectro utilizado na calibração. É recomendável que quando forem

utilizados radiômetros fotovoltaicos se tome cuidado com a avaliação dos erros da medida. Esses erros podem ser mais bem inferidos quando se conhece a resposta espectral do sensor e o espectro da fonte de radiação. Por isso, é importante conhecer a resposta espectral de cada radiômetro fotovoltaico.

Dados de radiação solar obtidos por radiômetros fotovoltaicos associados ao horário do dia, época do ano e outros dados meteorológicos, permitem determinar correções com base em espectros equivalentes da radiação, tornando-os mais precisos.

A caracterização espectral pode ser absoluta ou relativa. A caracterização absoluta é mais complexa e normalmente é empregada em técnicas de calibração. As técnicas de calibração absoluta tem custos elevados para serem implementadas, utilizam fontes de radiação calibradas e radiômetros criogênicos, que são normalmente padrões primários, cuja operação é complexa, tornando seu uso restrito a Institutos Nacionais de Metrologia (LIMA, 2006). A caracterização relativa é mais simples de se realizar, pois não depende do controle rigoroso da fonte de radiação, já que variações na intensidade da radiação e de seu espectro têm pouca importância neste caso.

A temperatura é um dos parâmetros que afeta as características radiométricas dos materiais, sendo que tais características são normalmente dadas a 25 °C. Em geral, o efeito da variação da temperatura nas medições de radiação solar pode ser desprezado. Entretanto, uma atenção maior deve ser dispensada quando uma maior exatidão de medição for necessária, principalmente em sistemas de caracterização espectral quando se utiliza filtros de interferência de banda passante e filtros de corte (HAAG, 2007; ARAUJO, 2006).

Neste trabalho, foi montado um sistema de caracterização para determinação da resposta espectral dos radiômetros desenvolvidos que utiliza o método da resposta relativa. A metodologia adotada é mais simples, por isso obteve-se uma resposta espectral sem grandes dificuldades. O Controle da temperatura foi feito apenas externamente mantendo a temperatura do ambiente entorno de 24 °C com uso de ar condicionado.

Um diagrama esquemático do sistema de caracterização de resposta espectral para radiômetros fotovoltaicos que foi montado no LAS/INPE é mostrado na Figura 41. Este sistema utiliza um conjunto de filtros interferenciais produzido pela *Andover Corporation* com 50.0 mm de diâmetro, para se obter as faixas espectrais desejadas. O radiômetro em teste recebe a radiação monocromática e o sinal elétrico é medido por um multímetro de 6 ½ dígitos da marca Argilent, modelo 34401A em seguida o feixe de radiação monocromático é desviado por um espelho para um radiômetro calibrado em espectro da Oriel, modelo 70260, percorrendo a mesma distância, que então mede a intensidade deste feixe. Para evitar aquecimento dos filtros e dos sensores, o que causaria alteração no espectro e erros nas medidas, foram utilizadas ventoinhas com fluxo de ar direcionado aos filtros e aos sensores. A fonte de radiação utilizada neste sistema é uma lâmpada de Quartzo Tungstênio Halogênio (QTH), FEL, de 1000 W, Newport, modelo 6315.

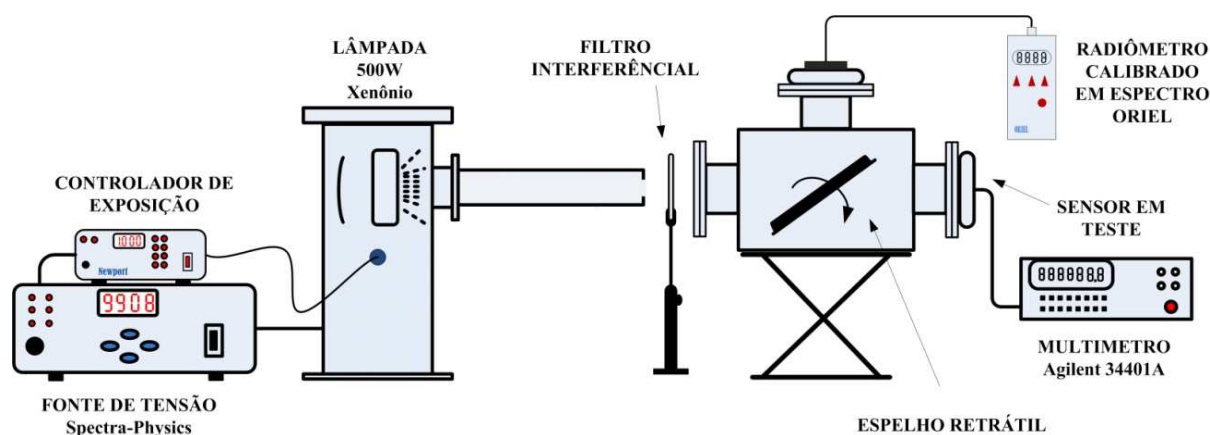


Figura 41 - Diagrama esquemático do sistema de caracterização espectral.

Antes de realizar as medidas espectrais nos sensores, foram feitos vários testes no sistema e observou-se uma boa estabilidade. Na Tabela 6, são mostradas as características de cada filtro utilizado no sistema.



Tabela 6 - Relação dos filtros de interferência utilizados no sistema de caracterização espectral.

<b>Referência Nº</b>	<b>Comprimento de onda central:</b>	<b>Largura a meia altura</b>	<b>Transmissão</b>	<b>Espessura</b>
250FS10-50	250.0+3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	12% min.	4.0 mm
300FS10-50	300.0 +3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	15% min.	4.0 mm
350FS10-50	350.0 +3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	25% min.	8.0 mm
400FS10-50	400.0 +3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	45% min.	7.0 mm
450FS10-50	450.0 +3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	45% min.	7.0 mm
500FS10-50	500.0 +3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	55% min.	7.0 mm
550FS10-50	550.0 +3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	55% min.	7.0 mm
600FS10-50	600.0+3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	55% min.	7.0 mm
650FS10-50	650.0+3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	55% min.	7.0 mm
700FS10-50	700.0+3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	55% min.	7.0 mm
750FS10-50	750.0+3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	50% min.	7.0 mm
800FS10-50	800.0+3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	50% min.	7.0 mm
850FS10-50	850.0+3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	50% min	7.0 mm
900FS10-50	900.0+3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	50% min	7.0 mm
950FS10-50	950.0+3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	50% min.	7.0 mm
100FS10-50	1000.0 +3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	45% min.	8.5 mm
050FS10-50	1050.0+3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	45% min.	8.5 mm
110FS10-50	1100.0+3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	40% min	8.5 mm
115FS10-50	1150.0 +3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	40% min	8.5 mm
120FS10-50	1200.0 +3/-0 nm	10.0+2/-2 nm	35% min	8.5 mm

O espelho do desviador de feixe por ser de segunda face, introduz uma atenuação na intensidade da radiação, que é proporcional ao comprimento de onda medido. Este erro na medida foi previamente determinado e obteve-se um fator de correção para cada filtro utilizado. Para estas medidas, foi utilizada uma lâmpada incandescente por ter um espectro mais uniforme. Estas medidas foram feitas nas posições onde ficam os sensores de teste e o de referência. Na Figura 42, é mostrado um detalhe da montagem do sistema de caracterização espectral. As medidas foram realizadas em ambiente totalmente escuro, sem o uso da radiação de "bias" e os filtros neste sistema são substituídos manualmente.

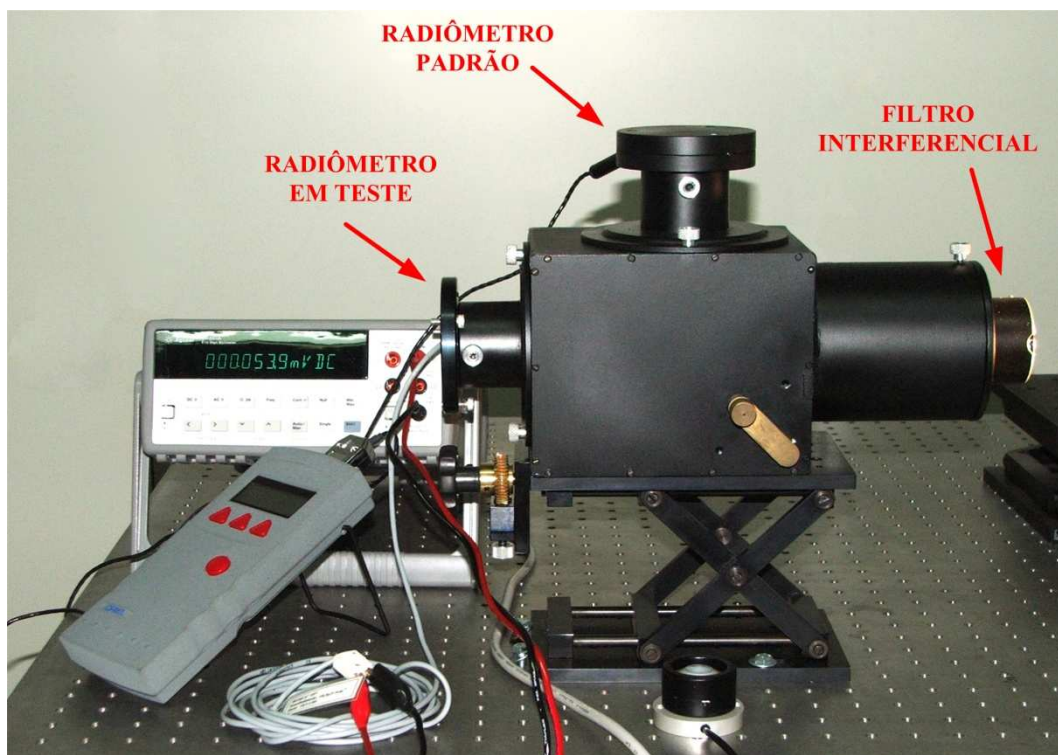


Figura 42 - Detalhe da montagem do sistema de caracterização espectral

A resposta espectral do sensor em teste é dada para cada comprimento de onda, dividindo o sinal de saída do sensor pela intensidade do feixe determinado pelo radiômetro padrão utilizado como referência.

Os dados obtidos neste sistema de caracterização têm a finalidade de determinar o comportamento do radiômetro para diversos comprimentos de onda. Os erros das

medidas devido ao tipo de configuração do sistema de caracterização podem ser significativos para uma análise quantitativa da resposta espectral obtida, porém para uma análise qualitativa, que é o nosso objetivo, a maioria destes erros tem pouco impacto.

#### **8.1.4. Sistema de caracterização por comparação com padrão**

O propósito da montagem deste sistema de caracterização é ter uma alternativa em laboratório para determinar a sensibilidade dos radiômetros desenvolvidos por comparação com um radiômetro padrão, utilizando a irradiação gerada por uma lâmpada de xenônio de 1000 W. Normalmente, esta resposta do sensor é uma constante que se refere à sensibilidade do sensor, obtida dentro de uma faixa espectral, com uma determinada distribuição de intensidades padronizada.

O sistema de caracterização relativa montado no LAS foi concebido para ser uma alternativa para a calibração dos protótipos de radiômetros desenvolvidos neste trabalho, embora na prática o sistema não fosse utilizado somente para esta finalidade. As calibrações adotadas para os radiômetros desenvolvidos foram obtidas ao ar livre, utilizando o Sol como fonte de radiação. Este sistema de caracterização foi muito útil para o processo de desenvolvimento dos radiômetros. Com o sistema montado no laboratório é possível determinar com boa precisão e de forma fácil e rápida a sensibilidade dos sensores em testes, diferentemente do processo de medida que utiliza o Sol como fonte de radiação, onde as condições do céu limpo e do horário do dia nem sempre são adequadas. No laboratório é possível realizar medidas a qualquer hora e em condições que podem ser previamente ajustadas. Além da calibração dos sensores, o sistema pode ser utilizado para outros estudos com sensores, tais como: determinar a sensibilidade do sensor para diversas intensidades de irradiação, estudo da influência da temperatura, análise de erros devidos ao nivelamento do sensor em relação ao plano perpendicular a zênite, determinação da linearidade do sensor e outros.

O diagrama esquemático do sistema montado no LAS/INPE é mostrado na Figura 43. O principal componente deste sistema é uma lâmpada Oriel de 1.000 W de descarga em gás xenônio.

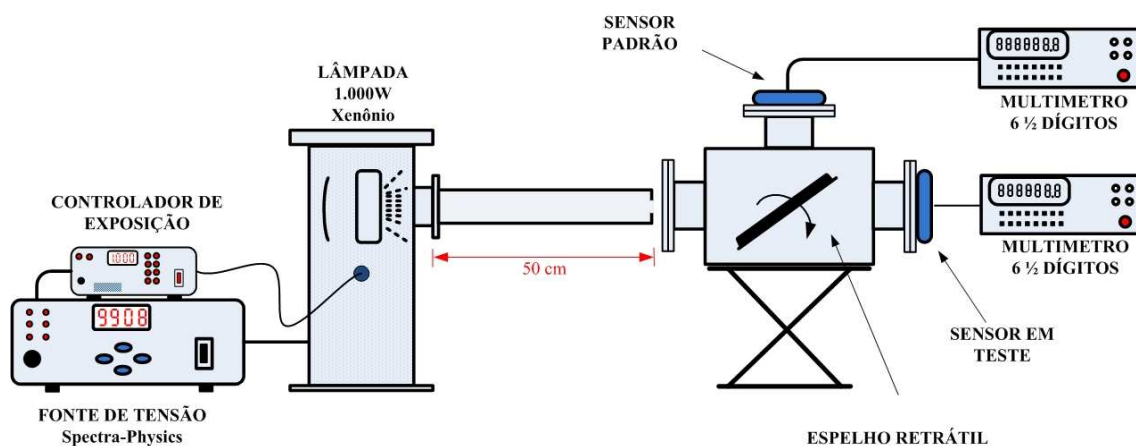


Figura 43 - Diagrama esquemático do sistema de caracterização por comparação.

A lâmpada e os radiômetros ou sensores em teste são mantidos a 50 cm de distância. Para medir e monitorar a intensidade da lâmpada nesta distância foi utilizado o desviador de feixe de radiação, conforme descrito no método de caracterização espectral. Neste desviador de feixe, foi acoplado um radiômetro calibrado da Kipp & Zonen, CMP 11 e o radiômetro a ser caracterizado, ambos a mesma distância da lâmpada. Para medidas do sinal dos radiômetros foram utilizados um multímetro Argilent de 6½ dígitos e um sistema de aquisição de dados programável portátil. A cada medida obtida no radiômetro em teste era obtida a intensidade da lâmpada através do padrão. O valor obtido no padrão deve ser corrigido multiplicando-se o valor obtido por um fator de correção, isto é necessário por causa da atenuação que o sinal sofre devido ao desviador de feixe. A determinação do fator de correção consiste em medir a intensidade do feixe na posição direta e na posição indireta utilizando o próprio radiômetro de referência e subtrair um sinal do outro. Testes mostraram que este fator de correção é constante para variações de intensidade da lâmpada em até 10%, considerando-se que a irradiância normalmente utilizada foi entorno de 1000 W/m<sup>2</sup>. Para manter a intensidade da lâmpada constante durante o processo de caracterização, utilizou-se o foto controlador digital da Newport, modelo 68951.

Para utilização do sistema de calibração de radiômetros em laboratório é necessário uma série de cuidados especiais, principalmente no que se refere ao controle da intensidade da lâmpada e a qualquer outra fonte de radiação que não seja devido à lâmpada, por isso o sistema deve ser instalado em ambiente com temperatura controlada e com paredes pintadas de preto para evitar reflexão. Qualquer outra fonte de radiação e de reflexão deve ser eliminada. No sistema desenvolvido no LAS, o sensor de referência e o sensor em teste são acoplados ao dispositivo desviador de feixe que é uma caixa fechada cuja entrada da radiação se dá por um único lado onde é acoplada a fonte. As paredes internas desta caixa são pintadas de preto para evitar reflexões. Para controlar a temperatura do dispositivo onde os sensores ficam acoplados, evitando aquecimento dos sensores, utilizou-se uma ventoinha. Também a exposição dos sensores a radiação era interrompida periodicamente, bloqueando o feixe de radiação da lâmpada na entrada do dispositivo desviador de feixe.

A Figura 44 mostra uma foto do sistema desenvolvido. O controle da intensidade da lâmpada é realizado utilizando controlador digital da Newport, modelo 68951.

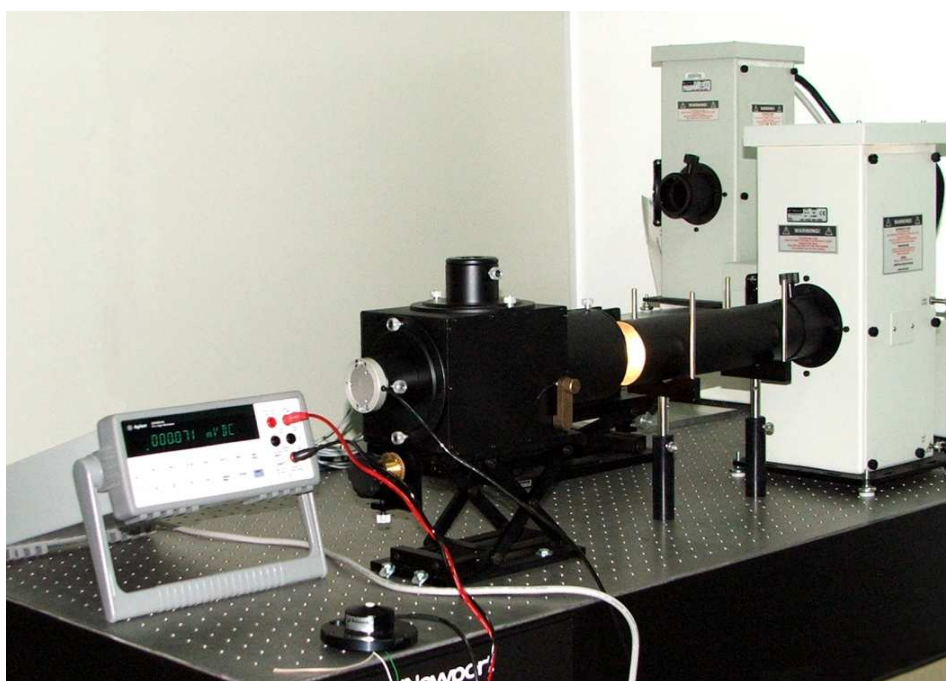


Figura 44 - Sistema de caracterização por comparação.

As sensibilidades dos protótipos LAS determinadas no sistema descrito não apresentaram diferenças significativas quando comparados com medidas realizadas nos mesmos dispositivos ao ar livre, utilizando o método por comparação com o mesmo padrão e o Sol como fonte de radiação.

O sistema montado apresenta diversas vantagens em comparação com outros sistemas de caracterização como, por exemplo, a calibração ao ar livre ou a calibração absoluta com lâmpadas calibradas. A caracterização ao ar livre tendo o Sol como fonte de radiação depende das condições climáticas favoráveis e a calibração com lâmpada calibrada exige uma série de cuidados especiais com relação ao local e as condições das medidas. O sistema desenvolvido no laboratório apresenta várias vantagens, entre elas podemos citar a praticidade do uso, onde não há necessidade de ambiente totalmente escuro, já que os sensores ficam praticamente isolados quando acoplados ao dispositivo desviador de feixe. A substituição dos sensores em testes é simples não exigindo alinhamento, pois são encaixados em um suporte padrão. Não há necessidade de a lâmpada ser calibrada, porque as medidas são realizadas por comparação com um sensor de referência.

## **8.2. Resultados experimentais da fase de desenvolvimento do radiômetro**

Os resultados experimentais apresentados nesta seção foram obtidos durante os estudos e desenvolvimento do radiômetro e consistiram em testes e medidas de propriedades ópticas e elétricas aplicadas a matérias e modelos de desenvolvimento com a finalidade de caracterizá-los. Estes resultados foram fundamentais na escolha dos materiais, componentes e das geometrias adotadas para confecção do difusor e do elemento sensor e que determinaram a concepção dos protótipos de qualificação.

### **8.2.1. Testes do difusor**

Um dos primeiros componentes do radiômetro a ser estudado foi o difusor. O difusor tem um papel importante no radiômetro, pois além de proteger o elemento sensor das

intempéries do meio ambiente, é responsável por espalhar uniformemente a radiação sobre o elemento sensor e pela correção da lei dos cossenos. Por isso, suas propriedades ópticas são relevantes para o seu correto funcionamento.

Como ponto de partida, foram identificados diversos tipos de materiais que poderiam ser utilizados para confecção dos difusores, tais como: vidro, policarbonatos, poliamidas sintéticos (nylon), polietileno (plástico), acrílico e teflon. Destes materiais foram escolhidos o acrílico e o teflon, por serem fáceis de encontrar no mercado nacional, fáceis de serem usinados, apresentarem boa resistência mecânica, capacidade de resistir às intempéries do meio ambiente e possuírem propriedades ópticas que são necessárias para confecção do elemento difusor. O teflon é uma marca de propriedade da empresa norte americana Dupont, trata-se do polímero politetrafluoretileno (PTFE).

O teflon apresenta uma série de propriedades físicas e químicas que o torna um dos materiais ideais em vários aspectos para uso como difusor. Ele é uma substância praticamente inerte, impermeável, fácil de usinar e suficientemente transparente para ser utilizado como difusor em radiômetros. O acrílico ou polimetil-metacrilato (PMMA) é um termoplástico rígido, cujas propriedades ópticas, mecânicas, químicas e custo relativamente baixo também o tornam uma das alternativas para confecção de difusores.

Para confirmar os critérios utilizados na escolha do material para confecção dos difusores, decidiu-se compará-los aos materiais utilizados nos difusores de radiômetros fotovoltaicos comerciais. Para isso, foi realizado um levantamento e constatou-se que tais informações não são disponíveis comercialmente. Foram, então, removidos os difusores de duas unidades disponíveis no LAS e para análise destas amostras e identificação do material, utilizou-se a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR - Fourier Transform Infrared), que é uma técnica simples e rápida, porém uma das mais importantes para a determinação estrutural de um composto.

A espectroscopia FTIR se baseia no fato das moléculas das substâncias possuírem frequência de vibração específica, as quais correspondem aos níveis de energia da molécula ou níveis vibracionais. Quando a molécula recebe uma radiação

eletromagnética com a mesma energia destas vibrações, esta radiação é absorvida e quando é diferente ela é refletida. O registro gráfico destas absorções ou reflexões em determinados comprimentos de ondas, quando se incide uma radiação de infravermelho em uma amostra denomina-se espectro de absorção de infravermelho. O FTIR é uma técnica de se obter este espectro de absorção ou transmissão de infravermelho, onde a radiação é aplicada na amostra por um interferômetro e após atravessá-la é realizada uma transformada de Fourier no sinal e o espectro é então obtido (COLTHUP, 1964; BUENO, 1989).

Os espectros de FTIR das amostras de difusores retirados dos radiômetros fotovoltaicos são mostrados na Figura 45. Eles foram obtidos com um espectrômetro de infravermelho da marca PARKIN - ELMER, modelo Spectrum GX, do laboratório de integração e testes (LIT/INPE), através do programa "Spectrum Search Plus" que faz parte do equipamento. Os espectros obtidos foram correlacionados com outros em um banco de dados e os resultados obtidos para ambas as amostras indicaram que se trata de um composto da família dos polimetil – metacrilato, ou seja, pode se concluir que o material das amostras é o acrílico.



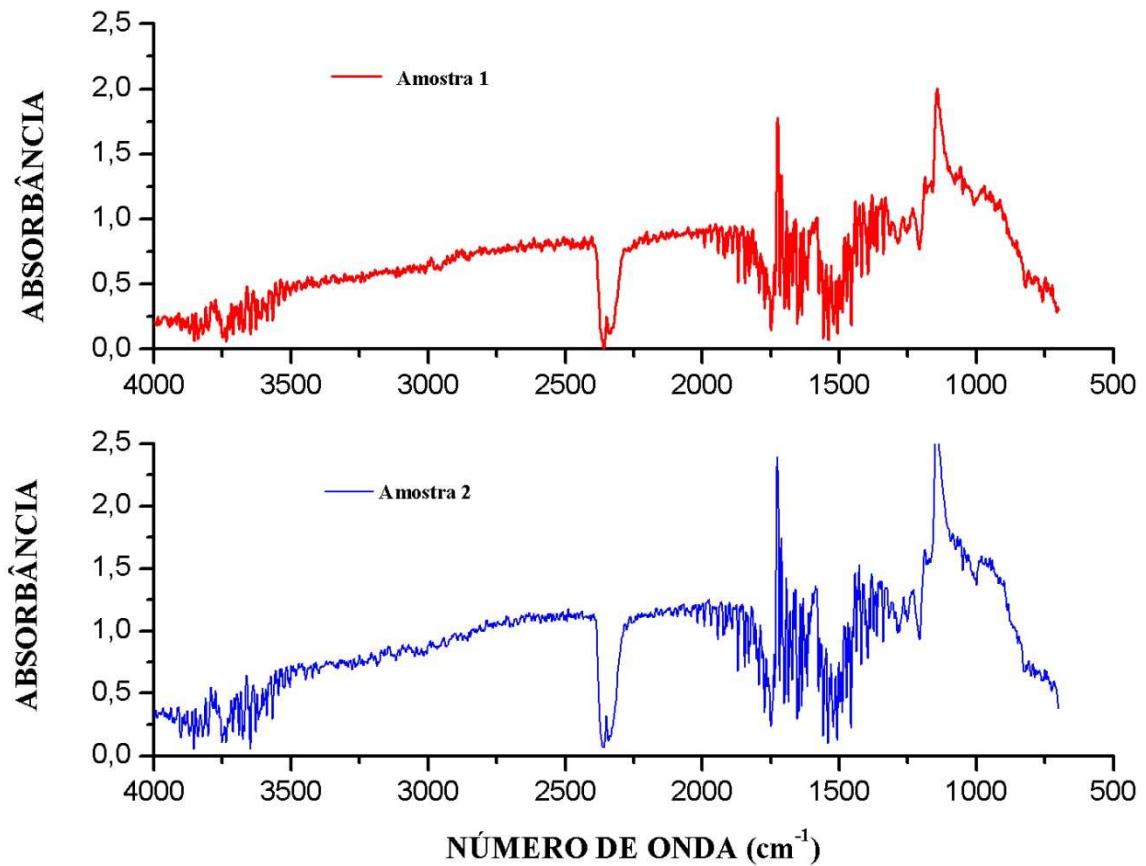


Figura 45 - Espectros FTIR das amostras de difusores

### 8.2.2. Medida de transmissão de radiação dos difusores

Definido o tipo de material para confeccionar os difusores, o próximo passo foi verificar se as propriedades ópticas destes materiais atendiam as necessidades da aplicação. Como os fabricantes de teflon e acrílico não fornecem informações sobre as propriedades ópticas destes materiais, foi necessário realizar algumas medidas para determinarmos se estes materiais eram adequados para uso como difusores em radiômetros fotovoltaicos.

Para determinar a transparência do material em relação ao espectro da radiação solar e a capacidade de espalhar esta radiação foram realizadas medidas de transmissão direta e transmissão total de radiação nas amostras. Para estas medidas, foram confeccionadas

amostras de teflon e acrílico na forma de discos com diâmetro de 8 mm e espessuras de 2 mm, 4 mm, 6 mm e 8 mm. Na superfície das amostras, foi dado acabamento simples apenas um polimento com lixa nº 600. O equipamento utilizado para estas medidas foi o espectrofotômetro da marca Hitachi, modelo U-3501 do LAS/INPE.

Na Figura 46, temos uma curva de transmissão direta da radiação nas amostras de teflon e acrílico e como referência temos a curva de um dos difusores da amostra de referência. A medida de transmissão direta consiste em capturar a radiação que passa pela amostra diretamente sem sofrer espalhamento, para isso o ângulo de visão do sensor do espectrofotômetro é muito pequeno, de tal forma que a contribuição da radiação espalhada pela amostra pode ser desprezada.

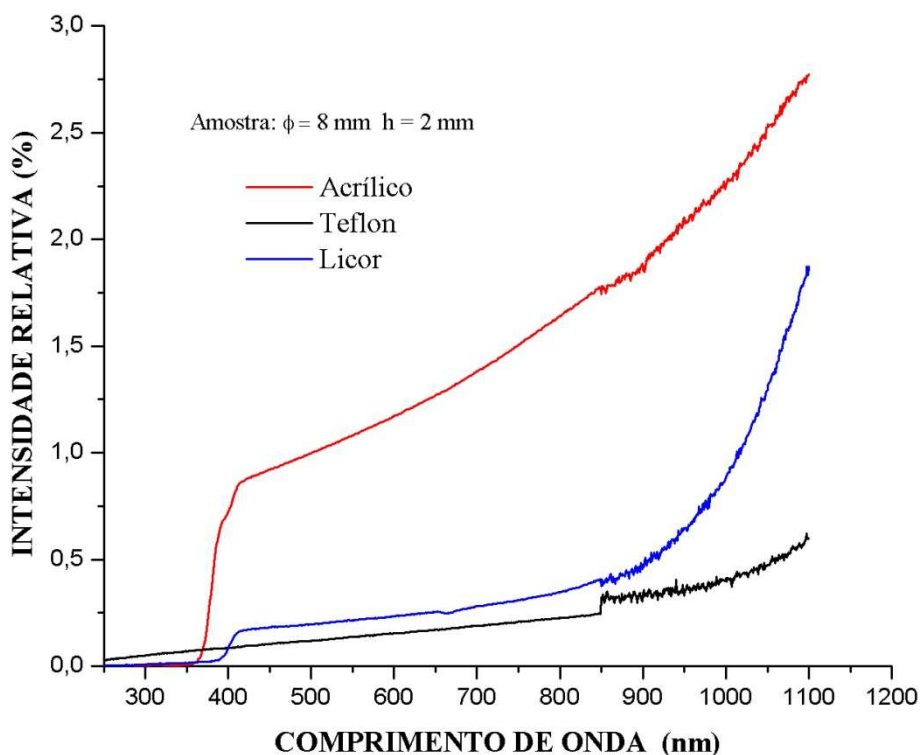


Figura 46 - Curva de transmissão direta da radiação nas amostras

Podemos observar que o acrílico possui uma transmissão muito baixa, quase zero para comprimentos de onda abaixo de 370 nm na região do ultravioleta, semelhante comportamento se observa na amostra de referência. O teflon apresenta transmissão em todo o espectro analisado e observa-se que esta transmissão aumenta com o aumento do

comprimento de onda. Considerando que o elemento sensor utilizado nos radiômetros é uma célula solar de silício e que ela possui uma resposta espectral na faixa de 350 nm a 1100 nm, ambos os materiais em termos de espectro de transmissão são adequados.

A medida de transmissão total consiste em medir toda a radiação transmitida pela amostra, tanto a componente direta quanto a espalhada. A medida da radiação espalhada é de grande interesse, pois uma das propriedades do difusor é espalhar uniformemente a radiação sobre o elemento sensor. Quanto maior o espalhamento, melhor é a propriedade do material de difundir a radiação sobre o elemento sensor. Na Figura 47, temos as curvas de transmissão total das amostras que é a radiação que o elemento sensor efetivamente recebe.

Para realizar as medidas de transmissão total das amostras, utilizou-se uma esfera integradora, que é um dos acessórios do espectrofotômetro. As curvas de espalhamento das amostras foram obtidas a partir da curva medida da transmissão total subtraindo a curva da componente direta de cada amostra. A Figura 48 mostra a curva de espalhamento da radiação das amostras de teflon e acrílico e do difusor de referência. Na análise das curvas de espalhamento e da transmissão direta, podemos concluir que a contribuição da transmissão direta é pequena comparada com a transmissão total em ambos os materiais analisadas. Também pode se observar que ambos os materiais apresentam boa propriedade de espalhamento da radiação, embora na amostra de teflon a transmissão total da radiação seja bem menor do que no acrílico.

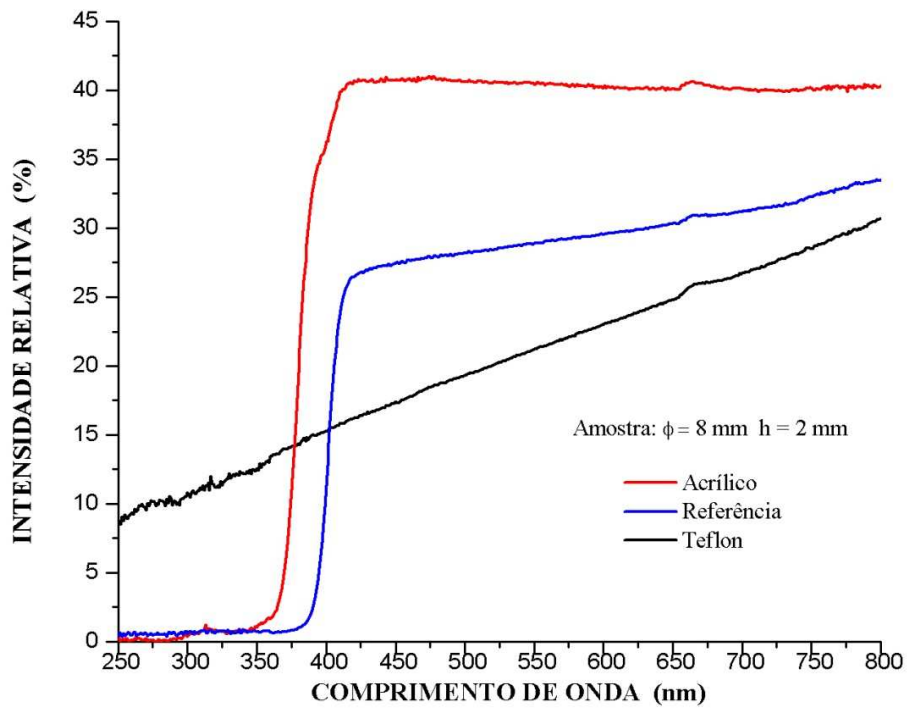


Figura 47 - Curvas de transmissão total das amostras.

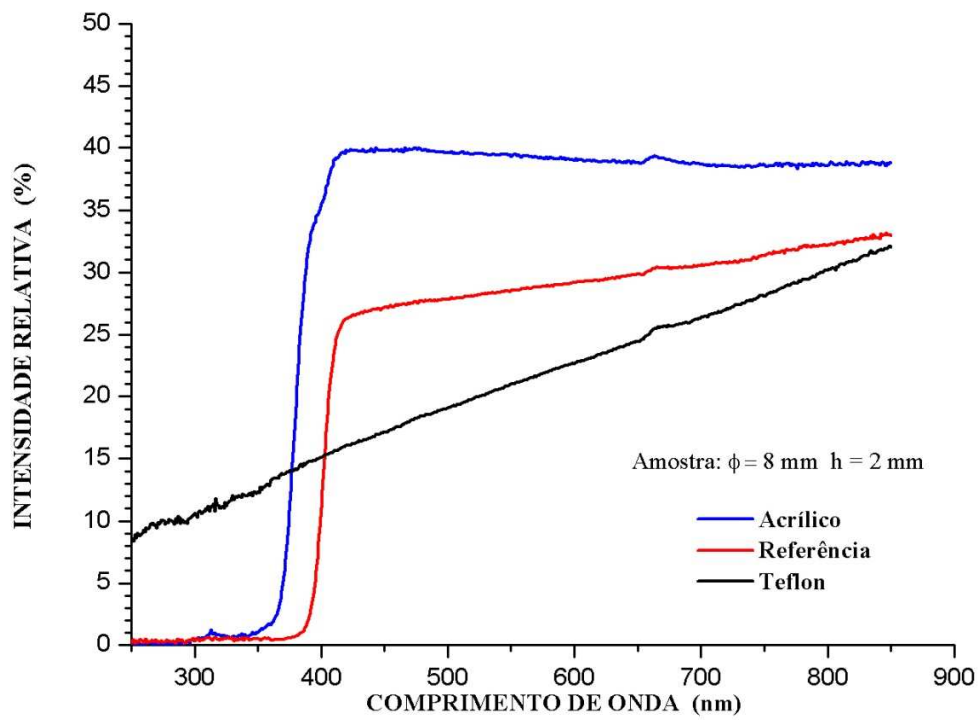


Figura 48 - Curva de espalhamento.

### **8.2.3. Caracterização do elemento sensor**

As células utilizadas neste trabalho foram devidamente caracterizadas no LME. Este sistema de caracterização possui um iluminador com lâmpadas de halogênio que simula as condições da luz solar AM 1,5G e  $100 \text{ mW/cm}^2$ , uma base para fixação da célula teste e a de referência, com temperatura controlada que mantém as células na temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . A célula referência utilizada para o controle do processo de medida possui a mesma tecnologia da célula teste e foi caracterizada pelo NREL (National Renewable Energy Laboratory) (SÁNCHEZ, et al., 2007). Ao passar as células ao LAS/INPE, foram fornecidas as respectivas curvas  $I \times V$  e demais informações sobre cada célula.

No LAS, as células foram novamente caracterizadas, medindo-se apenas as curvas  $I \times V$  para cada célula, conforme estabelecia o plano de desenvolvimento e teste dos radiômetros. As curvas obtidas no LAS foram utilizadas para verificar se as células não sofreram nenhum dano devido ao transporte e armazenamento e para selecionar as que apresentavam melhor desempenho para serem utilizadas em protótipos. As medidas das características  $I \times V$  foram obtidas no LAS com o uso de um simulador solar comercial e com sistema automático de controle e aquisição de dados, similar ao sistema de caracterização utilizado pelo LME.

#### **8.2.3.1. Condições de medidas das curvas $I \times V$**

Para o levantamento das características  $I \times V$  das células utilizadas como elemento sensor utilizou-se como padrão a célula Solarex-3 calibrada em AM1 ( $100,0 \text{ mW/cm}^2$ ), que tem  $8 \text{ cm}^2$  de área,  $V_{mp}$  de  $504,0 \text{ mV}$ ,  $V_{oc}$  de  $599,0 \text{ mV}$ ,  $I_{mp}$  de  $216,4 \text{ mA}$ ,  $I_{sc}$  de  $239,1 \text{ mA}$ , eficiência de  $13,63 \%$  e fator de forma de  $0,7615$ . Para caracterização, a temperatura da base foi mantida em  $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , a potência de irradiação do simulador em  $1.000 \text{ W/m}^2$ . Foi utilizado um filtro do simulador para se obter AM 1,0G, potência ajustada na fonte para  $\sim 900 \text{ W}$ . A irradiação do simulador foi estabilizada através do controlador de intensidade luminosa, marca Oriel, modelo 68851. Na Figura 49, é

apresentada a curva de uma das células produzidas pelo LME como representativa das demais células, já que todas as células tiveram curvas semelhantes.

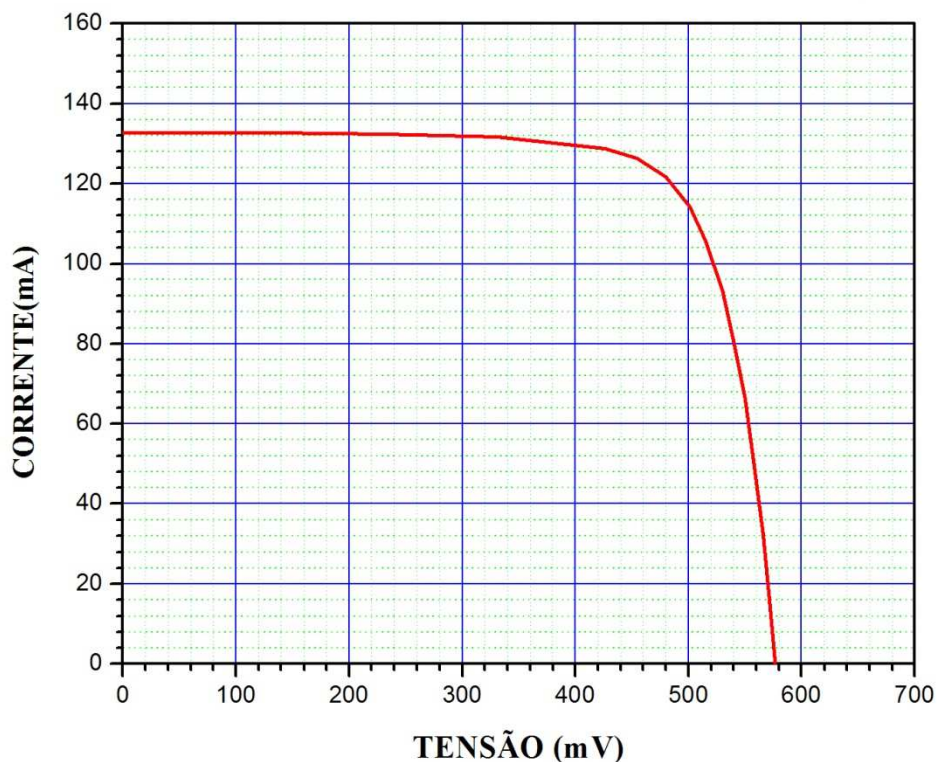


Figura 49 - Curva típica das células produzidas pelo LME

#### 8.2.3.2. Variação das características $I \times V$ em função da área iluminada do elemento sensor.

Um dos problemas enfrentados por usuários de radiômetros fotovoltaicos é a dificuldade de limpeza destes dispositivos quando instalados em campo. A geometria dos radiômetros desenvolvidos neste trabalho foi concebida de tal forma a evitar acúmulo de sujeiras, principalmente sobre o difusor. Por isso, a área do difusor exposta ao meio ambiente deve ser a menor possível e de tal formato que não retenha sujeiras que afetariam o seu desempenho. Para avaliar o impacto da redução da área do difusor, foi inicialmente considerada a forma do difusor como sendo um disco ou um pequeno cilindro, semelhante aos difusores dos radiômetros fotovoltaicos disponíveis em nosso laboratório. Como a área do elemento sensor foi previamente estabelecida como sendo

quadrada de aresta 1,8 cm, para áreas menores do difusor teríamos áreas não iluminadas no elemento sensor e isso deveria ser estudado para evitar conseqüências futuras.

Para estudar o efeito do difusor sobre o elemento sensor foram confeccionados vários modelos de desenvolvimento, concebidos de modo a oferecer opções de configuração para a definição dos modelos de engenharia. Para elaboração destes modelos foram criados vários tipos máscaras para serem colocadas sobre uma célula solar nas dimensões de 2 cm x 2 cm. As máscaras foram construídas em um material totalmente opaco com dimensões ligeiramente maiores que o elemento sensor contendo no centro um furo no diâmetro de 20 mm, 14 mm, 8 mm e 4 mm. No furo das máscaras foram alojados os materiais escolhidos como difusores na forma de disco de 3 mm de espessura. A Figura 50 mostra as curvas I x V obtidas para diferentes diâmetros de máscaras com difusores de acrílico e na Figura 51, as curvas I x V foram obtidas para máscaras com difusores de teflon.

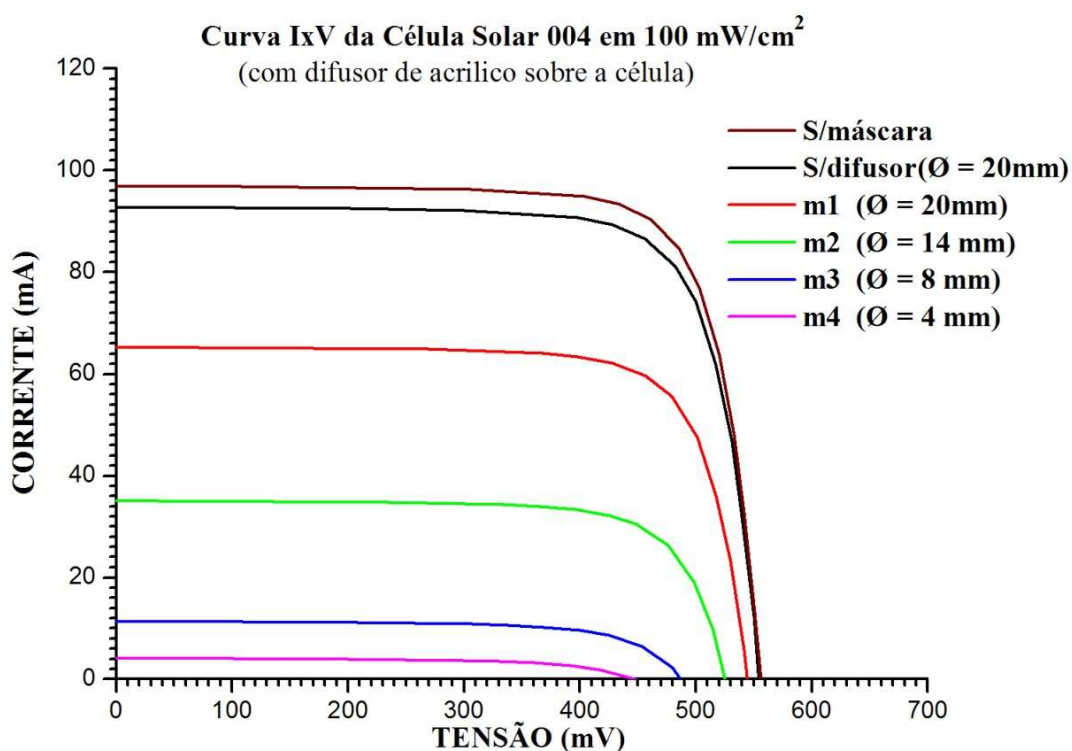


Figura 50 - Curvas de uma das células produzidas pelo LME.

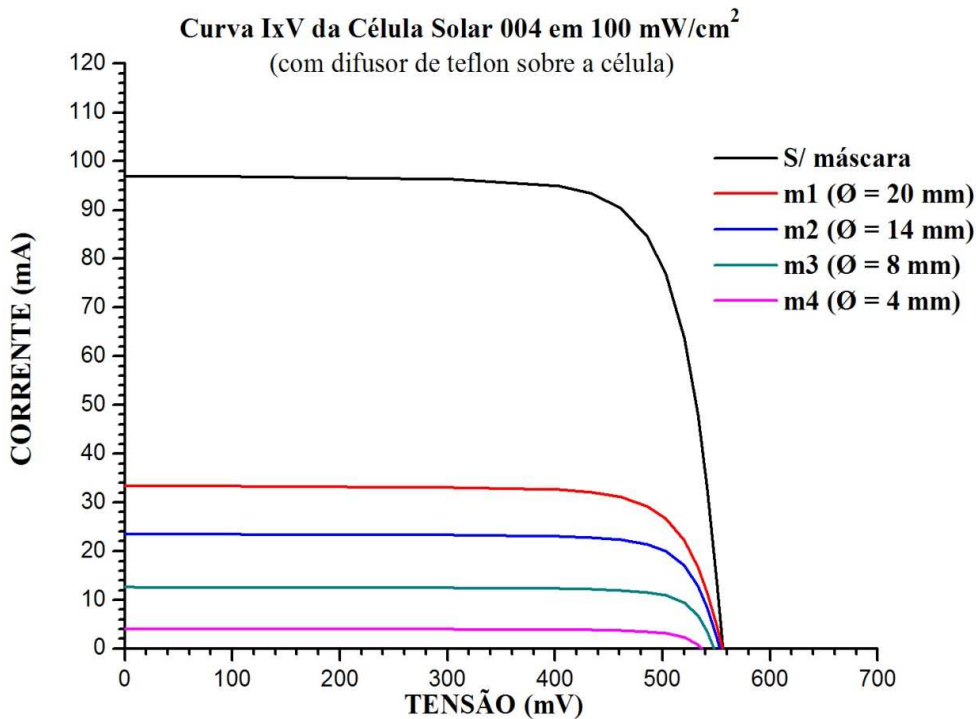


Figura 51 - Curvas de uma das células produzidas pelo LME

Os resultados dos testes realizados com os diversos modelos de difusores mostram que as dimensões dos difusores e o tipo de material utilizado afetam significativamente a intensidades da corrente de curto circuito na célula, enquanto a tensão de circuito aberto reduz pouco, mas não altera o formato da curva I x V. A redução da corrente de curto circuito se deve unicamente à queda da intensidade da radiação incidente devido à redução das dimensões do difusor e da opacidade do material utilizado. A escolha das dimensões do difusor e do material neste caso está diretamente ligada à intensidade do sinal desejado, para evitar o uso de amplificadores.

Com base na análise dos dados obtidos nos ensaios dos modelos de difusor e do elemento sensor, decidiu-se construir difusores na forma de um tronco de cone, sendo o diâmetro da área do topo de 8 mm, o diâmetro da base que fica em contato com o elemento sensor de 20 mm e a altura de 5 mm.

Esta geometria do difusor permite ter uma área exposta à incidência da radiação solar, externa ao corpo do radiômetro, relativamente pequena, evitando assim acúmulos de sujeiras ou de água sobre o difusor. A área da base do difusor fica em contato com o



elemento sensor e, sendo ligeiramente maior que a área do topo, promove uma iluminação mais uniforme, reduzindo a área sem iluminação, otimizando o aproveitamento de toda a área sensível da célula solar.

#### **8.2.4. Resposta à lei dos cossenos**

Para analisar o comportamento do difusor e do elemento sensor em relação à lei dos cossenos, foram construídos protótipos simplificados dos radiômetros, contendo o elemento sensor e o difusor. Neste protótipo para testes, o difusor era facilmente removível, facilitando a troca de difusores em diversos ensaios. Também foram confeccionados vários difusores de acrílico e teflon com características diferentes como, por exemplo, o formato, a área e acabamento da superfície que fica exposta a radiação. Na Figura 52, é mostrado um protótipo de teste com difusor em uma das geometrias testadas e na Figura 53, são mostrados alguns exemplos de modelos de difusores que foram estudados.



Figura 52 - Protótipo para teste da lei dos cossenos.



Figura 53 - Exemplos de modelos de difusores estudados.

Para realizar as medidas da lei dos cossenos foi utilizado o sistema de caracterização desenvolvido no LAS, conforme descrito na sessão anterior.

A obediência a lei dos cossenos de Lambert é um critério importante para um instrumento de medida da radiação solar. Erros de medidas de radiação solar devido ao ângulo de incidência de radiação podem ser significativos, principalmente quando são realizadas medidas discretas ao longo do dia solar. Convém lembrar que no início e no final do dia solar o ângulo de incidência em relação a zênite tende a  $90^\circ$ , onde os erros dos radiômetros devido a não obediência a lei dos cossenos são mais significativos, podendo ser maiores que 10%. Na Figura 54, é mostrado um exemplo de resposta de quatro modelos de difusores confeccionados em acrílico que foram testados. O modelo nº 1 é um difusor cuja superfície exposta á radiação é plana, polida e rente ao corpo do protótipo de teste. No modelo nº 2, a área exposta à radiação é um prolongamento cilíndrico de 1,5 mm com acabamento feito por lixa grossa. No modelo nº 3, a área exposta a radiação é um prolongamento cilíndrico de 3 mm, com acabamento feito por lixa grossa (nº 100). No modelo nº 4, a área externa ao corpo do protótipo é um prolongamento na forma de cone com 1 mm de altura.

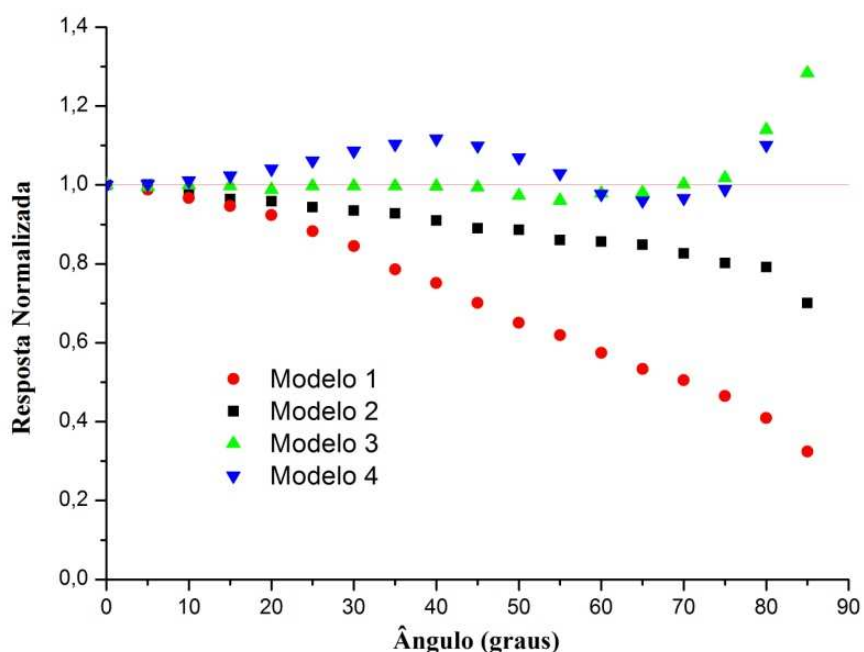


Figura 54 - Resposta a lei dos cossenos de modelos de difusores de acrílico.

Na Figura 55, é mostrado um exemplo de resposta angular normalizada de cinco modelos de difusores confeccionados em teflon. O modelo nº 1 é um difusor cuja superfície exposta à radiação é um prolongamento cilíndrico de 0,7 mm e polida com lixa fina. No modelo nº 2, a área exposta à radiação é a mesma que no modelo um, porém com acabamento feito por lixa grossa. No modelo nº 3, a área exposta à radiação é um prolongamento cilíndrico de 2 mm. No modelo nº 4, a área externa ao corpo do protótipo é o prolongamento na forma de cone com 1,5 mm de altura e o modelo cinco tem 1,5 mm de altura com acabamento em lixa fina (nº 1200).

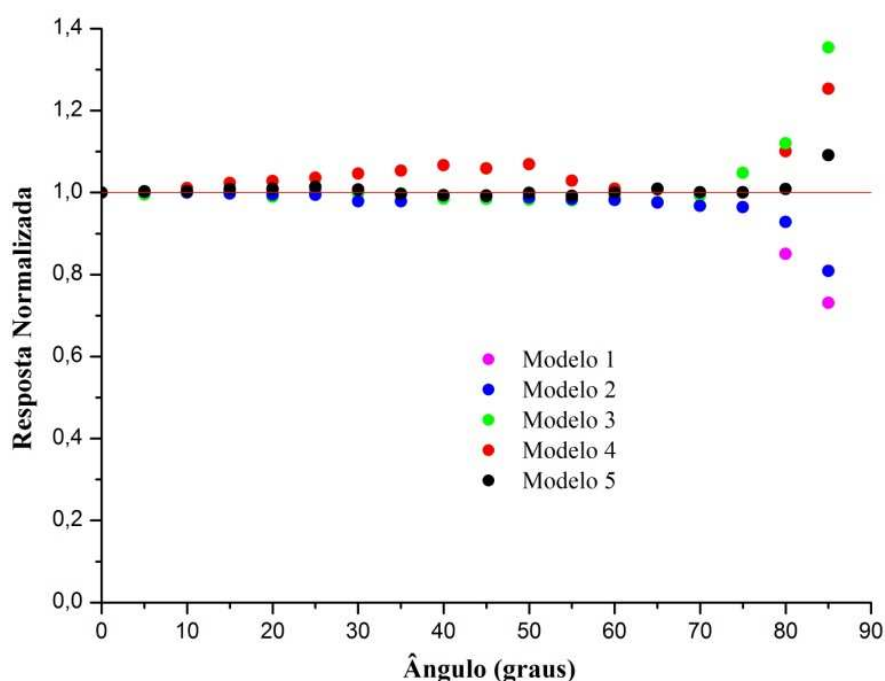


Figura 55 - Resposta a lei dos cossenos de modelos de difusores de teflon

Os testes de comportamento em relação ao ângulo de incidência da radiação para diversos modelos de difusores mostraram que o teflon apresenta melhor comportamento do que o acrílico. Com estes testes pôde-se concluir que o teflon é o material mais adequado para a confecção do difusor do radiômetro. Também foi observado que a melhor geometria para o difusor é a que possui um prolongamento cilíndrico de 1,5 mm com acabamento feito com lixa fina.

### **8.3. Resultados experimentais da fase de qualificação do radiômetro**

A fase de qualificação é a última fase de desenvolvimento dos radiômetros antes da industrialização. Durante esta fase foram montados protótipos de radiômetros já em seu formato final com as melhores opções de componentes e geometrias encontradas e determinadas nas fases anteriores do desenvolvimento. Os protótipos desta fase são denominados Radiômetros LAS e são identificados individualmente por um número, como por exemplo, LAS105. Os testes aplicados nestes protótipos têm por finalidade qualificar o produto, ou seja, demonstrar que o produto atendeu todos os quesitos determinados na especificação. A primeira providência tomada nesta fase foi a calibração dos radiômetros. É através da calibração que o dispositivo desenvolvido se torna um instrumento de medida útil. Também foram aplicados testes para determinar o efeito da temperatura sobre a sensibilidade dos radiômetros LAS, teste da lei de cossenos, e por último testes ambientais foram aplicados aos protótipos.

#### **8.3.1. Calibração do Radiômetro**

É importante salientar, antes de referirmos à calibração dos radiômetros desenvolvidos neste trabalho, que todo o processo de calibração de qualquer instrumento de medida consiste em procedimentos técnicos, científicos e legais, certificados por normas nacionais e internacionais que exigem laboratórios devidamente qualificados e acreditados por órgãos nacionais competentes e na utilização de padrões com rastreabilidade (INMETRO, 2003).

O estudo da radiação solar e suas componentes a partir de dados obtidos por transdutores como os radiômetros aqui desenvolvidos, tem como requisito imprescindível uma correta calibração dentro das normas pré-estabelecidas. O processo de calibração consiste basicamente na obtenção do fator de sensibilidade do dispositivo e do seu erro, que é uma constante que permite transformar o sinal de saída do sensor em unidades radiométricas (Rastreabilidade Meteorológica e os Critérios de Aceitação para a Instrumentação, 2008).

Existe uma grande diversidade de métodos para se obter os fatores de calibração de radiômetros. Para evitar divergências entre dados e métodos tanto de medida de radiação solar como de calibração de instrumentos de medidas meteorológicas em geral, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) vem promovendo nos últimos anos a padronização de instrumentos, métodos de calibração e de procedimentos para medidas de radiação solar. Esta padronização é aceita e adotada por muitos institutos de metrologias e centros de pesquisa meteorológicas e ambientais em diversos países do mundo. Neste trabalho os processos de calibração utilizados foram baseados nas normas e nas recomendações da OMM.

A calibração estabelece, numa primeira etapa e sob condições especificadas, uma relação entre os valores e as incertezas da medição fornecida por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando à obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação. Uma calibração pode ser expressa por meio de uma declaração, uma função de calibração, um diagrama de calibração, uma curva de calibração ou uma tabela de calibração. Em alguns casos, pode consistir de uma correção aditiva ou multiplicativa da indicação com uma incerteza de medição associada (INMETRO, 2009; ASTM, 2002; ISO, 1993; ISO, 1992). Em resumo, o objetivo da calibração é verificar se a medida obtida por um equipamento é compatível com o esperado e se o mesmo está adequado para a atividade a que se destina. Não se deve confundir a calibração com o ajuste de um sistema de medição, frequentemente denominado de maneira imprópria de “auto-calibração”, nem com a verificação da calibração.

Basicamente, o processo de calibração de radiômetros consiste na obtenção de uma ou mais constantes que convertem as grandezas medidas (tensão, corrente, diferença de temperatura) para a grandeza radiométrica de interesse, seja esta irradiância ou radiância, espectral ou não. Para este processo, é necessária a utilização de um padrão de medida de radiação solar primário ou secundário ou fontes de radiação cuja grandeza radiométrica seja conhecida com exatidão e precisão (ISO, 1992; WMO, 2008). Estas

fontes de radiação podem ser o Sol, fontes incandescentes, cavidades de corpo negro de alta temperatura e fontes de descargas em gás.

Fontes incandescentes e descargas em gás são lâmpadas especiais calibradas em espectro e intensidade utilizadas como fontes de radiação. Existem lâmpadas específicas para calibração de radiômetros em unidades de radiância espectral, irradiância espectral e irradiância total. A cavidade de corpo negro de alta temperatura são dispositivos especiais, sendo os mais usados constituídos basicamente por sólidos inertes, na forma de cone, cilindro ou esfera que são aquecidos eletricamente a temperaturas entre 1000 a 3000 K e através de uma abertura emitem radiação com espectro e intensidade bem definidos para cada temperatura.

Os métodos de calibração que utilizam como fonte a radiação solar natural apresentam a vantagem de possuir uma fonte de radiação para calibração idêntica a que o radiômetro calibrado irá medir. Porém, para calibrar um sensor ao ar livre é necessária uma série de condições tais como horário do dia, condição de céu limpo, ausência de aerossóis e altitude, que muitas vezes não são possíveis. Há regiões onde as condições climáticas são muito instáveis ou são regiões com alto grau de poluição, com muitos aerossóis na atmosfera. Neste trabalho foram realizadas calibrações ao ar livre e em laboratório com uso de fonte artificial.

Para calibração com fonte artificial, foi utilizado o sistema de caracterização apresentado no item 8.1.4. Para este processo utilizou um radiômetro primeira classe calibrado, CM22, da Kipp e Zonen como padrão de referência. Os protótipos de teste e o padrão foram instalados no dispositivo do desviador de feixe e foram realizadas aquisições de medidas no padrão e no protótipo LAS a ser calibrado, alternando as medidas a cada 5 minutos entre o padrão e o protótipo LAS durante uma hora. Devido ao erro provocado pelo desviador de feixe, os valores da irradiância medidos pelo padrão foram corrigidos usando um fator de correção que foi previamente determinado. Para determinar o erro devido ao desviador foram feitas uma série de medidas da intensidade total da radiação no dispositivo, medindo a intensidade do feixe direto e do feixe desviado, utilizando para esta medida o radiômetro padrão, o mesmo usado no

processo de calibração. A potência da fonte foi ajustada para obter 1000 W no ponto onde os radiômetros foram instalados.

Normalmente, para a determinação da constante de calibração de um sensor utiliza-se o método do quociente, recomendado pela OMM (1971), que consiste em determinar a constante de calibração através do quociente do sinal medido nos terminais do radiômetro e a intensidade da radiação incidente (WMO, 2008; KRAZENERG, 2003):

$$K_P = K_R \left[ \frac{V_P}{V_R} \right] \quad (8.1)$$

Onde  $k_p$  e  $k_r$  são as constantes de calibração dos radiômetros protótipo e referência respectivamente,  $v_p$  e  $v_r$  são seus respectivos sinais medidos ( $\mu V$ ).

A Figura 56 mostra uma bancada de calibração utilizada para calibrar os protótipos LAS. Apenas para efeito de confirmação do método de calibração adotado foram colocados dois radiômetros fotovoltaicos importados e devidamente calibrados. As calibrações realizadas nestes dispositivos importados serviram para confrontar com os valores fornecidos pelos fabricantes.



Figura 56 - Bancada de calibração ao ar livre para calibração de protótipos de radiômetros desenvolvidos no LAS.

Os resultados da calibração dos protótipos LAS por comparação com o radiômetro padrão CM22 ao ar livre e resultados da calibração dos protótipos no sistema de caracterização relativa no laboratório com seus respectivos desvios são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Constantes de calibração determinada por dois métodos diferentes

Sensor LAS Nº	Ar livre K [ $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ ]	Sistema LAS K [ $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ ]
101	17,21 $\pm$ 0,15	17,50 $\pm$ 0,11
102	19,25 $\pm$ 0,16	19,12 $\pm$ 0,06
103	19,20 $\pm$ 0,10	19,04 $\pm$ 0,05
104	17,71 $\pm$ 0,12	17,33 $\pm$ 0,08
105	19,18 $\pm$ 0,15	18,52 $\pm$ 0,12
106	18,68 $\pm$ 0,14	18,97 $\pm$ 0,08
107	18,28 $\pm$ 0,18	18,48 $\pm$ 0,13
108	17,83 $\pm$ 0,15	17,89 $\pm$ 0,09
111	15,60 $\pm$ 0,16	15,52 $\pm$ 0,16
113	19,52 $\pm$ 0,22	18,91 $\pm$ 0,11
114	21,23 $\pm$ 0,20	22,14 $\pm$ 0,04
115	16,70 $\pm$ 0,12	17,23 $\pm$ 0,05

A Figura 57 e a Figura 58 mostram dois exemplos de retas de resposta dos protótipos medidos em mV, em função da intensidade de radiação solar em  $\text{W}/\text{m}^2$ , esta última medida com o radiômetro de referência calibrado.



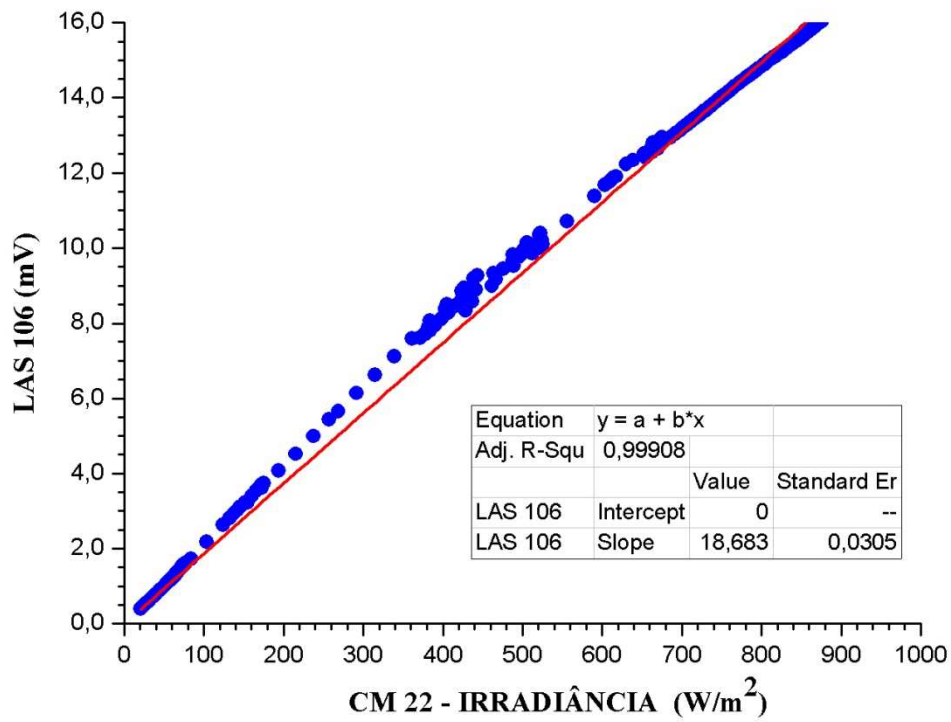


Figura 57 - Curva de calibração do radiômetro LAS 106.

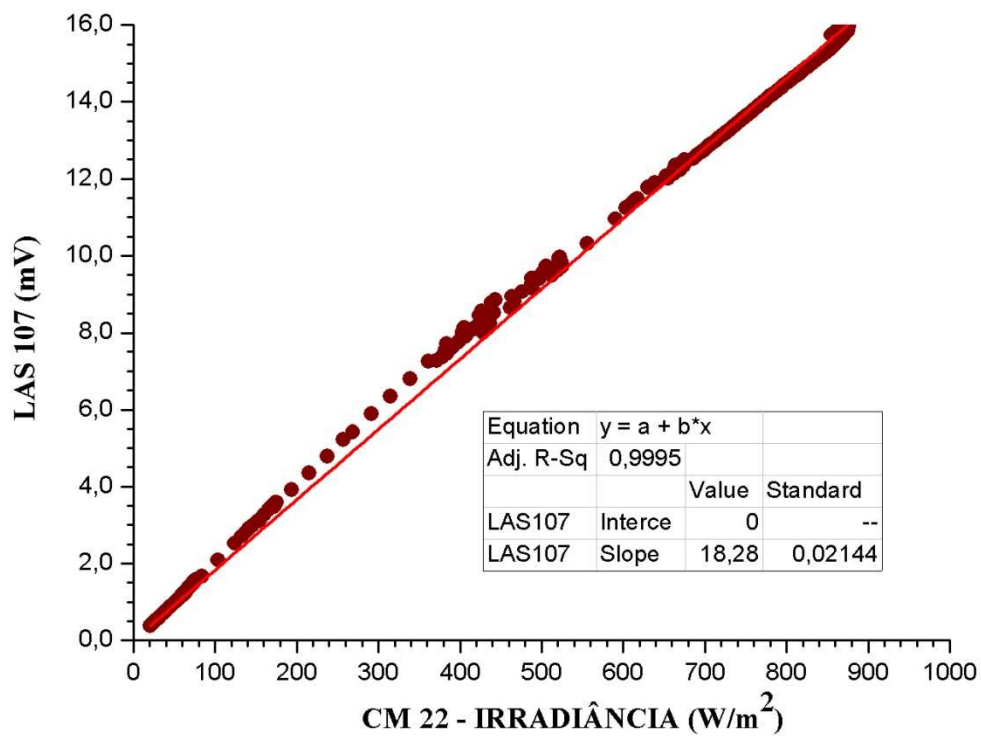


Figura 58 - Curva de calibração do radiômetro LAS 107.

### 8.3.2. Efeito da temperatura sobre a sensibilidade dos protótipos

Os sensores fotovoltaicos, em geral, apresentam uma variação no seu comportamento em função da temperatura. Com o aumento da temperatura os fotodiodos ou célula solar tendem a aumentar suavemente a sua sensibilidade e ocorre também uma ligeira alteração de sua resposta espectral. Este fenômeno também deve ocorrer nos radiômetros desenvolvidos neste trabalho, considerando que os radiômetros desenvolvidos possuem como elemento sensor células solares de silício monocristalino que tem um comportamento semelhante aos fotodiodos. O aumento de temperatura de uma célula de silício tende a reduzir a sua eficiência. Isto se deve ao fato de que a tensão de circuito aberto diminui significativamente com o aumento da temperatura, porém a corrente de curto circuito apresenta uma menor influência da temperatura, sofrendo um ligeiro acréscimo. Como os radiômetros desenvolvidos foram projetados para trabalhar em uma região da curva  $I \times V$  distante do “joelho” e próxima da corrente de curto circuito, logo a influência da temperatura no sinal deste elemento sensor será devido à corrente.

O sinal nos terminais do radiômetro devido à irradiação solar é um sinal de tensão, consequência da corrente da célula sobre um resistor em paralelo. O resistor e a célula, (elemento sensor), são fixados em um pequeno disco de alumínio, sendo um de cada lado deste disco. O conjunto resistor e elemento sensor ficam alojados dentro do corpo do radiômetro, que também é de alumínio. Por isso a célula e o resistor estão em contato térmico e isolado do contato direto com o meio ambiente. Com a variação da temperatura externa, o conjunto resistor e célula tende a termalizar simultaneamente, possuindo a mesma temperatura quando o radiômetro é exposto ao fluxo de radiação solar e ao meio ambiente externo. Logo a temperatura do corpo do radiômetro, devido ao meio ambiente, afeta não somente a célula, mas também o resistor. Os resistores comuns possuem um coeficiente de temperatura positivo que tende a aumentar a resistência com o aumento da temperatura, mas o resistor em paralelo com a célula é de precisão feito normalmente de filme metálico que possui um coeficiente de temperatura positivo, porém muito baixo.

Com o aumento da temperatura, a célula solar de silício diminui sua sensibilidade na região do vermelho deslocando-se o seu pico mais para a região do azul. Na utilização de células em radiômetros solares, o deslocamento do pico da sensibilidade espectral da célula para o azul pode fazer com que o sinal na saída do radiômetro sofra um acréscimo porque melhora o casamento espectral do sensor com a radiação solar.

Para estudar o efeito da temperatura nos protótipos desenvolvidos foram realizadas várias medidas tendo como fonte de radiação o próprio Sol e uma fonte artificial. Para monitorar a temperatura no conjunto célula e resistor foi acoplado a este bloco um termopar tipo T em cada um dos radiômetros utilizado nos testes.

As medidas ao ar livre, tendo o Sol como fonte de radiação, foi realizada em um dia de céu claro, porém com algumas nuvens. Um conjunto de cinco radiômetros foi submerso em água congelada a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ficando apenas a superfície do topo do dispositivo externa ao bloco de gelo. Em dois radiômetros foram instalados termopares para o monitoramento da temperatura. Os radiômetros no bloco de gelo foram expostos à radiação solar e os sinais dos radiômetros e do termopar adquiridos por um sistema de aquisição de dados portátil de 16 bits da marca Fourier, modelo DaqPro 5300. Para acelerar o processo de aquecimento dos radiômetros utilizou-se um soprador térmico. A Figura 59 mostra a resposta de um dos radiômetros em função da variação da temperatura utilizando o Sol como fonte de radiação. O sensor de referência é um radiômetro fotovoltaico Kipp & Zonen modelo SP-LITE, com sensibilidade de  $100\text{ }\mu\text{V}/\text{Wm}^2$ . Este radiômetro foi mantido próximo ao experimento na temperatura ambiente ( $\pm 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) apenas para monitorar a intensidade da radiação solar incidida nos radiômetros em teste.

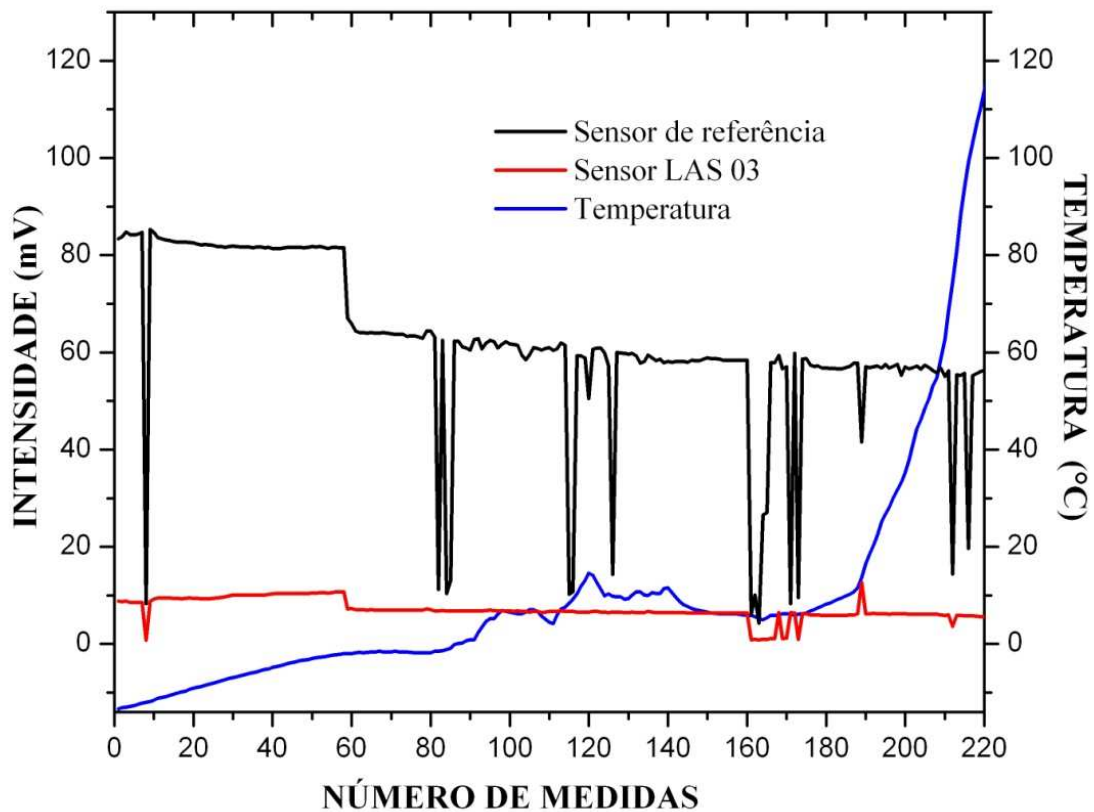


Figura 59 - Efeito da temperatura medida ao ar livre.

Para a medida de efeito da temperatura no radiômetro utilizando uma fonte de radiação artificial, utilizou-se uma lâmpada de He(Xe) de 500 W, um radiômetro com termopar tipo T acoplado internamente ao bloco célula e o resistor foi instalado em uma caixa térmica, contendo uma entrada para radiação. Foi instalado um resistor de potência para aquecimento interno da caixa térmica e para abaixar a temperatura foi utilizado nitrogênio líquido.

Para as medidas de temperatura, utilizou-se o termômetro digital ICEL modelo TD-910D e para medida do sinal elétrico do sensor foi utilizado um multímetro de 6½ dígitos da Argilent, modelo 34401A. Neste processo, as medidas do sinal foram adquiridas manualmente e eram anotadas para cada 2 graus de alteração na temperatura. A Figura 60 mostra a resposta do protótipo LAS130 em função da temperatura para uma irradiação constante tendo como fonte de radiação uma lâmpada de mercúrio e xenônio.

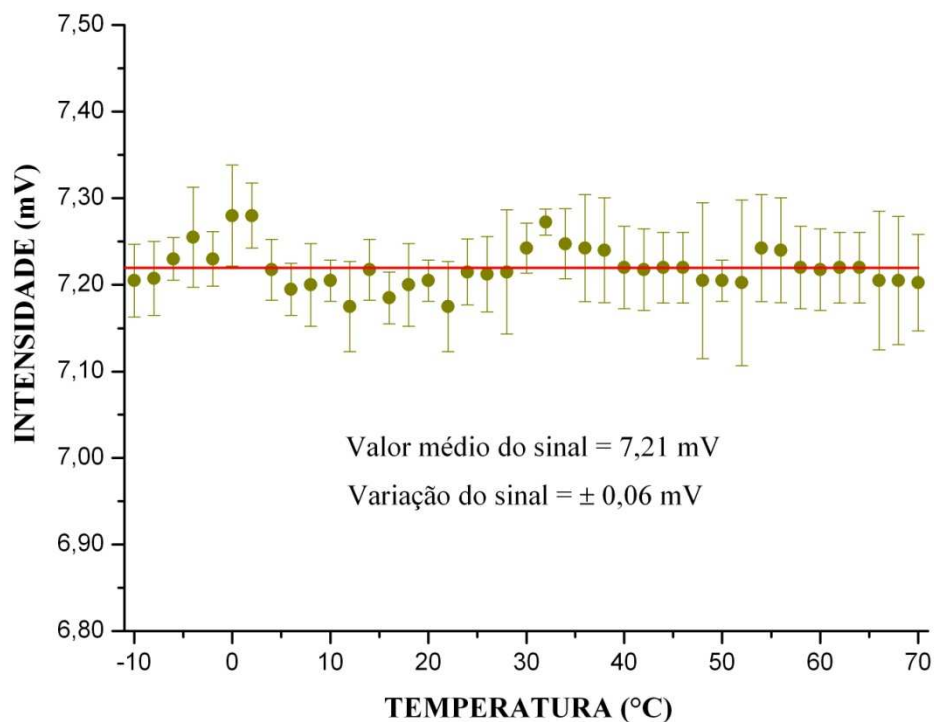


Figura 60 - Efeito da temperatura medida no laboratório para o protótipo LAS130

Conforme os dados obtidos nos experimentos de temperatura realizados nos protótipos de radiômetros tanto para irradiação solar natural como as realizadas em laboratório com a lâmpada de mercúrio e xenônio, observou-se que a dependência à temperatura nos dispositivos é muito pequena, próxima de ser linear. No estudo do efeito da temperatura em um lote de radiômetros observou-se semelhante comportamento, não havendo diferenças significativas de um radiômetro para outro.

### 8.3.3. Teste do cosseno nos protótipos LAS qualificado

A resposta ideal de um sensor de radiação solar será máxima para o ângulo de incidência de zero grau, ou seja, quando a radiação incidente for perpendicular à superfície do difusor e será zero para o ângulo de 90 graus quando a radiação passa rasante sobre o sensor. Para os outros ângulos entre zero e 90 graus ela é proporcional ao cosseno do ângulo de incidência. O teste da lei dos cossenos aplicado aos protótipos tem como finalidade determinar o desvio do valor que o dispositivo sofre em relação ao

comportamento ideal. Os dados obtidos mostram que os protótipos desenvolvidos apresentam um baixo desvio do comportamento ideal.

Estes testes foram aplicados utilizando o novo sistema de caracterização da lei dos cossenos descrito no item 8.1.2. A Figura 61 mostra o comportamento de um dos protótipos testados, sendo este comportamento típico em todos os radiômetros desenvolvidos. O eixo vertical representa o desvio do comportamento do sensor em relação ao valor ideal. Este valor foi normalizado em função da sensibilidade máxima obtida com o ângulo de incidência perpendicular ao sensor. O eixo horizontal mostra a variação angular da incidência da radiação. Podemos observar na curva da Figura 61 que o erro na medida do cosseno aumenta com o ângulo de incidência. Para medidas com radiação incidente acima de 60 graus, vários fatores contribuem para que a medida se desvie do seu valor esperado, entre eles podemos citar: a redução da intensidade do sinal que atinge o elemento sensor diminuindo a relação sinal ruído; o acabamento da superfície; problemas de nivelamento e o desalinhamento na ótica de entrada são alguns dos fatores que contribui para este erro (CORDEIRO, 2008).

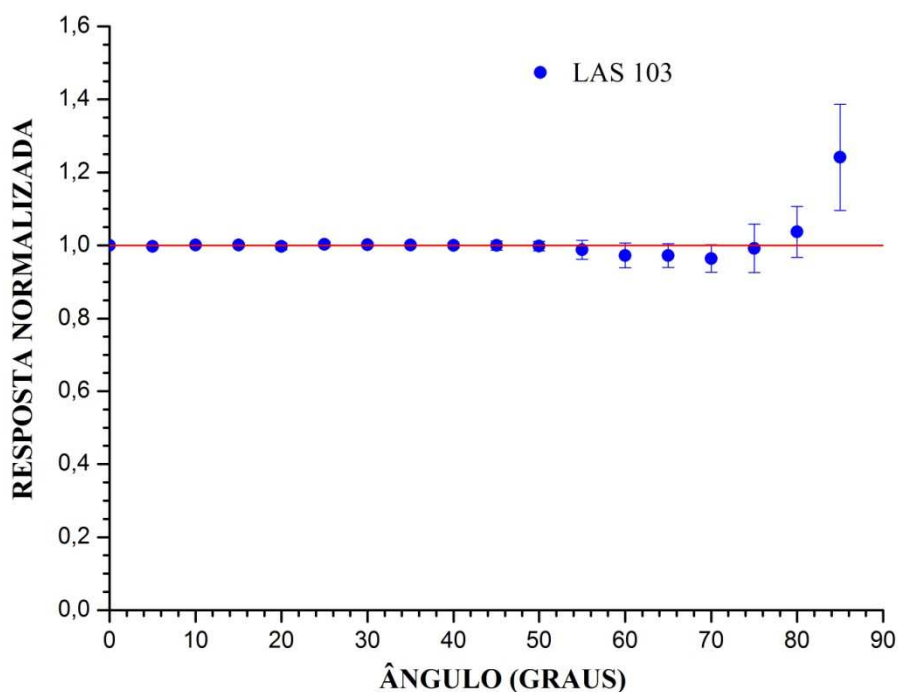


Figura 61 – Gráfico da lei dos cossenos do protótipo LAS103.

### 8.3.4. Resposta Espectral dos protótipos

A determinação precisa da função de resposta espectral de um radiômetro solar ou mesmo de uma célula solar é complexa e exige a utilização conjunta de fontes de radiação calibrada em espectro, monocromadores de precisão, *chopper* e amplificadores como *lock-in* além de um rigoroso controle da temperatura. As intensidades de radiação medidas nestes sistemas são muito pequenas e os sinais elétricos nas saídas dos sensores para cada comprimento de onda são muito fracos o que exige amplificadores especiais com alta relação sinal ruído. Como não dispomos de tais equipamentos a caracterização dos protótipos foi realizada utilizando o sistema descrito no item 8.1.3. O nosso objetivo neste trabalho foi obter a resposta espectral relativa dos protótipos com fins qualitativos, por isso não temos a pretensão de obter uma resposta precisa. A Figura 62 mostra a resposta normalizada do protótipo LAS106.

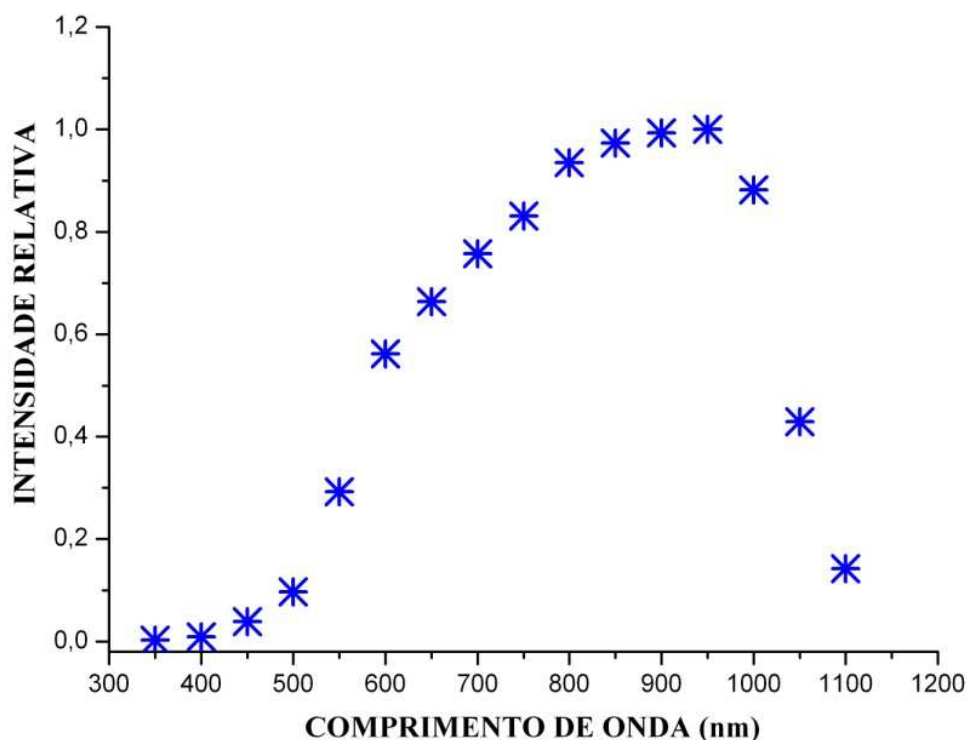


Figura 62 - Resposta espectral do protótipo LAS106.

### 8.3.5. Efeito da resposta espectral,al nos protótipos

Para comparar o efeito da resposta espectral nos protótipos em relação ao erro causado na medida da radiação solar global devido ao descasamento espectral, foram realizadas medidas simultâneas em um radiômetro espectral GetSpec, dois protótipos LAS, um radiômetro fotovoltaico importado e um radiômetro de termopilha. Foram obtidas para análise, seis medidas de intensidades de irradiância em horários diferentes. A Figura 63 mostra a bancada de medidas que foi instalado em um lugar alto para evitar sombras e reflexões indesejáveis. A irradiância global foi medida por quatro radiômetros simultaneamente, sendo da esquerda para direita, os radiômetros Kipp & Zonen CMP11, Kip& Zonen SP LITE, protótipo LAS 104 e protótipo LAS 106. No fundo pode-se observar o elemento sensor do GetSpec.



Figura 63 - Bancada de medida de radiação solar

Na Figura 64, são mostradas seis curvas espectrais da radiação solar obtidas em horários diferentes pelo espectro radiômetro. Foram calculadas as integrais para cada curva na faixa de comprimento de onda entre 400 nm a 1100 nm e os resultados comparados com as medidas de irradiância realizados por cada um dos radiômetros.

Na Tabela 8, podemos ver os resultados desta comparação. As medidas obtidas com o radiômetro Kipp & Zonen CMP11 apresentaram valores de irradiância maiores que os demais radiômetros. Isto era esperado, pois este tipo de radiômetro tem princípio de funcionamento diferente dos outros sensores. Ele utiliza como elemento sensor uma



termopilha que tem uma resposta espectral plana entre 310 nm a 2800 nm, ou seja, a variação espectral da radiação solar não afeta a sua resposta nesta faixa de comprimentos de onda por isso ele é mais preciso. Podemos observar na tabela que a medida de número seis obtida pelo radiômetro Kipp & Zonen CMP11 apresenta um valor muito diferente dos demais, tal fato pode ser atribuído ao tempo de resposta deste radiômetro que é da ordem  $\pm 5$  s, um valor muito maior que a dos outros sensores que possuem tempo de resposta menor que um segundo. Por possuir um tempo de resposta lento, tal tipo de radiômetro não é capaz de detectar mudanças rápidas na variação da intensidade da radiação solar. Comparando os resultados dos radiômetros com o espectro integrado observamos que os protótipos tiveram valores próximos aos do radiômetro CMP11 e maiores do que a integral do espectro nos comprimento de onda de 400 nm a 1100 nm obtidos pelo radiômetro espectral. Considerando que o elemento sensor dos protótipos possui resposta espectral na faixa de 400 nm a 1100 nm, podemos observar que as medidas são capazes de contemplar uma faixa de espectro mais ampla. Com a calibração aplicada aos protótipos é possível obter valores mais próximos do valor da radiação global integrada em todo o espectro solar, com erros menores que 3% nas medidas realizadas.

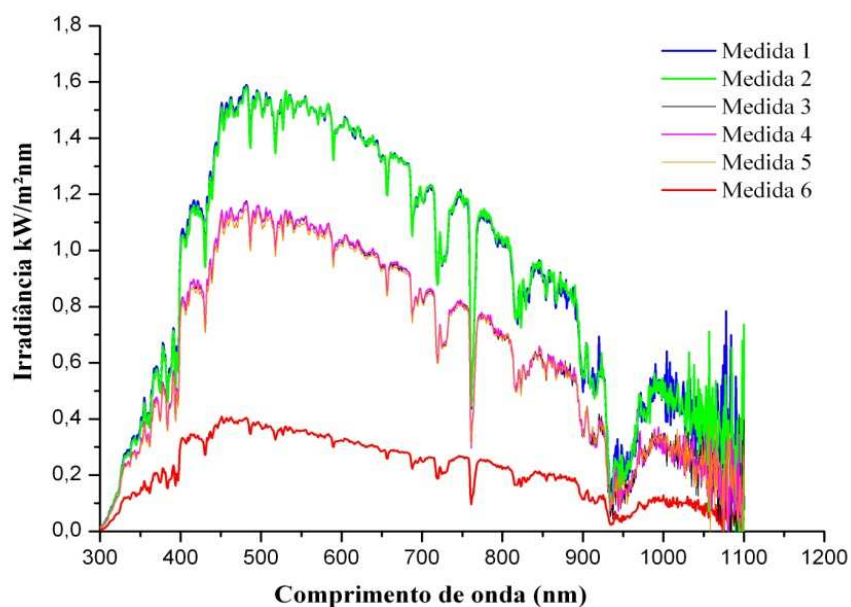


Figura 64 - Curvas espectrais da radiação solar obtidas em horários diferentes pelo espectro radiômetro.

Tabela 8 - Comparação de medidas de irradiação

Medida Nº	SP Lite W/m <sup>-2</sup>	CMP - 11 W/m <sup>-2</sup>	LAS 107 W/m <sup>-2</sup>	LAS 106 W/m <sup>-2</sup>	Get Spectro W/m <sup>-2</sup>
1	869,80	872,28	871,25	871,23	726,84
2	867,06	871,42	869,11	870,05	725,35
3	612,45	615,22	603,14	603,65	511,31
4	610,82	617,54	616,09	617,87	515,45
5	599,83	611,74	607,69	607,98	508,12
6	203,38	207,08	206,22	206,51	173,37

A avaliação do comportamento dos protótipos em relação à variação espectral da radiação solar aqui apresentada não tem a intenção de ser conclusiva. Estudos mais detalhados devem ser realizados para determinar os erros com mais precisão, mas as medidas obtidas neste trabalho indicam que o erro devido ao descasamento entre a resposta espectral dos protótipos em relação ao espectro da radiação solar nos protótipos é relativamente pequeno em situações onde não há grandes variações do espectro da radiação incidente como a que ocorre durante a passagem de nuvens.

#### 8.4. Ensaios Ambientais nos protótipos

Para analisar a degradação dos radiômetros quando expostos por longo tempo ao meio ambiente natural, onde estão sujeitos as variações climáticas e a incidência da radiação solar, foram realizados ensaios ambientais de envelhecimento acelerado em um lote de cinco protótipos de radiômetros. Os ensaios aplicados foram de temperatura e umidade, névoa salina e incidência de ultravioleta. Todos os ensaios obedeceram às normas técnicas pertinentes ao ensaio aplicados.

O ensaio de névoa salina ou *Salt Spray Test* visa obter informações sobre a degradação de materiais e componentes em relação aos efeitos da corrosão e contaminação pelo sal e umidade. Este ensaio foi aplicado aos radiômetros desenvolvidos no LAS, para

simular as condições ambientais agressivas de regiões próximas ao mar ou plataformas marítimas, tendo como objetivo principal avaliar a durabilidade e os efeitos danosos do meio ambiente sobre os radiômetros.

O ensaio de nevoa salina aplicado aos protótipos de radiômetros foi realizado no DCTA (Centro Técnico Aeroespacial) na divisão de materiais do IAE (Instituto de Aeronáutica e Espaço) de acordo com a norma ASTM B 117-03. Para este ensaio utilizou-se uma câmara EQUILAM, modelo SSE500, série nº 1295 e cinco protótipos de radiômetros. Foram utilizados 40 litros de uma solução com 5 partes de cloreto de sódio por 95 partes de água destilada. Os sensores ficaram em exposição na câmara por 96 horas a uma temperatura de  $35\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ . Na Figura 65, é mostrado fotos deste ensaio onde é mostrado a câmara de névoa salina EQUILAM e um dos protótipos após o término do ensaio, ainda dentro da câmara.



Figura 65 - Ensaio ambiental de nevoa salina. Esquerda: câmara de névoa salina.  
Direita: radiômetros dentro da câmara.

Após o término deste ensaio, foi realizada uma análise visual que mostraram pontos de oxidação nos parafusos de fixação e manchas brancas no corpo em todos os protótipos, sendo que não foi observada nenhuma alteração visual nos difusores, mesmo para os dispositivos que foram instalados na horizontal. Através da limpeza das peças, as

manchas foram facilmente removidas e os pontos de oxidação também foram removidos, pois eram superficiais e não comprometeram os parafusos. Para concluir a análise foram testados todos os protótipos e suas sensibilidades foram determinadas antes e depois de serem limpos. O teste de névoa salina não provocou danos funcionais e nem visuais permanentes nos protótipos analisados, também não se observou nenhuma alteração na sensibilidade dos protótipos testados nem antes e nem após a limpeza.

O ensaio de temperatura e umidade foi realizado no laboratório de ciclo térmico do LIT/INPE. O objetivo deste teste foi verificar o comportamento dos protótipos quando submetidos às condições ambientais impostas em termos de temperatura e umidade. Para este ensaio, utilizou a câmara climática Heraeus Votsch VLK 08/150. A câmara Heraeus tem volume útil de 150 litros e trabalha entre  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , transiente térmico máximo  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , umidade de 10% a 95%, máxima flutuação da umidade  $\pm 5\%$ . O ensaio termoclimático foi realizado nos mesmos protótipos utilizados no teste de névoa salina, nas condições estabilizadas durante o período de 90 horas ininterruptas, com temperatura de  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  e 90 % de umidade relativa. A Figura 66 mostra fotos do ensaio termoclimático, em (a) pode-se observar a câmara Heraeus Votsch e em (b) são mostrados os protótipos dentro da câmara após o término do teste. Após o ensaio termoclimático foi realizada uma análise e teste funcionais nos protótipos e constatou que não houve danos funcionais e nem visuais.



Figura 66 - Ensaio ambiental termoclimáticos. (a) Câmara Heraeus Votsch. (b) protótipos dentro da câmara após o término do teste.

O ensaio ambiental de exposição à radiação ultravioleta foi realizado no laboratório de célula solar do LAS/INPE e foi baseado na norma ASTM G53-96. Para este ensaio, utilizou-se uma lâmpada de descarga elétrica em mercúrio de 1000 W com um refletor parabólico metálico polido para uma maior concentração da radiação. Foi utilizado este tipo de lâmpada porque ela tem uma alta intensidade de ultravioleta (UVA e UVB), maior do que a encontrada normalmente na radiação solar terrestre. Para este ensaios foram utilizados os cinco protótipos de radiômetros que haviam sido submetidos aos ensaios anteriormente descritos. Estes protótipos foram colocados a 20 cm abaixo do refletor em uma faixa de radiação mais intensa. O ensaio de ultravioleta foi realizado durante o período de 7 a 8 horas diário, durante 120 horas. A temperatura média dos protótipos depois de estabilizada era entorno de 60 °C e a irradiância da lâmpada na posição dos protótipos ficaram entorno de 1200 W/m<sup>2</sup>. Para evitar superaquecimento e alta concentração de ozônio do ambiente foi utilizada ventilação forçada. Na Figura 67, é mostrada uma foto deste ensaio ambiental. Após o ensaio de exposição radiação UV, os protótipos foram comparados com um protótipo de referência e observou-se uma ligeira alteração do brilho do corpo do protótipo e o nível de bolha apresentou uma suave alteração na coloração, ficando suavemente amarelado. Não foram constatadas alterações visuais nos difusores.



Figura 67 - Foto de ensaio ambiental de exposição a radiação ultravioleta.

Após aplicação de cada ensaio ambiental, os cinco protótipos foram analisados visualmente e realizados testes funcionais que consistiram em medidas da sensibilidade e da lei dos cossenos e não foram observadas alterações funcionais. Na tabela 9, é mostrada a sensibilidade dos sensores medidas antes e após todos os ensaios ambientais realizados. Pode-se observar que a variação da sensibilidade detectada após o ensaio está dentro da faixa de erro da medida.

Tabela 9 - Comparação da sensibilidade dos protótipos LAS antes e após os ensaios ambientais.

Sensibilidade $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$		
Sensor	Antes	Após
103	$19,20 \pm 0,10$	$19,19 \pm 0,11$
104	$17,71 \pm 0,12$	$17,68 \pm 0,15$
106	$18,68 \pm 0,14$	$18,75 \pm 0,19$
107	$18,28 \pm 0,18$	$18,26 \pm 0,09$
108	$17,83 \pm 0,15$	$17,69 \pm 0,21$

### 8.5. Teste de funcionamento em campo

Para testar o funcionamento dos radiômetros desenvolvidos em situação contínua de operação em campo foi instalada uma plataforma de teste para coleta de dados de radiação solar. Esta plataforma consiste uma base metálica á 1,5 m de altura com dois radiômetros localizada sobre o Laboratório de Energia solar do LAS/INPE. Os radiômetros instalados nesta base foram um protótipo LAS102 com sensibilidade de  $19,12 \pm 0,06 \mu\text{V}/\text{Wm}^2$  e um radiômetro fotovoltaico importado Kipp & Zonen, modelo SP LITE com sensibilidade de  $101,20 \mu\text{V}/\text{Wm}^2$ . A Figura 68 mostra uma foto desta plataforma.



Figura 68 - Foto da plataforma de teste de coleta de dados de radiômetros.

Para aquisição de dados dos radiômetros na plataforma de testes foi utilizado um sistema automático de coleta de dados (*datalogger*) Fourier, de 16 bits, modelo DaqPro 5300, acoplado a um microcomputador. O sistema de aquisição de dados funciona a bateria, faz aquisições e armazena os dados independentemente do microcomputador. As medidas de radiação solar também são enviadas ao microcomputador, que através de um programa específico do sistema de aquisição de dados (DaqLab) pode apresentar os dados na tela do computador em tempo real na forma de gráficos ou tabelas ao mesmo tempo que armazena os dados na memória do micro. Este programa permite também algumas manipulações matemáticas dos dados, como por exemplo, a conversão dos sinais de tensão dos radiômetros em grandezas adequadas.

A Figura 69 e a Figura 70 apresentam resultados experimentais de medidas diárias de irradiação solar global obtido com o uso do radiômetro protótipo LAS 102. A plataforma de coleta de dados para medida de radiação solar foi montada em caráter experimental com a finalidade de testar o funcionamento dos radiômetros em situação real de operação. Devido à topografia do local e a presença de edifícios na vizinhança,

embora o local seja relativamente alto, uma grande parte da radiação solar encontra-se bloqueada em cerca de 10 a 15 graus de elevação em algumas direções. Por isso, há uma parcela da radiação, principalmente a difusa, que não é mensurada pelos instrumentos. Estudos mais detalhados e de longo prazo relacionados às medidas de radiação deverão ser realizados para determinar a estabilidade dos protótipos. Resultados parciais analisados até o momento indicam que a instabilidade deve ficar menor do que 1% ao ano.

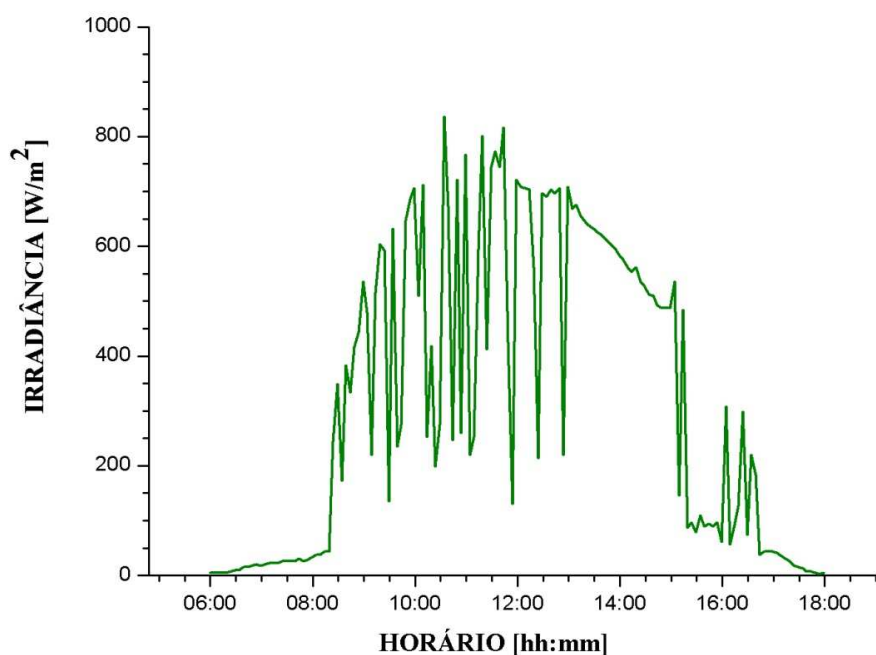


Figura 69 - Resultado da medida diária de irradiação solar global obtido com o uso do radiômetro protótipo LAS102 no dia 13 de dezembro de 2009



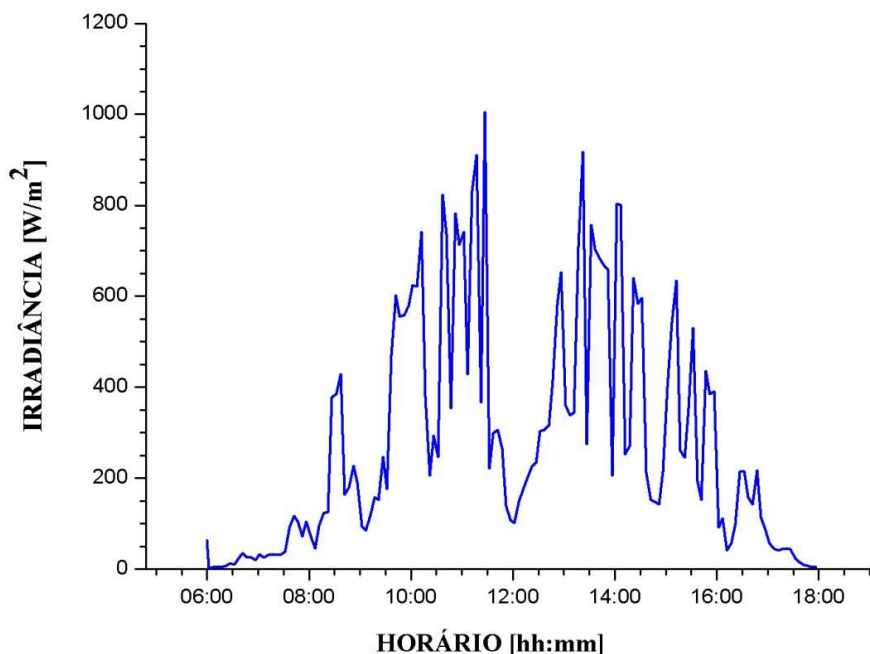


Figura 70 - Medida da irradiação diária solar global obtido com o uso do radiômetro protótipo LAS102 no dia 8 de abril de 2010.

### 8.6. Resultados experimentais para qualificação do DataRad

Para qualificação do dispositivo DataRad, foram realizados uma série de testes no protótipo utilizando a metodologia previamente determinada pelo plano de desenvolvimento e teste. Foram realizados testes em bancadas utilizando fontes de tensão e décadas de resistores de precisão para simular os mais diversos tipos de sensores que poderão ser conectados no dispositivo e para testar também as diversas escalas de tensão em que o dispositivo pode operar. Foram realizados testes funcionais do dispositivo para verificar a comunicação com micro, envios e leitura de parâmetro, transferência do conteúdo da memória para “pen drive”, visualização dos valores adquiridos pelo dispositivo em tempo real e teste de início e término do período de aquisição de dados. Também foram realizados testes de aquisição de dados em situações reais utilizando radiômetros importados, radiômetros desenvolvidos no próprio LAS/INPE e termopares do tipo T. Várias medidas de irradiação solar em dias de céu claro e em dias nublados foram adquiridas pelo dispositivo para comparação com dados

adquiridos por outro sistema de aquisição. Os radiômetros utilizados nestes testes foram devidamente calibrados. A verificação do sistema foi realizada por comparação com termopares, fontes e multímetros de precisão compatível com a resolução do DataRad. Atualmente, o DataRad encontra-se em testes para avaliar seu desempenho e confiabilidade. Ele foi instalado no laboratório de Energia Solar do LAS/INPE há pouco mais de dois meses e está realizando ininterruptamente aquisições diárias de dados de irradiação solar através de dois radiômetros, das seis às dezoito horas. Na Figura 71, é mostrado um exemplo uma curva referente aos dados de radiação solar adquirido pelo DataRad utilizando sensor fotovoltaico desenvolvido no LAS/INPE ao longo de um dia com céu aberto com poucas nuvens e com taxa de uma aquisição a cada cinco minutos. Na Figura 72, é mostrada a aquisição nas mesmas condições para um dia com muitas nuvens.

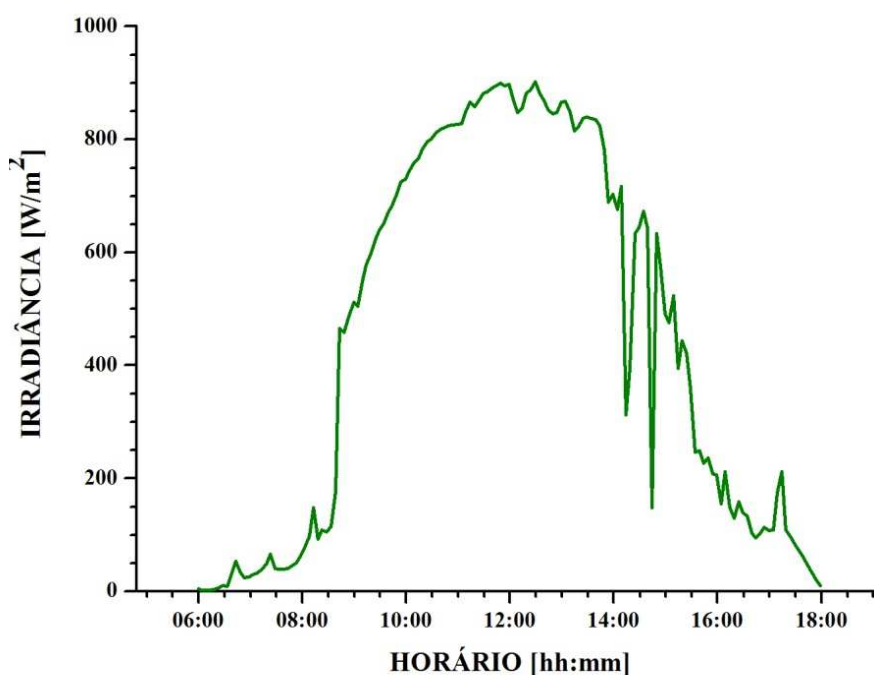


Figura 71 - Irradiância medida no dia 24/03/10 com o DataRad

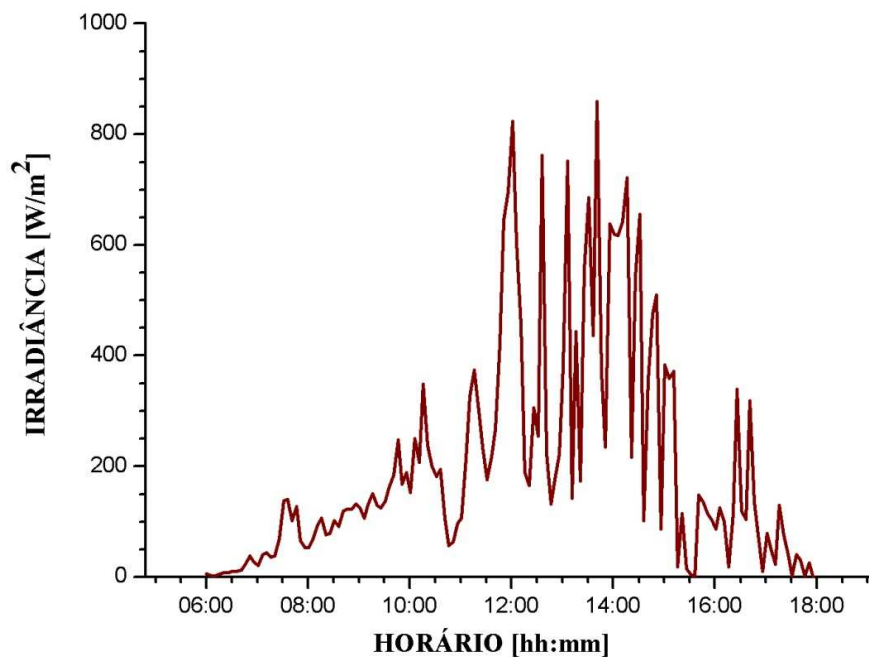


Figura 72 - Irradiância medida no dia 07/04/10 com o DataRad

Para validar os dados de irradiação solar obtidos pelo DataRad, foram realizadas aquisições de dados ao mesmo tempo com um outro sistema de aquisição similar. O *datalogger* utilizado foi o da marca Fourier, importado, de 16 bits, modelo DaqPro 5300. Para isso, foram utilizados os radiômetros desenvolvidos no LAS, com aquisição paralela nos dois dispositivos. Devido à dificuldade técnica, as aquisições não foram sincronizadas, mas o tempo entre as medidas em cada sistema foi muito menor que a taxa de aquisição. Na Figura 73, são mostradas as curvas de irradiância diária em ambos os instrumentos no dia 27 de julho deste ano. Na Figura 74, pode-se observar um detalhe das medidas mostradas na Figura 72. A diferença observada em alguns pontos da curva entre o DataRad e o DaqPro 5300 se deve a falta de sincronismo entre os dois dispositivos. A análise dos dados obtidos nos dois sistemas mostram que os dados obtidos com o DataRad possui qualidade compatível com o dispositivo importado e atende as especificações exigidas para este tipo de dispositivo, conforme as recomendações da OMM.

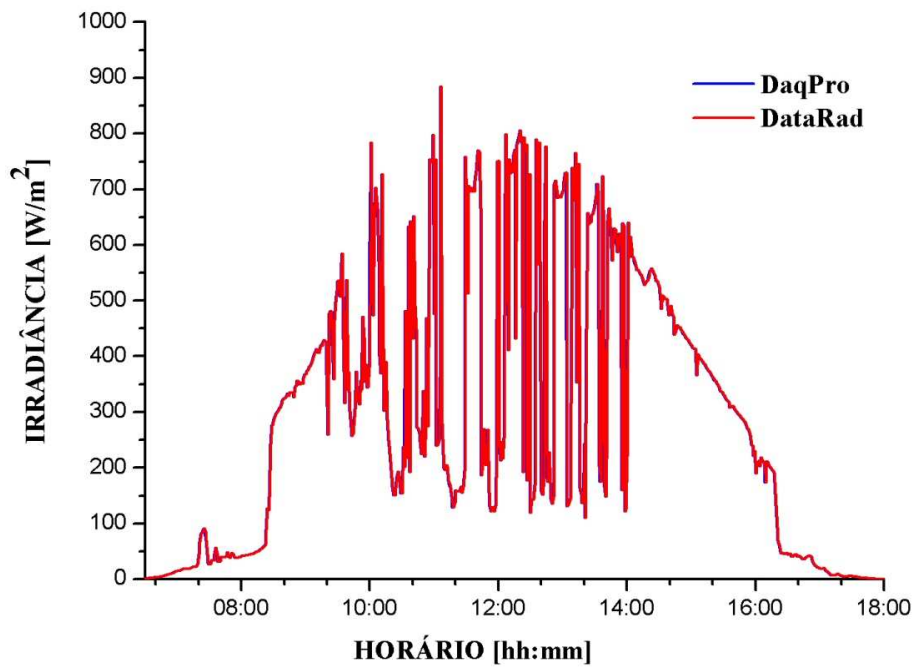


Figura 73 - Curvas de irradiância obtidas no dia 27/07/10 com o DataRad e com o DaqPro 5300 simultaneamente.

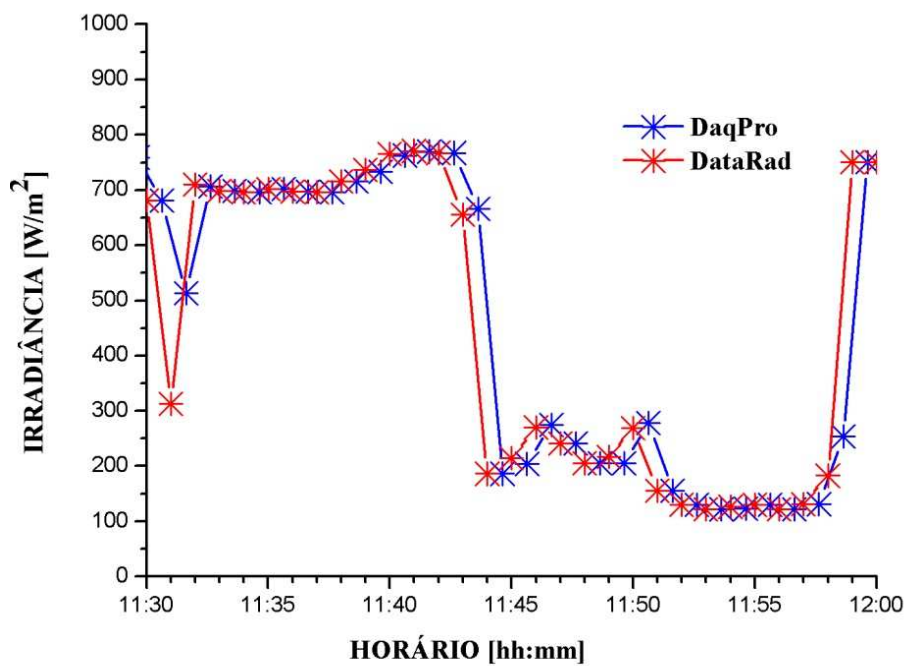


Figura 74 - Detalhe da medida de irradiação solar do dia 27/07/10 obtidas simultaneamente com o DataRad e com o DaqPro 5300.

## 9. CONCLUSÃO

Nos últimos anos, devido às questões ambientais relacionadas ao aquecimento global, houve um significativo aumento de interesse no mundo todo por fontes de energia renováveis de baixo impacto ambiental. Entre as alternativas de energia, com baixo impacto ambiental, se destacam a energia solar e a eólica. O Brasil possui um imenso potencial para exploração da energia solar, mas para o desenvolvimento deste setor é necessário um esforço para que haja domínio tecnológico e capacitação do parque industrial nacional, não só na produção de equipamento de geração e captação de energia, mas também de dispositivos capazes de medir e monitorar a radiação solar. Este trabalho de tese teve como objetivo principal, através da parceria entre LAS/INPE, LME/USP e a empresa Orbital Engenharia, desenvolver dispositivos para medida e monitoramento da radiação solar voltado para o setor de energia solar fotovoltaica e térmica.

A partir da pesquisa junto a usuários e a constatação de que havia no mercado nacional brasileiro uma crônica carência de radiômetros e de dispositivos de aquisição de dados e que os equipamentos normalmente utilizados são importados e de alto custo, foi elaborado o projeto para o desenvolvimento de um radiômetro fotovoltaico e de um sistema de aquisição de dados dedicado a medida da radiação solar.

Com o objetivo de nacionalizar e baratear o custo final dos dispositivos, optou-se pela utilização de um elemento sensor, no caso a célula solar de silício monocristalino, que pudesse ser desenvolvido e fabricado no Brasil. Também para o sistema de aquisição de dados, foram utilizados componentes facilmente encontrados no mercado nacional.

Um dos fatores que contribuíram para o sucesso deste trabalho foi o uso da metodologia de desenvolvimento. A metodologia adotada neste trabalho apresenta uma série de fatores que a tornou uma ferramenta indispensável não só para o desenvolvimento dos dispositivos aqui apresentados, mas principalmente pela criação de uma documentação detalhada que será a base para transferência de toda a tecnologia ao setor produtivo. Esta metodologia, comumente utilizada no INPE nos projetos de satélites e de outros

componentes de uso espacial foi aplicada pioneiramente neste trabalho de tese e poderá servir de exemplo para aplicações em outros projetos similares.

Na metodologia utilizada, ambos os projetos nasceram com a concepção dos dispositivos que foram definidos a partir das especificações feitas com auxílio dos possíveis usuários e através de uma equipe de especialistas e colaboradores da área de engenharia de setores do INPE relacionado à energia solar e instrumentação. A partir da concepção, outras fases de desenvolvimento foram realizadas: fase de Projeto Preliminar; fase de Projeto Detalhado; Fase de Qualificação e fase de Pré-industrialização. Em cada fase foram gerados ou atualizados documentos e realizada uma reunião formal de revisão.

Os resultados da calibração e dos diversos testes mostraram que o desempenho do radiômetro de célula solar de silício desenvolvido possui qualidade compatível com os similares importados. A montagem de diversos protótipos de radiômetros obedeceu aos mais rígidos controles de qualidade e foi realizada em caráter experimental na empresa Orbital Engenharia Ltda. que possui infra-estrutura adequada, uma equipe de técnicos altamente qualificados e interesse em produzir e comercializá-los.

Os sistemas de caracterização e calibração dos protótipos montados no LAS/INPE foram imprescindíveis para o desenvolvimento dos protótipos e servirão também para o desenvolvimento de outros tipos de radiômetros como, por exemplo, o radiômetro de ultravioleta que está em fase adiantada de desenvolvimento no LAS/INPE. Estes sistemas também servirão de referência para montagem de outros similares na empresa que virá a produzir os radiômetros em escala comercial.

O radiômetro desenvolvido neste trabalho tem como característica particular o uso de uma célula solar de silício monocristalino convencional com área ativa de 15,5 mm x 15,5 mm, como elemento sensor, diferentemente dos radiômetros fotovoltaicos importados, que normalmente utilizam fotodiodos. O uso de célula solar de silício como elemento sensor nos radiômetros apresenta a vantagem de ser uma tecnologia de domínio nacional e possuir preço relativamente menor que os fotodiodos.

As células de silício monocristalino de uso convencional, utilizadas no projeto foram produzidas no LME, que possui os equipamentos, técnicas apropriadas para esse tipo de célula e uma sólida experiência no desenvolvimento e na produção de células solares de uso terrestre e espacial. As células solares utilizadas possuem tipicamente as seguintes características elétricas: tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) de 580 mV; corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ) de 70 mA; área ativa quadrada de 15,5 mm x 15,5 mm e eficiência de 13,5%. Os resultados obtidos com este dispositivo permitem concluir que o desenvolvimento de células solares de silício monocristalino pelo LME para aplicações como elemento sensor de radiação solar atingiu seu objetivo, podendo servir de ponto de partida para desenvolvimento de outros dispositivos semicondutores para uso como sensores, como por exemplo, elementos sensores para medida de ultravioleta.

A resposta espectral dos radiômetros desenvolvidos é de 400 nm a 1100 nm, sensibilidade típica entre 10 a 20  $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ , tempo de resposta menor que 10 ms, resposta compatível com a lei dos cossenos para ângulos de incidência até 80°, erro de precisão dentro das condições naturais da luz do dia de  $\pm 3\%$  e conforme os resultados experimentais mostraram, a dependência à temperatura dos protótipos de radiômetro é muito pequena, próxima de ser linear, tornando-o adequado para operação na faixa de temperatura de -20 °C a 80 °C. A variação máxima da estabilidade, para o período de 1 ano é prevista para  $\pm 2\%$ .

Os radiômetros fotovoltaicos, por não possuir uma resposta espectral linear e não incluir o espectro solar inteiro, eles não deve ser classificado de acordo com os requisitos do OMM para radiômetros convencionais. Porém, os radiômetros fotovoltaicos apresentam algumas características até mesmo superiores aos instrumentos de primeira classe. Entre as vantagens do radiômetro fotovoltaico, podemos citar o baixo custo, tempo de resposta extremamente rápido, elevado sinal de saída e baixa degradação da constante de calibração, características estas que o torna útil como um instrumento operacional no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos e em certas condições na geração de bancos de dados de radiação solar global, tão necessário para o desenvolvimento do setor fotovoltaico no Brasil.

A durabilidade dos radiômetros foi testada através de ensaios ambientais em protótipos, e estima-se uma vida útil superior a cinco anos para os dispositivos em operação contínua no campo. Conforme informações de usuários, os elementos que mais degradam nos piranômetros fotovoltaicos importados são o difusor e o cabo de saída de sinal, por isso foi dada especial atenção em relação a estes componentes. O uso do difusor de teflon confere ao difusor além de uma melhor correção a lei dos cossenos, uma menor degradação, pois o teflon é um material inerte a maioria dos agentes agressores do meio ambiente. Para evitar a degradação do cabo de sinal do radiômetro, foi cuidadosamente especificado um cabo que fosse resistente as condições de uso ao ar livre. Os materiais empregados para produzir os radiômetros são isentos de substâncias que prejudiquem o meio ambiente ou podem causar danos a saúde e são na sua maioria recicláveis.

O dispositivo de aquisição de dados desenvolvido recebeu a denominação de DataRad e é um dispositivo com características particulares, voltado especialmente para atender engenheiros e pesquisadores do setor de energia solar. O DataRad é um *datalogger* dedicado, com 12 bits e cinco Mbyte de memória, capaz de adquirir e armazenar dados simultaneamente de quatro radiômetros e dois termopares, com armazenamento ininterrupto durante mais de um ano na menor periodicidade, que é a aquisição de uma medida de cada sensor por minuto, considerando-se 16 horas de aquisição por dia. Os sinais dos transdutores são amostrados e calculados para uma média de 30 medidas e então esta média é convertida em valores e unidades adequadas a grandeza que está sendo medida e armazenado na memória. Os dados que são enviados para memória também podem ser simultaneamente apresentados no mostrador digital do dispositivo ou enviados ao microcomputador em tempo real tornando seu uso ideal na maioria das aplicações.

Baixo consumo de energia, grande capacidade de memória e a alta precisão do dispositivo, foram os principais quesitos no desenvolvimento deste dispositivo e graças ao uso da metodologia aplicada no desenvolvimento, semelhantemente ao desenvolvimento do radiômetro, obteve-se uma documentação consistente que permitirá a total transferência da tecnologia.



O DataRad, associado ao radiômetro fotovoltaico desenvolvido no LAS/INPE, é uma alternativa em termos de custo e praticidade que deverá ser oferecida a curto prazo no mercado nacional. Porém, por apresentar flexibilidade no uso de diversos tipos de transdutores, vislumbra-se a utilização do DataRad em outras aplicações como, por exemplo, no monitoramento de outros dados ambientais de interesse em aplicações para dimensionamento de sistemas de energia alternativas ou convencionais que requerem dados tais como temperatura, velocidade do vento, vazão de rios, níveis de represas, etc. Ele possui uma série de características que o torna o instrumento adequado para o levantamento de dados ambientais em regiões remotas, onde não se dispõem de energia elétrica e sistemas de comunicação. É um instrumento simples de usar, compacto, porém robusto o suficiente para o trabalho em campo, possui grande capacidade de armazenamento de dados, baixo consumo de energia podendo operar com baterias por longos períodos e capacidade de suportar as intempéries de operação em campo. Acoplado a um sistema de alimentação por painéis solares e a um transmissor este dispositivo poderá operar em campo sem assistência, realizando funções equivalentes a uma pequena plataforma de coleta de dados.

Os resultados preliminares dos testes realizados no protótipo do DataRad mostraram que seu desempenho é compatível com os dispositivos similares importados e o fato dele ser dedicado ao monitoramento de radiação solar o torna um instrumento prático de se utilizar. Algumas melhorias poderão ser realizadas no caso de uma nova versão deste dispositivo, principalmente no que diz respeito à interface com o usuário. Os resultados de medidas realizadas em longo prazo, como as que estão sendo realizadas no Laboratório de Energia solar do LAS atualmente, permitirão uma melhor avaliação do dispositivo, principalmente no que diz respeito à estabilidade do sistema.

Além dos dispositivos desenvolvidos e da transferência de toda a tecnologia ao setor produtivo nacional, este trabalho de tese teve uma contribuição significativa no desenvolvimento de uma metodologia experimental que permitirá o desenvolvimento de outros tipos de sensores e de sistemas de aquisição de dados voltados à área ambiental e de energia. O aprendizado adquirido também permitiu criar uma nova competência no INPE que terá como consequência a formação de futuros pesquisadores e a criação de

inovações que contribuirão para que o Brasil tenha independência tecnológica na área de sensores ambientais e de energia solar.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLOCCA, J. A.; STAURT, A. **Transducers: theory and applications**. Reston Publishing, 1984. 180p. ISBN-10: 083597796X, ISBN-13: 978-0835977968.

ARAUJO, M. B. G. et al. Correção da temperatura em medidas espectrofotométricas., In: CONGRESSO E FEIRA DA QUALIDADE EM METROLOGIA, REDE METROLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO – REMESP (ENQUALAB 2006), São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n], 2006.

ASTM. **E-824**: standard test method for transfer of calibration from reference to field radiometers, 2002.

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.

BERNARD, S.; COVINO, J.R. Corrosion: fundamentals, protection and prevention the purpose of ASM handbook. In: Cramer, S.; Covino Jr., B. (eds.) **ASM Handbook**, 2006. v. 13, 1135 p. ISBN: 9780871707093.

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.

BOGADO, M. G. M. **Diseño, elaboración, caracterización y ensayos de dispositivos fotovoltaicos para usos espaciales**. 189f. Tesis (Doctor em Ciencia y Tecnología - Mención Física). Universidad Nacional de General San Martín, Comisión Nacional de Energía Atómica, Instituto de Tecnología, Argentina, 2004.

BUENO, W.A. **Manual de espectroscopia vibracional** - Conselho Nacional de Pesquisas (PADCT). São Paulo: McGraw-Hill, 1989.

COLTHUP, N. B.; DALY, L. H.; WIBERLEY, S. B. **Introduction to infrared and Raman spectroscopy**. v. 3. Boston: Academic Press, 1964.

CORDEIRO, R. R.; SECKMEYER, G.; LABBE, F. **Cossine error influence on ground-based spectral UV irradiance measurements**. Bristol, England: IOP Publishing Ltda, 2008. v. 45.p. 406-414.

DEFELICE, T. P. **An introduction to meteorological instrumentation and measurement**. New Jersey: Printice Hall, 1998. 0-13-243270-6.

DIAS, C. A. A. **Procedimento de medição e aquisição de dados de uma torre micrometeorológica em Sinop - MT.** Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Ciências Exatas e da Terra - UFMT, Cuiabá - MT, 2007.

EBERHARDT, D. **Desenvolvimento de um sistema completo para caracterização de células solares.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Metalúrgica) - PUC - Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2005.

ESCOBEDO, J. F. et al.. Radiômetros Solares com Termopilhas de Filme Finos. I - Descrição e Custos. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v. 16, n. 1, 1997

FONSECA, F. J. **Desenvolvimento de uma célula solar de silício para aplicações espaciais.** 131f. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada). Universidade de São Paulo - Instituto de Física e Química de São Carlos. São Carlos -SP, 1985.

FRAMÇA, J. A. **sistema de aquisição de dados baseados em microcontrolador.** 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande - PB, 1997.

FRITSCHEN, L J.; GAY, L. W. **Environmentl instrumentation.** New York: Springer -Verlag, 1979. ISBN 0-387-90411-5

GRUPO DE TRABALHO DE ENERGIA SOLAR ( GTES)/Centro de Pesquisas de Energia Elétricas/Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro - RJ: CRESESB, 2004.

HAAG, R. **Desenvolvimento de um radiômetro espectral e metodologia para caracterização do espectro solar.** 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, 2007.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.. **Física 4.** 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1984.

HOVEL, H. J. Semicondutores and semimetals. In: WILLARDSON R. K.; BEER A. C. (eds). **Solar Cells.** New York: Academic Press Inc., 1976. v. 11 - 253 p.

HOYT, D. V.; SCHATTEN, K. H. **The role of the sun in climate change** New York: Oxford University Press, 1997.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60904-1:** photovoltaic devices - Part 1: measurement of photovoltaic current-voltage characteristics. 2. ed. Geneva, 2006.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60904-2:** Photovoltaic devices - Part 2: requirements for reference solar devices. Geneva, 2007.

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

INAMASU, R. Y. **Coletor de dados:** um subsídio para escolha. boletim de pesquisa nº 1/96. : Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, São Carlos, SP 1996. ISSN 1413-9537.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Vocabulário internacional de metrologia:** conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2008). 1. ed. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: [http://www.inmetro.gov.br/infotec/publicacoes/VIM\\_2310.pdf](http://www.inmetro.gov.br/infotec/publicacoes/VIM_2310.pdf) acesso: 15/01/10

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Orientações sobre calibração e rastreabilidade das medições em laboratórios de calibração e de ensaio.** Rio de Janeiro, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO - 9846:** solar energy - calibration of a pyranometer using a pyrhemometer. Geneva, 1993.

—. **ISO - 9847:** Calibration of Field Pyranometer by comparison to a Reference Pyranometer. Geneva, 1992.

KRAZENERG, M. et. al. Rastreabilidade de radiômetros para medida da energia solar. In: METROLOGIA 2003 - METROLOGIA PARA A VIDA, 2003, Recife. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM), 2003.

KREIDER, J. F. ; KREITH, F. **Solar energy handbook.** New York: McGraw-Hill Book Company, 1981.

LIMA, M. S. et. al. Spectral responsivity calibration of linear pyrometer of INMETRO. In: IMEKO WORLD CONGRESS - METROLOGY FOR A SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 18. Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: SBM, 2006.

LORENZZETTI, J. A. **Princípios físicos de sensoriamento remoto** (Div. de Sensoriamento Remoto - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São José dos Campos, 2009). Notas de Aula, SER-210-3.

MAGGI, M. F. **Aula 3 - radiação solar** (Instituto Agrônômico do Paraná. Guarapuava, 2007). Notas de Aula, disciplina: Meteorologia e Climatologia.

MARTINAZZO, C. A. **Modelo de estimativa de radiação solar para elaboração de mapas solarimétricos**. 185f. Dissertação ( Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PROMEC/UFRGS. Porto Alegre RS, 2004.

MARTÍNEZ, M. A. **Modelos Empíricos para la Estimación de la Irradiancia Solar Ultravioleta**. 212f. Tesi (Doutor in Física). Facultad de Ciencias. Departamento de Física - Universidad de Extremadura. Badajoz, 2007.

MARTINS, F. R. et. al. Levantamento dos recursos de energia solar no brasil com o emprego de satélite geoestacionário - projeto Swera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n° 2, p. 145-159, 2004. Disponível em: [www.sbfisica.org.br](http://www.sbfisica.org.br). Acesso em: 15/01/2008.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L.; COLLE, S. Mapas de irradiação solar para o Brasil – resultados do projeto SWERA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3137-3146. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12716-PRE/8006). Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.15.49>>. Acesso em: 01 out. 2010.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; CHAGAS, R. C.; MANTELLI NETO, S. L.; PEREIRA, E. B.; ANDRADE, E.; THOMAZ, C. Projeto sonda - rede nacional de estações para coleta de dados meteorológicos aplicados ao setor de energia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR - CBENS, 1., Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2007. (INPE-14716-PRE/9687). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/05.03.14.32>>. Acesso em: 01 out. 2010.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; SILVA, S. A. B.; ABREU, S. L.; COLLE, S. Solar Energy scenarios in Brazil, part one: resource assessment. **Energy Policy**, v. 36, n. 8, p. 2843-2854, apr. 2008. doi: <[10.1016/j.enpol.2008.02.014](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.02.014)>.

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

MICHALSKY, J. J.; HARRISON, L.; LEBARON, B. A. Empirical radiometric correction of a silicon photodiode rotating shadowband pyronometer. **Solar Energy Journal**, v. 39. p. 87-96. 1987.

OKUMO, E.; VILELA, M. A. C. **Radiação ultravioleta: características e efeitos**. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física - Sociedade Brasileira de Física, 2005. (Vol: Temas Atuais de Física). ISBN: 85-88325-31-4.

PALTRIDGE, G. W.; PLATT, C. M. R. **Radiative processes in meteorology and climatology**. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. ISBN: 0-444-41444-4. Vols. Developments in Atmospheric Science.

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. 1.ed. em Português. São Paulo: Hemus Livraria e Editora Ltda, 1981.

PARK, J.; MACKAY, S. **Practical data acquisition for instrumentation and control systems**. Oxford: Elsevier, 2003. ISBN 07506 57960.

PEREIRA, E. B. et. al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 1. ed. INPE. São José dos Campos, 2006. ISBN 978-85-17-00030-0.

PLANA-FATTORI, A.; CEBALLOS, J. C. **Glossário de termos técnicos em radiação atmosférica**. São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico da USP, 1996. Disponível em: <http://www2.cptec.inpe.br/satelite/metsat/pesquisa/gloss/glossar.htm>. 1997. Acesso em Dezembro de 2007.

PRIEB, C. W. M. **Desenvolvimento de um sistema de ensaio de módulos fotovoltaicos**. 54f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PROMEC/UFRGS. Porto Alegre, 2002.

SANTANA, M. A. A. et. al. Rastreabilidade metrológica e os critérios de aceitação para a instrumentação meteorológica / ambiental. In: CONGRESSO E FEIRA DA QUALIDADE EM METROLOGIA, REDE METROLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO – REMESP (ENQUALAB 2008), São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n], 2008.

RESENDE, S. M. **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. 2ª ed. Editora e Livraria da Física, São Paulo, 2004. ISBN: 621381.

ROCHA, F. J. M. **Projeto e construção de um pireliômetro fotovoltaico para operação sistemática**. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PROMEC/UFRGS. Porto Alegre - RS, 1992.

SÁNCHEZ, M. C.; STEM, N. E.; RAMOS, C. A. S. processo simplificado de fabricação de células solares com eficiências de 17% utilizando substrato de Cz de baixa resistividade. In: SINPTEE: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. 14 a 17 de outubro de 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: [s.n], 2007.

SCHEER, H. **Economia solar global** -estratégias para a modernidade ecológica. Rio de Janeiro: CRESESB / CEPTEL, 2002. ISBN 84-8109-315-7.

SCHMIDTKE, G.; FRÖHLICH, C. E.; THUILLIER, G. ISS-SOLAR: Total (TSI) and Spectral (SSI) Irradiance Measurements. **Advances in Space Research**. v. 37, p. 255–264, 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com> . Acesso em 25 de mar. 2010.

SQUITTER EQUIPAMENTOS PROFISSIONAIS DO BRASIL Ltda. **Sensor de radiação fotossinteticamente modelo S2137**. Disponível em: <http://www.squitter.com.br/produtos/sensores/radiacao/s2022/s2022.htm> .Acesso em: 25 maio 2009).

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

VEISSID, N. **Estudo e Desenvolvimento do experimento célula solar do primeiro satélite da missão espacial brasileira**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1989.

—. New satellite sensor and method for the direct measurement of the Planetary Albedo, results for the 1999, 2000 and 2001 in South America. **Atmospheric Research**, v. 66. p. 65-82. 2003.

VEISSID, N.; BONNET, D.; RICHTER, H. Experimental investigation of double exponential model of solar a solar cell under illuminated conditions the instrumental uncertainties in the current, voltage and temperature. **Solid-State Electronics**, v. 38, n. 11, p. 1937-1943, 1995.

VICTORIA, I. M. B. **Medição da radiação solar global e difusa utilizando piranômetro com sensores fotovoltaicos**. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciências/Meteorologia). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - RS, 2008.

VILELA, W. A. et. al. Célula solar de silício como elemento sensor para medidas da radiação solar global. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2., E CONFERÊNCIA REGIONAL LATINO-AMERICANA DA ISES, 3., 18 a 21 de novembro de 2008, Florianópolis - SC. **Anais...** Florianópolis: 2008.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria dos erros** São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1998.

WAGNER, E.; DÄNDLIKER, R.; SPENNER, K. **Sensor: a comprehensive survey**. New York: VCH, 1992. v. 6. ISBN 0-89573-678-0.

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



ZANESCO, I. **Análise e construção de um piranômetro fotovoltaico.** 120f.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia / Área de Concentração: Geração de Energia),  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PROMEC/UFRGS. Porto Alegre, 1991.