



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/02.14.13.03-TDI

UNIDADE DE MONITORAMENTO AMBIENTAL PARA O ESTUDO DA IRRADIÂNCIA SOLAR E SENSORES

Celso Israel Fornari

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/ Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Antonio Fernando Beloto, e Waldeir Amaral Vilela, aprovada em 19 de fevereiro de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DHMCJ2>>

INPE
São José dos Campos
2013

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

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

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

Membros:

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

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

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

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

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

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

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/02.14.13.03-TDI

UNIDADE DE MONITORAMENTO AMBIENTAL PARA O ESTUDO DA IRRADIÂNCIA SOLAR E SENSORES

Celso Israel Fornari

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/ Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Antonio Fernando Beloto, e Waldeir Amaral Vilela, aprovada em 19 de fevereiro de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DHMCJ2>>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Fornari, Israel Celso.

F767u Unidade de monitoramento ambiental para o estudo da irradiância solar e sensores / Celso Israel Fornari. – São José dos Campos : INPE, 2013.

xxiv+127 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/02.14.13.03-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadores : Drs. Antonio Fernando Beloto, e Waldeir Amaral Vilela.

1. monitoramento ambiental. 2. irradiância solar. 3. espectro solar . I.Título.

CDU 551.521.37

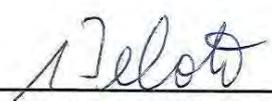
Copyright © 2013 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção 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 © 2013 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

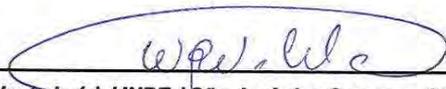
**ETE/Ciência e Tecnologia de Materiais e
Sensores**

Dr. Antonio Fernando Beloto



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

Dr. Waldeir Amaral Vilela



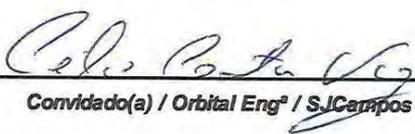
Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Luiz Angelo Berni



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

Dr. Celio Costa Vaz



Convidado(a) / Orbital Eng^o / SJCampos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Celso Israel Fornari**

São José dos Campos, 19 de Fevereiro de 2013

“...none but ourselves can free our minds...”

Bob Marley

AGRADECIMENTOS

A meus pais, meus protetores, por toda a base e apoio que me deram por mais de duas décadas.

Aos doutores e orientadores, Antonio Fernando Beloto e Waldeir Amaral Vilela, pela oportunidade de realização deste trabalho, por todo o empenho, incentivo e orientação precisa em todos os momentos.

Ao Dr. Luiz Angelo Berni, pelas ideias, discussões e ajuda no trabalho.

À Pétala, companheira inseparável, por toda compreensão, apoio e paciência durante a elaboração deste trabalho.

A meu irmão, por toda a ajuda e suporte na programação das torres, criação de rotinas e automatização dos sistemas de coleta de dados.

A toda equipe de manutenção do INPE, liderada pelo Raílson, por todo o apoio, desde a confecção da primeira base até à fixação do último estirante. Sem este suporte este trabalho não teria sido possível.

A toda equipe de mecânica (Peixoto, Wellington, Laércio, Geraldo, Miro e Márcio), pelas dicas, confecção e soldagem de todas (e foram muitas) as peças utilizadas na instalação das unidades.

À equipe do LIM de Cachoeira Paulista, em especial ao Márcio, Patrícia e Paulo Arlino, por todo o suporte no processo de compra, instalação e calibração dos sensores.

Aos amigos uesquianos Tiago Franca, Eduardo Aragão e Maxsom Vieira por todo o apoio fornecido dentro e fora do laboratório e pelas discussões pertinentes acerca do trabalho.

Ao Dalmo, sempre de bom humor, pela incansável ajuda dada desde a fixação do primeiro parafuso até a colocação da última espiral.

A todos os colegas e professores da UESC, pelo incentivo e apoio. Em especial aos doutores, Adécio Carlos de Oliveira, Adriano Hoth, Nestor Correia e Zolacir Trindade, que me mostraram o caminho da ciência.

Aos amigos de todas as horas: Eduardo (Dudu), Leandro (Cebolas), Lucas (Calo), Matheus (Pedra), Maxsom (Seu Lunga), Michel (Pemo), Raonei (Chapola), Tiago de Jesus (Jesus) e Tiago Franca (Franga).

À CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste projeto.

RESUMO

A presença de vapor de água e aerossóis em suspensão na atmosfera terrestre, assim como a variação da temperatura pode alterar o espectro da radiação solar que chega à superfície terrestre. Sistemas fotovoltaicos e sensores baseados em silício possuem uma resposta espectral restrita a faixa entre 400 a 1100 nm, podendo apresentar respostas diferentes para uma mesma irradiância solar quando ocorrem mudanças no perfil do espectro solar. Para este trabalho foi montado uma Unidade de Monitoramento Ambiental com aquisição de espectro solar para o estudo do comportamento de dispositivos fotovoltaicos em função das variáveis ambientais e do comportamento do radiômetro desenvolvido pelo Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS do INPE. O radiômetro LAS foi exaustivamente estudado após apresentar problemas durante o processo de calibração no Laboratório de Instrumentação Meteorológica - LIM/INPE, situado em Cachoeira Paulista - SP. Este trabalho descreve a construção, as especificações e o princípio de funcionamento dos sensores ambientais, sistema de transmissão e aquisição de dados e a estrutura da torre. A Unidade de Monitoramento Ambiental foi de fundamental importância neste trabalho, pois permitiu obter dados ambientais tais como: pressão, temperatura, umidade, precipitação, irradiância solar e espectro solar. Os dados de irradiância solar obtidos através de diferentes sensores permitiram comparar os resultados com radiômetros padrões que utilizam termopilhas como elemento sensor. Também foi obtido em uma das torres o espectro solar em diversos horários do dia com objetivo de observar as variações do espectro da radiação solar e como estas variações interferem nas medidas realizadas com dispositivos fotovoltaicos. Pode-se, com este estudo, gerar informações sobre eficiência de dispositivos fotovoltaicos em função das variáveis ambientais e determinar fatores de correção que poderão ser aplicados em dados obtidos com radiômetros que utilizam sensores fotovoltaicos.

ENVIRONMENTAL MONITORING UNIT FOR STUDY OF SOLAR IRRADIANCE AND SENSORS

ABSTRACT

The presence of water vapor and aerosols in the atmosphere as well as the variation of temperature may affect the spectrum of solar radiation that reaches Earth's surface. Photovoltaic systems and silicon-based sensors have a spectral response restricted from 400 to 1100 nm, and may have different output to the same solar irradiance when changes occur in the solar spectrum. For this work, it was assembled an Environmental Monitoring Unit with acquisition of the solar spectrum to study the behavior of photovoltaic devices as a function of environmental variables and the behavior of the radiometer developed by Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS/INPE. The LAS radiometer was investigated after presenting problems during the calibration in the Laboratório de Instrumentação Meteorológica – LIM/INPE, located in the city Cachoeira Paulista. This work describes the construction, specifications, and principles of operation of environmental sensors, the data acquisition and transmission system and the physical structure of the tower. The Environmental Monitoring Unit was of fundamental importance in this study because it allowed obtaining environmental data such as pressure, temperature, humidity, precipitation, solar irradiance and the solar spectrum. The solar irradiance data obtained from different sensors allowed comparing the results with standards radiometers utilizing thermopiles as sensing element. In one of the towers was also obtained the solar spectrum in different hours of day in order to observe variations in the solar radiation spectrum and how those changes affect the measurements taken with photovoltaic devices. With this study, it is possible to generate information on efficiency of photovoltaic devices according to environmental variables and determine correction factors that can be applied to data obtained with radiometers that use photovoltaic sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Movimento de translação da Terra ao redor do Sol.	6
Figura 2.2 - Movimento aparente do Sol para um observador situado na superfície terrestre.	7
Figura 2.3 - Emissão espectral de um corpo negro em função da temperatura. 9	
Figura 2.4 - Comparação do espectro solar AM0 com o de um corpo negro a 6000 K Fonte: MCCLUNEY (1994).	9
Figura 2.5 - Ilustração da variação Massa-Ar em função da inclinação solar. .	11
Figura 2.6 - Influência da massa de ar (AM) no espectro solar.	11
Figura 2.7 - Ilustração das possíveis interações da radiação solar quando penetra a atmosfera.	12
Figura 2.8 - Absorção espectral de diversos gases.	13
Figura 2.9 - Espectro solar com respectivas absorções de gases.	14
Figura 2.10 - Espectro solar padrão	15
Figura 2.11 - Espectros simulados pelo software Espectro Solar mostrando a variação das contribuições diretas e difusas para as 06h00 e as 12h00 do mesmo dia.	16
Figura 2.12 - Utilização de um disco de sombreamento para medidas da radiação difusa.	18
Figura 2.13 - Regiões internas de uma lâmina de silício dopada. Onde representam: (a) fóton com energia menor do que a do <i>gap</i> , (b) fóton refletido pela superfície, (c,d,f) pares elétron buraco que geram a fotocorrente e (e) pares gerados que sofrem recombinação.	20
Figura 2.14 - Resposta espectral típica de uma célula solar de silício.	22
Figura 2.15 - Dependência com a temperatura de uma célula solar de silício. 23	
Figura 2.16 - Características de uma curva $I \times V$	23
Figura 2.17 - Circuito equivalente de uma célula solar real.	24
Figura 2.18 - Termopilha de duas junções. Modelo utilizado no radiômetro CM11 de fabricação da Kipp & Zonen.	26
Figura 2.19 - Comparação da resposta espectral de dois elementos sensores.	27
Figura 2.20 - Recomendação de local para a instalação de uma PCD.	30
Figura 3.21 - Partes de uma Unidade de Monitoramento Ambiental.	34
Figura 3.22 - Controlador de carga da bateria utilizado nas unidades.	35
Figura 3.23 - Anemômetro utilizado nas unidades.	37
Figura 3.24 - Barômetro utilizado nas unidades.	38
Figura 3.25 - Sensor de temperatura e umidade (esq.) e abrigo meteorológico (dir.).	39
Figura 3.26 - Detalhe do princípio de funcionamento de um pluviômetro.	40

Figura 3.27 - Pluviômetro utilizado nas unidades.....	41
Figura 3.28 - Radiômetro termoelétrico, modelo CM11.....	42
Figura 3.29 - Protótipo de radiômetro PAR, modelo LAS 107.....	42
Figura 3.30 - Interface ótica e de sustentação da fibra ótica: (1) base, (7) corpo principal, (2) (3) (4) (5) peças internas de sustentação da fibra, (6) difusor.	46
Figura 3.31 - Suporte da fibra ótica.....	47
Figura 3.32 - <i>Datalogger</i> CR1000 de fabricação da Campbell Sci.....	48
Figura 3.33 - Sistema de aquisição de dados: DataRAD.....	49
Figura 3.34 - Rádio RF401 de fabricação da Campbell Sci.....	50
Figura 3.35 - Transceptor RS232 de fabricação da FlexMedia.....	51
Figura 3.36 – Condições ambientais registradas.....	52
Figura 3.37 - Sistema de curva I x V.....	56
Figura 3.38 - Sistema de resposta espectral (1) Fonte de radiação (2) espelho plano (3) lente plano-convexa (4) suporte para filtros (5) chopper.....	58
Figura 3.39 - Foto do sistema de caracterização espectral montado no laboratório.....	59
Figura 3.40 - Resposta ideal de um sensor de radiação em função do angulo de incidência.....	60
Figura 3.41 - Sistema de medidas da resposta angular.....	61
Figura 4.42 - Localização das unidades instaladas dentro do INPE.....	65
Figura 4.43 - Unidade 1.....	68
Figura 4.44 - Precipitação registrada pela Unidade 1.....	69
Figura 4.45 - Temperatura média, máxima e mínima diárias.....	70
Figura 4.46 - Umidade relativa média, máxima e mínima diárias.....	71
Figura 4.47 - Unidade 2.....	73
Figura 4.48 - Terminal da fibra ótica instalado em campo.....	73
Figura 4.49 - Espectro solar coletado no dia 20 de novembro de 2012.....	74
Figura 4.50 - Unidade 3, instalada próximo à portaria principal.....	75
Figura 4.51 - Diagrama da análise realizada no radiômetro LAS.....	77
Figura 4.52 – Diferença, em módulo, registrada entre padrão de referência e o radiômetro LAS.....	78
Figura 4.53 - Histograma das diferenças registradas.....	79
Figura 4.54 - Razão entre o sinal do LAS e do CM11.....	80
Figura 4.55 - Difusor do radiômetro LAS após 3 meses de operação.....	81
Figura 4.56 - MEV do difusor do radiômetro LAS (50, 100 e 500 vezes de aumento).....	81
Figura 4.57 - Medida de transmitância do difusor LAS.....	82
Figura 4.58 - Detalhes dos difusores de radiômetros comerciais e do radiômetro LAS.....	83
Figura 4.59 - Resultado do experimento de dependência da temperatura.....	86

Figura 4.60 – Medida da linearidade de radiômetros do LAS e comercial.	88
Figura 4.61 – Desvio do cosseno normalizado para radiômetros do LAS que esteve em operação por três anos e um radiômetro que não esteve exposto ao tempo.	89
Figura 4.62 – Medida da lei dos cossenos para o conjunto fibra ótica + difusor (LAS).	92
Figura 4.63 - Medidas de dois espectros no mesmo horário para o difusor apontando para Sol e outra para o difusor inclinado.	93
Figura 4.64 - Comparação do espectro medido por dois espectrômetros na faixa de 900 a 1100 nm.	94
Figura 4.65 - Resposta espectral típica dos radiômetros LAS.	96
Figura 4.66 - Potência média disponível por hora.	99
Figura 4.67 - Diferença das integrais do perfil espectral solar e a resposta do radiômetro desenvolvido no LAS ao longo do dia.	100
Figura 4.68 - Comparação entre as diferenças registradas e previstas.	101
Figura 4.69 – Perfil do espectro disponível para o radiômetro as 07h00, ao meio dia e às 17h00.	102
Figura 4.70 - Média diária da potência disponível.	103
Figura 4.71 - A atmosfera como um filtro ótico.	104

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Tipos e ligas utilizadas nos termopares mais comuns.	25
Tabela 2.2 - Comparação entre sensores fotovoltaicos e termoeletrônicos comerciais.	28
Tabela 3.3 - Informações das unidades instaladas.	35
Tabela 3.4 - Especificações técnicas do anemômetro.	37
Tabela 3.5 – Especificações técnicas do barômetro.	38
Tabela 3.6 - Especificações técnicas dos sensores de temperatura e umidade.	39
Tabela 3.7 - Especificações técnicas do pluviômetro.	41
Tabela 3.8 - Características do radiômetro termoeletrico CM11.	43
Tabela 3.9 - Características do radiômetro fotovoltaico SP-Lite.	43
Tabela 3.10 - Características do radiômetro fotovoltaico LAS.	44
Tabela 3.11 - Características da fibra ótica para coletar a radiação solar.	45
Tabela 3.12 - Características dos espectrofotômetros utilizados.	45
Tabela 4.13 - Recomendações atendidas pelas UMAs desenvolvidas.	66
Tabela 4.14 - Sensores instalados na Unidade 1.	67
Tabela 4.15 - Sensores da Unidade 3.	76
Tabela 4.16 - Estatísticas do radiômetro LAS para dias sem nuvens.	90
Tabela 4.17 - Estatísticas do radiômetro LAS para dias nublados e chuvosos.	90
Tabela 4.18 - Resultados das comparações dos espectrofotômetros.	95
Tabela 4.19 - Potência da radiação solar na faixa espectral perceptível pelo radiômetro (das 06h as 11h).	97
Tabela 4.20 - Potência da radiação solar na faixa espectral perceptível pelo radiômetro (das 12h as 18h).	98
Tabela 4.21 - Análise da potência perceptível pelo sensor fotovoltaico em função dos filtros.	104
Tabela 4.22 - Tabela de correlações.	106

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LAS	Laboratório Associado de materiais e Sensores
ETE	Engenharia e Tecnologia Espacial
CELSOL	Laboratório de Células Solares
UMA	Unidade de Monitoramento Ambiental
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
CPTEC	Centro de Previsões do Tempo e Estudos Climáticos
MEV	Microscopia de Varredura Eletrônica
LIM	Laboratório de Instrumentação Meteorológica
WMO	World Meteorological Organization
AWS	Automatic Weather Station
AM	Air Mass
ASTM	American Society for Testing and Materials
EPA	Environmental Protection Agency
AASC	American Association of State Climatologists
ISO	International Organization of Standardization
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia

LISTA DE SÍMBOLOS

h	Constante de Planck, [J.s]
ν	Frequência da onda, [Hz]
λ	Comprimento de onda, [nm]
c	Velocidade da luz no vácuo, [m/s]
σ	Coefficiente de correlação linear
T	Temperatura, [K]
R_p	Resistência em paralelo
R_s	Resistência em série
I	Corrente fotogerada, [A]
I_{sc}	Corrente de curto circuito
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
I_{cn}	Fluxo radiante total de um corpo negro, [W/m ²]
A	Coefficiente de absorção
R	Coefficiente de reflexão
E_{cn}	Espectro emitido por um corpo negro
k	Constante de Boltzmann, [J/K]

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1	INTRODUÇÃO 1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 5
2.1.	O Sol 5
2.1.1.	Movimentos do Sol 5
2.1.2.	O Sol como um corpo negro 7
2.1.3.	A influência da atmosfera no espectro solar 10
2.1.4.	Instrumentação e medidas de dados ambientais 16
2.1.4.1.	Medida da radiação direta 17
2.1.4.2.	Medida da radiação difusa 17
2.2.	Princípio de funcionamento de um radiômetro 18
2.2.1.	Fotovoltaicos 19
2.2.2.	Termoelétricos 25
2.2.3.	Comparações entre fotovoltaicos e termoelétricos 27
2.3.	Unidade de Monitoramento Ambiental - UMA 28
3	METODOLOGIA 33
3.1.	Unidade de Monitoramento Ambiental 33
3.1.1.	Sistema de energia 35
3.1.2.	Sensores 36
3.1.2.1.	Anemômetro 36
3.1.2.2.	Barômetro 37
3.1.2.3.	Temperatura e Umidade 38
3.1.2.4.	Pluviômetro 40
3.1.2.5.	Radiômetro 41
3.1.2.6.	Espectro solar 44
3.1.3.	Sistema de aquisição de dados 47
3.1.3.1.	CR1000 48
3.1.3.2.	DataRAD 48
3.1.4.	Sistema de transmissão de dados 50
3.1.4.1.	Radio Campbell 50
3.1.4.2.	Transceptor RS232 51
3.2.	Aquisição e análise dos dados ambientais 51

3.2.1.	Condições ambientais dos dados utilizados.....	52
3.2.2.	Aquisição do espectro solar	53
3.2.3.	Análise dos dados	53
3.3.	Sistemas de caracterização de dispositivos fotovoltaicos	55
3.3.1.	Sistema de curva I x V	55
3.3.2.	Sistema de resposta espectral	57
3.3.3.	Sistema de resposta angular	59
3.4.	Análise da variação espectral.....	61
4	RESULTADOS	65
4.1.	Unidades de monitoramento ambiental	65
4.1.1.	Unidade 1	66
4.1.2.	Unidade 2	71
4.1.3.	Unidade 3	75
4.2.	Avaliação funcional do radiômetro LAS.....	76
4.2.1.	O difusor do radiômetro LAS	79
4.2.2.	Dependência com a temperatura	84
4.2.3.	Linearidade do sinal em função da intensidade da radiação.....	87
4.2.4.	Lei dos cossenos.....	88
4.2.5.	Estatísticas do radiômetro LAS	90
4.2.6.	Sistema de aquisição do espectro solar	91
4.2.7.	Medidas do espectro	95
4.2.8.	Análise do descasamento espectral.....	99
4.2.9.	A atmosfera como um filtro ótico	104
4.3.	Correlação dos erros nas medidas de irradiância com as variáveis ambientais.....	105
5	CONCLUSÃO	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
	APÊNDICE A	117
	APÊNDICE B	119

1 INTRODUÇÃO

O interesse em monitorar as variáveis climáticas remonta à antiguidade. O homem sempre buscou uma maneira de quantificar as grandezas ambientais com o objetivo de sobrevivência, seja para conseguir vantagens em batalhas, para conseguir abrigo durante tempestades e catástrofes ou para aplicação na agricultura. Com o passar do tempo foram sendo desenvolvidos vários dispositivos, denominados sensores ambientais, capazes de fornecerem medidas sobre grandezas físicas (WMO, 2008). Um sensor é definido como um dispositivo que recebe e responde a um sinal ou estímulo, que pode ser definido como uma quantidade, propriedade ou condição que é percebida e convertida em um sinal elétrico (FRADEN, 2004).

A partir de 1980, sistemas integrados de sensores começaram a ser produzidos e foram denominados de Plataforma de Coleta de Dados (PCD) ou *Automatic Weather System* (AWS) em inglês. Estes sistemas integrados consistem de uma torre, que funciona como suporte para todo o conjunto, os sensores de medidas ambientais e um sistema de aquisição de dados. Quando instalado em locais remotos, o conjunto pode contar com um sistema de transmissão de dados sem fio, além de geradores próprios de energia (BROCK, et al., 2001). Portanto, para que os dados fornecidos por estas estações tenham validade e sejam coerentes, é necessário realizar periodicamente a calibração de todos os sensores em laboratórios credenciados, além de seguir as normas e recomendações das agências competentes (WMO, 2008).

A radiação solar é uma fonte primária de energia em quase todos os processos físicos e químicos que ocorrem na superfície terrestre. O conhecimento da radiação solar que atinge a atmosfera e a superfície terrestre tem uma vasta aplicação em diversas áreas do conhecimento humano e é uma variável ambiental de fundamental importância no estudo do clima e dos fenômenos meteorológicos. 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 e da grande extensão territorial do país (GUIMARÃES, 2003). Visando diminuir esta carência, o INPE tem realizado nos últimos anos atividades de pesquisa e desenvolvimento de produtos com aplicação direta ou indireta nesta área (VILELA, 2010).

O ideal para dimensionar um sistema fotovoltaico de captação de energia solar para uma determinada área é que sejam feitos estudos do local através de medidas sistemáticas de radiação solar por certo período de tempo e também o estudo das variações ambientais no local. A radiação solar em uma determinada área específica está intimamente relacionada às condições climáticas da região, pois as condições locais alteram o espectro solar incidente (VALLEY, 1965). Além disto, o espectro solar na superfície terrestre também é alterado devido às estações do ano (HIRATA, et al., 1995). Modelos matemáticos que estimam a radiação global incidente na superfície terrestre precisam ser validados para diversas regiões do país, e para isto necessitam de estações meteorológicas (GUIMARÃES, 2003).

Os sensores utilizados para medida da radiação solar são denominados radiômetros ou piranômetros. Os radiômetros podem ser basicamente de dois tipos, térmicos e fotovoltaicos. Radiômetros que utilizam elementos sensores fotovoltaicos podem utilizar um fotodiodo ou uma célula solar, geralmente de silício. Os radiômetros que utilizam elementos sensores de silício possuem uma resposta espectral entre 400 e 1100 nm, e possuem um pico de resposta em torno de 900 nm. Radiômetros que utilizam como elemento sensor uma termopilha possuem uma resposta linear entre 300 e 3000 nm (ZHOU, et al., 1995). Mudanças ocorridas no espectro devido à presença de vapor d'água, por exemplo, que acontecem para comprimentos de onda entre 750 e 3000 nm (MCCARTNEY, 1983) podem não ser percebidos por elementos sensores baseados em silício. Além disto, a variação espectral ao longo do ano pode variar em até 5% a taxa de energia disponível para um intervalo entre 400 e

1100 nm (HIRATA, et al., 1995). Como 97% da radiação incidente na superfície terrestre está confinada entre 290 e 3000 nm (WÜRFEL, 2005), esta resposta limitada do silício pode gerar dados com um erro inerente ao tipo de sensor utilizado. As medidas do espectro solar não são incluídas nos padrões de dados meteorológicos, pois os sensores não são em geral ambientalmente selados. Assim, o único dado disponível é a irradiância incidente no local, isto é, a integral do espectro em todos os comprimentos de onda (GOTTSCHALG, et al., 2003).

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e instalação de sistemas de unidades de monitoramento ambiental que incluam dados do espectro solar incidente. Isto permitiu inicializar um banco de dados meteorológicos, que fornecerá informações sobre as variações espectrais ocorridas ao longo das estações do ano e ainda permitirá futuramente a obtenção de um espectro padrão de referência para a região de São José dos Campos. Este trabalho visou também estudar a correlação entre medidas de irradiância solar, temperatura e umidade para dispositivos e sensores fotovoltaicos, avaliando a influência da variação espectral nas medidas e analisar o radiômetro desenvolvido no LAS. O radiômetro LAS é produto de uma tese de doutorado e foi desenvolvido com tecnologia e componentes nacionais. Foram constatados problemas no radiômetro durante o período de calibração, no Laboratório de Instrumentação Meteorológica (LIM) do INPE. O sensor apresentou um aumento gradativo na constante de calibração com o passar do tempo.

Para realizar este trabalho, foram montadas três unidades de monitoramento ambiental que são constituídas por sistema de aquisição e armazenamento de dados, sensores de monitoramento ambiental, sistema de suprimentos de energia autônomo e transmissão de dados via cabo e sem fio. Ao banco de dados ambientais obtidos nestas unidades será adicionado o espectro solar incidente obtido através de espectrômetro utilizado normalmente em laboratório. Com isso, espera-se além de criar um banco de dados ambientais e de radiação solar para São José dos Campos, capacitar o laboratório na área

de instrumentação e monitoramento ambiental e com a montagem das unidades de monitoramento ambiental permitir teste em campo dos produtos desenvolvidos no INPE nesta área.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. O Sol

Toda radiação eletromagnética significativa em termos de energia que chega à superfície terrestre é proveniente do Sol, que é responsável direta ou indiretamente por quase todos os tipos de energias utilizadas pelo homem. Todo o petróleo, o carvão e o gás natural existentes na Terra foram gerados, ao longo do tempo, pela radiação solar. Além disto, é ela que alimenta o ciclo da água, que permite a geração da hidroeletricidade (VILELA, 2010).

O Sol fornece anualmente muito mais energia do que o ser humano consome neste mesmo período de tempo. Fornece em média $1,5 \times 10^{18}$ kWh por ano, enquanto que o ser humano possui uma demanda média de $3,4 \times 10^6$ kWh no mesmo período. Assim, se toda energia solar incidente sobre o planeta Terra pudesse ser aproveitada, em 12 minutos seriam armazenados o equivalente à demanda mundial anual (Rüther, 2004).

2.1.1. Movimentos do Sol

O sol é a estrela situada mais próxima do planeta Terra e, por ser o corpo mais massivo do sistema solar, está localizado no centro deste sistema, onde orbitam todos os outros corpos. A Terra descreve uma órbita aproximadamente elíptica em torno do Sol, sendo que o centro de massa do Sol se localiza em um dos focos da elipse. Este movimento de translação da Terra ao redor do Sol obedece às leis da mecânica clássica de Newton e está representado na Figura 2.1. A eclíptica é um círculo imaginário no qual o Sol parece se mover ao longo do ano, ou seja, é o plano no qual a Terra realiza o movimento de translação. É devido à inclinação do eixo de rotação da Terra em relação à eclíptica que ocorrem as estações do ano.

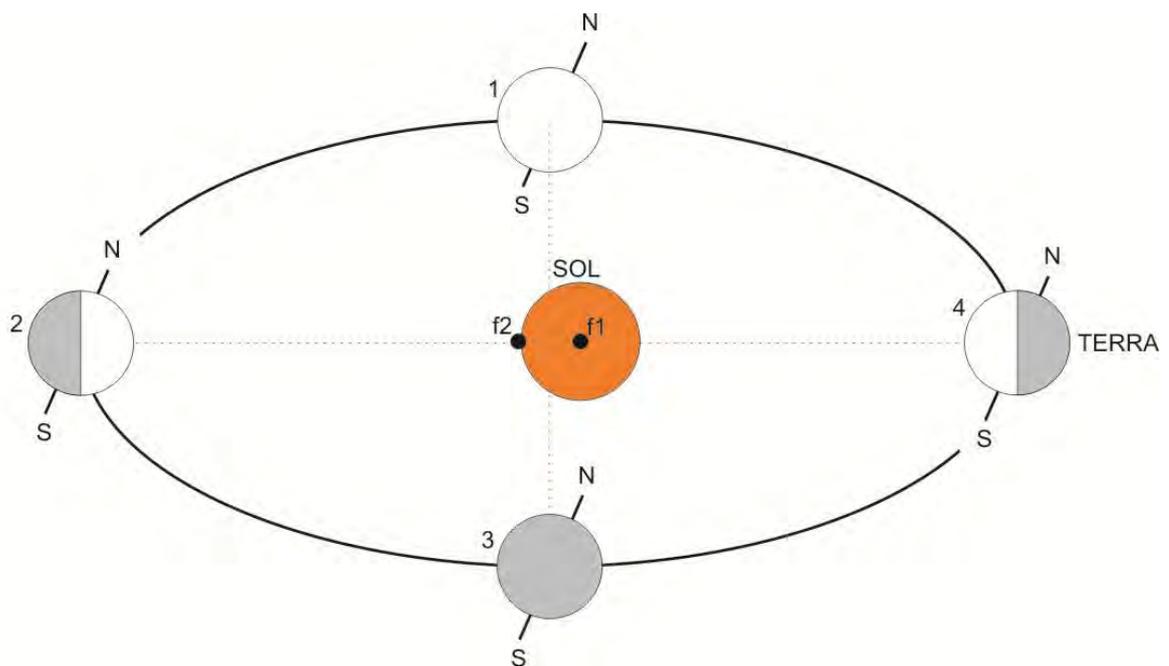


Figura 2.1 - Movimento de translação da Terra ao redor do Sol.

De acordo com a Figura 2.1, para o hemisfério sul, a passagem do ponto 1 para o ponto 2 corresponde ao outono. A passagem do ponto 2 para o ponto 3 corresponde ao período de inverno. Do ponto 3 para o 4 a primavera e do ponto 4 para o ponto 1 o verão. Estas mudanças de estação estão ligadas à inclinação do eixo de rotação da Terra em relação à eclíptica (NUSSENZVEIG, 2002). A posição mais próxima ao Sol, periélio, ocorre no dia 3 de janeiro, enquanto o ponto mais distante, afélio, ocorre no dia 4 de julho. A variação na distância Terra-Sol ao longo de um ano é de aproximadamente $1,47 \times 10^{11}$ m para o periélio e de $1,52 \times 10^{11}$ m para o afélio. Esta variação da distância Terra Sol acarreta em uma variação do fluxo solar extraterrestre em $\pm 3 \%$ (GUIMARÃES, 2003).

Além do movimento de translação, a Terra possui o movimento de rotação. Este é o movimento responsável pelo dia e noite terrestre. No momento em que a Terra está com a face voltada para o Sol, ela recebe a energia proveniente do astro, esquentando sua superfície e fornecendo energia para a

vida na Terra. Para um observador que está situado na Terra, o Sol produz um movimento aparente, surgindo sempre a leste e se pondo no oeste, passando pelo máximo aproximadamente ao zênite do observador. Como mostra a Figura 2.2.

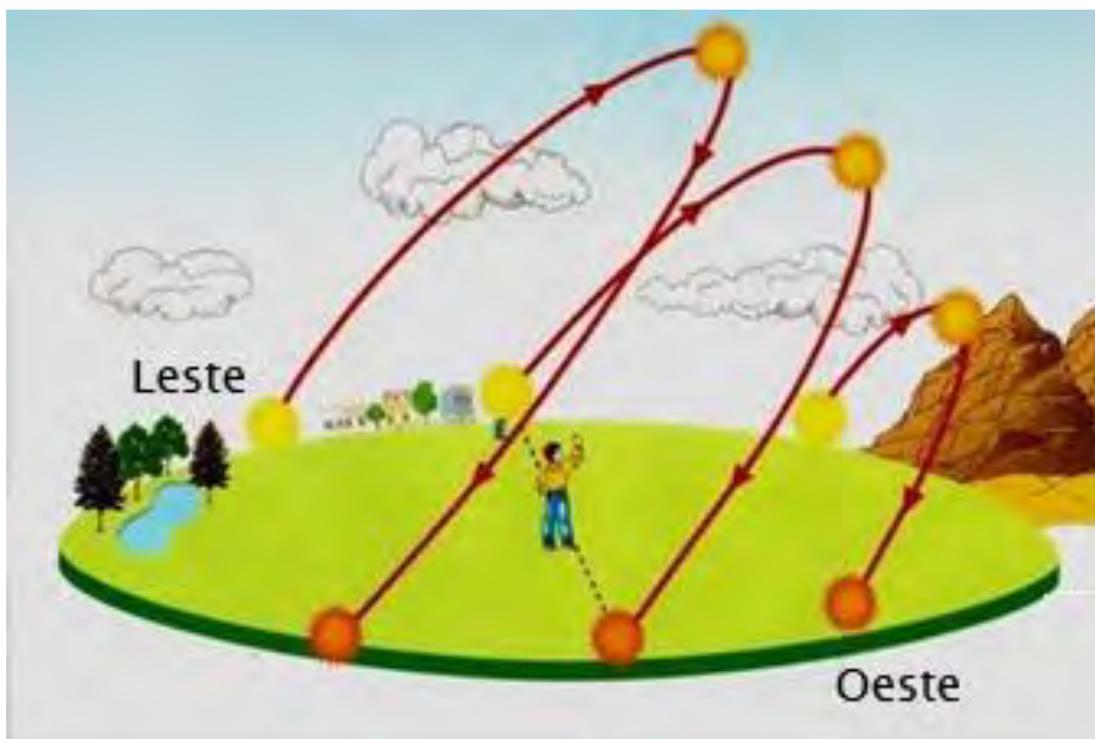


Figura 2.2 - Movimento aparente do Sol para um observador situado na superfície terrestre.
Fonte: Adaptado de
[HTTP://geobarreiros.blogspot.com.br](http://geobarreiros.blogspot.com.br), 2012

2.1.2. O Sol como um corpo negro

Todos os corpos, com temperatura acima do zero absoluto, emitem radiação. A emissão é diretamente proporcional à temperatura deles, ou seja, quanto mais quentes eles são, maior é a emissão. O fluxo radiante total da superfície de um objeto que deixa um corpo, no vácuo, a uma temperatura T pode ser expressa pela lei de Stefan-Boltzmann, conforme Equação 2.1:

$$I_{cn} = \sigma T^4 \quad 2.1$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann e vale $5,67032 \text{ W/m}^2\text{K}^{-4}$, a temperatura T é expressa em Kelvin e a exitância, I_{cn} , em Watts por metro quadrado.

Um corpo negro é um corpo ideal, que absorve toda energia incidente sobre ele, independente do comprimento de onda e do ângulo da radiação incidente. A Equação 2.2 representa as características de um corpo negro.

$$A + R = 1 \quad 2.2$$

Sendo $R = 0$, onde A representa o coeficiente de absorção e R o coeficiente de reflexão. Na prática, poucas superfícies se aproximam das propriedades óticas de um corpo negro. Assim, a maioria dos corpos reais são considerados corpos cinza e possuem, em apenas algumas faixas do espectro, propriedades óticas parecidas com as de um corpo negro.

A distribuição espectral da exitância de um corpo negro pode ser prevista através da lei de Planck. Max Planck precisou mudar radicalmente as ideias da física, partindo do princípio de que a energia eletromagnética é quantizada e não contínua, como se pensava. Desta forma, a predição do espectro emitido é dada pela Equação 2.3:

$$E_{cn} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad 2.3$$

Onde h é a constante de Planck, e vale $6,626176 \times 10^{-34} \text{ Js}$, $c = 2,9979246 \times 10^8 \text{ m/s}$ e é a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo e $k = 1,380662 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ é a constante de Boltzmann. O espectro em função da temperatura de superfície é mostrado na Figura 3.3.

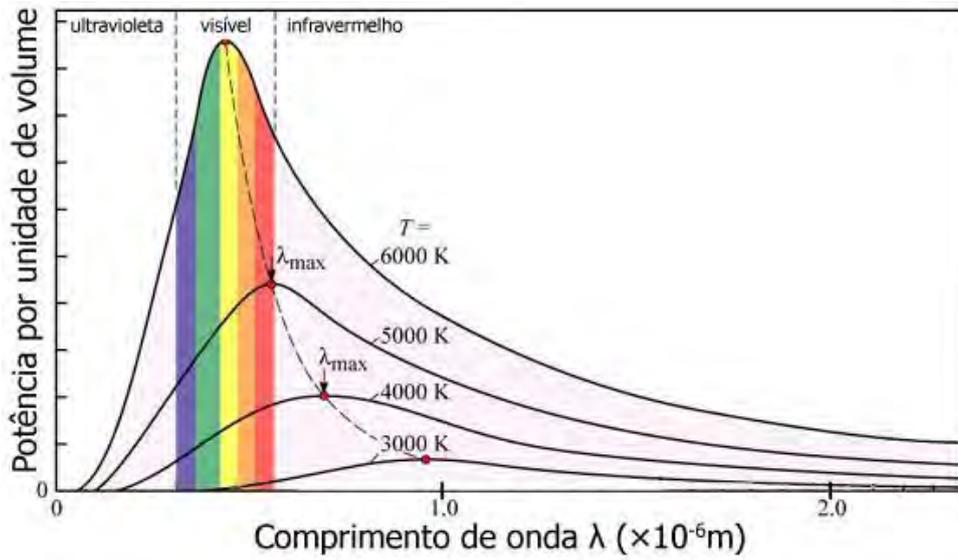


Figura 3.3 - Emissão espectral de um corpo negro em função da temperatura.
 Fonte: CED/UFSC (2012)

O Sol pode ser considerado um corpo negro com temperatura da superfície de aproximadamente 6000 K. A Figura 3.4 representa os dois espectros.

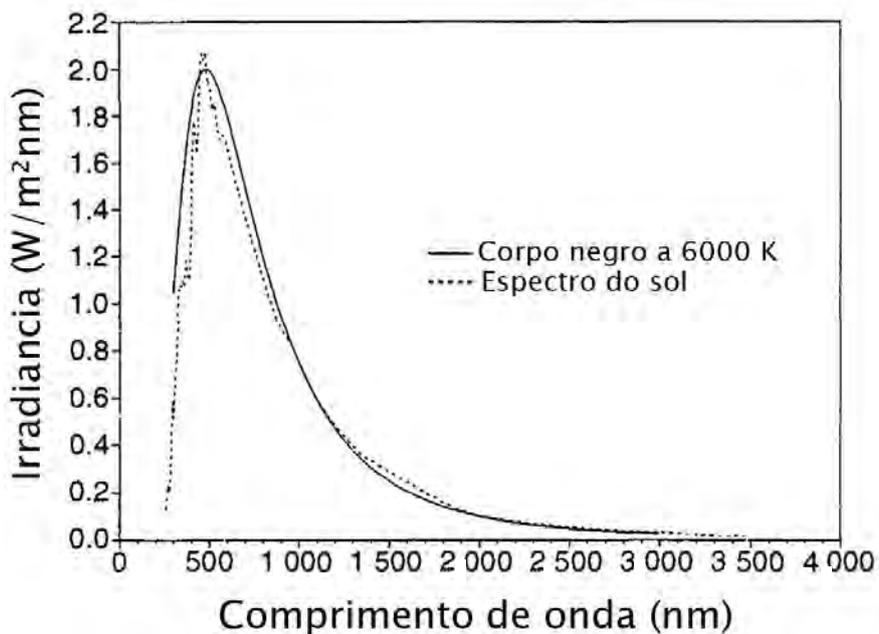


Figura 3.4 - Comparação do espectro solar AM0 com o de um corpo negro a 6000 K
 Fonte: MCCLUNEY (1994).

A temperatura na superfície do Sol é resultante das reações nucleares que ocorrem no seu interior, através do ciclo próton-próton. Este ciclo consiste basicamente da fusão de dois átomos de hidrogênio, formando um átomo de hélio (ABETTI, 1955).

2.1.3. A influência da atmosfera no espectro solar

A potência irradiada pelo Sol, no topo da atmosfera terrestre, calculada a partir da lei de Stefan-Boltzmann, considerando que a distância média da Terra ao Sol é de aproximadamente $1,496 \times 10^{11}$ m, é de 1367 W/m^2 (WÜRFEL, 2005). Este resultado é a integral do espectro solar disponível no topo da atmosfera. Ao penetrar na atmosfera, a radiação eletromagnética sofre influência das partículas em suspensão na atmosfera e, além disso, cerca de 30 % da radiação solar total incidente na superfície é refletida de volta para o espaço (VEISSID, et al., 2010).

A radiação solar que atinge a superfície terrestre é influenciada pelo caminho que deve percorrer na atmosfera. O ângulo de incidência da radiação altera a espessura da camada atmosférica a ser atravessada. Uma relação matemática representa a fração atmosférica em função do ângulo de incidência e é representada pela Equação 2.4.

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)}, -90^\circ < \theta < 90^\circ \quad 2.4$$

Onde AM é a fração da massa de ar (do inglês *Air Mass*) e θ é o ângulo compreendido pelo zênite de um observador situado na superfície terrestre e a radiação direta do sol. A Figura 2.5 representa a variação da massa de ar em função da inclinação solar e a Figura 2.6 a influência da massa de ar no espectro solar incidente.

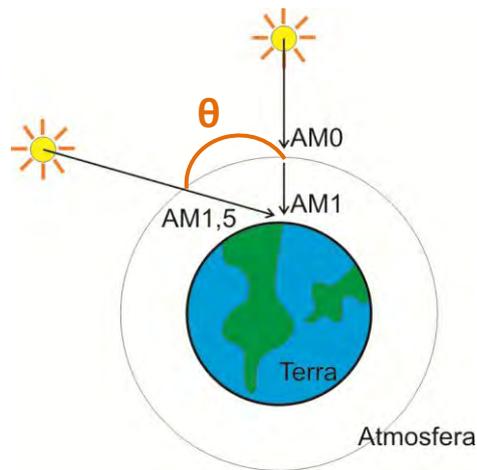


Figura 2.5 - Ilustração da variação Massa-Ar em função da inclinação solar.

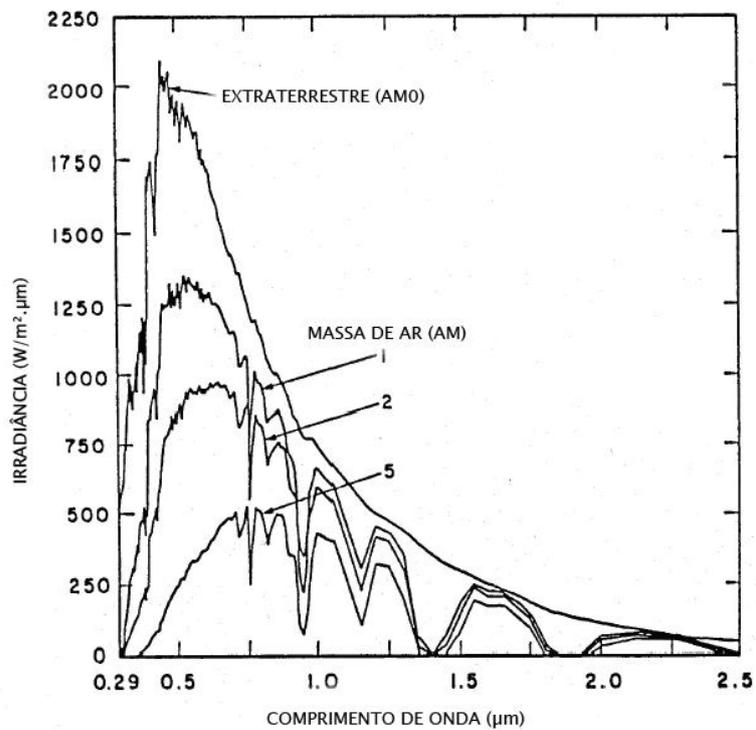


Figura 2.6 - Influência da massa de ar (AM) no espectro solar.
Fonte: Adaptado de PALMER (2009).

É possível observar, através da Figura 2.6 que o aumento da camada de massa de ar resulta na diminuição da intensidade do espectro solar e uma diminuição da transmitância de radiação na região do ultravioleta ao verde,

mantendo uma boa transmitância na região do vermelho e infravermelho. Logo, pode-se afirmar que o aumento da massa de ar ocasiona um desvio do espectro solar para o vermelho e infravermelho próximo.

A radiação solar ao penetrar na atmosfera pode sofrer absorção ou espalhamento. A Figura 2.7 representa as possíveis interações da radiação com a atmosfera.

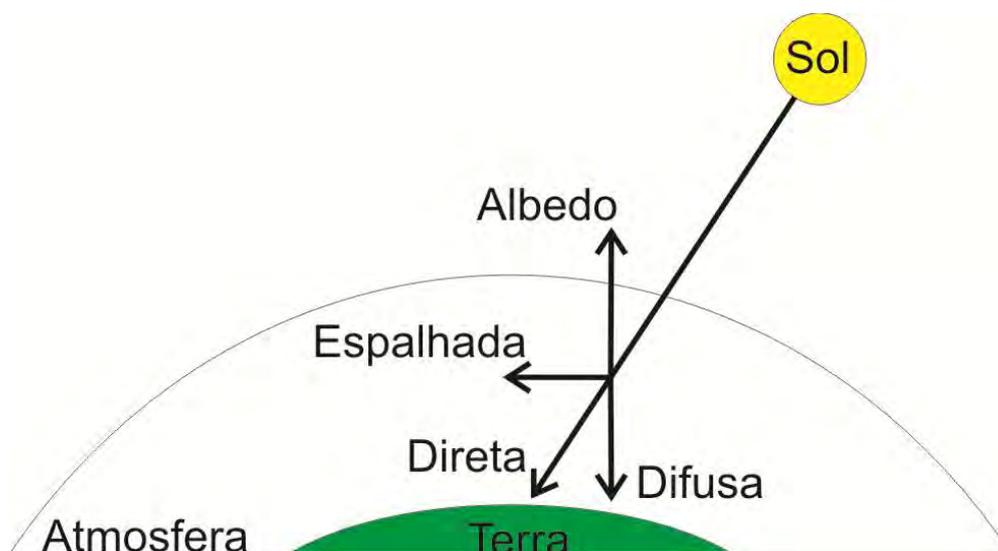


Figura 2.7 - Ilustração das possíveis interações da radiação solar quando penetra a atmosfera.

O ozônio e o vapor d'água presentes na atmosfera são os principais responsáveis pela absorção da radiação solar. Outros componentes menos importantes também absorvem parte da radiação, como o dióxido de carbono, oxigênio e os gases em geral (GUIMARÃES, 2003). A Figura 2.8 mostra a absorção espectral de diversos gases em função do comprimento de onda, inclusive a absorção agregada, que é a soma de todas as contribuições de todos os gases. Além disto, para dias de céu nublado, existe o efeito das nuvens, que acabam reduzindo em até 85 % o fluxo da radiação incidente. O espalhamento do fluxo radiante devido à presença de nuvens ocorre para o visível e infravermelho próximo (GUIMARÃES, 2003).

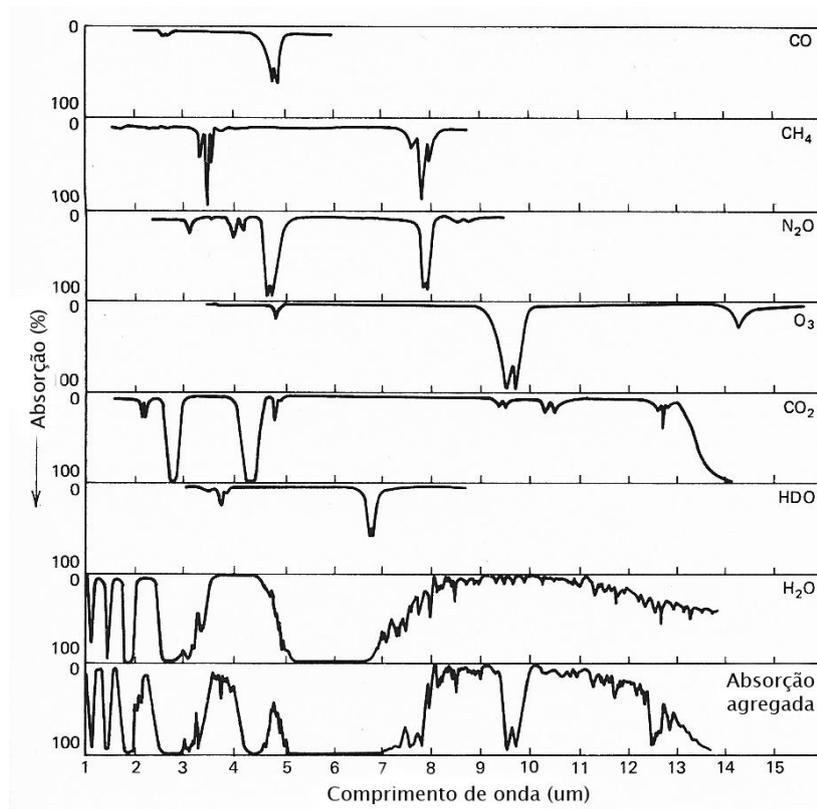


Figura 2.8 - Absorção espectral de diversos gases.
 Fonte: Adaptado de MCCARTNEY (1983).

A Figura 2.9 mostra as curvas de absorção do espectro solar incidente na superfície terrestre. A região do visível e do infravermelho próximo contém a maior fração da energia solar, 46 % do visível e 46 % do infravermelho próximo. Nessas regiões, a absorção se deve, principalmente, ao ozônio, vapor d'água e oxigênio. O CO_2 é responsável pela absorção da radiação para comprimentos de onda maiores que 1400 nm. A absorção do ultravioleta se deve à presença do ozônio.

O espalhamento da radiação solar na atmosfera pode ser do tipo Rayleigh ou Mie (GUIMARÃES, 2003). O espalhamento Rayleigh ocorre quando as ondas eletromagnéticas têm seus caminhos alterados devido a partículas com dimensões muito menores do que o comprimento de onda incidente.

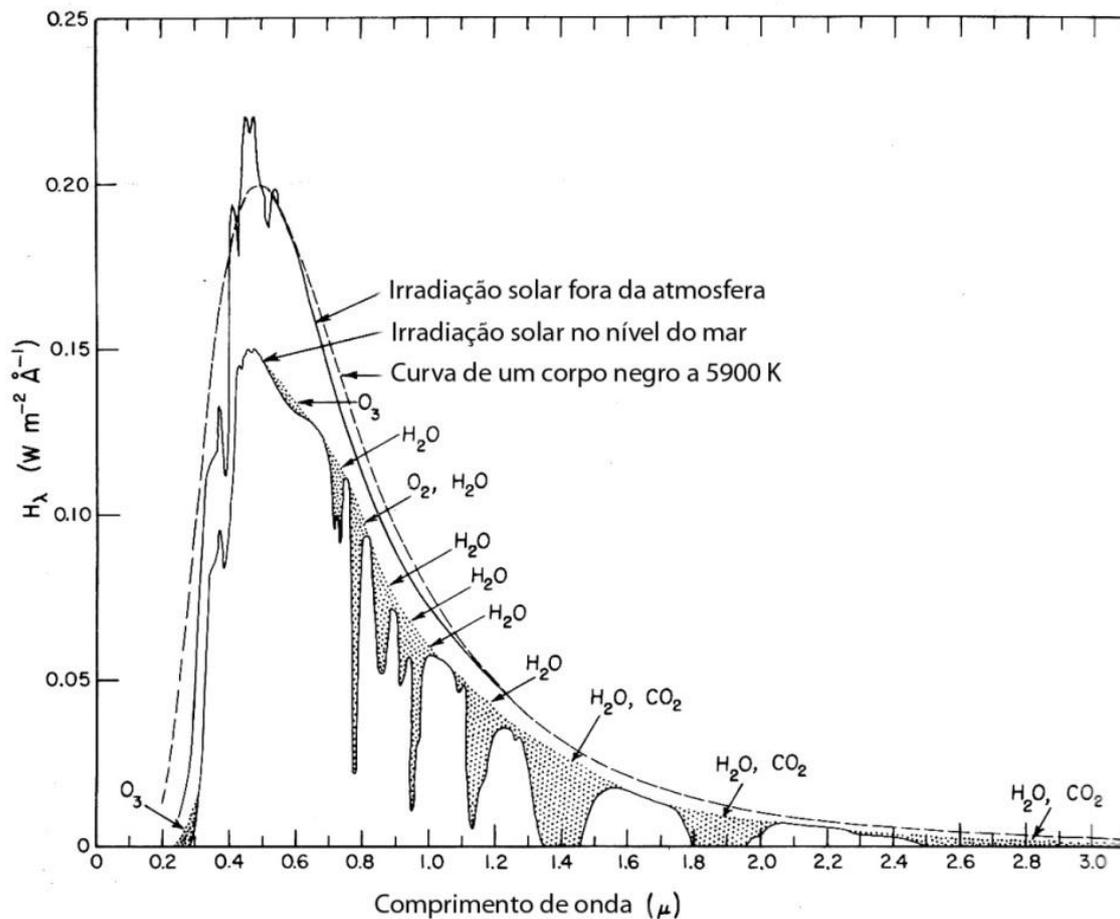


Figura 2.9 - Espectro solar com respectivas absorções de gases.
 Fonte: Adaptado de VALLEY (1965).

Este espalhamento ocorre basicamente em função da presença das moléculas dos gases constituintes da atmosfera (FEYNMAN, et al., 2008). Partículas que possuem dimensões aproximadamente iguais ou maiores do que o comprimento de onda incidente, devido à presença de aerossóis e gotículas de água, resulta no espalhamento Mie (NUSSENZVEIG, 2002). A ASTM define o espectro padrão para o AM0 e AM1 conforme apresentado na Figura 2.10.

A radiação solar total incidente na superfície terrestre é chamada de radiação global. Ela é a soma de duas frações, a radiação direta e a radiação difusa. Radiação direta é aquela que atravessa a atmosfera terrestre sem sofrer influência da mesma.

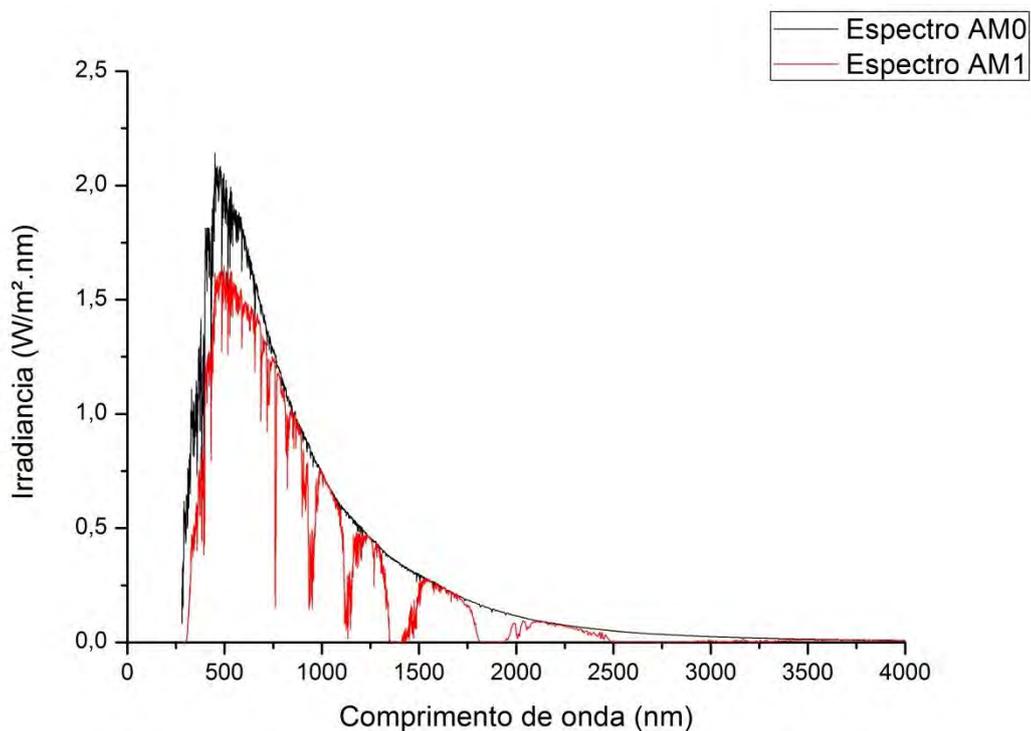


Figura 2.10 - Espectro solar padrão
Fonte: ASTM (2012).

A radiação difusa é aquela que atinge a superfície terrestre após sofrer algum tipo de desvio na atmosfera. Quanto maior a fração da massa de ar, maior será a porcentagem de radiação difusa. A Figura 2.11 mostra o espectro solar simulado para as seis horas da manhã e para o meio dia, utilizando o software Espectro Solar, do laboratório de energia solar da UFRGS (KREZINGER, 2001), para a região de São José dos Campos. É possível aferir que a radiação difusa varia de 44% para as 08 h da manhã para 15 % ao meio dia, enquanto que a radiação direta varia de 56 % para as 06 h da manhã para 85 % ao meio dia local.

Para dias sem a presença de nuvens no céu e locais situados próximos à linha do equador, ou seja, com uma latitude pequena ($\pm 20^\circ$), ao meio dia a radiação direta está em torno de 85 % do total. Para o período da manhã, próximo ao nascer do Sol, a fração da radiação difusa está em torno de 40 % (NAQI, 2006). Os valores simulados estão dentro da faixa prevista pela literatura.

Pequenas variações podem ocorrer devido às condições atmosféricas locais e devido à variáveis inseridas na simulação.

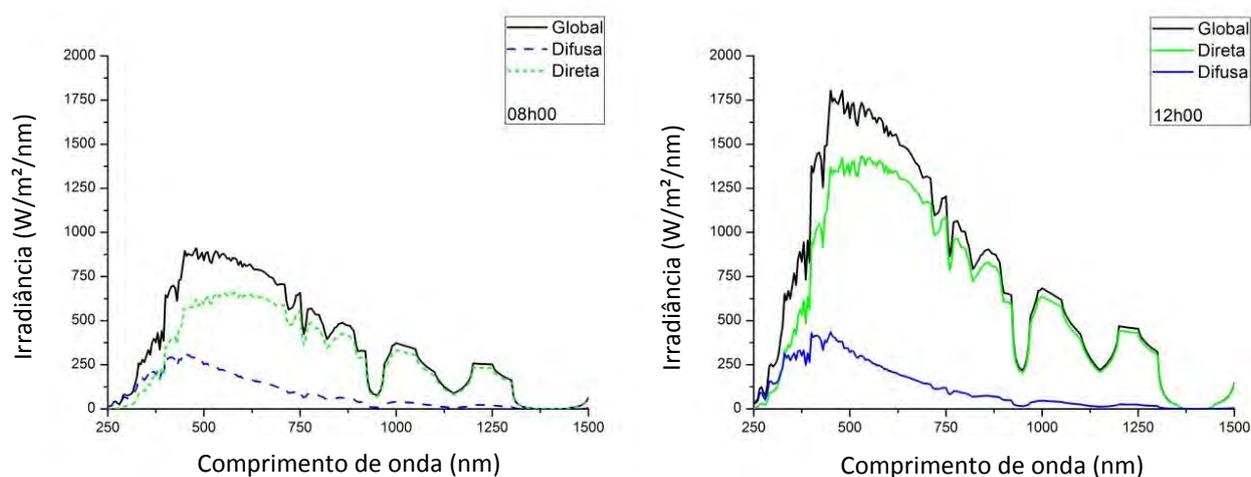


Figura 2.11 - Espectros simulados pelo software Espectro Solar mostrando a variação das contribuições diretas e difusas para as 06h00 e as 12h00 do mesmo dia.

2.1.4. Instrumentação e medidas de dados ambientais

As medições solarimétricas na superfície terrestre são de grande importância para o estudo da influência das condições atmosféricas nas componentes direta e difusa da radiação solar (TIBA, et al., 2000). Os instrumentos solarimétricos medem a potência incidente por unidade de área, fotoperíodo, posição do disco solar, radiação PAR etc., integrada sobre os diversos comprimentos de onda, sendo que entre 400 a 700 nm é radiação visível ou radiação PAR, na região entre 300 a 400 nm radiação ultravioleta e para os comprimentos de onda entre 700 a 5000 nm denomina-se radiação infravermelha.

O radiômetro ou piranômetro é o sensor que mede a irradiância solar que chega a uma determinada superfície, ou seja, a potência incidente pela área. A unidade padrão de medida é o Watt por metro quadrado (W/m^2). Os radiômetros atualmente utilizados possuem basicamente dois tipos de elementos sensores, fotovoltaicos e termopilhas. Os elementos sensores

fotovoltaicos podem ser fotodiodos ou células solares. Já uma termopilha é um conjunto de termopares conectados em série. Estes elementos sensores integram a maioria dos radiômetros comerciais. Radiômetros que utilizam elementos sensores fotovoltaicos possuem um custo muito menor do que o de um radiômetro que utiliza termopilha, além disto, seu tempo de resposta é muito menor se comparado aos sensores térmicos. Sua maior limitação é a não linearidade na resposta em função do comprimento de onda e a região relativamente limitada de comprimentos de onda para as quais responde (TIBA, et al., 2000).

2.1.4.1. Medida da radiação direta

Para condições atmosféricas idênticas, quanto menor for o caminho a ser percorrido, isto é, a massa ar, maior será a contribuição da componente direta. O piroheliômetro, instrumento utilizado para medir a radiação direta, possui uma pequena abertura de tal que só aceita a radiação proveniente diretamente do disco solar e da região vizinha. O sensor segue o movimento do sol, de forma que a radiação fica sempre focalizada sobre o elemento sensor. Estes são instrumentos de precisão e possuem uma incerteza na faixa de 0,5 %. Em geral, os piroheliômetros utilizam termopilhas como elemento sensor (TIBA, et al., 2000).

2.1.4.2. Medida da radiação difusa

Para condições idênticas da atmosfera, quando maior for a massa ar, maior será a contribuição da componente difusa. O radiômetro, sensor utilizado para medir a contribuição da radiação difusa, utiliza um anel de sombreamento, de forma que o disco solar fique tapado e o elemento sensor receba somente a radiação eletromagnética difusa. A Figura 2.12 demonstra a utilização de um disco de sombreamento para medidas da radiação difusa. Ao longo do ano, o anel de sombreamento deve ser ajustado, afim de que o elemento sensor não receba contribuição da radiação solar direta. O custo desta banda de sombreamento é relativamente baixo, assim como sua instalação é simples.

(PALMER, et al., 2009). Neste trabalho investigou-se a parte dos instrumentos utilizados para medir radiação em toda faixa espectral de emissão do Sol, que está aproximadamente entre 250 e 5000 nm. O instrumento de medida é denominado radiômetro. Os radiômetros comerciais mais comuns possuem dois tipos distintos de elemento sensor: fotovoltaico e termoelétrico. Estes dois tipos são descritos detalhadamente nos tópicos abaixo.

2.2.1. Fotovoltaicos

Células solares ou fotodiodos são dispositivos fotovoltaicos que geram uma tensão de saída proporcional à radiação solar incidente. Esta transformação da radiação solar em eletricidade ocorre devido ao efeito fotovoltaico. Com isto é possível quantificar a energia incidente por área, ou seja, a irradiância solar.

Um exemplo de elemento sensor fotovoltaico é a célula solar de silício. Como exemplo de um radiômetro que utiliza como elemento sensor uma célula solar de silício, o grupo CELSOL do LAS/INPE em parceria com o Laboratório de Microeletrônica da USP e com a empresa Orbital Engenharia LTDA, desenvolveu um radiômetro de baixo custo para medidas da radiação solar (VILELA, 2010).

A célula solar é obtida através da difusão de dopantes em uma lâmina de silício, formando desta maneira um campo elétrico (Figura 2.13). Quando a radiação eletromagnética incide sobre a célula, ela ioniza uma região interna da célula, gerando um par elétron-lacuna. Este par elétron-lacuna é separado pelo campo elétrico interno ou barreira de potencial antes que se recombine, gerando corrente, chamada de fotocorrente (BELOTO, 1983). A obtenção da barreira de potencial interna de uma célula solar de silício é feita através da difusão de impurezas. Normalmente, essas impurezas são átomos de fósforo que possuem um elétron a mais (cinco) que o silício (quatro) na última camada ou átomos de boro que possuem um elétron a menos (três). Uma lâmina de silício do tipo p (que já possui átomos de boro na estrutura) deve ser submetida a um processo de dopagem, tradicionalmente difusão térmica, o qual difunde

átomos de fosforo, em maior quantidade do que os de boro, na superfície da lâmina, criando assim uma região do tipo n. Esta fase do processo de fabricação de uma célula solar é de extrema importância, pois é nesta fase que são definidos a concentração superficial, a profundidade da junção p-n, resistência de folha e tempo de vida na região difundida da célula (BELOTO, 1983). A Figura 2.13 representa as regiões dentro de uma lâmina de silício após a dopagem.

No lado tipo n da junção, há elétrons livres que podem se deslocar, devido às impurezas adicionadas. No lado tipo p há buracos livres (ausência de elétrons). Os elétrons livres próximos à região de depleção tenderão a se deslocar para o lado p para se neutralizar, assim como os buracos do lado p tenderão a se deslocar para o lado n.

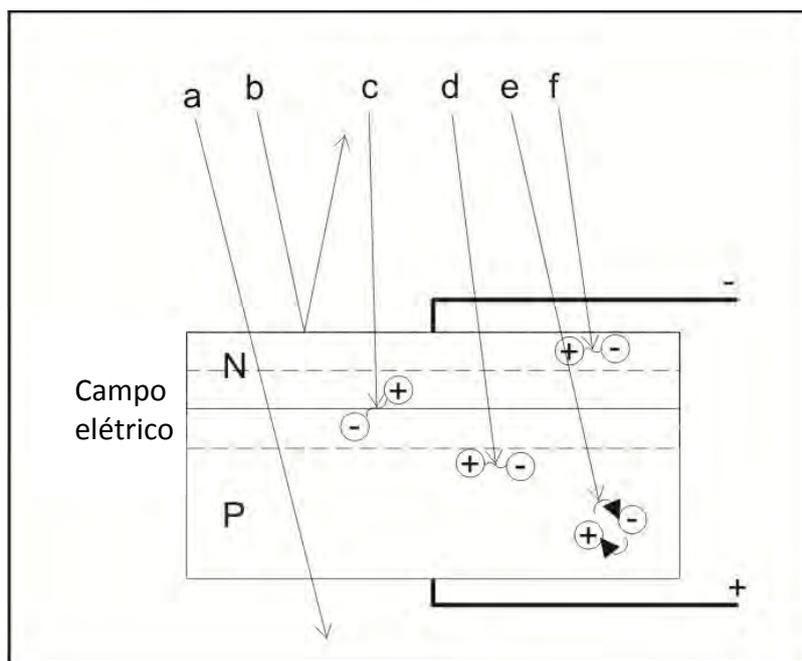


Figura 2.13 - Regiões internas de uma lâmina de silício dopada. Onde representam: (a) fóton com energia menor do que a do *gap*, (b) fóton refletido pela superfície, (c,d,f) pares elétron buraco que geram a fotocorrente e (e) pares gerados que sofrem recombinação.

Isto não pode ocorrer para sempre, pois à medida que os elétrons passam para o lado p, perdemos elétrons no lado n e o mesmo ocorre para os buracos do lado p. Assim, a carga positiva líquida aumenta no lado n até que finalmente uma voltagem se estabelece e bloqueia a difusão de elétrons para o lado p e o mesmo deve acontecer do outro lado da junção. Em condições de equilíbrio, a difusão líquida de corrente deve ser nula. Deste modo, é formado o campo elétrico na junção np, responsável pela geração da fotocorrente.

Quando a radiação eletromagnética incide sobre a célula e é absorvida, ela gera um par elétron-lacuna. Este par só pode ser gerado se a energia do fóton incidente for maior ou igual à energia da banda proibida, ou seja, o *gap* do material. O *gap* do silício é de 1,11 eV a 25°C (STREETMAN, et al., 2000). A energia de um fóton é dada pela Equação 2.5.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad 2.5$$

Onde h é a constante de Planck, ν é frequência do fóton, c a velocidade da luz no vácuo e λ o comprimento de onda do fóton. Utilizando a Equação 2.5 e o valor do *gap* do silício, temos que o comprimento de onda limite para a criação de um par elétron-lacuna no interior de uma célula solar é de aproximadamente 1100 nm. Fótons com comprimento de onda maior do que 1100 nm não possuem energia suficiente para vencer o *gap* do silício, não contribuindo para a corrente fotogerada (Figura 2.13a). Além disto, fótons muito energéticos são absorvidos próximos à superfície da célula solar, e logo se recombinam, não contribuindo também para a geração de corrente foto gerada (Figura 2.13f). Fótons absorvidos no “bulk” geram pares que são separados pelo campo elétrico, se tiverem comprimento de difusão adequado (Figura 2.13d) caso contrário se recombinam (Figura 2.13e).

A célula solar possui resposta espectral para os comprimentos de onda entre 400 e 1100 nm, que correspondem ao final do ultravioleta e início do infravermelho. Apesar dos menores comprimentos de onda serem mais

energéticos, a célula de silício não possui uma boa resposta nesta região do espectro. Portanto, a taxa de conversão de fótons não é igual para todos os comprimentos de onda. A maneira que o dispositivo fotovoltaico se comporta em função do comprimento de onda se chama resposta espectral. A resposta espectral de uma célula solar típica é representada na Figura 2.14.

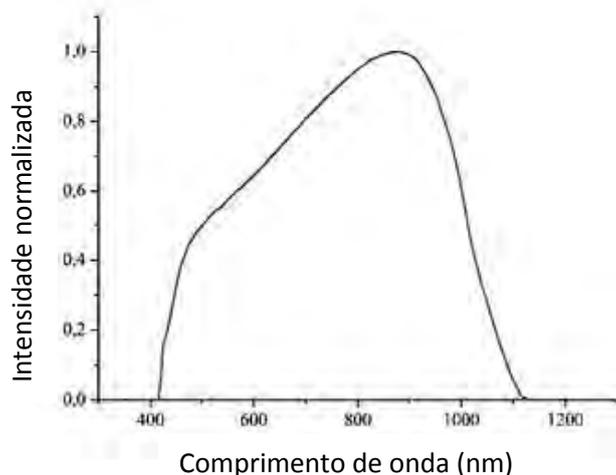


Figura 2.14 - Resposta espectral típica de uma célula solar de silício.
Fonte: PAES (2012).

A resposta espectral é a taxa de conversão de fótons em função dos comprimentos de onda. Um elemento sensor fotovoltaico de silício para medida da radiação solar possui uma resposta espectral um pouco limitada em relação ao espectro inteiro. Esta porção do espectro corresponde a 66 % do total que incide na superfície terrestre.

Além da resposta espectral não uniforme e restrita a uma faixa limitada do espectro, a célula solar também apresenta uma dependência com a temperatura, mostrada na Figura 2.15, podendo causar erros nas medidas de irradiância. Estima-se esta dependência seja de aproximadamente 0,1%/°C (WÜRFEL, 2005). Quando aplicadas as correções disponíveis para a dependência de temperatura dos dispositivos fotovoltaicos, os erros em função da temperatura tornam-se negligenciáveis (TIBA, et al., 2000).

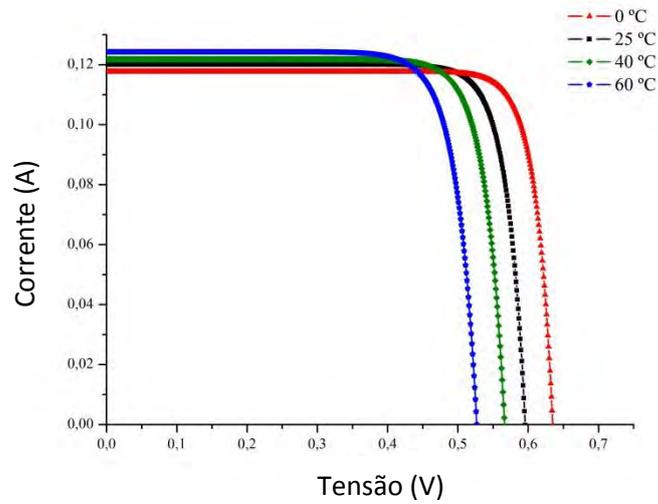


Figura 2.15 - Dependência com a temperatura de uma célula solar de silício.
Fonte: PAES (2012).

Para realizar medidas de irradiância utilizando-se uma célula solar, é necessário que a célula esteja na parte plana (I_{sc}) da curva I x V, Figura 2.16, onde a corrente é constante. A potência máxima de uma célula solar é dada pela área do retângulo na curva I x V, conforme representado na Figura 2.16. O aumento da área (A1) corresponde a um ganho de potência na célula.

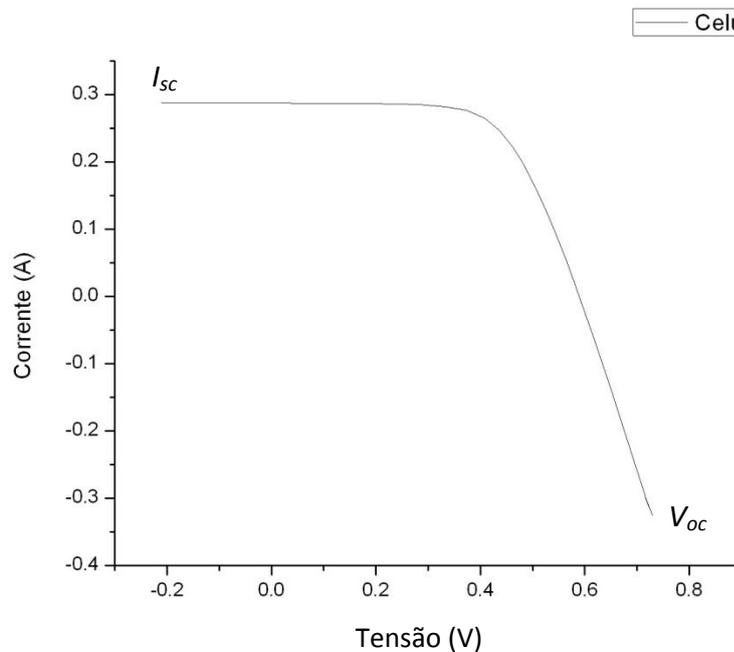


Figura 2.16 - Características de uma curva I x V.

O circuito equivalente de uma célula solar real é apresentado na Figura 2.17. Neste circuito, D1 possui as características de um diodo ideal e representa a componente da célula solar no escuro. D2 representa os efeitos de recombinação de pares elétrons-lacunas próximos à junção. A fonte de corrente (I_{cc}) representa a corrente foto gerada quando a célula é iluminada. R_p é a resistência em paralelo da célula e R_s a resistência em série. A resistência em paralelo, R_p , representa as imperfeições da célula, que dão origem à correntes de fuga através da junção ou nas bordas da célula.

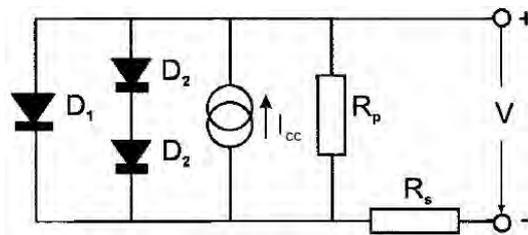


Figura 2.17 - Circuito equivalente de uma célula solar real.
Fonte: WÜRFEL (2005).

Portanto, quanto maior for o valor da resistência em paralelo, melhor será a potência da mesma. Já a resistência em série representa a resistência dos contatos, da base da célula e também do emissor e quanto menor for o seu valor, maior será a tensão nos terminais da célula. Uma célula solar ideal possui uma resistência em paralelo que tende ao infinito e uma resistência em série que tende à zero. A Equação 2.6 representa a equação geral para a corrente na célula solar. Onde I_s representa a corrente de saturação da junção, V a tensão nos terminais da célula, R_s a resistência em série, R_p a resistência em paralelo, m o fator de qualidade do diodo, podendo assumir valores inteiros entre 1 e 6 (VILELA, 2010), k a constante de Boltzmann e T a temperatura na escala absoluta da célula.

$$I = I_L - I_s \cdot \left[e^{\frac{e(V+I.R_s)}{mkT}} - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad 2.6$$

2.2.2. Termoelétricos

Termopilhas são termopares conectados em série. Um termopar é um dispositivo construído a partir da junção de dois metais diferentes. A variação da temperatura implica na variação de uma tensão na junção.

O efeito Seebeck é o responsável pela tensão elétrica em função da variação da temperatura. Thomas Seebeck, um físico finlandês, descobriu em 1821 o efeito termoelétrico que carrega seu nome. Portanto, o oposto também é válido, ou seja, se aplicarmos uma tensão sobre um termopar obteremos um gradiente de temperatura na junção. Este efeito reverso é chamado de efeito Peltier, em homenagem ao físico francês Jean Charles A. Peltier, em 1834 (ADKINS, 1983).

Diversos tipos de ligas metálicas podem ser utilizados para a confecção de termopares. Portanto, há alguns termopares mais comuns que podem ser encontrados no mercado. A Tabela 2.1 mostra os tipos e junções que eles utilizam.

Tabela 2.1 - Tipos e ligas utilizadas nos termopares mais comuns.

Tipo	Ligas
K	Cromel e Alumel
T	Cobre e Constantan
E	Cromel e Constantan
J	Ferro e Constantan
B	Platina e Ródio-platina

As termopilhas utilizadas em radiômetros comerciais podem ser de dois tipos: a primeira possui a junção quente voltada para o sol e a junção fria voltada para o lado oposto, a segunda possui só uma superfície voltada para o sol, sendo pintada de forma intercalada de branco e preto. A Figura 2.18 a seguir mostra o modelo de termopilha de duas junções.

A radiação eletromagnética proveniente do sol incide sobre a junção quente, aumentando ainda mais a sua temperatura. Esta superfície recebe um tratamento para que haja uma reflexão mínima em todos os comprimentos de onda, de forma que a maioria dos fótons incidentes sejam absorvidos pela junção e transformados em calor. A diferença de temperatura criada em função da incidência da radiação gera uma diferença de potencial nos terminais. Esta diferença de potencial está associada à potência incidente por unidade de área.

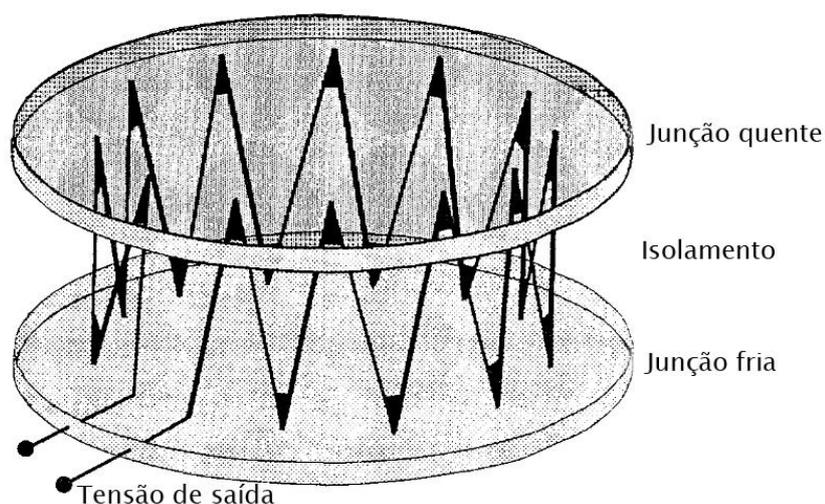


Figura 2.18 - Termopilha de duas junções. Modelo utilizado no radiômetro CM11 de fabricação da Kipp & Zonen.
Fonte: MCCLUNEY (1994).

As termopilhas são ótimos elementos sensores para medidas de radiação solar. Os radiômetros de primeira classe e os padrões de referência para medidas da radiação solar utilizam como elemento sensor termopilhas. A resposta espectral da termopilha é aproximadamente plana na faixa de 300 a 3000 nm (CAMPBELL SCI, 2010), como pode ser verificado na Figura 2.19.

2.2.3. Comparações entre fotovoltaicos e termoeletrônicos

Elementos sensores fotovoltaicos possuem como maior limitação a não uniformidade da resposta espectral além de só possuir resposta em uma faixa mais restrita do espectro solar, quando comparado com a termopilha. A Figura 2.19 mostra a comparação entre a resposta espectral de um elemento sensor fotovoltaico, uma termopilha e o espectro padrão ao nível do mar.

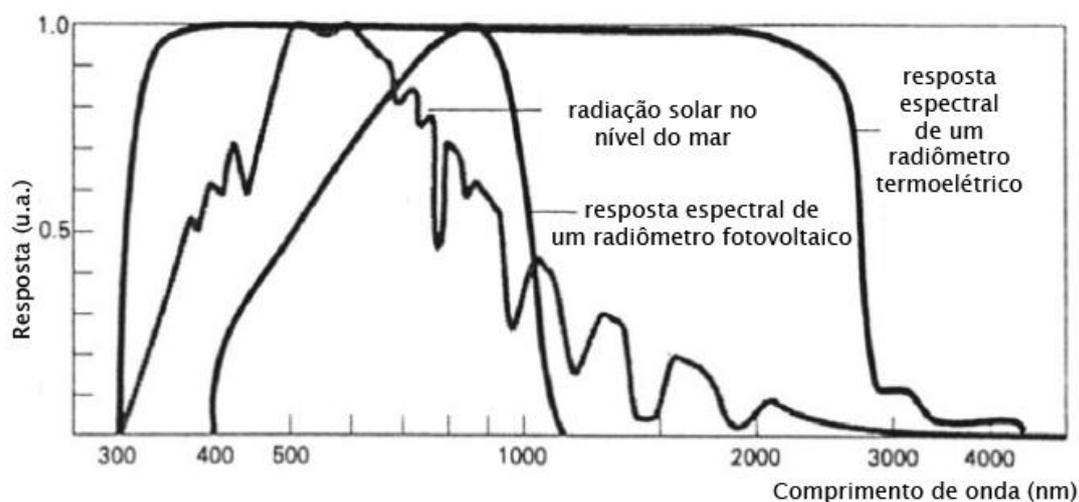


Figura 2.19 - Comparação da resposta espectral de dois elementos sensores.
Fonte: CAMPBELL SCI (2010).

Devido a esta limitação e não uniformidade, um radiômetro que utiliza uma célula solar está sujeito a um erro nas medidas de até 3 % quando comparado com um radiômetro que utiliza uma termopilha. Portanto, quando se considera somente a energia total incidente ao longo de um dia, este erro pode diminuir para menos de 1 % (TIBA, et al., 2000).

Uma das grandes vantagens de um sensor fotovoltaico é o seu preço e seu tempo de resposta rápido. Um sensor fotovoltaico tem um custo muito menor do que um sensor que utiliza termopilha e ainda possui um tempo de resposta de aproximadamente 1 ms, enquanto que uma termopilha possui um tempo de resposta de aproximadamente 15 s (TIBA, et al., 2000). A Tabela 2.2 mostra

algumas das características dos dois elementos sensores encontrados no mercado.

Tabela 2.2 - Comparação entre sensores fotovoltaicos e termoeletrônicos comerciais.

Características	Fotovoltaico	Termoeletrônico
Faixa espectral	400 a 1100 nm	310 a 2800 nm
Sensibilidade	1200 $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$	de 4 a 6 $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$
Dependência com a temperatura	< 0,2 %/°C	< 1 % de -10 a +40 °C
Tempo de resposta	< 1 s	< 15 s (95 % da resposta)
Não linearidade	< ± 1 % até 1000 W/m^2	< $\pm 0,6$ % até 1000 W/m^2
Estabilidade	< 2 % ao ano	< 0,5 % ao ano

Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC (2010).

2.3. Unidade de Monitoramento Ambiental - UMA

O monitoramento ambiental remonta a antiguidade. Registros de informações acerca do tempo vêm sendo aprimorados ao longo das décadas. A partir do século XX, com os avanços tecnológicos e o advento da eletrônica, os dados ambientais veem deixando de ser baseados em observações a olho nu e estão sendo gerados por sensores. Estes bancos de dados permitem ao ser humano entender as mudanças climáticas que ocorrem na superfície terrestre além de permitir a previsão do tempo local. Estes dados ambientais são importantes para determinar a ocorrência de certos fenômenos, estudar a mudança climática no planeta e até o potencial energético de certas regiões do globo. Portanto, para que o banco de dados tenha validade, ou seja, para que as medidas ambientais sejam utilizadas por qualquer pesquisador do planeta, os sensores devem ser calibrados por laboratórios competentes e instalados em locais recomendados, de forma que não apresentem erros embutidos no banco de dados.

Existem diversas agências que possuem recomendações para a instalação de unidade de monitoramento ambiental ou plataforma de coleta de dados. A mais

conhecida é a Organização Meteorológica Mundial, do inglês *World Meteorological Organization* (WMO). Além dela, existem a EPA (do inglês *Environmental Protection Agency*), a AASC (do inglês *American Association of State Climatologists*), a EEA (do inglês *European Environmental Agency*) entre outras.

As recomendações destas agências buscam uniformizar e padronizar os dados meteorológicos ao redor do mundo. Todas as recomendações devem ser seguidas sempre que possível. Quando não puderem ser atendidas todas as recomendações de instalação de uma unidade de monitoramento ambiental, é muito importante que conste, junto com o banco de dados, os metadados. Metadados são informações sobre as condições locais de instalação das torres, como tipo do terreno, objetos próximos e quaisquer informações que possam ser importantes.

Em uma plataforma de coleta de dados é muito importante que seja feita manutenção periódica. Os sensores instalados devem ser periodicamente calibrados, para que possam fornecer dados confiáveis a serem estudados. A calibração dos sensores deve ser feita por laboratórios acreditados por órgãos regulamentadores em cada país. No Brasil a acreditação de laboratórios de calibração é realizada pelo INMETRO. A calibração é feita seguindo normas de agencias competentes, como a ABNT, ISO, ASTM e outras.

A localização da torre de monitoramento deve ser escolhida com cuidado. O local escolhido precisa ter representatividade para a vizinhança e é recomendável que o local seja coberto de vegetação rasteira e não possua objetos próximos. A distância recomendada para a instalação de uma PCD em relação a qualquer objeto é de dez vezes a sua altura. A Figura 2.20 representa um esquema de local recomendável de instalação de uma unidade de monitoramento ambiental. Além destes cuidados, recomenda-se a construção de uma cerca ao redor da unidade, evitando a aproximação de animais e pessoas não autorizadas. As dimensões da cerca variam de acordo com os

recursos e o local de instalação, normalmente uma unidade de monitoramento ambiental possui uma área típica de 15 x 15 m² cercada.

Na torre, o sensor de vento deve ser posicionado numa região aberta, sem obstruções no horizonte. A AASC recomenda que o sensor seja instalado a uma altura de 3,0 m do chão. Já a WMO e a EPA recomendam que as medidas do vento sejam feitas a uma altura de 10,0 m.

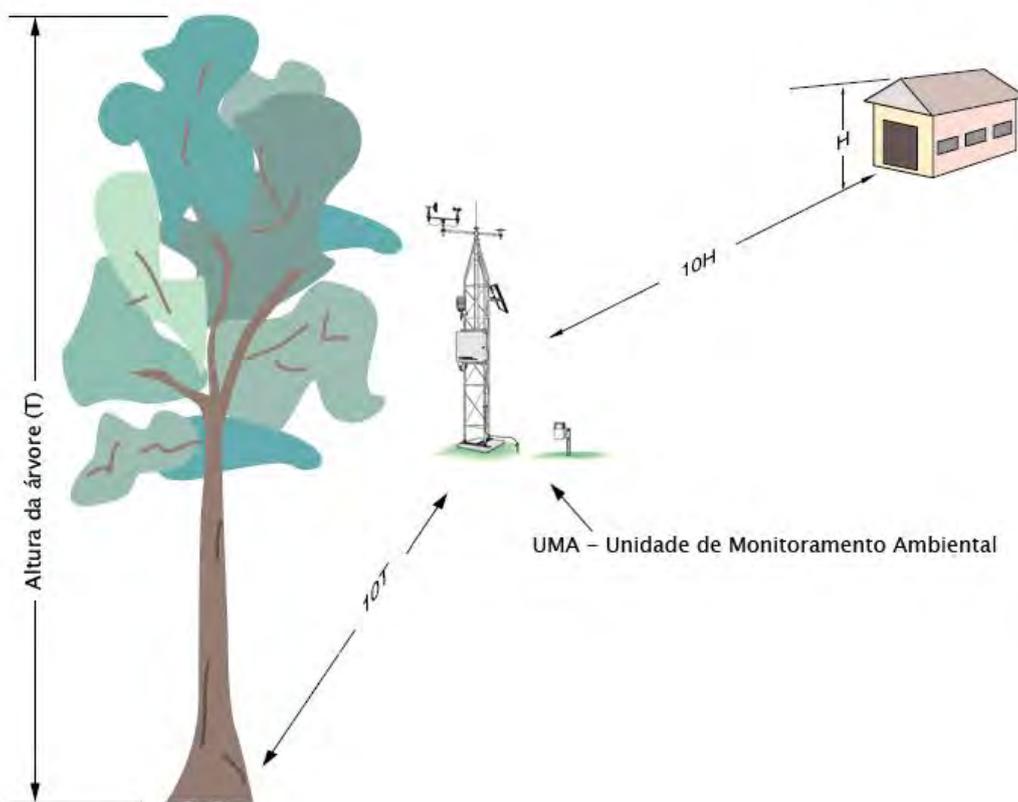


Figura 2.20 - Recomendação de local para a instalação de uma PCD.
Fonte: CAMPBELL SCI (2010).

Para o sensor de temperatura e umidade relativa, a EPA recomenda ter uma área aberta de 9,0 m de diâmetro. Além disto, que a cobertura do terreno seja de grama curta ou a superfície natural da Terra. Deve-se evitar áreas pavimentadas e locais que tenham muitas indústrias, locais fechados, grande

densidade de vegetação, pântanos entre outros. O sensor deve ser instalado dentro de um abrigo de radiação com ventilação adequada. A AASC recomenda que o sensor seja instalado a uma altura de $1,5 \pm 1,0$ m, já a WMO recomenda que ele seja instalado entre 1,25 e 2,0 m do chão. A EPA recomenda que ele seja instalado a 2,0 m da superfície.

O sensor de precipitação deve ser instalado sobre uma superfície que possua grama curta, a fim de evitar que respingos do chão interfiram na medida. Locais abertos que possuam fortes ventos devem ser evitados para este tipo de sensor. Na impossibilidade de evitar locais abertos, escudos para o vento podem ser utilizados. Caso haja a possibilidade de precipitação sólida na região, um aquecedor deve ser acoplado ao pluviômetro. Segundo a AASC, o pluviômetro deve ser instalado a 1,0 m de altura. Já a WMO e a EPA recomendam uma altura mínima de 0,3 m.

Segundo a WMO, EPA e AASC, os radiômetros devem ser instalados em locais que não tenham sombra durante todas as estações do ano. Devem ser evitados reflexos de superfícies artificiais e fontes artificiais de radiação nas proximidades. A altura de instalação do radiômetro para medidas da radiação global, direta ou difusa não é crítica. Recomenda-se, para o hemisfério sul, que o radiômetro seja instalado de tal forma que seu fio fique voltado para o sul, evitando a radiação solar direta sobre ele em certas latitudes.

O sensor de pressão do ar deve ser instalado dentro da caixa ambiental. Desta forma ele fica protegido das intempéries do ambiente e da insolação direta.

3 METODOLOGIA

Na primeira parte deste capítulo será apresentada uma descrição detalhada das unidades de monitoramento ambiental instaladas no campus do INPE em São José dos Campos, contendo especificações e princípio de funcionamento dos sensores utilizados, dos sistemas de aquisição e transmissão dos dados e do sistema de suprimento de energia.

Na segunda parte apresentamos a metodologia de análise dos resultados. Como foi realizada a triagem dos dados, por dia, em função da presença de nuvens e as divisões de análises, o método de aquisição do espectro solar diário e o horário de coleta e por fim a metodologia de análise dos dados coletados.

Na terceira e última parte são descritos os três sistemas de caracterização de sensores de radiação solar e de células solares do laboratório de Célula Solar – CELSOL do LAS/INPE. O laboratório conta com sistemas de medida de curva de corrente por tensão ($I \times V$), resposta espectral e lei dos cossenos. Os sistemas são descritos detalhadamente.

3.1. Unidade de Monitoramento Ambiental

Uma Unidade de Monitoramento Ambiental ou Plataforma de Coleta de Dados pode ser definida como uma estação meteorológica na qual as observações são feitas e transmitidas de forma automática (WMO, 2008). Ela pode ser dividida em cinco partes, conforme a Figura 3.21. Basicamente, o sistema é composto por uma torre metálica, confeccionada em alumínio resistente a corrosão que dá suporte a instrumentação e ao sistema de suprimento de energia.

O sistema de suprimento de energia é formado por um painel solar, um controlador de carga e uma bateria, sendo que o controlador de carga e a bateria ficam instalados dentro da caixa ambientalmente selada resistente às

intempéries ambientais. O sistema de suprimento de energia tem a finalidade de alimentar o sistema de aquisição e transmissão de dados e alguns sensores ativos. A demanda de energia depende da quantidade de instrumentação instalada na torre, do período de operação e da taxa da transmissão e aquisição de dados. A instrumentação da unidade de monitoramento é composta por sensores, responsáveis por perceber as variações ambientais e gerar sinais elétricos que são lidos e convertidos em dados digitais que são armazenados pelo sistema de aquisição e posteriormente transmitidos para uma unidade de tratamento de dados remota via rádio ou outro sistema de transmissão de dados.

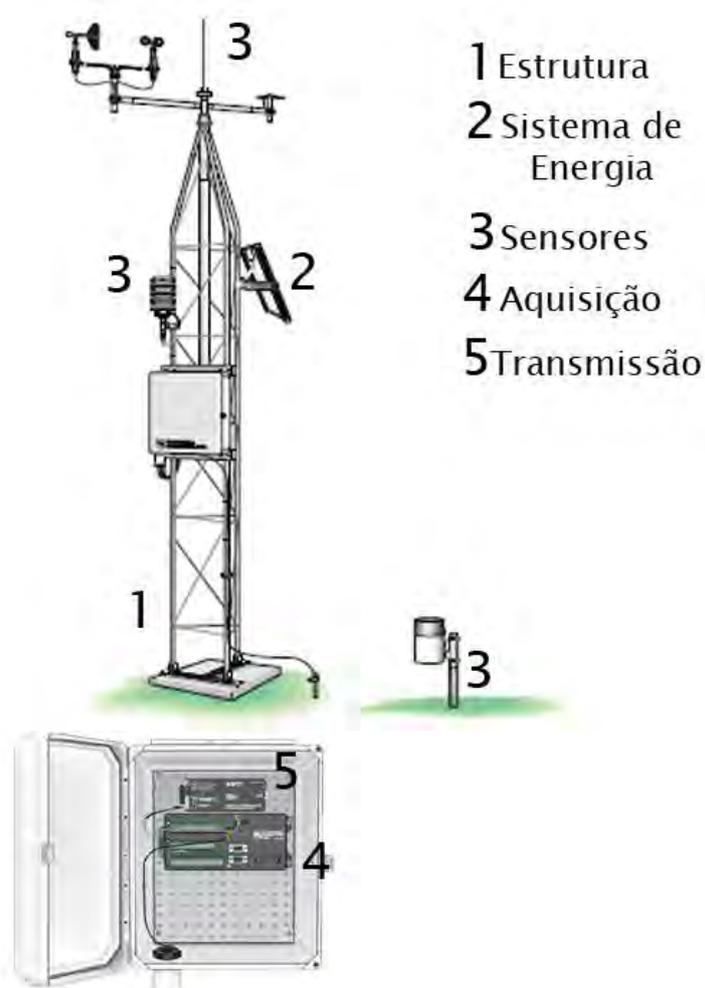


Figura 3.21 - Partes de uma Unidade de Monitoramento Ambiental.
Fonte: CAMPBELL SCI (2010).

As unidades de monitoramento ambiental são utilizadas para monitorar as variações ambientais na superfície terrestre tais como: velocidade e direção do vento; precipitação; temperatura; pressão e umidade atmosférica; radiação solar, albedo local e radiação terrestre. A confiabilidade das medidas em uma unidade de monitoramento ambiental depende de vários fatores, entre eles podemos citar a qualidade da instrumentação instalada, a calibração dos sensores e as condições locais adequadas onde o sistema esta instalado. Neste trabalho, foram montadas três unidades dentro das dependências do INPE, em São José dos Campos. A localização e altura de cada torre instalada no INPE estão contidas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Informações das unidades instaladas.

Nome	Altura (m)	Localização
Unidade 1 – Caixa d'água	3	-23° 12' 41", -45° 51' 32"
Unidade 2 – Prédio Materiais	3	-23° 12' 31", -45° 51' 33"
Unidade 3 – Portaria principal	10	-23° 12' 27", -45° 51' 42"

3.1.1. Sistema de energia

O sistema de energia utilizado nas unidades de monitoramento é constituído por um painel solar com potência de 20 W da marca Kyocera, uma bateria de 12 V com capacidade de 26 Ah e um controlador de carga. Na Figura 3.22 é mostrado uma foto do controlador utilizado nas unidades de monitoramento ambiental instalado no INPE, modelo SHS-10 da marca MorningStar.



Figura 3.22 - Controlador de carga da bateria utilizado nas unidades.

Os sistemas de energia nas unidades de monitoramento ambiental montados no INPE foram dimensionados visando futuras ampliações no sistema. O painel solar foi instalado seguindo as recomendações de inclinação em função da latitude local. Na demanda atual o sistema possui autonomia para operar cerca de 30 dias com ausência de radiação solar.

3.1.2. Sensores

Neste trabalho, nos restringimos aos sensores para aplicação ambiental utilizados para obtenção de dados meteorológicos. A descrição dos sensores utilizados segue abaixo.

3.1.2.1. Anemômetro

O anemômetro é o sensor que mede a velocidade e direção do vento. Existem diversas marcas disponíveis no mercado, mas basicamente são dois os tipos de anemômetros: mecânicos e ultrassônicos. A medida de velocidade do vento nas Unidades de Monitoramento ambiental do INPE é realizada através de um anemômetro mecânico com três conchas, posicionada a 120° entre si. O eixo rotacional do anemômetro fica perpendicular à superfície terrestre, mantendo assim a rotação das conchas paralelas à superfície terrestre. A velocidade de rotação do anemômetro está relacionada ao vento paralelo ao plano que contém as conchas. Uma bobina conectada ao eixo de rotação do instrumento induz uma corrente elétrica, que é proporcional à velocidade do vento.

A medida da direção do vento é feita através de um cata-vento, que consiste de uma aleta, fixa em um eixo que gira livremente 360° . Este eixo é perpendicular à superfície terrestre e acompanha as rajadas de vento na horizontal. Este eixo está preso a um potenciômetro variável de 0 a 10 k Ω . Um sinal de excitação de 5 V é transmitido para o circuito, que passa através do potenciômetro e é lido na saída. O valor do sinal de saída é proporcional ao ângulo azimutal da velocidade do vento.

Neste trabalho, foi utilizado o anemômetro de fabricação da MetOne modelo 034A/B. As especificações do sensor estão contidas na Tabela 3.4. A Figura 3.23 mostra um exemplar do sensor.

Tabela 3.4 - Especificações técnicas do anemômetro.

Sensor	Faixa	Incerteza
Velocidade	0 a 49 m/s	$\pm 1,1 \%$
Direção	0 a 356°	$\pm 4^\circ$



Figura 3.23 - Anemômetro utilizado nas unidades.

3.1.2.2. Barômetro

A pressão atmosférica é a força por unidade de área que uma coluna vertical de ar ortogonal à superfície da Terra que se estende desde a superfície até fora da atmosfera exerce sobre uma determinada área (BROCK, et al., 2001). Barômetro é denominação dada ao dispositivo que mede a pressão atmosférica. O elemento sensor do barômetro é uma cápsula de cerâmica, que se deforma proporcionalmente à pressão aplicada. Dentro desta cápsula são conectados dois eletrodos de ouro. A deformação da cápsula de cerâmica gera uma mudança proporcional na capacitância medida devido ao

deslocamento (aproximação ou afastamento dos eletrodos), sendo associada à pressão atmosférica. O sensor é representado na Figura 3.24.

Neste trabalho foi utilizado o barômetro de fabricação da Setra modelo 276 – ROHS. As especificações do sensor estão na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Especificações técnicas do barômetro.

Sensor	Faixa	Incerteza
Pressão	800 a 1100 hPa	+ 0,25 %



Figura 3.24 - Barômetro utilizado nas unidades.

3.1.2.3. Temperatura e Umidade

O sensor utilizado para medição da temperatura é composto por um circuito elétrico ligado a uma resistência de platina, que varia sua resistência em função da temperatura. Assim a temperatura é determinada pela diferença de potencial das extremidades da resistência. A variação da resistência é proporcional à temperatura em uma determinada faixa.

O sensor utilizado para realizar a medida de umidade relativa do ar é baseado em um capacitor, cujo dielétrico é um polímero permeável ao vapor de água. Quando exposto ao ambiente, o polímero absorve o vapor de água presente no ar, mudando assim a constante dielétrica do capacitor e consequentemente a

sua capacitância. A variação da capacitância é proporcional à variação da umidade relativa do ambiente.

Estes sensores, representados pela Figura 3.25(a), ficam instalados dentro de um abrigo meteorológico. Este abrigo está representado na Figura 3.25(b). O abrigo protege o sensor da radiação solar direta e da chuva. A radiação solar direta pode causar erros de medida da temperatura, e a chuva pode interferir nas medidas de umidade atmosférica.

O sensor de temperatura e umidade utilizado neste trabalho é fabricado pela Rotronic, modelo HC2, e o abrigo meteorológico é da marca Squitter. As especificações dos sensores seguem na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Especificações técnicas dos sensores de temperatura e umidade.

Sensor	Faixa	Incerteza
Temperatura	-40 a + 85 °C	0,2 °C
Umidade	0 a 100 %	1,5 %

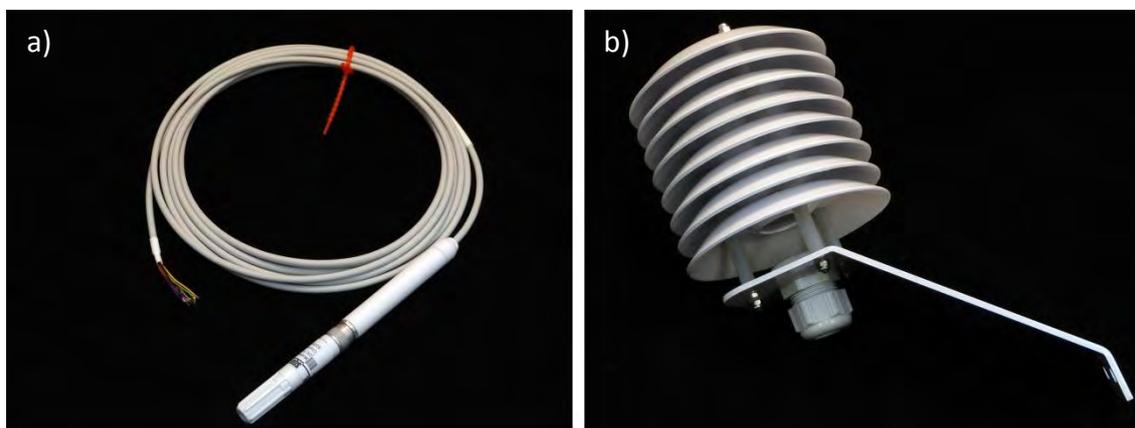


Figura 3.25 - Sensor de temperatura e umidade (esq.) e abrigo meteorológico (dir.).

3.1.2.4. Pluviômetro

O pluviômetro é o instrumento utilizado para medir o volume de precipitação por área. A unidade de medida é o milímetro (mm). O sensor utilizado neste trabalho é do tipo “Tipping Bucket” que consiste em um recipiente aberto de forma cilíndrica, com abertura de captação com diâmetro 200 mm, um funil interno que direciona a água da chuva coletada sobre duas conchas em um sistema de básculas, conforme mostrado na Figura 3.26.



Figura 3.26 - Detalhe do princípio de funcionamento de um pluviômetro.
Fonte: SQUITTER (2009).

Quando a capacidade de uma das cavidades coletora de água é atingida, o peso da água faz com que a báscula incline, esvaziando a água e dando lugar a outra báscula. Cada vez que essa inversão acontece, o pluviômetro gera um pulso de tensão, que é lido pelo sistema de aquisição de dados e computado. Cada pulso gerado é equivalente à capacidade volumétrica da báscula, sendo a quantidade de chuva medida pelo volume de água coletado em função da área de coleta.

Neste trabalho utilizamos o pluviômetro fabricado pela Squitter modelo S2163. As especificações do sensor seguem na Tabela 3.7 e a Figura 3.27 mostra o pluviômetro utilizado nas unidades.

Tabela 3.7 - Especificações técnicas do pluviômetro.

Sensor	Faixa	Incerteza
Pluviômetro	0 a 500 mm/h	0,20 mm



Figura 3.27 - Pluviômetro utilizado nas unidades.

3.1.2.5. Radiômetro

Neste trabalho, foram utilizados dois tipos de radiômetros. Como padrões de referência utilizou-se o radiômetro de termopilha, marca Kipp&Zonen, modelo CM11 representado na Figura 3.28. Para análises da influência da temperatura e umidade relativa do ar foi utilizado o radiômetro fotovoltaico global, marca Kipp&Zonen, modelo SP-Lite. Além dos radiômetros comerciais foram utilizados radiômetros fotovoltaicos desenvolvidos pelo INPE/LAS, protótipos

LAS 104, LAS 105, LAS 106, LAS 108, representados na Figura 3.29. Isto foi feito para testar o funcionamento dos radiômetros por comparação, em função de pequenas discrepâncias observadas em medidas realizadas anteriormente no Laboratório de Instrumentação Meteorológica (LIM) do CPTEC. A Tabela 3.8 mostra as características do radiômetro CM11.



Figura 3.28 - Radiômetro termoeletrico, modelo CM11.



Figura 3.29 - Protótipo de radiômetro PAR, modelo LAS 107.

Tabela 3.8 - Características do radiômetro termoeletrico CM11.

Fabricante	Kipp & Zonen
Elemento sensor	Termopilha
Tipo	Global
Faixa espectral	310 a 2800 nm
Sensibilidade	Entre 4 e 6 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Tempo de resposta	< 15 s (95% da resposta)
Dependência com temperatura	< 1 % (entre -10 a +40 °C)
Estabilidade	<0,5 % ao ano

As características do radiômetro SP-Lite, da marca Kipp & Zonen, são apresentadas na Tabela 3.9 e o protótipo LAS, apresenta as características na Tabela 3.10 (VILELA, 2010).

Tabela 3.9 - Características do radiômetro fotovoltaico SP-Lite.

Fabricante	Kipp & Zonen
Elemento sensor	Fotodiodo (Fotovoltaico)
Tipo	Global
Faixa espectral	400 a 1100 nm
Sensibilidade	10 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Tempo de resposta	< 1 s
Dependência com temperatura	$\pm 0,15 \text{ %}/^\circ\text{C}$
Estabilidade	$\pm 2 \text{ %}$ ao ano

Tabela 3.10 - Características do radiômetro fotovoltaico LAS.

Fabricante	LAS/Orbital Engenharia
Elemento sensor	Célula solar (Fotovoltaico)
Tipo	Global
Faixa espectral	410 a 1100 nm
Sensibilidade	$\pm 20 \mu\text{V/W/m}^2$
Tempo de resposta	< 1 s
Dependência com temperatura	Não
Estabilidade	Não determinado

Fonte: VILELA (2010).

3.1.2.6. Espectro solar

A aquisição do espectro solar foi realizada através de dois espectrômetros, sendo um para faixa espectral entre 200 e 1100 nm e o outro para faixa entre 900 e 1700 nm, que medem a irradiância incidente em função do comprimento de onda, os quais possuem uma rede de difração interna fixa e um CCD linear. A radiação eletromagnética incidente na rede de difração é decomposta em faixas de comprimento de onda que são captadas pelo detector CCD. A resolução do comprimento de onda medido no espectrômetro depende da qualidade das grades de difração e do número de linhas das mesmas. Desta forma, a potência incidente no espectrofotômetro é medida em função do comprimento de onda.

Para coletar a radiação solar, foi utilizada uma fibra ótica de 25 m de comprimento e com 200 μm de diâmetro do núcleo, com conectores SMA 905, compatíveis com os espectrofotômetros e boa transmitância nas faixas do ultravioleta, visível e infravermelho. A fibra ótica foi utilizada para que pudessemos coletar o espectro solar sem expor os equipamentos às intempéries do ambiente. As características da fibra ótica é apresentada na Tabela 3.11 e as características dos dois espectrofotômetros são apresentadas na Tabela 3.12.

Tabela 3.11 - Características da fibra ótica para coletar a radiação solar.

Fornecedor	Fotonica (Campinas/SP)
Comprimento	25 m
Conector	SMA 905
Diâmetro do núcleo	200 μm
Abertura Numérica (NA)	0,22 \pm 0,02
Transmitância	UV/VIS/IV

Tabela 3.12 - Características dos espectrofotômetros utilizados.

Fabricante	GetSpec	GetSpec
Modelo	getSpec 2048 x 14	getSpect NIR 0117
Faixa	200 a 1160 nm	900 a 1700 nm
Resolução	0,04 a 20 nm	12,5 nm
Tempo de integração	2,24 ms a 10 min	6 μs a 500 ms

Para coletar a radiação solar na torre de monitoramento ambiental através da fibra ótica foi desenvolvida uma interface ótica entre a fibra e o meio ambiente a partir da adaptação de protótipo de radiômetro desenvolvido no LAS. Esta interface tem como finalidade servir de suporte para fibra ótica, tornar a captação da radiação solar pela fibra ótica compatível com a lei dos cossenos através de um difusor e proteger a entrada da fibra da ação do meio ambiente. A Figura 3.30 mostra as partes que compõem esta interface. Todas as partes metálicas desta interface foram confeccionadas em alumínio de alta qualidade com exceção dos parafusos de fixação que são de aço inoxidável. As peças em alumínio conferem leveza ao dispositivo e praticidade para transporte e foram anodizadas na cor natural para reduzir o aquecimento do dispositivo pela absorção da radiação solar, proteção à corrosão e permite que este dispositivo seja utilizado em condições ambientais mais diversas possíveis. Na base deste dispositivo contém um nível de bolha e parafusos de nivelamento, de forma que

mantém toda a estrutura nivelada. O difusor utilizado neste dispositivo é um sólido cônico com prolongamento cilíndrico, confeccionado em teflon, sendo o mesmo utilizado no radiômetro desenvolvido no LAS. O difusor tem a finalidade de espalhar a radiação solar uniformemente sobre o terminal da fibra ótica e promover uma correção à lei dos cossenos (VILELA, 2010). O difusor permite que a fibra tenha a visão de uma semiesfera e atenda à lei dos cossenos. No interior do dispositivo foi colocado sílica gel, de forma a amenizar os danos da umidade e evitar que ela interfira nas medidas do espectro solar. O suporte da fibra ótica montado é apresentado na Figura 3.31.

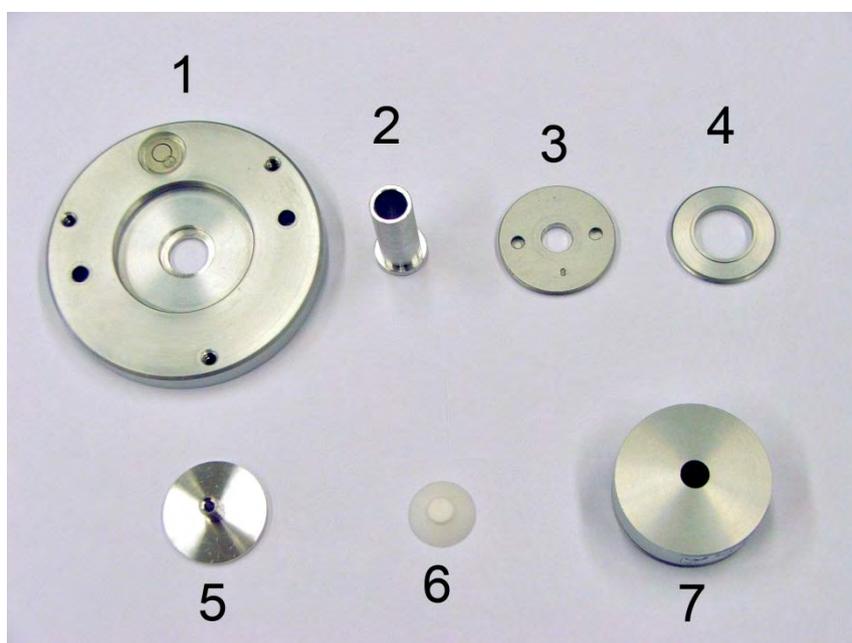


Figura 3.30 - Interface ótica e de sustentação da fibra ótica: (1) base, (7) corpo principal, (2) (3) (4) (5) peças internas de sustentação da fibra, (6) difusor.



Figura 3.31 - Suporte da fibra ótica.

O conjunto, fibra e terminal, foram calibrados para cada espectrofotômetro. A calibração deste conjunto foi realizada no laboratório CELSOL, em uma bancada ótica seguindo as recomendações do fabricante, através de uma lâmpada de calibração de fabricação da Oriel de 200 W de potência, modelo 63335, para calibração na faixa espectral de 250 a 2400 nm.

3.1.3. Sistema de aquisição de dados

A aquisição dos dados nas unidades de monitoramento ambiental é realizada por um *datalogger*. O *datalogger* possui diversas entradas, onde os sensores são conectados. O *datalogger* lê o sinal dos sensores, faz o processamento do sinal, digitaliza o e armazena em sua memória, gerando assim uma tabela de dados. Neste trabalho utilizamos *dataloggers*, da marca Campbell, modelo CR1000, e um sistema de aquisição de dados desenvolvido pelo LAS, modelo DataRAD, fabricado pela empresa Orbital Engenharia LTDA em São José dos Campos. O objetivo de usar o DataRAD foi testá-lo, por comparação com os existentes no mercado.

3.1.3.1. CR1000

O CR1000 é um dispositivo de aquisição de dados muito versátil. Ele é capaz de ler e fornecer dados da maioria dos sensores ambientais disponíveis no mercado. Ele possui 8 entradas de tensão diferencial ou 16 entradas de tensão simples, com escalas variáveis de 2,5 mV, 7,5 mV, 25 mV, 250 mV, 2,5 V e 5 V. O erro associado à todas escalas não ultrapassa 0,12 % da escala. Além disto, o CR1000 também possui entradas digitais e contadores de pulso. Ele também possui saídas de alimentação de 5 V e 12 V. A periodicidade de aquisição é programável, e o dispositivo necessita de uma alimentação entre 9,6 e 16 Vdc. O CR1000 possui uma memória interna de 4 Mb e se conecta a um terminal utilizando conexão via cabo RS-232 ou rádio. A Figura 3.32 mostra o CR1000, utilizado nas unidades de monitoramento.



Figura 3.32 - Datalogger CR1000 de fabricação da Campbell Sci.

3.1.3.2. DataRAD

O DataRad é um dispositivo de aquisição de dados, desenvolvido especialmente para atender as necessidades de engenheiros e pesquisadores da área de energia solar e pode ser utilizado para adquirir, processar e armazenar sinais proveniente de diversos tipos de sensores de radiação e

outros. Ele foi projetado e desenvolvido pelo laboratório de Células Solares do LAS / INPE com transferência da tecnologia para Orbital Engenharia. A Orbital Engenharia é uma empresa nacional do setor aeroespacial especializada em energia solar, situada em São José dos Campos-SP. O DataRad pode operar de forma remota, sem assistência e é capaz de suportar as intempéries da operação em campo. Este dispositivo de aquisição dados tem resolução de 12 bits, memória interna de 1 Mb e é capaz de adquirir e armazenar dados simultaneamente de quatro radiômetros e dois termopares, durante mais de um ano na menor periodicidade. As entradas para o radiômetro permitem operação nas escalas de 25 mV, 50 mV, 100 mV, 200 mV, 500 mV, 1 V e 2 V. A periodicidade de aquisição pode ser ajustada para 1, 5 ou 10 minutos. O dispositivo necessita de uma alimentação entre 9 e 15 Vdc. O DataRad pode se conectar a um microcomputador via cabo USB. Os dados podem ser coletados através de uma comunicação direta com um ou através de transferência direta para um dispositivo de memória flash (Pen Drive). A Figura 3.33 mostra uma foto do DataRAD utilizado neste trabalho..



Figura 3.33 - Sistema de aquisição de dados: DataRAD.

3.1.4. Sistema de transmissão de dados

O sistema de transmissão de dados cria uma conexão entre a unidade de monitoramento ambiental e um computador. Este sistema recolhe os dados armazenados do *datalogger* e os transmite até um terminal (computador), para que seja feita a análise por um usuário. Neste trabalho, foram utilizados dois tipos diferentes de dispositivos de transmissão de dados, um rádio modelo RF 401 de fabricação da Campbell Sci e um transceptor RS232 de fabricação da FlexMedia.

3.1.4.1. Radio Campbell

O rádio utilizado para a comunicação é o modelo RF 401, de fabricação da Campbell Scientific, que opera numa frequência de 915 MHz. Quando conectado diretamente a um *datalogger* da Campbell, através de um cabo RS232 adaptado (CS I/O), o datalogger fornece alimentação ao rádio. Para transmissão de dados via rádio entre a unidade de monitoramento ambiental e receptor instalado em um microcomputador no laboratório de energia solar foram instaladas antenas do tipo Yagi 900 MHz e 9 dBi. O protocolo utilizado na comunicação é o PakBus, desenvolvido pela Campbell Scientific e visa facilitar a comunicação entre os dispositivos e o terminal, evitar interferência com outros sistemas e perda de dados. A Figura 3.34 mostra um rádio RF401 de fabricação da Campbell Sci. utilizado.



Figura 3.34 - Rádio RF401 de fabricação da Campbell Sci.

3.1.4.2. Transceptor RS232

O transceptor RS232 utilizado neste trabalho foi o modelo MCSF, da marca FlexMedia representado na Figura 3.35. O MCSF cria uma conexão sem fio entre duas portas seriais RS-232. Isto permite isolar eletricamente o sistema e transmitir os dados a uma distância de aproximadamente 70 m (FLEXMEDIA, 2012). Esta distância é maior se comparado à conexão com cabo que pode ser de no máximo 15 m, com a mesma taxa de transmissão de dados (19600 kbps). O MCSF utiliza uma fonte de alimentação entre 5 Vdc e 30 Vdc e trabalha numa frequência de 2.4 GHz. Uma limitação deste dispositivo é o tamanho dos pacotes de dados que não podem exceder 512 bytes.



Figura 3.35 - Transceptor RS232 de fabricação da FlexMedia.

3.2. Aquisição e análise dos dados ambientais

Todos os dados gerados pelas unidades de monitoramento ambiental foram enviados a um terminal (microcomputador) onde foram processados e analisados. O período de leitura dos dados foi definido como sendo de 15 s, e o armazenamento dos dados gerados é uma média realizada a cada 1 min, 5 min

e 30 min. O período de aquisição dos dados não possui recomendações das agências competentes, variando para cada tipo de aplicação e usuário. Os arquivos foram divididos por dia e nomeados com a data em que foram gerados, através de uma rotina criada, com o código que pode ser visto no Apêndice A.

3.2.1. Condições ambientais dos dados utilizados

A análise dos dados foi considerada para três condições: dia ensolarado, dia parcialmente nublado, dia nublado. Na Figura 3.36 podemos observar um gráfico com as três curvas de radiação solar global, medidas através de um radiômetro modelo CM11, para estas três condições. Como dias ensolarados foram considerados dias em que não havia nuvens visíveis no céu durante o intervalo de aquisição dos dados.

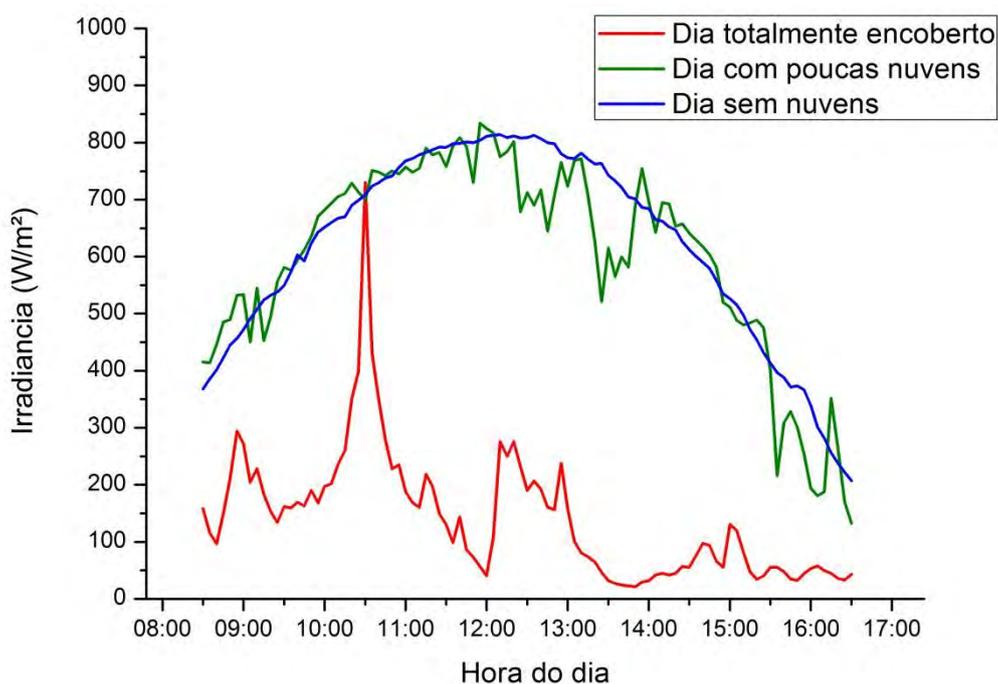


Figura 3.36 – Condições ambientais registradas.

Os dias parcialmente nublados foram dias em que havia poucas nuvens, portanto os períodos de sol predominavam. Esta condição é representada na

Figura 3.36 pela curva de radiação solar de linha verde, onde se percebe variações da radiação solar no gráfico, gerado pela presença das nuvens. Os dias nublados foram os dias em que quase não houve períodos de sol, onde o céu ficou encoberto de nuvens na maior parte do tempo, predominando a radiação solar difusa. Esta condição é representada na Figura 3.36 pela linha vermelha.

3.2.2. Aquisição do espectro solar

As medidas do espectro solar foram coletadas durante os meses de outubro e novembro de 2012 através da torre 2. O espectro foi coletado a cada 30 min pelo espectrofotômetro, com um tempo de integração de 200 ms, e a curva armazenada foi obtida da média de 15 medidas. A faixa espectral medida estava limitada a capacidade do espectrômetro e foi de 200 a 1100 nm. Os espectros foram coletados na maioria das vezes das 06h00 as 18h00. A aquisição dos espectros foi realizada de forma manual devido ao fato do espectrofotômetro não ser de uso exclusivo deste projeto. Mas a automatização do sistema de coleta do espectro solar foi estudada e poderá ser utilizada futuramente.

3.2.3. Análise dos dados

Foram realizados três estudos a partir dos dados gerados pelas unidades de monitoramento ambiental. O primeiro estudo está relacionado à influência da temperatura e umidade relativa do ambiente, pressão e velocidade do vento nas diferenças de medidas de radiômetros fotovoltaicos. O segundo estudo está relacionado à análise da influência da variação espectral e o terceiro estudo foi o teste e análise de funcionamento em campo do radiômetro desenvolvido no LAS.

O primeiro estudo foi o da influência das variáveis ambientais nas medidas de irradiância solar por um radiômetro fotovoltaico foi realizada com dados obtidos no período de 17 de maio a 15 de novembro de 2012. Neste estudo foram

comparados os dados de irradiância medidos pelo radiômetro fotovoltaico da Kipp & Zonen modelo SP-Lite com dados de irradiância medidos pelo radiômetro de termopilha, Kipp & Zonen, modelo CM11, utilizado como padrão de referência. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar, pressão e velocidade do vento utilizados na análise foram coletados na mesma torre onde foram obtidos os dados de radiação. O estudo realizado calculou os coeficientes de correlação linear entre variáveis ambientais como umidade relativa, temperatura ambiente, velocidade do vento e pressão atmosférica. Este estudo visa obter correlações entre as diferenças de irradiância registradas nas medidas de radiômetros fotovoltaicos e térmicos.

O segundo estudo foi o da influência da variação espectral no comportamento dos radiômetros fotovoltaicos foi estudada no período de 03 de outubro até o dia 22 de novembro de 2012. Para este estudo, foram utilizadas as aquisições dos espectros obtidas através do espectrômetro modelo 2048 da marca GetSpec. Também foi utilizada neste estudo a resposta espectral de um radiômetro fotovoltaico desenvolvido pelo LAS. A resposta espectral do sensor foi obtida no sistema de resposta espectral do laboratório de Energia solar do LAS/INPE (FERREIRA, et al., 2012). A análise comparou os espectros obtidos da radiação solar e a resposta espectral do sensor desenvolvido no LAS. A resposta espectral de um radiômetro é a sensibilidade que o sensor possui para uma determinada faixa espectral. O produto do espectro medido com a resposta espectral do radiômetro fornece o espectro aproveitado pelo radiômetro LAS. Foram realizadas análises da integral do espectro aproveitado em função da hora do dia e das condições temporais.

O terceiro estudo consistiu na análise do comportamento em campo do radiômetro desenvolvido no LAS com objetivo de verificar a sua degradação e o seu comportamento para diversas condições de irradiância solar. Para estes estudos foram comparados os dados de irradiância obtidos no sensor em testes e no sensor referência entre os dias 17 de maio a 15 de novembro de 2012. O sensor de referência utilizado foi um piranômetro de termopilha Kipp &

Zonen modelo CM11, devidamente calibrado no laboratório de Instrumentação Meteorológica (LIM) no INPE em Cachoeira Paulista, SP.

3.3. Sistemas de caracterização de dispositivos fotovoltaicos

Como parte deste trabalho está relacionada ao estudo do comportamento de sensores de radiação solar, principalmente o estudo em campo dos sensores desenvolvidos no próprio laboratório, tornou-se importante a caracterização detalhada destes sensores para uma maior compreensão de seu comportamento e uma análise após a instalação em campo, com o objetivo de verificar a degradação que as intempéries do ambiente causaram aos sensores. A comparação dos resultados antes e depois da instalação em campo dos sensores permitiu identificar em quais pontos ocorreu maior degradação do sensor, permitindo assim propor modificações para melhorar ainda mais a qualidade dos radiômetros.

Para este estudo foram utilizados além das unidades de monitoramento ambiental, a infraestrutura de caracterização de sensores e matérias do LAS. O grupo de Célula Solar (CELSOL) do LAS/INPE conta com três sistemas de caracterização de dispositivos fotovoltaicos e sensores de radiação: um sistema que permite medir a curva corrente por tensão característica de um dispositivo fotovoltaico, um sistema de medida de resposta espectral e um sistema de medida de resposta angular para sensores de radiação. Estes sistemas foram qualificados para diferentes tipos de elementos sensores fotovoltaicos (PAES, 2012).

3.3.1. Sistema de curva I x V

O sistema de curva de corrente por tensão tem como principal componente um simulador solar de 1000 W, marca ORIEL, modelo 81193, equipado com uma lâmpada de arco curto de xenônio de emissão contínua com fluxo de saída colimado e uniforme de 6 x 6" (152 x 152 mm), modelo 6271. A potência do fluxo pode ser ajustada para até 25% da potência total do simulador através

da combinação entre a potência da fonte de alimentação e ajustes no sistema óptico, sendo ângulo de colimação de $\pm 3^\circ$ (Oriell Instruments, 1996). Ele é capaz de reproduzir os espectros AM0 e AM1.5G e foi concebido para caracterização de células solares de silício de uso espacial e terrestre. O sistema é representado pela Figura 3.37.

Dois multímetros são utilizados para medida da corrente (I) e da tensão (V) do dispositivo fotovoltaico em teste, marca HP (Hewlett Packard), modelo 3478A de 5½ dígitos de resolução que permitem medir tensões de até 100 mV na escala de 30 mV e correntes com resolução de 1 μ A na menor escala. Como carga dinâmica para os dispositivos em testes é utilizado uma fonte programável da Hewlett-Packard (HP), modelo 6632A (0 - 20V/0 - 5A). O sistema possui também para aquisição de dados uma placa GPIB acoplada a um microcomputador tipo PC.



Figura 3.37 - Sistema de curva I x V.

Uma caracterização recente do simulador solar mostrou que a não uniformidade do feixe é de 2,27 % para uma área de trabalho de 152 x 152 mm² e de 1,70 % para uma área de trabalho de 76 x 76 mm². A instabilidade temporal é de 1,41 % após 30 minutos. Segundo as normas atuais para este tipo de dispositivo, este simulador pode ser classificado como CBA para uma área de trabalho de 152 x 152 mm² e como CAA para uma área de trabalho de 76 x 76 mm² (PAES, 2012).

3.3.2. Sistema de resposta espectral

A resposta espectral de um dispositivo fotovoltaico ou de um sensor de radiação descreve a sua capacidade em converter a radiação incidente em corrente elétrica em função do comprimento de onda. Podemos definir a resposta espectral absoluta de um dispositivo (célula solar, fotodiodo ou radiômetro) como sendo a razão entre a densidade de corrente gerada pelo dispositivo na condição de curto circuito (A/cm²) e a irradiância incidente (W/cm²) em função do comprimento de onda (FERREIRA, et al., 2012) e (PAES, 2012). A caracterização espectral de células solares e sensores de radiação é fundamental para determinar a sua responsividade espectral e outros aspectos importantes de sua estrutura como, por exemplo, comprimento de difusão de portadores minoritários, os efeitos da profundidade da junção e o efeito da camada anti-refletora. Também é possível a partir da resposta espectral de um dispositivo fotovoltaico ou sensor solar determinar a sua corrente máxima para diferentes espectros da radiação incidente.

Na Figura 3.38 podemos observar um diagrama esquemático do sistema de caracterização espectral disponível no Laboratório de Células Solares do LAS. O principal componente deste sistema é um monocromador (Oriel 77200) que possui distância focal de 250 mm e grade de difração de 1200 linhas/mm reproduzindo comprimentos de onda de 300 a 1100 nm.

A fenda de saída do monocromador tem largura ajustável até 3 mm e altura até 12 mm e a dispersão linear é 2,86 nm/mm. Como fonte de radiação para este

o sistema é utilizado uma lâmpada halógena de tungstênio (QTH) de 250W da Newport (modelo 6334NS) e a ótica do sistema é formada por um espelho plano de primeira superfície (100 x 100 mm²), uma lente plano-convexa ($\phi = 75$ mm, $f = 145$ mm) e filtros passa alta para inibir espectros de segunda ordem na saída do monocromador. O sinal na saída do dispositivo em teste é medido por um multímetro de 6½ dígitos (Agilent- 34401A) com precisão de $\pm 0,0035$ % DC.

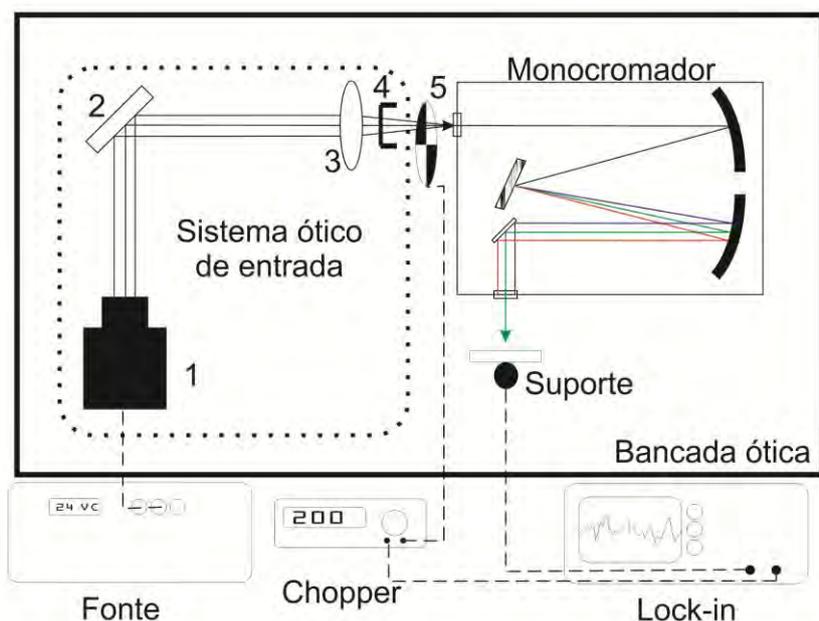


Figura 3.38 - Sistema de resposta espectral (1) Fonte de radiação (2) espelho plano (3) lente plano-convexa (4) suporte para filtros (5) chopper.

Para caracterização espectral de dispositivos que apresentam sensibilidade baixa para determinadas faixas espectrais é possível utilizar um amplificador especial, “lock-in” (SR850-DSP) em conjunto com um “chopper” ótico como representado na Figura 3.38. A Figura 3.39 mostra o sistema de resposta espectral do laboratório, onde (1) é a fonte, (2) o espelho, (3) o chopper, (4) o monocromador, (5) o suporte do sensor e (6) o sistema de aquisição.

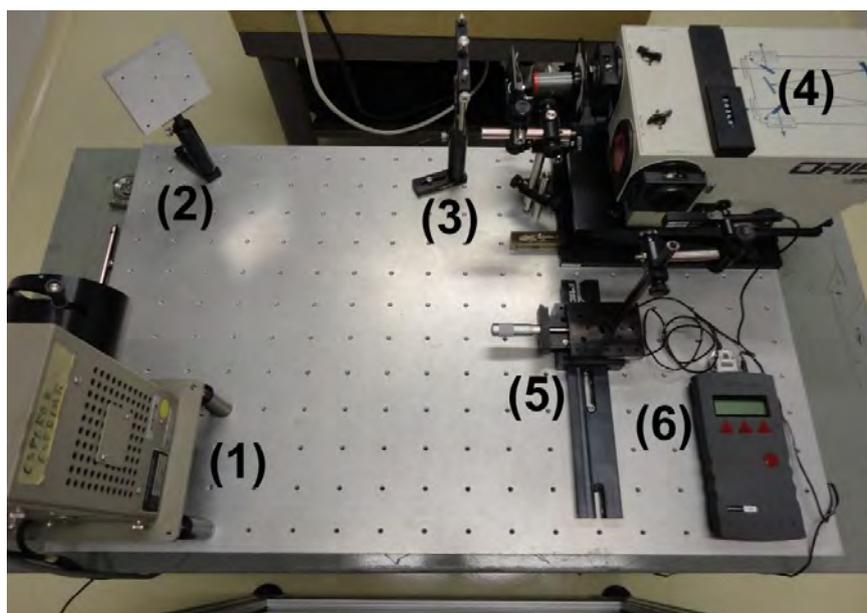


Figura 3.39 - Foto do sistema de caracterização espectral montado no laboratório.

3.3.3. Sistema de resposta angular

Os sinais medidos pelos sensores de radiação solar são afetados por vários tipos de erros, por exemplo, ruído elétrico, luz espúria, offset na eletrônica, degradação da ótica, resposta não linear do detector e desvio da resposta em relação à lei dos cossenos da ótica de entrada (BERNI, 2010). É bem conhecido que os sensores utilizados para medidas de irradiância global não apresentam uma perfeita resposta à lei dos cossenos (MICHALSKY, et al., 1995). Esta resposta piora com o aumento do ângulo de incidência, devido principalmente ao aumento da reflexão especular para ângulos grandes, por isso, medidas de irradiância solar global ou direta ao longo do dia estão sujeitas a erros em relação à lei dos cossenos da ótica de entrada do sensor (BERNI, et al., 2010).

O sistema de caracterização de resposta angular permite determinar o comportamento de um sensor em função da variação do ângulo de incidência da radiação. Um sensor de radiação solar ideal deve ter o sinal de saída proporcional ao cosseno do ângulo de incidência da radiação. Desvios da

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

A Figura 3.40 mostra o comportamento ideal de um sensor em função do ângulo de incidência da radiação. Como a radiação solar que incide na superfície da Terra muda constantemente o ângulo de incidência devido à rotação do planeta, os dispositivos de medidas dessa radiação precisam possuir uma boa resposta independente do ângulo de incidência da radiação, segundo a lei dos cossenos (MICHALSKY, et al., 1995).

O sistema de medida de resposta angular é composto por uma bancada óptica, uma fonte de radiação, um sistema ótico para a colimação do feixe da radiação, um suporte para o elemento sensor que permita um deslocamento angular de -90° a $+90^\circ$ e um multímetro de precisão utilizado para medida do sinal do sensor.

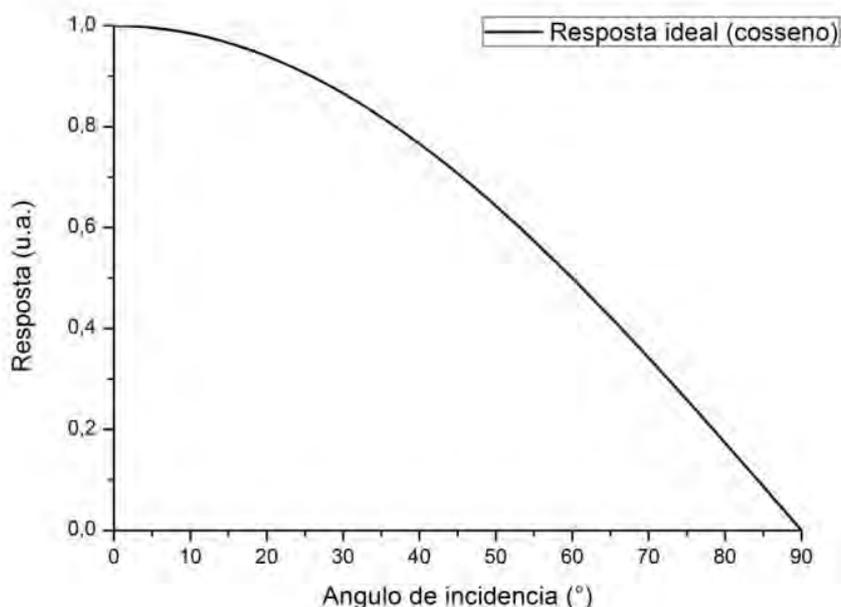


Figura 3.40 - Resposta ideal de um sensor de radiação em função do angulo de incidência.

A fonte de radiação é uma lâmpada de descarga de alta pressão de Mercúrio e Xenônio de 500W (Newport 66142). Neste sistema, o feixe da radiação 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. Na Figura 3.41 temos uma representação gráfica do sistema de medida de resposta angular do grupo CELSOL do LAS/INPE.

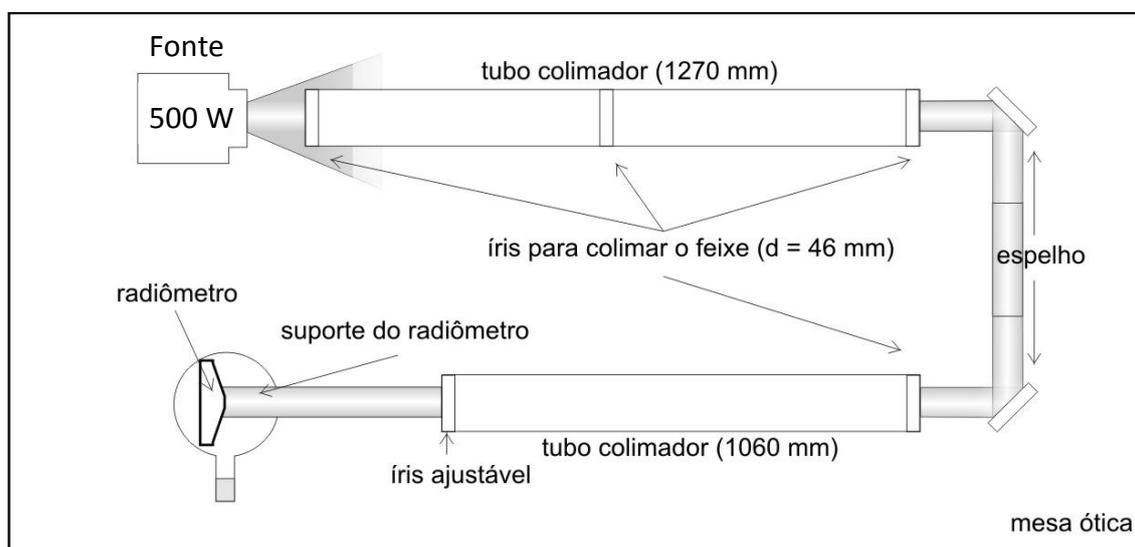


Figura 3.41 - Sistema de medidas da resposta angular.

3.4. Análise da variação espectral

O espectro solar incidente na superfície terrestre varia constantemente o seu perfil e a sua intensidade. As condições atmosféricas, como a presença de nuvens, umidade relativa, temperatura ambiente, concentração de gases e até a densidade de aerossóis variam ao longo do dia e alteram o perfil do espectro em regiões distintas. Um elemento sensor de silício responde de forma não linear para fótons na região compreendida entre 400 e 1100 nm. Este experimento teve como objetivo verificar, a partir de espectros solares medidos ao longo de algumas semanas, o erro que a variação no perfil do espectro causa em medidas realizadas por elementos sensores de silício.

A curva do espectro solar é descrita pela potência por unidade de área incidente em função do comprimento de onda da radiação, onde a integral desta função representa a irradiância incidente, ou seja, a potência por unidade de área. Seja $P(\lambda)$ a função do espectro solar e $R(\lambda)$ a resposta espectral de um dispositivo, medida em laboratório através do sistema de medida da resposta espectral descrito no capítulo 3.3.2, então a porção espectral perceptível para um dispositivo será dado pela Equação 3.1:

$$\varphi(\lambda) = P(\lambda).R(\lambda) \quad 3.1$$

Para este trabalho, $P(\lambda)$ e $R(\lambda)$ foram normalizados, para que pudéssemos analisar apenas o perfil do espectro perceptível, sem que a intensidade interferisse. A potência total aproveitada pelo dispositivo será a área sob a curva de $\varphi(\lambda)$, ou seja, a integral dada pela Equação 3.2.

$$\Phi = \int_{\lambda_0}^{\lambda_f} \varphi(\lambda).d\lambda \quad 3.2$$

Para realizar a análise da eficiência de painéis solares e erros ocasionados devido ao descasamento espectral, é utilizada a energia disponível para um dispositivo no espectro solar padrão, ou naquele no qual o dispositivo foi submetido à calibração. Seja Φ_{CAL} a potência total aproveitada pelo dispositivo quando exposto ao espectro de calibração ou ao espectro solar padrão e pode ser obtido pela Equação 3.3.

$$\Phi_{CAL} = \int_{\lambda_0}^{\lambda_f} \varphi_{CAL}(\lambda).d\lambda \therefore \varphi_{CAL}(\lambda) = P_{CAL}(\lambda).R(\lambda) \quad 3.3$$

Onde $P_{CAL}(\lambda)$ é a função do espectro de calibração ou do espectro padrão. Podemos definir o fator de descasamento espectral como sendo T , calculado pela Equação 3.4.

$$T = \frac{\Phi}{\Phi_{CAL}} \quad 3.4$$

Para a análise do descasamento espectral neste trabalho, o fator T foi descrito através de uma matriz, representada na Equação 3.5.

$$T_{ij} = \frac{\Phi_{ij}}{\Phi_{CAL}} \therefore \begin{cases} i = data \\ j = hora \end{cases} \quad 3.5$$

Onde T_{ij} são os elementos da matriz. O índice i corresponde à data na qual o espectro foi medido e o índice j corresponde à hora em que foi realizada a aquisição do espectro. Assim, a matriz de fatores, F, pode ser escrita como mostrado na Equação 3.6.

$$F_{i,j} = \begin{bmatrix} T_{11} & \dots & T_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{i1} & \dots & T_{ij} \end{bmatrix} \quad 3.6$$

Desta maneira, a análise dos fatores pode ser realizada de forma mais fácil, pois a matriz permite uma melhor visualização dos resultados.

4 RESULTADOS

Este capítulo foi dividido em três partes, sendo que a primeira parte descreve as instalações das unidades de monitoramento ambiental, a segunda parte traz os resultados da avaliação funcional realizada com os radiômetros LAS, incluindo a análise da variação espectral e da dependência da temperatura e umidade relativa e a terceira parte apresenta as correlações entre as diferenças nas medidas de irradiância e as variáveis ambientais.

4.1. Unidades de monitoramento ambiental

Para a realização dos testes dos radiômetros, medidas espectrais e dependências da temperatura e umidade relativa, foram instaladas três unidades de monitoramento ambiental dentro das dependências do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, em São José dos Campos – SP, em locais pré-determinados após uma análise cuidadosa do local, de acordo com a disponibilidade oferecida. A localização das unidades pode ser vista na Figura 4.42.



Figura 4.42 - Localização das unidades instaladas dentro do INPE.
Fonte: Adaptado de GOOGLE (2012).

Todas as unidades de monitoramento ambiental instaladas possuem um painel solar de fabricação da Kyocera, de 20 W de potência e área de 0,4 m², conectados a um módulo gerenciador de carga. O gerenciador de carga está conectado a uma bateria seca (NiCd) de 26 Ah e 12 V. As unidades também possuem uma caixa ambientalmente selada, onde ficam instalados o sistema de aquisição e transmissão de dados, o gerenciador de carga, a bateria e alguns sensores que necessitam de proteção das intempéries do ambiente. A Tabela 4.13 mostra quais são as recomendações atendidas pelas Unidades de Monitoramento Ambiental instaladas no INPE.

Tabela 4.13 - Recomendações atendidas pelas UMAs desenvolvidas.

Recomendações	Unidade 1	Unidade 2	Unidade 3
Localização	-	WMO	-
Pavimentação local	-	Não se aplica	WMO/EPA/AASC
Radiação solar	WMO/EPA/AASC	WMO/EPA/AASC	WMO/EPA/AASC
Temperatura e Umidade	EPA/AASC	Não se aplica	WMO/EPA/AASC
Pressão atmosférica	WMO/EPA/AASC	Não se aplica	WMO/EPA/AASC
Anemômetro	AASC	Não se aplica	WMO/EPA
Pluviômetro	WMO/EPA	Não se aplica	WMO/EPA/AASC

4.1.1. Unidade 1

A Unidade 1 foi instalada sobre uma caixa d'água, ao lado do Laboratório de Energia Solar no prédio do Circuito Impresso. A latitude da torre é de -23° 12' 41" e a longitude é de -45° 51' 32". Esta unidade possui uma torre de 3 m de altura e está equipada com diversos sensores de medidas ambientais. A transferência de dados desta unidade até o terminal, que fica situado no Laboratório de Células Solares - CELSOL é feita através de um transceptor RS 232. Os sensores instalados na torre são descritos na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Sensores instalados na Unidade 1.

Sensores instalados na Unidade 1:		Número de série
1	Radiômetro CM11	70255
2	Radiômetro SP-Lite	64168
3	Radiômetro LAS	106
4	Temperatura e umidade relativa	60568888
5	Pressão atmosférica	4960187
6	Precipitação	05391-1
7	Velocidade e direção do vento	M13006

O sistema de aquisição de dados utilizado nesta unidade é um datalogger modelo CR1000 e o sistema de transmissão de dados utilizado é um transceptor RS 232 modelo MCSF de fabricação da FlexMedia.

Devido à baixa potência de saída do sinal do transceptor RS 232, utilizamos uma antena externa do tipo direcional, de fabricação da Aquário com ganho de 16 dBi, instalada no telhado do laboratório, evitando assim perdas de pacotes de informação. Na torre, a antena instalada foi a mesma que acompanha o aparelho, uma antena omnidirecional de 5 dBi e frequência de 2.4 GHz. O tipo de antena omnidirecional transmite em todas as direções. A Figura 4.43 mostra a Unidade 1, já em operação.



Figura 4.43 - Unidade 1.

A Figura 4.43 mostra a visão norte da Unidade 1, cuja instalação foi finalizada dia 16 de maio de 2012. A rotina de programação da torre está apresentada no Apêndice B-1.

A precipitação total medida pela Unidade 1 está representada na Figura 4.44.

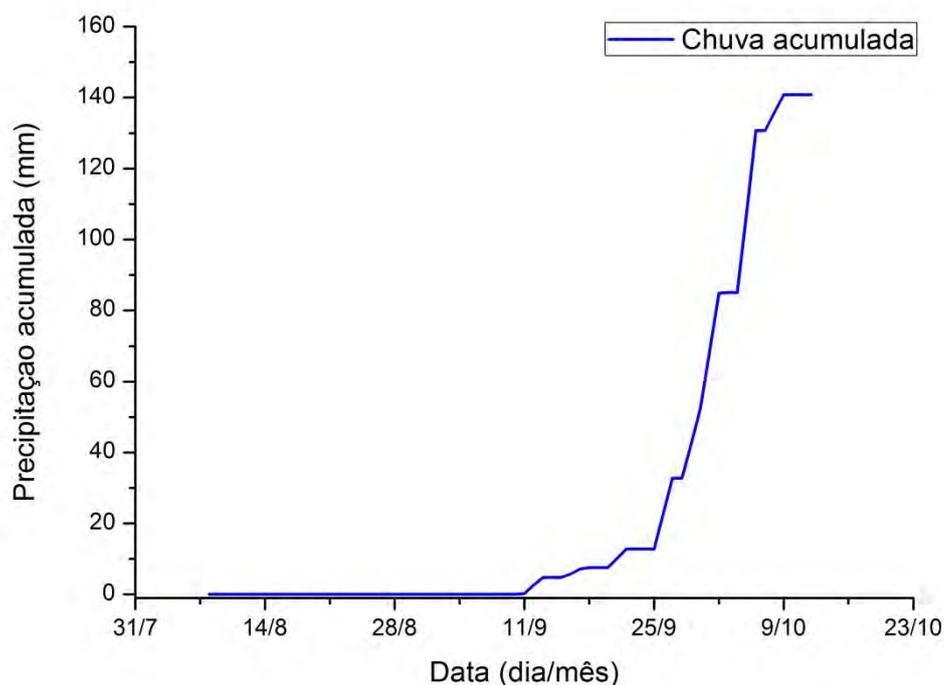


Figura 4.44 - Precipitação registrada pela Unidade 1.

Até o dia 15 de novembro de 2012, a precipitação acumulada registrada pela Unidade 1 foi de 140,75 mm. Através da Figura 4.44 é possível observar que no mês de setembro teve início o período de chuvas. Uma análise de dados durante um período maior é necessária para averiguar estas tendências. As temperaturas média diária, máxima e mínima registradas pela Unidade 1 no período de maio a novembro de 2012 são apresentadas na Figura 4.45.

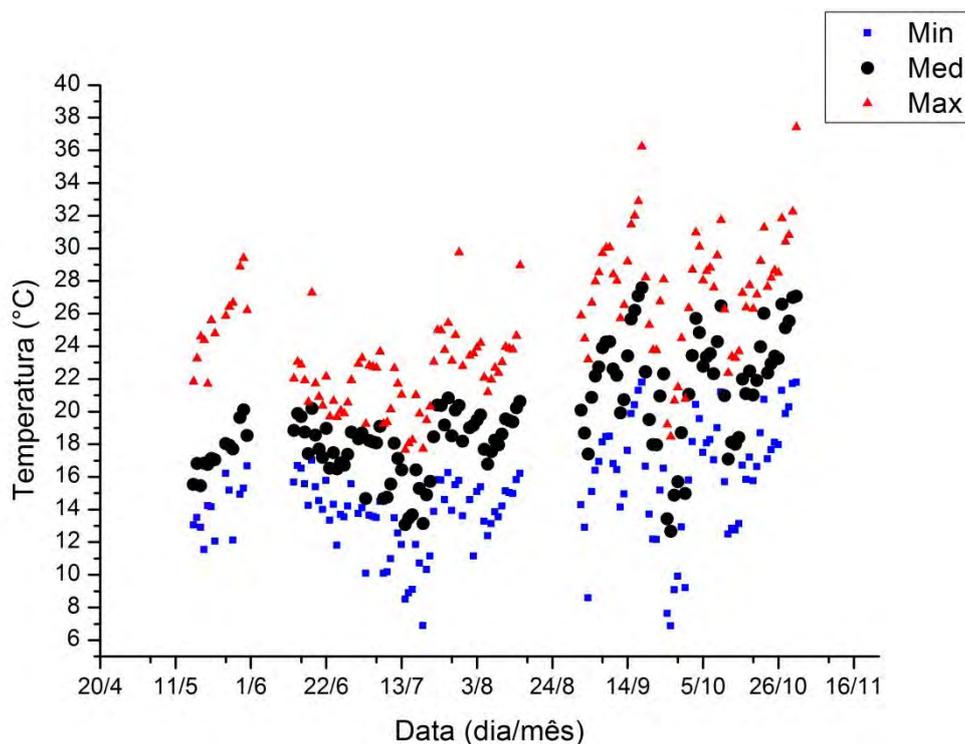


Figura 4.45 - Temperatura média, máxima e mínima diárias.

A menor temperatura registrada neste período foi de 6,9 °C, no dia 19 de julho às 06h10. Observa-se na Figura 4.45 o aumento gradual da temperatura média diária, compatível com a troca das estações. No início de outubro foram registrados cinco dias com médias de temperatura diárias abaixo do normal, causadas por uma frente fria vinda da Argentina (CPTEC, 2012).

A variação da umidade relativa diária é apresentada na Figura 4.46. Verifica-se uma diminuição gradativa do valor médio diário de umidade relativa no período analisado. Observando a Figura 4.46 e Figura 4.45, percebe-se que a umidade relativa e a temperatura média apresentam uma aparente correlação. O cálculo do coeficiente de correlação de Pearson (σ) foi feito para valores de temperatura e umidade relativa medidos num intervalo de 5 minutos durante o mesmo período de abrangência das médias, resultando em aproximadamente 12500 pontos registrados. O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida de como duas variáveis quantitativas se correlacionam (VUOLO, 1996).

O coeficiente (σ) pode assumir valores entre $-1 \leq \sigma \leq 1$. Em módulo, valores próximos de 1 significam que as variáveis possuem uma correlação muito forte entre si. O valor do coeficiente encontrado foi de aproximadamente $-0,8$, indicando uma correlação linear inversa muito boa entre estas duas variáveis.

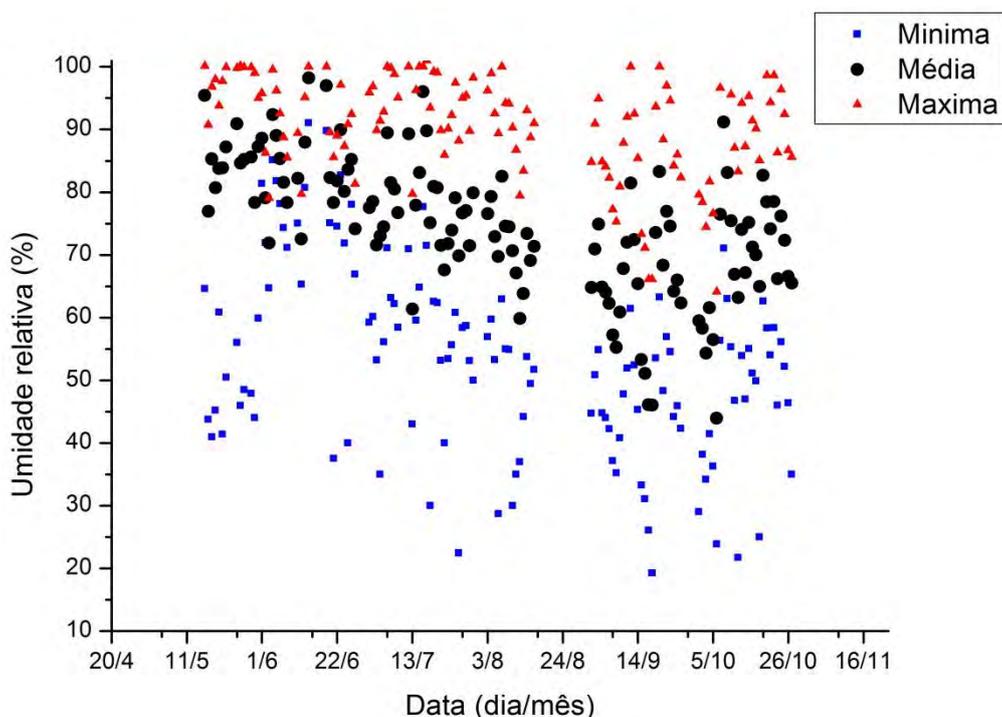


Figura 4.46 - Umidade relativa média, máxima e mínima diárias.

Durante este período a pressão média registrada foi de 946,82 mbar, com a mínima registrada de 934,20 mbar e máxima de 955,24 mbar. A velocidade do vento média foi de 3,2 km/h, com máxima de 13,1 km/h.

4.1.2. Unidade 2

A Unidade 2 foi instalada no telhado do prédio de Materiais. Próximo a este local, há algumas copas de árvores nas faces sudeste e noroeste, mas não interferiram nas medidas de forma perceptível. A latitude desta unidade é $-23^{\circ} 12' 31''$ e a longitude é $-45^{\circ} 51' 33''$. Para esta unidade foi utilizado uma torre de 3 m de altura onde estão instalados radiômetros fotovoltáicos, global e PAR. A

aquisição de dados nesta unidade foi feita através do dispositivo DataRAD. Na torre foi fixada uma haste com quatro suportes para quatro radiômetros, sendo que em um dos suportes foi instalado o terminal da fibra ótica. A Figura 4.47 mostra a visão da face sudoeste da unidade. A coleta dos dados desta unidade foi feita no próprio local sem transmissão de dados, o DataRAD permite utilizar um dispositivo de memória flash com conexão USB, *pendrive*, ou um computador portátil com um cabo USB.

A fibra ótica foi instalada de forma que uma das pontas ficou conectada ao terminal instalado na torre, conforme mostrado na Figura 4.48, e a outra ponta foi levada até a sala 51 do prédio de Materiais. Nesta sala foram instalados o sistema de aquisição de dados e dois espectrofotômetros.

Durante a aquisição de dados, no período de um mês, o DataRAD se mostrou um dispositivo muito versátil, há grande facilidade em programá-lo no local. A aquisição foi programada para ser realizada diariamente das 05h00 às 19h00. Fora deste período o DataRAD entra em modo de repouso e possui um consumo mínimo de energia, o que permite que a energia da bateria não tenha toda sua capacidade utilizada a curto prazo, garantido um longo período de operação sem radiação solar, como por exemplo, em períodos com vários dias de chuvas. O DataRAD apresentou uma excelente performance em termos de aquisição de dados no período em que o sistema esteve em operação, entretanto apresentou um pequeno problema interno, provavelmente relacionado ao conector de alimentação, de forma que o dispositivo não permaneceu ligado durante todo o processo de aquisição de dados em campo, causando falta de dados. Desta forma, optou-se por não utilizar os dados ambientais fornecidos por esta unidade neste trabalho.

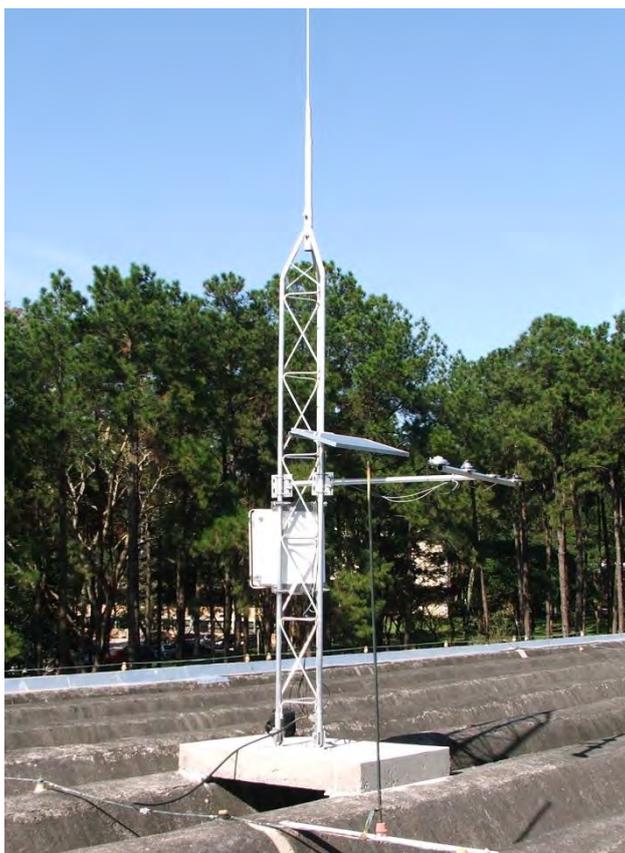


Figura 4.47 - Unidade 2.



Figura 4.48 - Terminal da fibra ótica instalado em campo.

O espectro solar foi coletado utilizando-se os espectrômetros descritos no capítulo anterior entre os dias 03 de outubro e 22 de novembro entre as 06h00 até as 18h00. Através dos espectros coletados, observa-se que ao meio dia o espectro possui os picos mais altos, ou seja, a irradiância neste horário é maior. Todos os espectros foram normalizados, a fim de conseguirmos analisar apenas a variação do perfil do espectro. A Figura 4.49 mostra um exemplo de espectro solar coletado neste período, ela se refere ao dia 20 de novembro de 2012.

O dia 20 de novembro apresentou pouca nebulosidade, tendo predomínio do sol ao longo de todo o dia e presença de nuvens no céu após as 15h25. A irradiância total registrada neste dia foi de 5,53 kW/m² com uma temperatura média de 20,7 °C, com máxima de 32 °C registrado às 15h10. Já a umidade relativa do ar média foi de 84 % variando entre 34 % e 97 %. Também neste dia houve registro de chuva durante a madrugada, totalizando 1 mm.

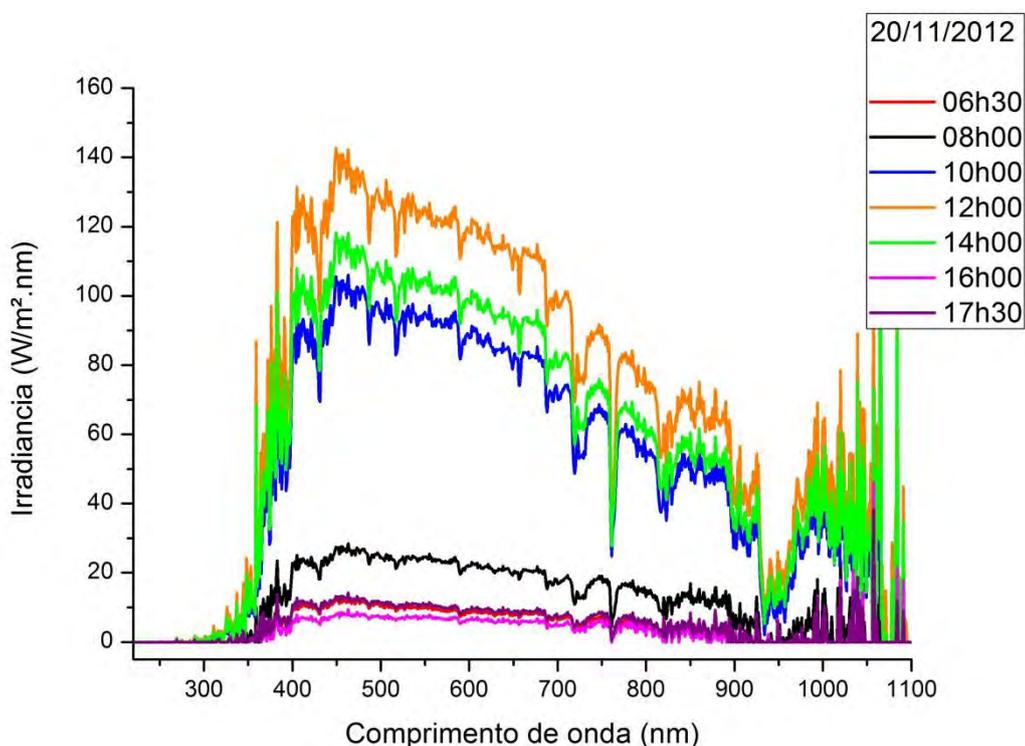


Figura 4.49 - Espectro solar coletado no dia 20 de novembro de 2012.

4.1.3. Unidade 3

A Figura 4.50 mostra a Unidade 3 que foi instalada próxima à portaria principal do INPE, em um local com piso coberto com grama e com poucas árvores nas proximidades. A latitude desta unidade é $-23^{\circ} 12' 27''$ e a longitude $-45^{\circ} 51' 42''$. Esta unidade possui uma torre de 10 m de altura e está equipada com diversos sensores de medidas ambientais e sua instalação atende a maioria das recomendações da WMO. Nesta unidade iniciou-se a coleta de dados no dia 07 de novembro de 2012. Os sensores instalados na Unidade 3 estão especificados na Tabela 4.15

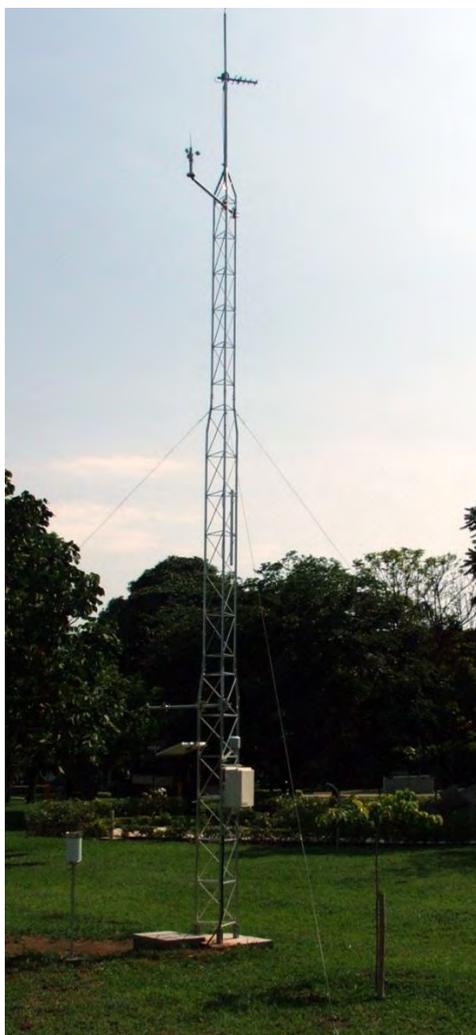


Figura 4.50 - Unidade 3, instalada próximo à portaria principal.

Tabela 4.15 - Sensores da Unidade 3.

Sensores instalados na Unidade 1:		Numero de série
1	Radiômetro SP Lite Global	64170
2	Radiômetro SP Lite PAR	45932
3	Temperatura e umidade relativa	60568887
4	Pressão atmosférica	4960188
5	Precipitação	05392-1
6	Velocidade e direção do vento	M13005

Esta torre utiliza como sistema de aquisição de dados um datalogger modelo CR1000 e a transmissão dos dados é feita através de um rádio transceptor modelo RF 401, ambos da marca Campbell Sci. A rotina de programação da Unidade está descrita no apêndice B-2.

A Unidade 3 realiza a transmissão dos dados via rádio através de uma antena instalada no alto de sua torre. A antena do rádio receptor está instalada na torre da Unidade 2, no prédio de Materiais e Sensores e é conectada ao rádio em uma sala dentro do prédio, através de um cabo de 15 m de comprimento. Os dados da Unidade 3 são adquiridos pelo CR1000 nos intervalos de 1, 5, 10 e 60 minutos e são enviados para Unidade 2 periodicamente e armazenados em um computador de mesa.

4.2. Avaliação funcional do radiômetro LAS

O radiômetro do LAS foi desenvolvido entre 2005 e 2008, passando, neste período, por vários testes em laboratório e também em campo. Recentemente um lote de quatro unidades destes radiômetros foi enviado para calibração no LIM em Cachoeira Paulista, onde se constatou uma pequena diferença de funcionalidade destes dispositivos ao longo do período de testes em campo quando comparado com radiômetros de referência. Quando se iniciou a análise

dos dados gerados pela Unidade 1, também se observou que o radiômetro do LAS apresentava algumas discrepâncias em suas medidas de irradiância global, quando comparadas com o radiômetro CM11 instalado na mesma torre. O CM11 é um radiômetro de termopilha da marca Kipp & Zonen que atende a norma ISO 9060 como padrão secundário. A partir destas constatações, buscou-se investigar a causa destas diferenças e propor soluções para aprimorar este radiômetro. A Figura 4.51 representa o diagrama de análise proposta para o radiômetro LAS.

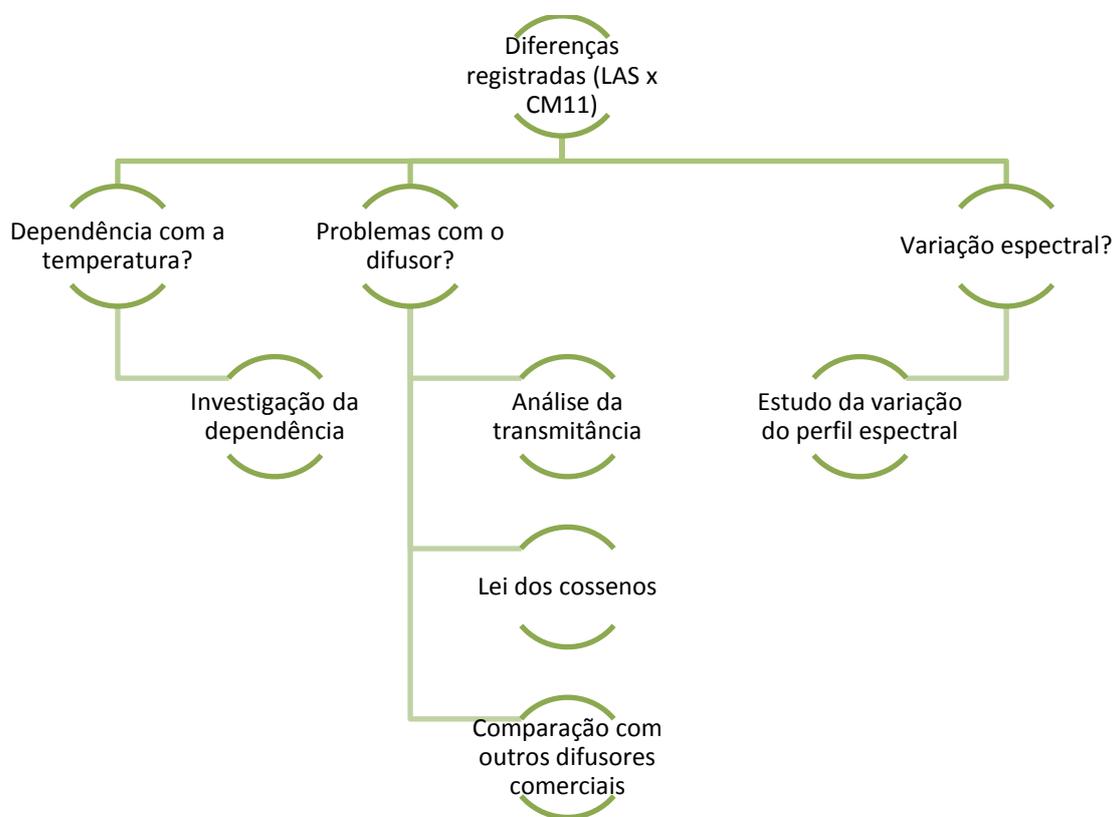


Figura 4.51 - Diagrama da análise realizada no radiômetro LAS.

As medidas de irradiância foram realizadas entre os meses de maio a dezembro de 2012. A primeira análise realizada foi a comparação entre o valor medido pelo padrão de referência e o valor medido pelo radiômetro LAS ao longo de um dia, a fim de identificar alguma discrepância de valores em função

da hora do dia. Para esta análise foram utilizados dados de irradiância solar somente de dias sem nuvens. A curva obtida, em módulo, está representada na Figura 4.52 e a distribuição das diferenças no histograma representado pela Figura 4.53.

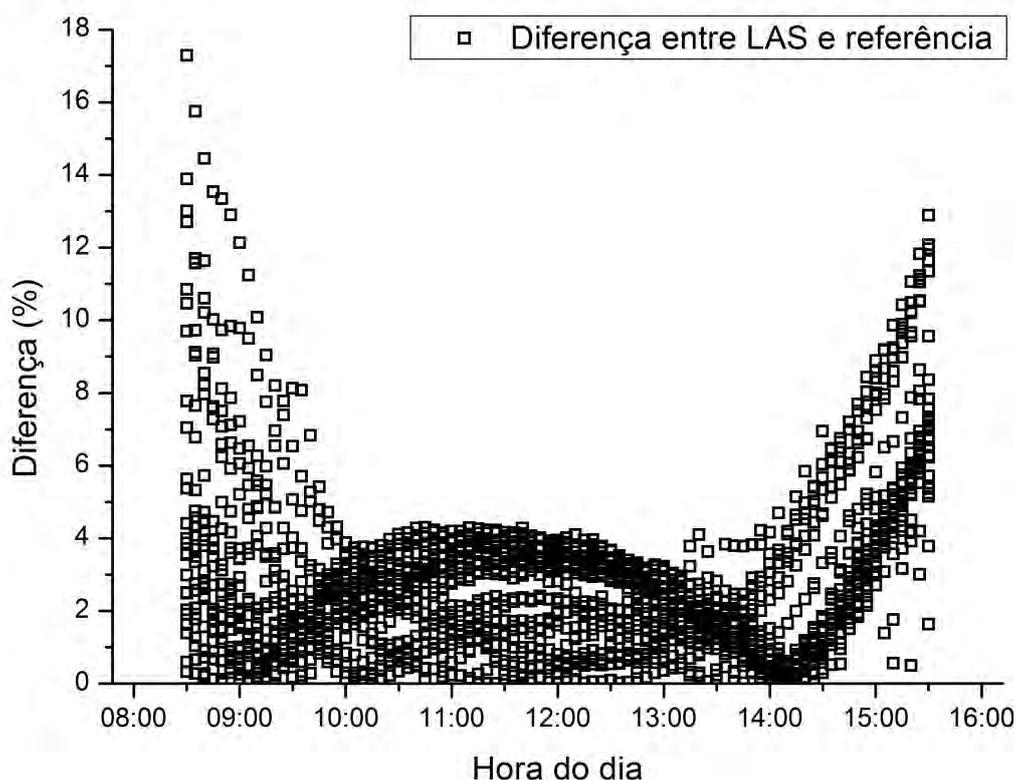


Figura 4.52 – Diferença, em módulo, registrada entre padrão de referência e o radiômetro LAS.

De acordo com os dados analisados e as diferenças apresentadas na Figura 4.53, cerca de 80 % dos valores medidos pelo radiômetro LAS apresentaram uma discrepância quando comparados com o padrão de referência CM11, que variou entre 0 e 4 %. Observou-se também que esta diferença apresentou um aumento ao longo dos meses de forma linear.

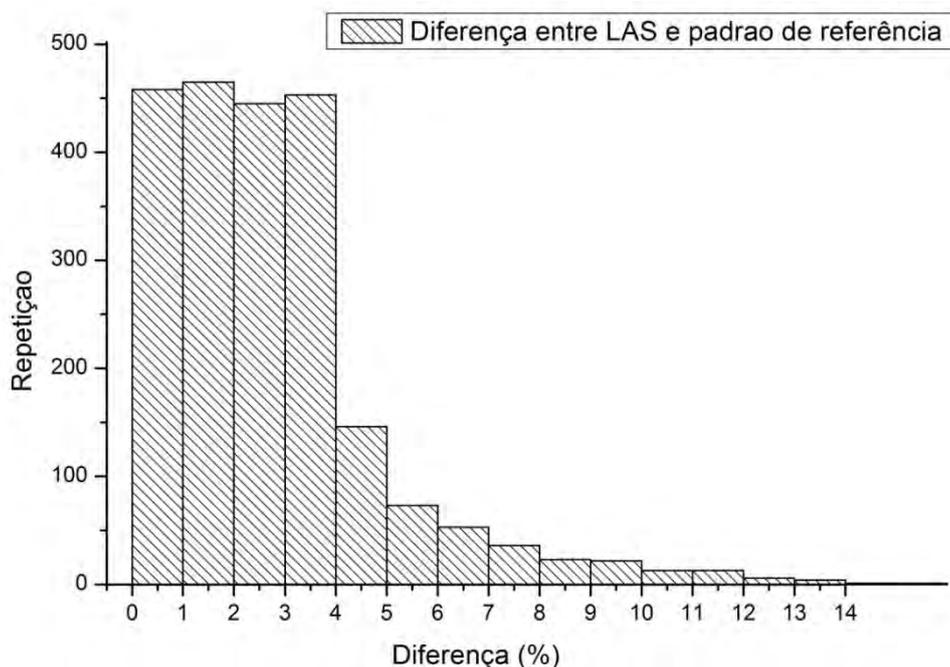


Figura 4.53 - Histograma das diferenças registradas.

4.2.1. O difusor do radiômetro LAS

Durante o período de aquisição dos dados observou-se que o radiômetro LAS apresentava uma queda constante e linear do sinal ao longo do tempo. Esta queda foi registrada pela primeira vez pelo LIM, de Cachoeira Paulista. Um lote com quatro unidades do radiômetro LAS foram enviadas para calibração no LIM e durante este período, foram realizados três processos de calibração. Em cada um deles os valores das constantes de calibração de todas as quatro unidades aumentaram gradativamente.

Este aumento na constante de calibração dos radiômetros indica que há uma degradação do sinal na saída do sensor. O sinal de saída do sensor está diminuindo e por isso há o aumento proporcional na constante de calibração, a fim de corrigir o valor medido. O difusor é a janela ótica de entrada da radiação solar e, se a sua transmitância estiver diminuindo gradativamente, o sinal de saída do sensor irá diminuir e conseqüentemente a leitura do sinal conterá erro se a constante de calibração não for corrigida.

A Figura 4.55 mostra o difusor do radiômetro LAS após três meses de operação. Pode-se observar que há um acúmulo de poeira sobre o difusor. Esse acúmulo de partículas pode impedir a entrada de parte da radiação solar, causando uma diminuição na intensidade do sinal. Para um melhor entendimento da superfície do difusor, foi realizada uma microscopia eletrônica de varredura (MEV), e o resultado é mostrado na Figura 4.56. É possível visualizar, com um aumento de 50 vezes, as ranhuras que o processo de fabricação imprimiu na superfície do difusor durante a confecção do mesmo. O aumento de 100 e 500 vezes não revelou porosidade do teflon, apenas rugosidades na superfície devidas ao acabamento.



Figura 4.55 - Difusor do radiômetro LAS após 3 meses de operação.

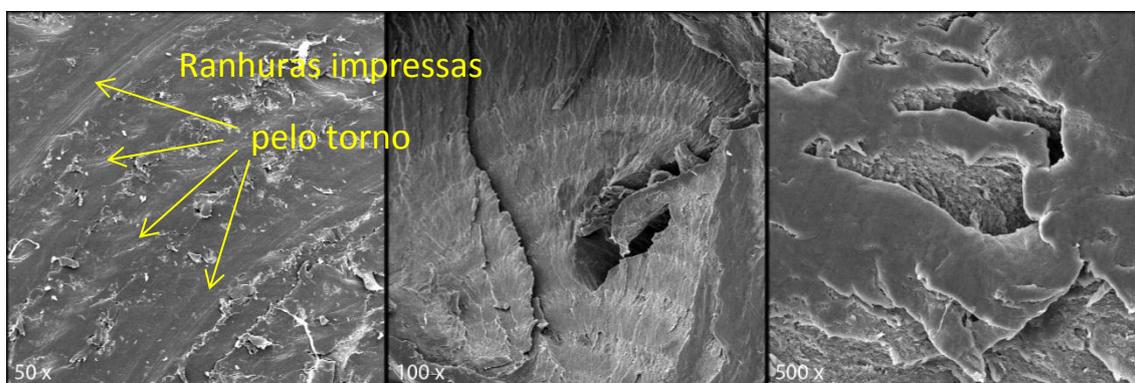


Figura 4.56 - MEV do difusor do radiômetro LAS (50, 100 e 500 vezes de aumento).

A ausência de poros no difusor elimina a hipótese de difusão de aerossóis no teflon. Porém a presença de rugosidade na superfície do difusor pode reter partículas, alterando a entrada da radiação. Desta forma, com o acúmulo de partículas ao longo do tempo na superfície do difusor ocorreu uma queda progressiva do sinal e um conseqüente aumento gradativo na constante de calibração.

O difusor utilizado, para medir a transmitância foi removido do radiômetro LAS, número de série 102, que estava em operação em campo desde março de 2009. O difusor de referência utilizado para comparação na análise da transmitância é um difusor novo e nunca foi exposto às intempéries da natureza. A medida de transmitância foi realizada em um espectrômetro de fabricação da Hitachi, modelo U-3501. Por se tratar de uma medida de transmitância total, utilizamos uma esfera integradora e uma máscara. A máscara foi utilizada para garantir que a radiação eletromagnética que atravessasse o difusor fosse admitida somente pela superfície que fica exposta a radiação solar. O resultado desta medida é mostrado na Figura 4.57.

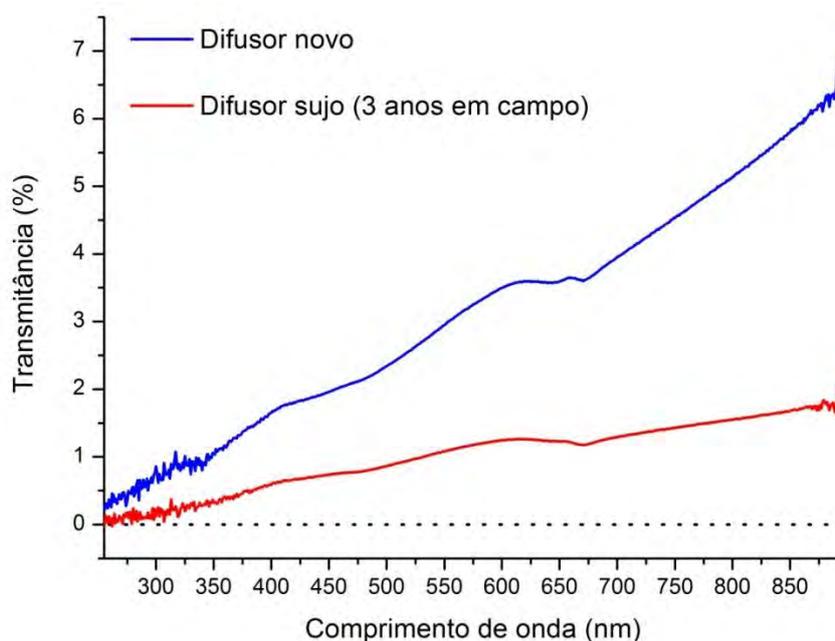


Figura 4.57 - Medida de transmitância do difusor LAS.

Observa-se uma queda na intensidade da radiação em todos os comprimentos de onda que atravessa o difusor que ficou exposto ao meio ambiente externo por meses, mas a curva mantém o mesmo perfil significando que a atenuação ocorrida foi a mesma para todos os comprimentos de onda. A média da razão entre as duas curvas é de 2,91, ou seja, o difusor que estava em campo transmite quase três vezes menos do que o difusor novo.

Provavelmente, as irregularidades na superfície do difusor permitiu o acúmulo de aerossóis, atenuando a radiação eletromagnética que atravessa o difusor e atinge o elemento sensor do radiômetro. No geral, os difusores instalados em radiômetros fotovoltaicos comerciais são de acrílico e tem sua superfície polida. Os difusores de acrílico possuem uma superfície mais lisa, o que impede a retenção de impurezas no difusor. Por outro lado, difusores confeccionados em acrílico apresentam limitação à transmitância do ultravioleta e não apresentaram uma boa resposta a lei dos cossenos (VILELA, 2010).

Alguns radiômetros comerciais que medem comprimentos de onda na região do ultravioleta utilizam difusores de teflon, protegidos por um domo transparente para a faixa espectral de trabalho do sensor, provavelmente de quartzo. Estes domos impedem que os aerossóis presentes na atmosfera se acumulem na superfície do difusor. A Figura 4.58 mostra detalhes de um radiômetro UV, que utiliza um difusor de teflon e um domo, também podemos observar nesta figura um radiômetro fotovoltaico comercial com um difusor de acrílico e o difusor do radiômetro LAS respectivamente.

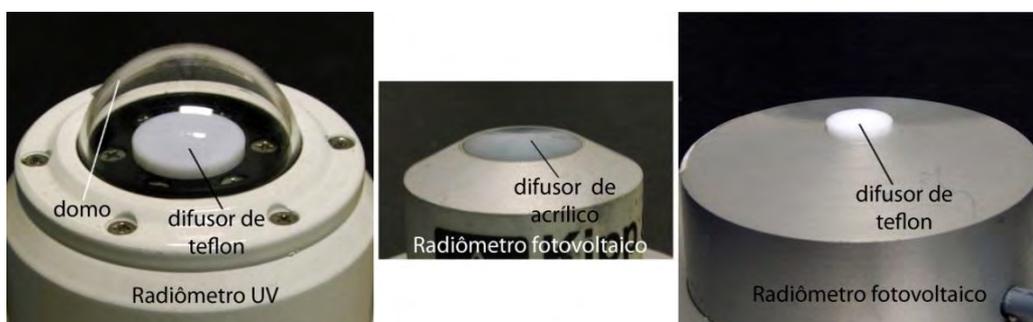


Figura 4.58 - Detalhes dos difusores de radiômetros comerciais e do radiômetro LAS.

Para evitar o acúmulo de impurezas no difusor do radiômetro LAS algumas medidas poderiam ser realizadas, como por exemplo, a melhoria do polimento na superfície do teflon que fica exposta ao meio ambiente ou a utilização de um domo transparente também pode evitar o acúmulo de aerossóis que aderem à superfície do teflon.

4.2.2. Dependência com a temperatura

Células solares e fotodiodos de silício possuem uma dependência do sinal de saída com a variação da temperatura. Para uma célula solar típica de silício, esta dependência é de 0,1 %/°C (WÜRFEL, 2005). Esta dependência está associada à variação da energia da banda proibida (BELOTO, et al., 2002). Considerando que o radiômetro desenvolvido no LAS utiliza como elemento sensor uma célula solar de silício monocristalino que apresenta uma dependência com a temperatura, decidiu-se realizar uma análise para verificar se esta dependência da temperatura afeta o sinal de saída do radiômetro e se esta dependência poderia ser causa dos erros detectados nas medidas da radiação solar.

Quando exposto diretamente ao Sol, um corpo absorve grande parte da energia incidente e a maior parte da energia incidente absorvida é transformada em calor. O radiômetro desenvolvido no LAS é confeccionado em alumínio naval e sua superfície é anodizada na cor natural do alumínio ou tingido na cor preta. O radiômetro quando exposto ao Sol durante sua operação absorve radiação aumentando a sua temperatura interna, com consequente aumento da temperatura do seu elemento sensor. Assim, o radiômetro LAS opera em diferentes temperaturas ao longo de um dia e ao longo das estações do ano. Para que os erros nas medidas de radiação solar não sejam significativos, prejudicando a qualidade dos radiômetros, o sensor não deve possuir dependência com a temperatura ou essa dependência deve ser a mínima possível. Para avaliar a dependência da temperatura do radiômetro desenvolvido no LAS utilizamos o sistema de caracterização I x V

de células solares adaptado para esta avaliação. Como fonte de radiação solar o sistema tem como principal componente um simulador solar de 1000 W de potência, de fabricação da Oriel, descrito no capítulo 3.3.1, um radiômetro LAS, um datalogger, modelo DaqPro, 16 bits, para aquisição da temperatura do elemento sensor e da tensão de saída e um sistema para variação da temperatura do radiômetro em teste constituído por uma célula peltier e sua fonte de alimentação.

Em um radiômetro LAS foi instalado um termopar no suporte onde fica instalado o seu elemento sensor. Este radiômetro LAS adaptado foi utilizado no experimento de dependência com a temperatura. O efeito peltier consiste em aplicarmos uma diferença de potencial nos terminais de uma liga metálica e obtermos, na junção, uma diferença de temperatura. Uma célula peltier, que opera de acordo com este princípio, foi instalada na base do radiômetro e conectada a uma fonte variável para ajustar a temperatura gradativamente no elemento sensor. Este aparato foi colocado sob o simulador solar a 130 mm da lente, na região onde o feixe possui a maior uniformidade.

O simulador solar foi ligado 40 minutos antes do experimento, para estabilizar. Desta forma, a incidência da radiação eletromagnética do simulador permaneceu constante durante as medidas realizadas no experimento. A variação da temperatura obtida no elemento sensor foi de 6 a 60 °C. A temperatura e a tensão de saída do radiômetro foram registradas pelo datalogger. O resultado é representado na Figura 4.59.

O resultado do experimento mostra uma dependência do sinal de saída com a temperatura. O coeficiente de correlação calculado para os dados obtidos é de aproximadamente -0,99, o que indica uma correlação inversa praticamente perfeita. Cada ponto no gráfico representa a média de 360 pontos experimentais medidos. A barra de erros associada a cada ponto representa a dispersão em torno do valor médio.

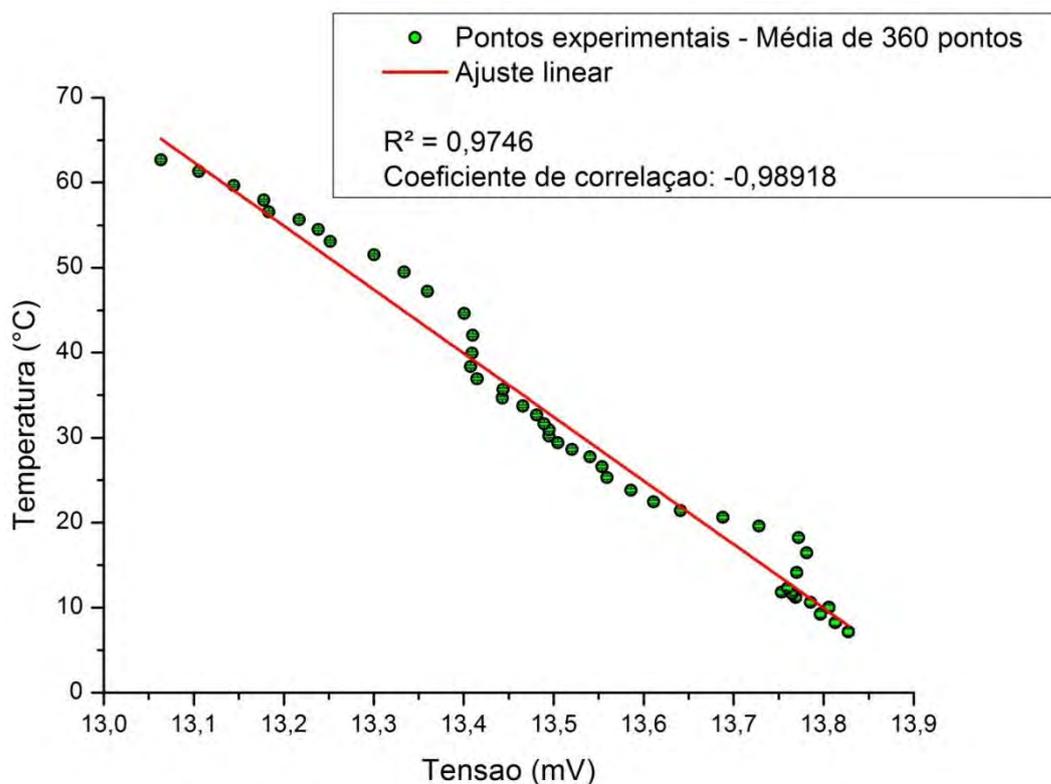


Figura 4.59 - Resultado do experimento de dependência da temperatura.

Para uma variação da temperatura de aproximadamente 60 °C a variação da tensão de saída, considerando uma irradiância constante durante todo o experimento, foi de aproximadamente 0,8 mV. Isto representa uma dependência de aproximadamente -0,014 mV/°C que equivale a um erro de aproximadamente -0,1%/°C. Na literatura, o valor encontrado para a dependência de uma célula solar com a temperatura é de +0,1%/°C (WÜRFEL, 2005). Portanto, a dependência do radiômetro analisado com a temperatura é aproximadamente igual em módulo à dependência de uma célula solar, mas o fator de correlação é negativo indicando que outro componente do radiômetro contribui negativamente, como por exemplo, o resistor que está em paralelo com a célula. Experimentos realizados em diversos tipos de resistores demonstraram que resistores com componentes de

carbono apresentam dependência negativa com a temperatura, indicando que provavelmente o protótipo analisado utilizava um destes resistores.

4.2.3. Linearidade do sinal em função da intensidade da radiação

Outro estudo realizado foi o da linearidade do sinal dos radiômetros. De acordo com a Figura 4.52 apresentada no item 4.2, os maiores erros aparecem para o início e final do dia, onde há um fluxo menor de radiação solar. Portanto, se o sinal de saída do radiômetro não for linear, pode causar erros para medidas realizadas nestes horários.

Para avaliar a linearidade dos radiômetros desenvolvidos no LAS foi realizado o experimento utilizando o simulador solar Oriel do Laboratório de Energia Solar e dois radiômetros LAS (um novo e um que estava em operação em campo por mais de três anos), também para comparação foi utilizado um radiômetro fotovoltaico comercial e um datalogger, DaqPro, 16 bits, para medir a tensão de saída. O resultado do experimento é representado pela Figura 4.60 que mostra a curva do comportamento de três radiômetros fotovoltaicos, sendo dois desenvolvidos no LAS e um radiômetro comercial importado. Todos os radiômetros utilizados neste experimento possuem elementos sensores fotovoltaicos de silício e o valor de R^2 para todas as curvas foi de 0,99. Assim, podemos afirmar que todos os radiômetros testados possuem uma resposta linear para a variação da intensidade radiação solar estudada.

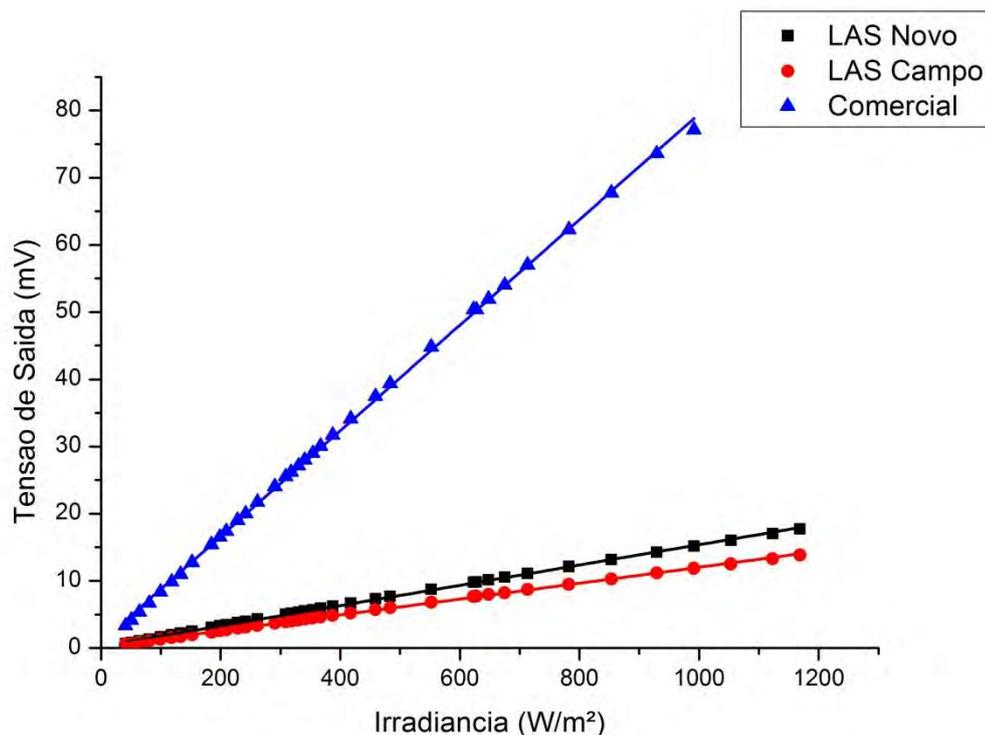


Figura 4.60 – Medida da linearidade de radiômetros do LAS e comercial.

4.2.4. Lei dos cossenos

Os sinais medidos pelos sensores de radiação solar são afetados por vários tipos de erros, um deles é o desvio da resposta em relação à lei dos cossenos da ótica de entrada (BERNI, et al., 2010). É bem conhecido que os sensores utilizados para medidas de irradiância global não apresentam uma perfeita resposta a lei dos cossenos (MICHALSKY, et al., 1995). Esta resposta piora com o aumento do ângulo de incidência, devido principalmente ao aumento da reflexão especular, por isso, medidas de irradiância solar global ou direta ao longo do dia estão sujeitas a erros em relação à lei dos cossenos da ótica de entrada do sensor (BERNI, et al., 2010).

O experimento de lei dos cossenos foi realizado para dois radiômetros LAS, através do sistema de lei dos cossenos do laboratório descrito no capítulo 3.3.3, sendo um novo e um que estava em operação em campo há três anos.

O objetivo deste experimento foi avaliar se as condições adversas enfrentadas em campo mudaram a resposta do radiômetro em função do ângulo de incidência do feixe de luz. Na Figura 4.61 podemos observar as resposta normalizada para lei dos cossenos dos dois radiômetros. Todas as medidas foram repetidas sete vezes e para garantir que a resposta da lei dos cossenos é a mesma, independente da posição dos difusores, também foi realizada alteração na posição do radiômetro girando-o 90° em relação ao seu centro.

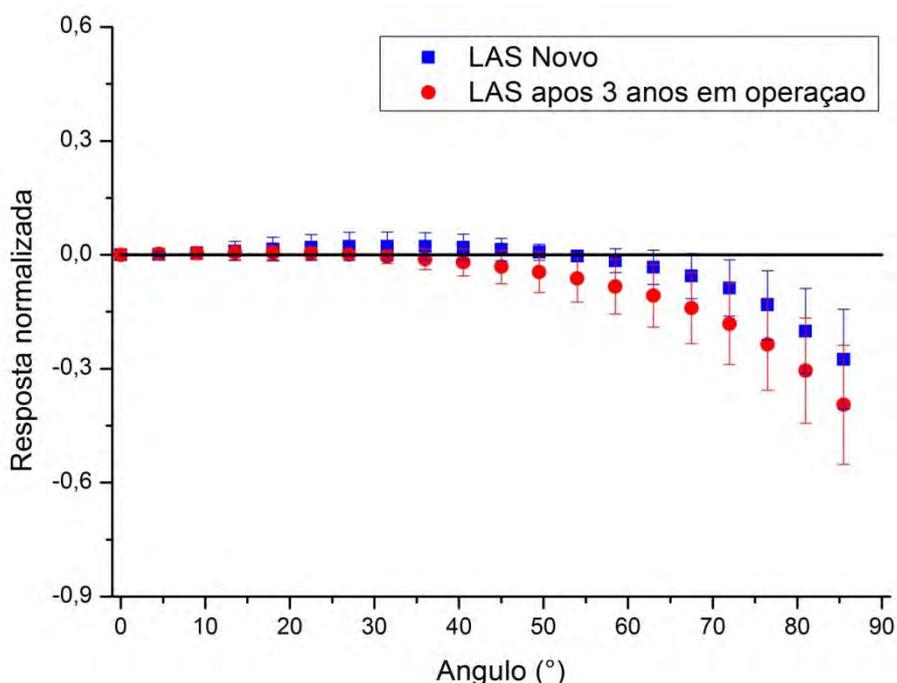


Figura 4.61 – Desvio do cosseno normalizado para radiômetros do LAS que esteve em operação por três anos e um radiômetro que não esteve exposto ao tempo.

O processo de fabricação dos difusores pode causar pequenos defeitos em sua superfície que são diferentes para cada unidade dentro de um mesmo lote, fazendo com que respondam ligeiramente diferente a lei dos cossenos. A curva do radiômetro com difusor que estava em campo fica mais próxima do cosseno para ângulos abaixo de 45°, Para ângulos acima de 45° a curva tende a afastar do cosseno. Este experimento mostra apenas uma tendência nas curvas de resposta em função do cosseno para os radiômetros LAS. Uma conclusão a

respeito da degradação da lei dos cossenos em função da exposição dos difusores às intempéries do meio ambiente só pode ser realizada se o experimento for realizado com o mesmo protótipo.

4.2.5. Estatísticas do radiômetro LAS

As medidas registradas pela Unidade 1 são coletadas a cada 15 segundos durante 5 minutos e a média destas medidas são armazenadas pelo sistema de aquisição de dados (CR1000). Quando comparamos os dados de irradiância solar obtidos nesta unidade, observamos que os valores “instantâneos” medidos pelo radiômetro LAS comparados com os valores “instantâneos” medidos pelo radiômetro CM11, apresentam diferenças significativas, mas, quando comparamos integrais diárias da irradiância em ambos os sensores, essa diferença diminui consideravelmente. Os resultados obtidos para dias sem nuvens nesta análise estão representados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Estatísticas do radiômetro LAS para dias sem nuvens.

	Diferença média
Medida “instantânea”	2,34 %
Integral diária	0,85 %

Para dias nublados e chuvosos, os resultados apresentam maiores diferenças e estão apresentados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Estatísticas do radiômetro LAS para dias nublados e chuvosos.

	Diferença média
Medida “instantânea”	7,41 %
Integral diária	4,18 %

Os dados mostram que há um aumento significativo da diferença dos valores obtidos tanto para valores “instantâneos” como para integrais diárias para dias

nublados e chuvosos. Os valores médios da integral diária para ambas as condições foram menores do que a média das medidas “instantâneas”. O radiômetro LAS mostrou desempenho aceitável para a maioria das aplicações para avaliar a irradiância total incidente sobre uma superfície na Terra em um dia sem nuvens. Para estimar a irradiância global instantânea a diferença média entre os valores fornecidos pelo padrão de referência e pelo radiômetro LAS foi de 2,34 % para dias sem nuvens e de 7,41 % para dias nublados e chuvosos. Estas diferenças registradas são discrepantes em função das condições do dia devido ao processo de calibração dos sensores de radiação. A calibração dos radiômetros é realizada em dias sem incidência de nuvens. Desta forma, medidas realizadas nas mesmas condições possuem uma diferença menor do radiômetro padrão.

4.2.6. Sistema de aquisição do espectro solar

Para aquisição do espectro solar foi montado na Unidade 2 um sistema constituído por uma fibra ótica que coleta a radiação solar e um monocromador portátil que foi mantido em uma sala dentro do prédio do LAS. Para coletar a radiação solar foi desenvolvido um terminal (Figura 3.31), que utilizou o corpo de um protótipo de radiômetro com difusor adaptado para esta medida. A utilização deste terminal tem a função de proteger a fibra ótica e servir de difusor para que o espectrofotômetro tivesse um campo de visão de uma semiesfera. A lei dos cossenos foi medida para este terminal em conjunto com a fibra e o resultado é apresentado na Figura 4.62.

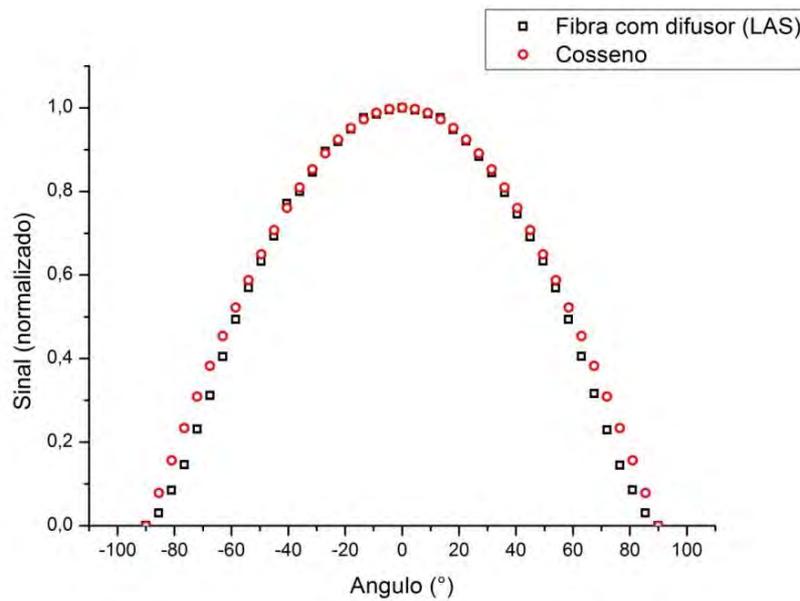


Figura 4.62 – Medida da lei dos cossenos para o conjunto fibra ótica + difusor (LAS).

O sinal fornecido pelo conjunto da fibra com o difusor foi analisado no sistema de medidas da lei dos cossenos com o espectrofotômetro GetSpec 2048. O espectrofotômetro forneceu o valor da integral do sinal entre 450 e 650 nm, pois esta é a região mais estável do espectro. A lei dos cossenos mostra que há um erro maior do que 5 % na intensidade do sinal medido para ângulos maiores que 60 ° para este conjunto.

Com objetivo de avaliar o efeito da inclinação solar no perfil espectral coletado pelo sistema, foram realizadas duas medidas, uma com o difusor apontando para o Sol e outra na sua posição normal (paralelo à superfície terrestre). As medidas foram realizadas entre as 09h00 e 09h30 do dia 19/11/12 e durante a aquisição o céu estava sem nuvens. As medidas foram normalizadas e comparadas entre si. O resultado é apresentado na Figura 4.63.

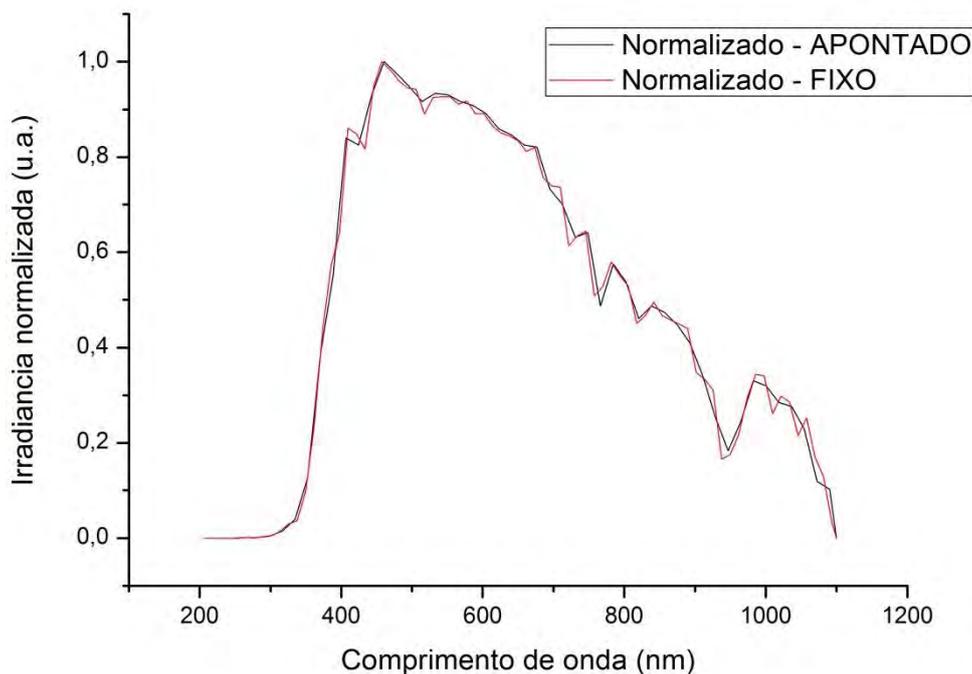


Figura 4.63 - Medidas de dois espectros no mesmo horário para o difusor apontando para Sol e outra para o difusor inclinado.

A diferença entre a integral dos dois espectros medidos é de 0,078 %. Assim, pode-se avaliar que a inclinação do Sol não é relevante neste tipo de análise, pois o perfil espectral se mantém o mesmo independentemente da inclinação do difusor. Desta forma, a matriz dos fatores pode ser analisada independentemente da posição do difusor, pois o espectro solar utilizado é normalizado.

O espectro medido através do espectrofotômetro GetSpec 2048 (200 a 1100 nm) foram realizadas com uma resolução de 1 nm, porém apresenta muito ruído para comprimentos de onda de 900 nm a 1100 nm. O espectrofotômetro GetSpec NIR 0117 (900 a 1700) apresenta uma curva suavizada do espectro medido, mas uma resolução de 12 nm. Comparando as aquisições de espectro na faixa de 900 a 1100 nm realizadas nos dois espectrômetros observamos que embora o GetSpec 2048 apresente mais ruído, se realizarmos uma suavização deste espectro, o que seria equivalente a reduzirmos a resolução

da medida no GetSpec 2048 para 10 nm, vamos obter um espectro semelhante ao adquirido com o GetSpec NIR 0117. A comparação das aquisições do espectro solar na faixa de 900 a 1100 nm entre os espectrômetros é apresentada na Figura 4.64.

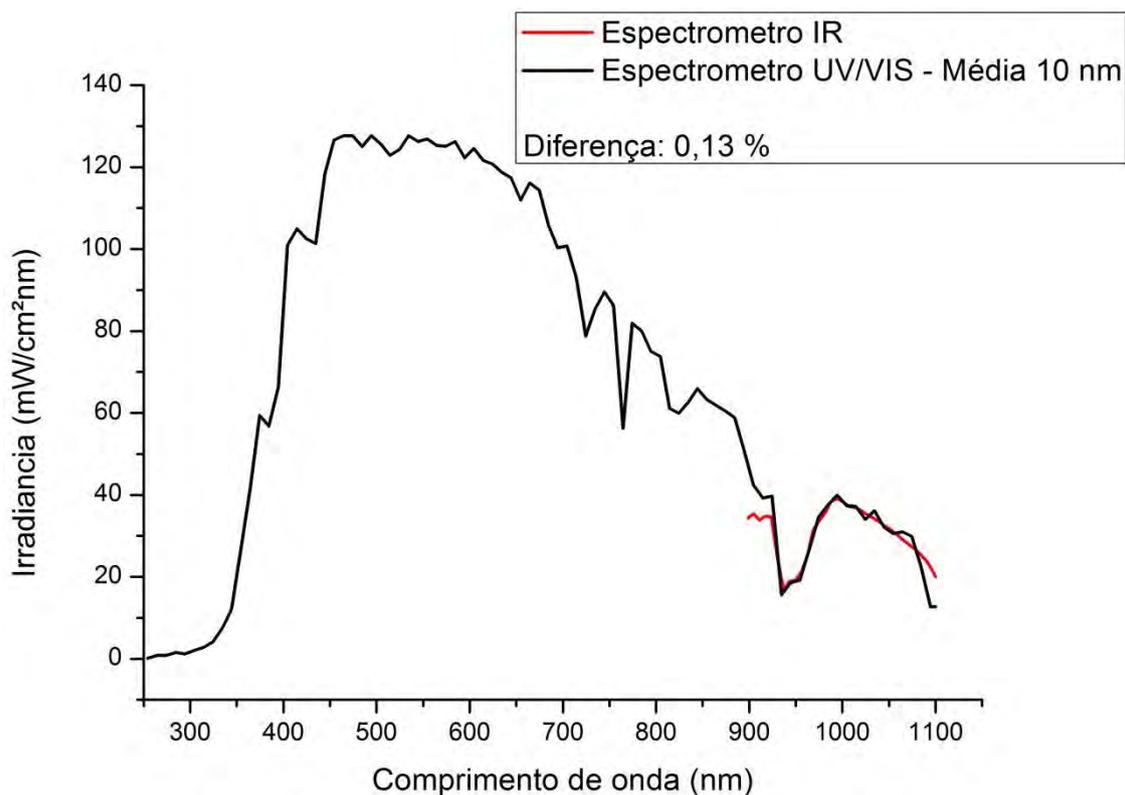


Figura 4.64 - Comparação do espectro medido por dois espectrômetros na faixa de 900 a 1100 nm.

A Figura 4.64 mostra a comparação de dois espectros sobrepostos na região espectral de 900 a 1100 nm, sendo que a linha preta representa uma média da aquisição feita pelo espectrofotômetro GetSpec 2048 e a linha vermelha é o espectro sem suavização obtido pelo GetSpec NIR 0117. A média do espectro medido foi calculada a cada 10 nm. A diferença entre a integral dos espectros medidos pelos dois espectrômetros nesta faixa foi de 0,13 %.

Com objetivo de avaliar o desempenho dos dois espectrômetros na região espectral de 900 a 1100 nm, foram feitas aquisições do espectro durante 4

dias, sendo que dois deles não apresentaram nuvens no céu e os outros dois apresentaram nebulosidade variada durante o dia. As aquisições foram realizadas das 08h00 as 17h00 a cada hora. Os resultados são apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 - Resultados das comparações dos espectrofotômetros.

Descrição	Média
2 dias sem nuvens	0,74 %
2 dias com nuvens	0,91 %
Todos os dias	0,83 %

A diferença entre o espectrômetro GetSpec NIR 0117 e o espectrômetro GetSpec 2048 é maior para dias nublados. A diferença média calculada entre os dois foi de 0,83 %. A utilização de dois espectrômetros requer a mudança constante do conector da fibra ótica entre eles. Além disto, os espectrômetros possuem softwares distintos, sendo necessária a sua inicialização para cada medida. O processo de conexão da fibra, inicialização do software e aquisição do espectro demanda tempo e a presença de um operador do sistema dificultando o processo de aquisição do espectro. Como os resultados da análise demonstraram que não há diferenças significativas para os espectros adquiridos nos dois espectrômetros, optou-se por utilizar somente o espectrômetro GetSpec 2048.

4.2.7. Medidas do espectro

Foram realizadas aquisições do espectro solar com o GetSpec 2048 entre os dias três de outubro à vinte e dois de novembro de 2012. A Figura 4.65 mostra a resposta espectral típica de um radiômetro desenvolvido no LAS medida no sistema de caracterização espectral do Laboratório de Energia Solar conforme descrito no item 3.3.2 (FERREIRA, et al., 2012). Esta curva é semelhante a dos radiômetros fotovoltaicos comerciais e foi utilizada para o cálculo de $R(\lambda)$.

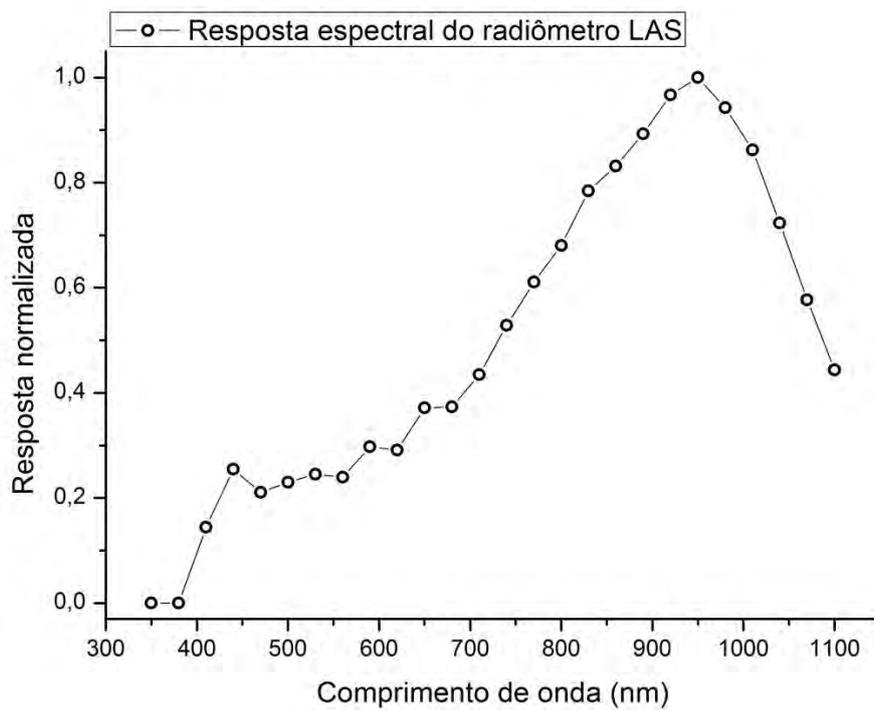


Figura 4.65 - Resposta espectral típica dos radiômetros LAS
 Fonte: FERREIRA (2012).

A potência espectral calculada de acordo com a Equação 3.2 e é apresentada na Tabela 4.19 e Tabela 4.20.

Tabela 4.19 - Potência da radiação solar na faixa espectral perceptível pelo radiômetro (das 06h as 11h).

Dia da medida	06h00	07h00	08h00	09h00	10h00	11h00
03/10/2012	419,65816	382,25117	412,06366	430,00712	446,31572	453,01039
08/10/2012	--	417,96173	419,93745	443,30401	448,06891	455,69842
09/10/2012	--	432,76254	437,51601	455,90785	454,30068	410,84371
10/10/2012	--	--	418,60203	436,67479	437,22302	451,99948
15/10/2012	--	--	425,23819	432,70514	454,73352	455,94069
16/10/2012	--	--	403,40142	432,86203	443,59137	456,53066
17/10/2012	--	--	--	--	385,83913	384,73402
18/10/2012	--	--	425,23819	432,70514	454,73352	455,94069
19/10/2012	367,30187	385,83977	378,43701	387,50279	402,49896	411,255
30/10/2012	419,65816	382,25117	378,43701	387,50279	402,49896	402,08089
31/10/2012	378,03466	379,54922	407,02979	428,62878	440,25956	437,45249
01/11/2012	400,74634	410,75852	432,39913	398,55028	429,05023	426,44998
02/11/2012	--	--	--	--	--	353,62341
05/11/2012	--	--	387,78661	373,60822	391,69114	380,01904
06/11/2012	--	--	419,02696	428,25355	422,32992	425,46892
08/11/2012	--	--	350,69171	355,31788	368,15668	388,30832
09/11/2012	--	303,04733	307,63594	320,02441	318,30713	298,47992
12/11/2012	303,18287	286,49925	331,07492	315,46719	348,54686	392,82304
13/11/2012	139,89891	186,86885	186,86885	349,7814	368,42319	376,18902
16/11/2012	378,9628	405,0026	408,47113	401,7053	416,64268	394,9445
19/11/2012	--	415,16532	420,11259	427,77436	443,52243	440,41497
20/11/2012	402,42222	384,56696	397,29134	398,59909	430,4536	436,17054
21/11/2012	--	409,04386	436,88667	444,87913	449,42983	452,35034
22/11/2012	--	416,57144	442,48922	447,94732	460,4473	458,25014

Tabela 4.20 - Potência da radiação solar na faixa espectral perceptível pelo radiômetro (das 12h as 18h).

Dia da medida	12h00	13h00	14h00	15h00	16h00	17h00	18h00
03/10/2012	456,45368	451,79901	444,22886	425,42504	397,70488	439,98143	442,34388
08/10/2012	455,419	448,7511	443,69018	435,99818	391,83329	367,93565	359,40689
09/10/2012	461,75391	416,94946	428,85219	413,87275	404,47818	389,42886	378,41684
10/10/2012	455,24688	449,68037	416,68501	426,15919	410,31162	392,75343	384,17481
15/10/2012	456,45577	453,80916	447,07813	444,34485	431,89131	404,79305	355,35619
16/10/2012	450,14832	452,7482	429,96994	424,67471	430,4128	403,25728	355,35619
17/10/2012	442,79179	401,03885	446,38002	381,21769	350,00224	388,54964	406,30419
18/10/2012	456,45577	453,80916	447,07813	444,34485	431,89131	404,79305	378,0362
19/10/2012	398,64597	427,06458	411,63351	385,09417	370,27582	367,96173	--
30/10/2012	449,46829	452,70397	448,67325	448,00846	414,41601	352,51206	--
31/10/2012	439,51442	421,08181	408,37756	359,72236	384,051	382,21829	186,67089
01/11/2012	402,97477	403,73272	406,10293	407,45184	411,73822	385,84538	383,58035
02/11/2012	360,62357	372,57736	373,34297	368,84208	368,84447	--	--
05/11/2012	437,70015	444,45377	444,39224	437,89555	418,22392	410,51595	410,51595
06/11/2012	432,08724	430,312	415,27813	--	--	--	--
08/11/2012	390,39909	374,35894	365,21244	356,43225	--	--	--
09/11/2012	284,4203	293,35163	301,18415	321,98214	292,91274	278,12743	--
12/11/2012	397,27875	350,88176	339,75268	383,46646	383,65962	345,55737	--
13/11/2012	393,44974	382,4483	376,15196	415,18027	362,14523	321,96786	384,7531
16/11/2012	445,0575	417,71957	426,29653	444,12377	423,7734	413,25654	--
19/11/2012	440,63338	425,97288	418,26404	418,83532	413,87043	402,25724	397,28455
20/11/2012	443,60338	442,66622	444,47365	349,59648	334,7716	383,3362	380,84774
21/11/2012	447,03122	447,84341	439,30193	429,33039	419,9758	--	--
22/11/2012	463,96375	460,33777	457,62787	447,00963	430,65328	431,05204	--

4.2.8. Análise do descasamento espectral

A variação da potência da radiação solar na faixa espectral perceptível para o radiômetro fotovoltaico em função da hora do dia, ou seja, a média das colunas da tabela é apresentada na Figura 4.66, sendo que o perfil de maior potência perceptível para o radiômetro ocorre ao meio dia local. A porção perceptível é calculada a partir do produto normalizado da resposta espectral do sensor pelo espectro solar incidente, de forma que a intensidade do espectro não influencie na porção perceptível. A curva representada pela Figura 4.66 apresenta simetria entre o período da manhã e da tarde e mostra que no início e final do dia a potência perceptível pelo sensor é menor, podendo causar erros de medidas para este período.

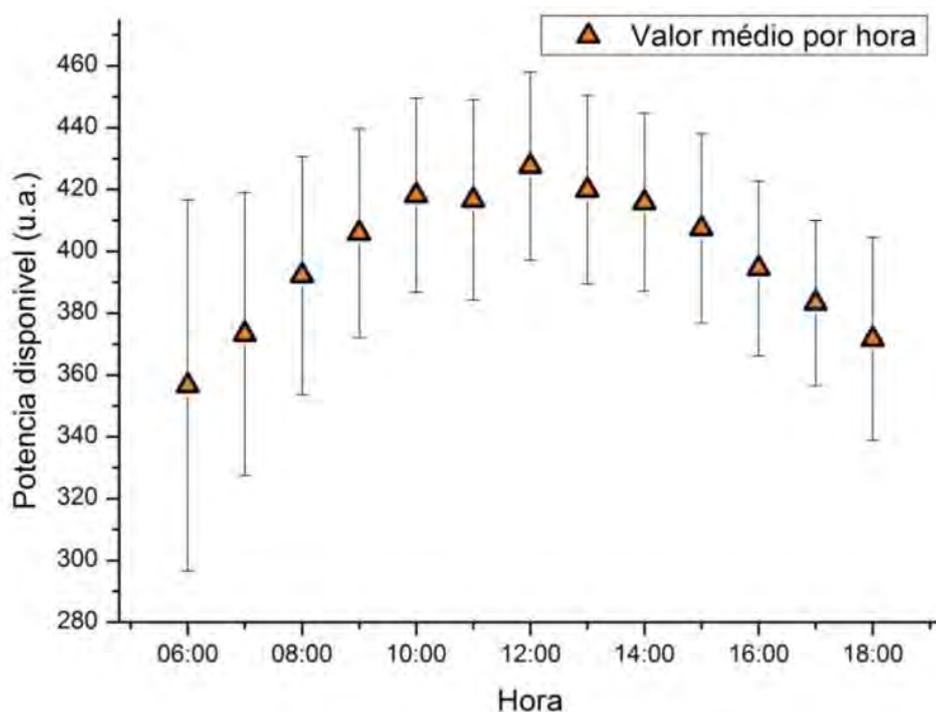


Figura 4.66 - Potência média disponível por hora.

Utilizando pontos coletados das 09h00 às 11h00 e das 13h00 às 15h00, podemos obter o fator de multiplicação ou fator de calibração Φ_{CAL} igual a

416,21 u.a.. Utilizando este fator de multiplicação as medidas realizadas com o radiômetro LAS possuiriam um erro que pode ser observado na Figura 4.68.

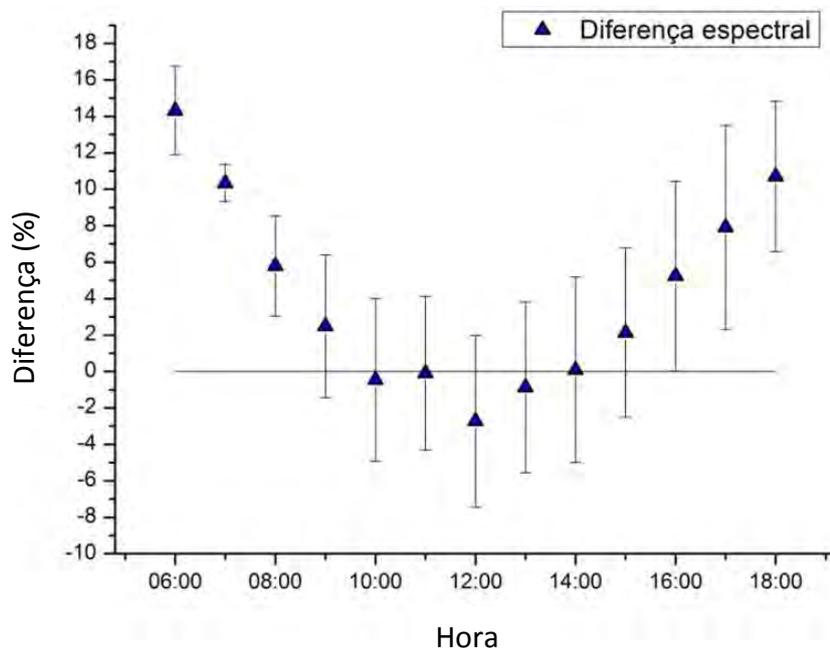


Figura 4.67 - Diferença das integrais do perfil espectral solar e a resposta do radiômetro desenvolvido no LAS ao longo do dia.

Adotando o perfil espectral médio para determinação do fator de calibração conforme calculado anteriormente o radiômetro teria um erro médio de 2,48 % em relação ao padrão de referência. Sendo que a diferença é maior para os extremos do dia.

Para os mesmos dias e horários em que foi analisado o descasamento do espectro para o radiômetro do LAS, também foram analisadas as diferenças das medidas de irradiação entre um radiômetro fotovoltaico comercial e o padrão de referência.

Pode haver uma pequena diferença entre a resposta espectral do radiômetro LAS e a resposta espectral dos radiômetros comerciais fotovoltaicos, mas nesta análise, considerou-se que a resposta espectral do radiômetro comercial utilizado neste trabalho tem o mesmo perfil do LAS. A Figura 4.68 mostra as

diferenças nas medidas entre os radiômetros e a diferença prevista para o descasamento espectral. Percebe-se através do gráfico que os erros de descasamento são em geral menores do que as diferenças registradas.

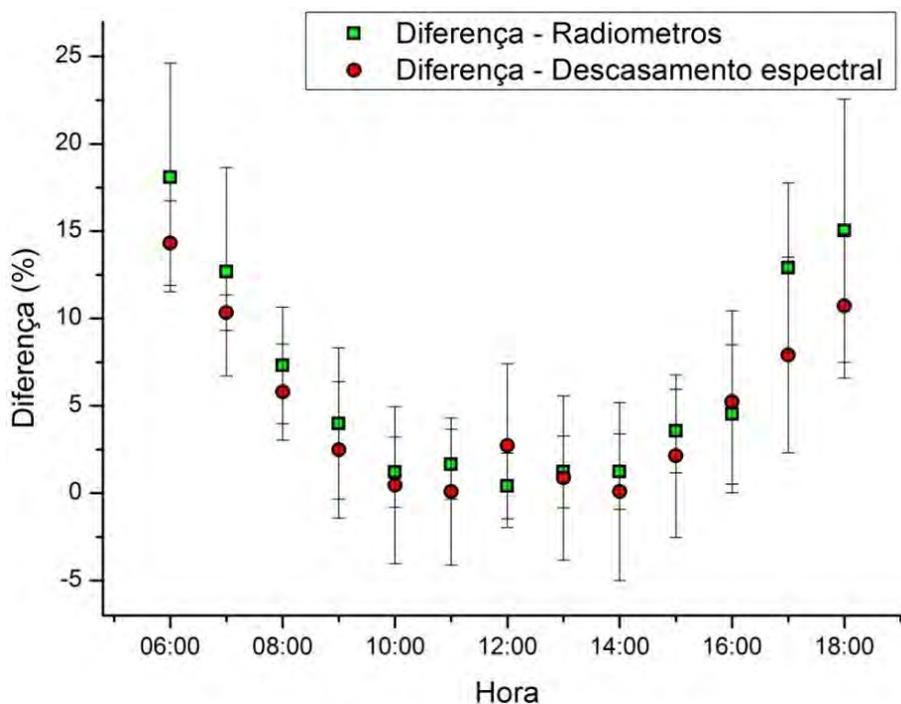


Figura 4.68 - Comparação entre as diferenças registradas e previstas.

A Figura 4.69 mostra um exemplo da variação no perfil do espectro entre o período da manhã, meio dia local e no final do dia.

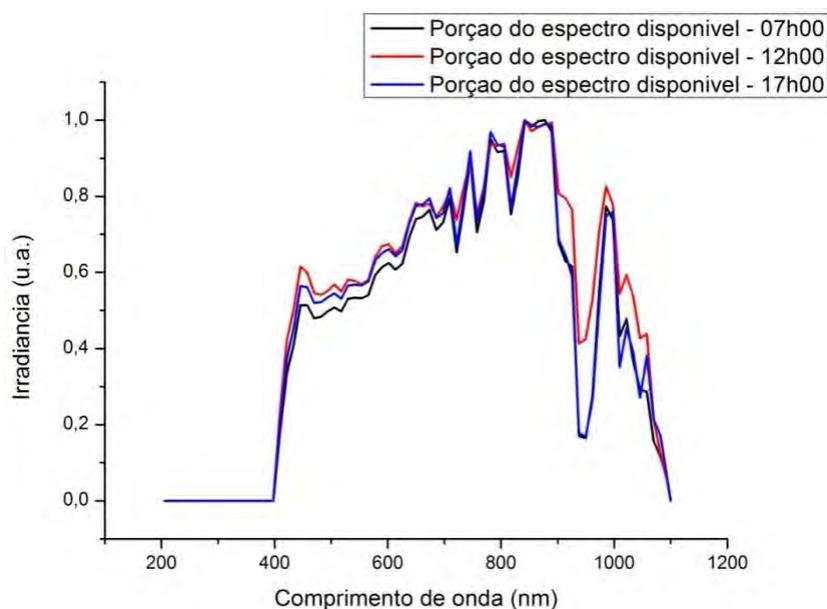


Figura 4.69 – Perfil do espectro disponível para o radiômetro as 07h00, ao meio dia e às 17h00.

Esta variação no perfil do espectro ao longo do dia resulta em uma variação média de 10 % da potência perceptível para radiômetros fotovoltaico ao longo do período analisado.

A análise da potência da radiação solar na faixa espectral perceptível pelo radiômetro em função do dia, ou seja, a média das linhas da tabela é apresentada na Figura 4.70. O registro da menor média diária do fator de potencia aproveitada pelo radiômetro ocorreu em 9/11/12 e foi de 301,77 u.a.. Neste dia, o céu estava totalmente encoberto com chuva na maior parte do tempo, o índice pluviométrico total registrado pela Unidade 1 foi de 52,25 mm. A temperatura diária média foi de 20,95 °C com pequena variação da temperatura, com mínima de 19,79 °C e máxima de 23,08 °C. A umidade relativa média registrada foi de 92,25 % UR com mínima de 85,4 % UR e máxima de 98,7 % UR. Este dia foi atípico durante o período utilizado na análise, com temperaturas baixas e praticamente constante ao longo do dia, alto índice de umidade e o menor índice de irradiação registrado.

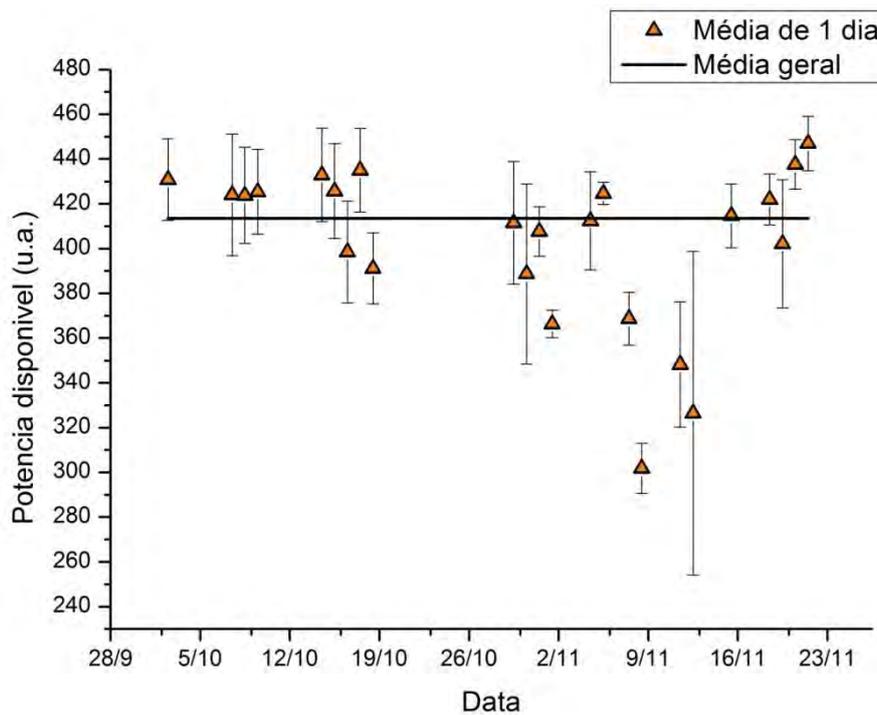


Figura 4.70 - Média diária da potência disponível.

Através da aquisição do espectro solar, foi possível prever que o erro médio na medida de um radiômetro fotovoltaico é de aproximadamente 2,5 %. Para os mesmos dias e hora de aquisição do espectro solar, foram realizadas análises entre os dados de radiação solar obtido pelo radiômetro padrão e por um radiômetro fotovoltaico comercial. O valor médio encontrado foi de aproximadamente 3,0 %. Pode-se observar que o erro médio da irradiância registrada na Unidade 1 é ligeiramente maior que o erro previsto pelo descasamento espectral. Isto indica que grande parte dos erros nas medidas dos radiômetros LAS é devido ao descasamento espectral. As respostas espectrais de dispositivos com elemento sensor de silício são semelhantes, por isto, pode-se expandir este resultado e afirmar que grande parte dos erros nas medidas dos radiômetros fotovoltaicos pode ser devido ao descasamento espectral.

4.2.9. A atmosfera como um filtro ótico

Podemos considerar a atmosfera como um filtro ótico, sendo o Sol uma fonte de radiação eletromagnética e o radiômetro o sensor, conforme representado na Figura 4.71, é possível avaliar a influência deste filtro nas medidas do espectro solar. Foram definidos três tipos básicos de filtros: filtro (1) sem nuvens, filtro (2) parcialmente nublado e filtro (3) totalmente nublado. Os filtros foram determinados e classificados a cada dia através de uma análise visual do céu. O resultado obtido utilizando a análise de filtros está representado na

Tabela 4.21.

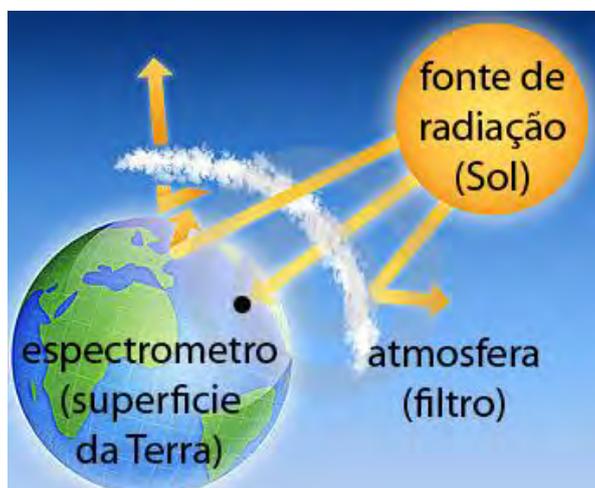


Figura 4.71 - A atmosfera como um filtro ótico.

Tabela 4.21 - Análise da potência perceptível pelo sensor fotovoltaico em função dos filtros.

Filtro	Média (u.a.)
(1)	454,30
(2)	413,24
(3)	378,03

Os resultados obtidos mostram que dentro de um mesmo dia, a variação no perfil do espectro pode ocasionar erros de 2,5 % independente do filtro adotado, este erro é dependente do caminho que a radiação percorre na atmosfera (massa ar). Se analisarmos a atmosfera como um filtro, a diferença medida entre o filtro (1) e o filtro (2) é de aproximadamente 9 % e a diferença medida entre o filtro (1) e o filtro (3) pode chegar a 17 %. Esta análise da influencia dos filtros no erro das medidas de irradiância solar foi realizada para dados obtidos em torno do meio dia de tal forma que o erro devido à variação da massa ar foi amenizado.

De acordo com as estatísticas dos dados da torre 1, parte do erro das medidas de irradiância solar podem ser atribuídas à variação do perfil espectral. A variação do perfil ao longo do dia e ao longo das semanas ocasiona uma diferença média de 2,5 %. A diferença média registrada entre medidas realizadas com o radiômetro LAS e o padrão de referência é de 2,34 % para dias com filtro (1) e de 7,43 % para dias com o filtro (3).

De acordo com as estatísticas dos dados da Unidade 1, parte dos erros das medidas de irradiância solar podem ser atribuídos à variação do perfil espectral que é ocasionada pelas mudanças dos filtros óticos e da variação da massa ar.

4.3. Correlação dos erros nas medidas de irradiância com as variáveis ambientais

Visando identificar outras fontes de erros que pudessem influenciar nas medidas de irradiância, foram realizados cálculos do coeficiente de correlação entre a diferença da irradiância medida entre radiômetros fotovoltaicos e o padrão de referencia e das variáveis ambientais. O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida do grau de correlação linear entre duas variáveis quantitativas (VUOLO, 1996). O valor do coeficiente (σ) pode assumir valores entre $-1 \leq \sigma \leq 1$. Valores negativos do coeficiente indicam uma correlação inversa, enquanto que valores próximos de um indicam uma correlação muito

forte entre as variáveis estudadas. O resultado desta análise é representado pela Tabela 4.22.

Tabela 4.22 - Tabela de correlações.

	Diferença Irradiância	Pressão Atmosférica	Umidade Relativa	Velocidade do vento	Temperatura
Diferença Irradiância	1	-0,08175	0,39548	-0,24212	0,24856
Pressão Atmosférica	-0,08175	1	0,40981	0,08974	0,12572
Umidade Relativa	0,39548	0,40981	1	-0,1453	-0,808
Velocidade do Vento	-0,24212	0,08974	-0,1453	1	-0,13853
Temperatura	0,24856	0,12572	-0,808	-0,13853	1

A Tabela 4.21 mostra o coeficiente da correlação entre variáveis ambientais e as diferenças de irradiância registradas. A umidade relativa possui o maior coeficiente dentre todas as variáveis ambientais analisadas, e é de 0,39548. Segundo classificações da literatura, coeficientes menores que 0,4 são considerados fracos. O coeficiente positivo indica que há uma correlação fraca e diretamente proporcional entre a variação da umidade relativa e as diferenças de irradiância (SPIEGEL, 2004). A umidade relativa do ar é o fator de maior impacto no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para geração de energia (GWANDU, et al., 1995)

A análise da correlação linear entre os erros de medidas de irradiância e as variáveis ambientais mostra apenas uma correlação fraca entre os dados. Recomendam-se para estudos futuros mais precisos que sejam realizadas análises de correlações não lineares e de múltiplas variáveis, a fim de verificar se realmente há uma relação entre os dados.

Os resultados obtidos neste trabalho juntamente com a análise funcional do radiômetro LAS mostrou que a principal fonte de erros de medidas apresentado pelo radiômetro desenvolvido no LAS está no seu difusor. O difusor de teflon sem proteção para uso em campo perde gradativamente a transmitância,

devido provavelmente à impregnação de aerossóis na sua superfície, requerendo constantemente a calibração do radiômetro. Duas soluções podem ser tomadas para este problema: a instalação de um domo transparente sobre o difusor ou a substituição do difusor por outro de material que não tenha rugosidades na superfície. O radiômetro LAS utilizado na análise de temperatura apresentou dependência do sinal de saída com a temperatura. A dependência registrada foi de $-0,1 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$. Este problema pode ser resolvido de duas formas: instalação de uma proteção térmica no corpo do radiômetro, de forma que o mesmo não fique diretamente exposto à radiação solar ou a instalação de uma resistência paralela à célula solar tal que a resistência varie de forma inversa a dependência da célula com a temperatura, compensando o sinal de saída.

Outra fonte de erro nas medidas do radiômetro desenvolvido no LAS foi o descasamento espectral. O perfil espectral da radiação solar muda ao longo do dia e das condições atmosféricas, resultando em erros nas medidas realizadas com radiômetros fotovoltaicos. Entretanto, este não é um problema em específico do radiômetro LAS, e sim de todos os elementos sensores fotovoltaicos à base de silício. Como os sensores fotovoltaicos comerciais possuem uma resposta espectral semelhante, este erro está implícito em todos eles. A análise do descasamento espectral mostrou que o radiômetro fotovoltaico teve um erro médio de $2,48 \text{ \%}$ em relação ao padrão de referência. Estes erros são maiores no início e no final do dia. Além disto, se compararmos resultados de um dia de céu sem nuvens com os resultados de um dia totalmente nublado, o descasamento pode gerar erros de 17 \% . Desta forma, a utilização de radiômetros fotovoltaicos para medir a irradiância total disponível ao longo de um dia sem nuvens apresenta o menor erro, pois neste caso a diferença média registrada entre um radiômetro fotovoltaico e o padrão de referência foi menor que 1 \% .

Através dos dados registrados pela Unidade 1, realizou-se a análise de correlações entre as variáveis ambientais e os erros de medidas da irradiância.

O maior coeficiente registrado foi de 0,39 para a correlação entre os erros de medidas e a umidade relativa. Este resultado indica que há uma correlação fraca entre estas duas variáveis. Sugere-se que uma análise de correlações mais detalhada seja realizada para estudos futuros.

5 CONCLUSÃO

O radiômetro LAS foi concebido com tecnologia nacional tendo resultado em uma tese de doutorado. Seu elemento sensor é uma célula solar de silício monocristalino desenvolvida no Laboratório de Microeletrônica da USP especialmente para esta finalidade. O desenvolvimento deste radiômetro foi realizado através de uma parceria entre o INPE, LME-USP e a empresa nacional Orbital Engenharia que tem o direito de produzir e comercializa-lo. Recentemente um lote de radiômetros foi enviado para o Laboratório de Instrumentação Meteorológica, situado em Cachoeira Paulista, para calibração e durante este processo foi constatado um aumento gradativo na constante de calibração. Com as instalações das unidades de monitoramento ambiental, os radiômetros LAS foram testados e monitorados continuamente e pôde-se observar que a intensidade do sinal dos radiômetros LAS estava sofrendo uma atenuação constante quando comparado com um padrão de referência. A constatação destes problemas motivou uma reavaliação funcional deste dispositivo. Foram utilizadas duas abordagens para a investigação do problema. Na primeira, os dados obtidos nas unidades de monitoramento ambiental foram analisados e investigaram-se as possíveis causas dos erros através de inspeção visual, experimentos e testes. Na segunda, medidas do espectro solar foram realizadas periodicamente para analisar se o descasamento espectral poderia ou não gerar erros significativos nas medidas de irradiância solar realizadas pelos radiômetros LAS e em radiômetros fotovoltaicos em geral. O objetivo do trabalho foi analisar, identificar e propor soluções e melhorias para os radiômetros LAS, com a finalidade de aumentar ainda mais a sua qualidade nas medidas e também estudar o erro causado pelo descasamento espectral em medidas de irradiância solar realizadas com radiômetros fotovoltaicos.

A análise do radiômetro LAS mostrou que ele possui uma queda gradativa no sinal de saída ao longo do tempo, como consequência, há necessidade de calibração periódica de curto prazo do dispositivo. Constatou-se que esta queda gradativa do sinal ocorre devido à diminuição da transmitância do

difusor, causada pelo acúmulo de partículas impregnadas na sua superfície. Também foi verificado que o radiômetro LAS possui uma dependência linear com a temperatura de aproximadamente $-0,1 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$. Por ficar exposto ao Sol, o que acarreta um significativo aumento da sua temperatura interna, faz com que essa dependência com a temperatura afete as medidas de irradiância.

O estudo do descasamento espectral mostrou que este fator pode ser responsável por grande parte de erros de medidas em radiômetros fotovoltaicos. O erro médio estimado através da análise do espectro solar para um radiômetro fotovoltaico do LAS devido ao descasamento espectral foi de 2,48 %. A análise dos dados registrados na Unidade 1 para irradiância no mesmo período de coleta dos espectros mostram que a diferença média foi de 3,15 % entre radiômetros fotovoltaicos em comparação com radiômetros de termopilha. É possível verificar que o valor médio previsto para o erro do descasamento espectral está contido dentro do erro das medidas realizadas em campo. Desta forma, a utilização de radiômetros fotovoltaicos para medida da radiação solar instantânea ou realizadas em uma pequena fração do dia não são recomendáveis, pois podem carregar uma incerteza significativa, porém podem ser utilizados na determinação de integrais diárias da radiação ou em séries acumulada, pois as incertezas das medidas são aceitáveis para a maioria das aplicações.

A análise de correlação linear entre os dados ambientais e irradiância solar mostrou que não há uma correlação linear forte entre os dados analisados. O maior coeficiente de correlação obtido foi de 0,39 entre os erros de irradiância e a umidade relativa. Este coeficiente mostra que há uma correlação fraca e proporcional entre os erros nas medidas de irradiância e a presença de vapor d'água na atmosfera.

Observou-se também que altura do Sol influencia nas medidas realizadas por radiômetros fotovoltaicos. Essa influência foi verificada através das medidas do espectro solar e confirmada pelas análises dos dados registrados na

Unidade 1. As menores diferenças registradas ocorreram para horários em torno do meio dia. A atmosfera com diferentes filtros também altera o perfil espectral. A diferença média registrada entre medidas realizadas com o radiômetro LAS e o padrão de referência é de 2,34 % para dias sem nuvens e de 7,43 % para dias com nuvens. Desta forma, é recomendável, mesmo para integrais diárias de irradiação, a utilização de radiômetros fotovoltaicos em condições atmosféricas favoráveis.

Os estudos realizados neste trabalho indicam que o radiômetro LAS pode ter maior precisão com mudanças simples, como por exemplo, a utilização de uma proteção no difusor para evitar que ele se contamine com o meio ambiente externo. A diminuição da dependência com a temperatura pode reduzir o erro do radiômetro LAS, o uso da compensação térmica através de termístores poderá reduzir significativamente a dependência do radiômetro com a temperatura. Com estas pequenas alterações é possível melhorar a qualidade do radiômetro desenvolvido no LAS, permitindo que o produto nacional tenha alta qualidade. A instalação das três unidades de monitoramento ambiental no INPE em São José dos Campos foi de fundamental importância para este trabalho e capacitou a Laboratório de Energia Solar na área de instrumentação ambiental e permitirá que outros sensores ambientais desenvolvidos no INPE possam ser testados em condições reais de uso. Também será possível a utilização dos dados gerados por estas unidades em outros tipos de estudos dentro do INPE, como por exemplo, estudos de mudanças climáticas local ou a disponibilização de dados para outros centros de pesquisa e universidades. Principalmente os dados da Unidade 3 que está instalada de acordo com a maioria das recomendações da WMO.

A Unidade 2, embora tenha apresentado problemas técnicos na sua operação, devido a aquisição de dados através do DataRAD, que ficou desligado durante um certo período, foi concebida para ser um sistema compacto de monitoramento de radiação solar. Nesta unidade foi instalado um sistema que utiliza fibra óptica e um monocromador portátil para aquisição de espectros

solar que foi utilizado neste trabalho e poderá complementar os dados de radiação. O problema técnico apresentado pelo DataRAD poderá ser facilmente resolvido, pois foi constatado um problema na entrada de alimentação do dispositivo que poderá ter sido o causador da falha técnica.

Como trabalhos futuros, sugere-se a aquisição do espectro solar em longo prazo, a fim de obter a variação do perfil espectral ao longo das estações do ano que poderão ser interessantes no estudo de eficiências de sistemas fotovoltaicos e sensores. Além disto, com estes dados será possível obter um espectro padrão para a cidade de São José dos Campos e região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABETTI G. **The sun**. [S.l]: Faber and faber, 1955.

ADKINS C. J. **Equilibrium thermodynamics**. Cambridge: McGraw-Hill, 1983.

ASTM International **Standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface**. West Conshohocken, PA, 2012.

BELOTO, A. F.; UEDA, M.; ABRAMOF, E.; SENNA, J. R.; SILVA, M. D. ; KURANAGA, C.; REUTHER, H ; SILVA, A. F. ; PEPE, I. Sponge-like and columnar porous silicon implanted with nitrogen by plasma immersion ion implantation (PIII). **Surface and coatings technology**, v. 156, p. 267-271, 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.

BENGHANEM M. A low cost wireless data acquisition system for weather station monitoring. **Renewable energy**, v. 35, p. 862-872, 2010.

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 – PA. **Anais...** São Paulo: ABENS, 2010.

BONNER M. G.; SAPSFORD C. M. Measurement of solar radiation by silicon solar cell **Solar energy conference**, 4, vol. 10, p. 195-202, 2010.

BROCK F. V.; RICHARDSON S. J. **Meteorological measurements systems**. Oxford: Oxford University Press, 2001.

CAMPBELL SCI. **CM11 Pyranometer Manual**, 2010. Disponível em <http://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cmp6-cmp11-cmp21.pdf> Acesso em: 23 out. 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE/CPTEC). **Notícia**. Disponível em: <http://www7.cptec.inpe.br/noticias/faces/noticias.jsp?idConsulta=22648&idQuadros=> Acesso em: 16 nov. 2011.

- DAL PAI A.; ESCOBEDO J. F. **Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento Melo-Escobedo**: fatores de correção anisotrópico e modelos de estimativa. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura), Botucatu: UNESP, 2005.
- FERREIRA T. A.; BERNI, L. A.; PAES, T. F.; VILELA, W. A.; BELOTO, A. F. Sistema para caracterização espectral de dispositivos fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energia Solar**, Ano 3, v. 3, n. 1, São Paulo: ABENS, 2012.
- FEYNMAN R. P., LEIGHTON R. B.; SANDS M. **Lições de física** São Paulo: Bookman, v. 1 a 3, 2008.
- FLEXMEDIA. **Manual MCSF - RS232**. p. 18, São Paulo, 2012.
- FRADEN J. **Handbook of modern sensors**. 3.ed., [S.l.], Springer, 2004.
- FRISCHEN L. J.; GAY, L. W. **Environmental Instrumentation**. [S.l.], Springer, 1979.
- GOOGLE. **Google maps**. Disponível em: <http://goo.gl/maps/R7RFF> Acesso em: 06 nov. 2012.
- GOTTSCHALG R.; INFELD D. G.; KEARNEY M. J. Experimental study of variations of the solar spectrum of relevance to thin film solar cells. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 79, p.527-537, 2003.
- GRANQVIST C. G. Solar energy materials review. **Advanced Materials**, v. 22, p.1789-1803, 2003.
- GRANQVIST C. G. Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review. **Solar energy materials and solar cells**, v. 91, p. 1529-1598, 2007.
- GUIMARÃES A. P. C. **Estimativa de parâmetros da camada atmosférica para cálculo da irradiação solar incidente na superfície terrestre**. 2003. Tese (Doutorado) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- GWANDU B. A. L.; CREASEY D. J. Humidity: A factor in the appropriate positioning of a photovoltaic power station, **Renewable Energy**, v. 6, n. 3, p. 313-316, 1995.
- HAYOHE H. N.; BALCHIN D. Automatic retrieval of agrimeteorological data using a microcomputer and radio telemetry. **Computers and electronics in agriculture**, v. 3, p. 129-134, 1987.

- HIRATA, Y.; TANI, T. Output variation of photovoltaic modules with environmental factors -I. The effect of spectral solar radiation on photovoltaic module output. **Solar Energy**, v. 55, n. 6, p. 463-468, 1995.
- HIRATA, Y.; TANI, T. Output variation of photovoltaic modules with environmental factors –II: Seasonal Variation. **Solar Energy**, v. 63, n. 3, p. 185-189, 1998.
- KIMBALL B. A.; BELLAMY L. A. Generation of diurnal solar radiation, temperature and humidity patterns. **Energy in agriculture**, v. 5, p. 185-197, 1996.
- KREZINGER A. **Software espectro solar**. UFRGS, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <http://www.solar.ufrgs.br/#softwares> Acesso em: 14 nov. 2011.
- MCCARTNEY E. J. **Absorption and emission by atmospheric gases**. [S.l.] John Wiley & Sons, 1983.
- MCCLUNEY W. R. **Introduction to radiometry and photometry**. [S.l.], ISBN-10: 0890066787, Artec House, 1994.
- MEKHILEF, S. Effect of dust, humidity and air velocity of efficiency of photovoltaic cells. **Renewable and sustainable energy reviews**, v.16, p. 2920-2925, 2012.
- MICHALSKY, J. J.; HARRISON, L. C.; BERKHEISER, W. E. Cosine response characteristics of some radiometric and photometric sensors. **Solar Energy**, v. 54, p. 397-402, 1995.
- NAQI, M. **Encyclopaedia of Geomorphology**. Anmol Publications, vol. II, ISBN 9788126124459, 2006.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica**. São Paulo: Edgard Blücher, vol. 1, 2002.
- PAES, T. F. **Sistemas de caracterização de elementos sensores para radiômetros fotovoltaicos**. Dissertação de mestrado, INPE, São José dos Campos, 2012.
- PALMER, J. M.; GRANT, B. G. **The art of radiometry**. Spie, Bellingham, 2009.
- PAULESCU, M. A temperature-based model for global solar irradiance and its application to estimate daily irradiation values. **International journal of energy research**, v. 35, p. 520-529, 2011.
- PILLAI, S. The effect of dielectric spacer thickness on surface plasmon enhanced solar cells for front and rear side depositions. **Journal of Applied Physics**, v. 101, p. 1051-1059, 2011.
- RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos**. UFSC, Florianópolis, 2004.

- SPIEGEL, M. R. **Probabilidade e estatística**. Makron Books, Coleção Schaum, 2004.
- SQUITTER **Manual do pluviômetro de balança modelo S2163**. São José dos Campos, 2009.
- SÖZEN, A.; ARCAKLIOGLU, E. Effect of relative humidity on solar potential. **Applied Energy**, v. 82, n. 4, p.345-367, 2005.
- STREETMAN, B. G.; SANJAY, B. **Solid state electronic devices**. New Jersey, ISBN 0-13-025538-6, 2000.
- TIBA, C. **Atlas solarimétrico do Brasil**. Universitária da UFPE, Recife, 2000.
- VALLEY, S. L. **Handbook of geophysics and space environments**. United States Air Force, Cambridge, 1965.
- VEISSID, N.; ESCOBEDO, J. F.; GALDINO, M. A. Taxa de absorção atmosférica sobre as cidades de Botucatu-SP e Rio de Janeiro-RJ, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 4, 2010.
- VILELA W. A. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar**. Tese de doutorado, INPE, São José dos Campos, 2010.
- VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria de erros**. Edgard Blucher, 2 ed., p. 264, São Paulo, 1996.
- WMO **Guide to meteorological Instruments and methods of observation**. [S.l.], World Meteorological Organization, 2008.
- WÜRFEL, P. **Physics of solar cells**, [S.l.], Wiley, 2005.
- ZDANOWICX T. Effect of air mass factor on the performance of different type of PV modules **Opto Electronics Review**, v. 2, p. 69-73, 2004.
- ZHOU, C.; MICHALSKY, J.; HARRISON, L. Comparison of irradiance measurements made with the multi-filter rotating shadow band radiometer and first-class thermopile radiometers, **Solar Energy**, v. 2, p. 487-491, 1995.

APÊNDICE A – ROTINA PARA RENOMEAR ARQUIVOS

Neste trabalho foram utilizados dois códigos para renomear os arquivos gerados pelas unidades de monitoramento ambiental, um para o Windows XP e outro para o Windows 7. A rotina possui extensão *.bat*.

Windows XP:

```
echo off

for /f "tokens=2 delims=" %%a in ('date /t') do set data=%%a

for /f "tokens=1 delims=/" %%a in ("%data%") do set dia=%%a

for /f "tokens=2 delims=/" %%a in ("%data%") do set mes=%%a

for /f "tokens=3 delims=/" %%a in ("%data%") do set ano=%%a

set data=%mes%_%dia%_%ano%

cd d:/DIRETORIO DO ARQUIVO A SER RENOMEADO

ren ARQUIVO A SER RENOMEADO.dat %data%.dat
```

Windows 7:

```
echo off

set data=%date%

for /f "tokens=1 delims=/" %%a in ("%data%") do set dia=%%a

for /f "tokens=2 delims=/" %%a in ("%data%") do set mes=%%a

for /f "tokens=3 delims=/" %%a in ("%data%") do set ano=%%a

set data=%mes%_%dia%_%ano%
```

```
cd d:/DIRETORIO DO ARQUIVO A SER RENOMEADO
```

```
ren ARQUIVO A SER RENOMEADO.dat %data%.dat
```

```
echo %data%
```

APÊNDICE B – ROTINA DE PROGRAMAÇÃO DAS TORRES 1 E 3

A rotina de programação do *datalogger* consiste de três etapas: a primeira é a declaração das variáveis e das unidades, a segunda é a definição das tabelas a serem geradas e a terceira é a definição de leitura dos sensores. Todas as variáveis que serão utilizadas devem estar contidas na primeira parte da rotina, seguidas de suas unidades de medidas. As tabelas a serem geradas devem conter as operações matemáticas que serão utilizadas, as variáveis que serão apresentadas e o período de aquisição. Já a rotina do programa deve conter as especificações de leitura, sinal de entrada e saída, constantes de calibração entre outros, de forma que o sinal elétrico lido seja associado à variável dependente. Os programas criados para as torres 1 e 3 seguem abaixo:

B.1 – Unidade 1:

'Declaração das variáveis e das unidades

Public BattV

Public radLAS

Public radTERM

Public Pressao

Public Temp

Public Umid

Public Chuva

Public Velocidad

Public Direcao

Public KZ_PV

Public Rad_LICOR

Units BattV=Volts

Units radLAS=W/m2

Units radTERM=W/m2

Units Pressao=mb
Units Temp=C
Units Umid=%
Units Chuva=mm
Units Velocidad=kilometers/hour
Units Direcao=degrees
Units KZ_PV=mV
Units Rad_LICOR=mV

'Definição dos dados das tabelas

```
DataTable(Torre1_a,True,-1)
    DataInterval(0,5,Min,10)
    Average(1,radLAS,FP2,False)
    Average(1,radTERM,FP2,False)
    Average(1,KZ_PV,FP2,False)
    Average(1,Pressao,IEEE4,False)
    Average(1,Temp,FP2,False)
    Average(1,Umid,FP2,False)
    Totalize(1,Chuva,FP2,False)
    WindVector (1,Velocidad,Direcao,FP2,False,0,0,0)
    FieldNames("Velocidad_S_WVT,Direcao_D1_WVT,Direcao_SD1_WVT")
    Average(1,Rad_LICOR,FP2,False)
EndTable
```

```
DataTable(Torre1_b,True,-1)
    DataInterval(0,1,Min,10)
    Minimum(1,BattV,FP2,False,False)
    Average(1,radLAS,FP2,False)
    StdDev(1,radLAS,FP2,False)
    Maximum(1,radLAS,FP2,False,True)
    Average(1,radTERM,FP2,False)
```

```
StdDev(1,radTERM,FP2,False)
Maximum(1,radTERM,FP2,False,True)
Average(1,KZ_PV,FP2,False)
StdDev(1,KZ_PV,FP2,False)
Maximum(1,KZ_PV,FP2,False,True)
Average(1,Pressao,IEEE4,False)
StdDev(1,Pressao,IEEE4,False)
Average(1,Temp,FP2,False)
StdDev(1,Temp,FP2,False)
Maximum(1,Temp,FP2,False,False)
Minimum(1,Temp,FP2,False,False)
Average(1,Umid,FP2,False)
StdDev(1,Umid,FP2,False)
Maximum(1,Umid,FP2,False,False)
Minimum(1,Umid,FP2,False,False)
Average(1,Rad_LICOR,FP2,False)
StdDev(1,Rad_LICOR,FP2,False)
Maximum(1,Rad_LICOR,FP2,False,True)
```

EndTable

```
DataTable(Vento,True,-1)
```

```
  DataInterval(0,30,Min,10)
```

```
  WindVector (1,Velocidad,Direcao,FP2,False,0,0,0)
```

```
  FieldNames("Velocidad_S_WVT,Direcao_D1_WVT,Direcao_SD1_WVT")
```

```
  Average(1,Velocidad,FP2,False)
```

```
  Sample(1,Direcao,FP2)
```

EndTable

```
DataTable(tempReal,True,-1)
```

```
  DataInterval(0,10,Sec,10)
```

```
  Average(1,radLAS,FP2,False)
```

```
Average(1,Pressao,FP2,False)
Average(1,Temp,FP2,False)
Average(1,Umid,FP2,False)
Average(1,Chuva,FP2,False)
Average(1,Velocidad,FP2,False)
Sample(1,Direcao,FP2)
```

EndTable

```
DataTable(Chuva,True,-1)
    DataInterval(0,1,Day,10)
    Totalize(1,Chuva,FP2,False)
```

EndTable

```
DataTable(hora,True,-1)
    DataInterval(0,1,Hr,10)
    Totalize(1,Chuva,FP2,False)
    Average(1,radLAS,FP2,False)
    Average(1,radTERM,FP2,False)
    Average(1,KZ_PV,FP2,False)
    Average(1,Pressao,FP2,False)
    Average(1,Temp,FP2,False)
    Average(1,Umid,FP2,False)
```

EndTable

'Programa

BeginProg

```
Scan(10,Sec,1,0)
```

```
'Default Datalogger Battery Voltage measurement BattV
Battery(BattV)
```

```
'Generic Differential Voltage measurements radLAS
```

VoltDiff(radLAS,1,mV25,1,True,0,_60Hz,66.666666666666666667,0)

'Generic Differential Voltage measurements radTERM

VoltDiff(radTERM,1,mV7_5,2,True,0,_60Hz,197.2386588,0)

'Generic Differential Voltage measurements Pressao

VoltDiff(Pressao,1,mV5000,3,False,0,_60Hz,0.060,+794.154218182)

'Generic Single-Ended Voltage measurements Temp

VoltSE(Temp,1,mV2500,7,True,0,_60Hz,0.1,-40.07)

'Generic Single-Ended Voltage measurements Umid

VoltSE(Umid,1,mV2500,8,True,0,_60Hz,0.1,-0.16)

'Pulse measurement Chuva

PulseCount(Chuva,1,1,2,0,0.25,0)

'034A/034B Wind Speed & Direction Sensor measurements

Velocidad and Direcao

PulseCount(Velocidad,1,2,2,1,2.8764,1.012)

If Velocidad=1.012 Then Velocidad=0

BrHalf(Direcao,1,mV2500,9,1,1,2500,True,0,_60Hz,720,0)

If Direcao>=360 Then Direcao=0

'Generic Differential Voltage measurements KZ_PV

VoltDiff(KZ_PV,1,mV250,6,True,0,_60Hz,14.47178003,0)

'Generic Differential Voltage measurements Rad_LICOR

VoltDiff(Rad_LICOR,1,mV25,7,True,0,_60Hz,1,0)

'Call Data Tables and Store Data

CallTable(Torre1_a)

CallTable(Torre1_b)

CallTable(Vento)

CallTable(tempReal)

CallTable(Chuva)

CallTable(hora)

NextScan

EndProg

B.2 – Unidade 3:

'Declaração das variáveis e unidades

Public BattV

Public Rad_1

Public Rad_2

Public Barometro

Public Temperatu

Public Umidade

Public Chuva

Public WS_kph

Public WindDir

Units BattV=Volts

Units Rad_1=mV

Units Rad_2=mV

Units Barometro=hPa

Units Temperatu=C

Units Umidade=% UR

Units Chuva=mm

Units WS_kph=kilometers/hour

Units WindDir=degrees

'Definição dos dados das tabelas

DataTable(Met1,True,-1)

 DataInterval(0,30,Min,10)

 Average(1,Rad_1,FP2,False)

 Average(1,Rad_2,FP2,False)

 Average(1,Barometro,FP2,False)

Average(1,Temperatu,FP2,False)

Average(1,Umidade,FP2,False)

Average(1,WS_kph,FP2,False)

Sample(1,WindDir,FP2)

EndTable

DataTable(Chuva,True,-1)

DataInterval(0,1,Day,10)

Minimum(1,BattV,FP2,False,False)

Totalize(1,Chuva,FP2,False)

EndTable

DataTable(t_1_min,True,-1)

DataInterval(0,1,Min,10)

Average(1,Rad_2,FP2,False)

Average(1,Barometro,FP2,False)

Average(1,Temperatu,FP2,False)

Average(1,Umidade,FP2,False)

Average(1,WS_kph,FP2,False)

Sample(1,WindDir,FP2)

EndTable

DataTable(t_5_min,True,-1)

DataInterval(0,5,Min,10)

Average(1,Rad_2,FP2,False)

Average(1,Barometro,FP2,False)

Average(1,Temperatu,FP2,False)

Average(1,Umidade,FP2,False)

Average(1,WS_kph,FP2,False)

Sample(1,WindDir,FP2)

EndTable

```

DataTable(t_10_min,True,-1)
    DataInterval(0,10,Min,10)
    Average(1,Rad_2,FP2,False)
    Average(1,Barometro,FP2,False)
    Average(1,Temperatu,FP2,False)
    Average(1,Umidade,FP2,False)
    Average(1,WS_kph,FP2,False)
    Sample(1,WindDir,FP2)
EndTable

```

```

DataTable(t_60_min,True,-1)
    DataInterval(0,60,Min,10)
    Average(1,Rad_2,FP2,False)
    Average(1,Barometro,FP2,False)
    Average(1,Temperatu,FP2,False)
    Average(1,Umidade,FP2,False)
    Average(1,WS_kph,FP2,False)
    Sample(1,WindDir,FP2)
EndTable

```

```

'Programa
BeginProgam
    Scan(5,Sec,1,0)
        'Default Datalogger Battery Voltage measurement BattV
        Battery(BattV)
        'Generic Differential Voltage measurements Rad_1
        VoltDiff(Rad_1,1,AutoRange,1,True,0,_60Hz,1,0)
        'Generic Differential Voltage measurements Rad_2
        VoltDiff(Rad_2,1,AutoRange,2,True,0,_60Hz,13.79310145,0)
        'Generic Differential Voltage measurements Barometro

```

```

VoltDiff(Barometro,1,mV5000,3,True,0,_60Hz,0.060,800.027)
'Generic Single-Ended Voltage measurements Temperatu
VoltSE(Temperatu,1,mV2500,7,True,0,_60Hz,0.1,-40)
'Generic Single-Ended Voltage measurements Umidade
VoltSE(Umidade,1,mV2500,8,True,0,_60Hz,0.1,0)
'Pulse measurement Chuva
PulseCount(Chuva,1,1,2,0,0.20,0)
'034A/034B Wind Speed & Direction Sensor measurements
WS_kph and WindDir
PulseCount(WS_kph,1,2,2,1,2.8764,1.012)
If WS_kph=1.012 Then WS_kph=0
BrHalf(WindDir,1,mV2500,9,1,1,2500,True,0,_60Hz,720,0)
If WindDir>=360 Then WindDir=0
'Call Data Tables and Store Data
CallTable(Met1)
CallTable(Chuva)
CallTable(t_1_min)
CallTable(t_5_min)
CallTable(t_10_min)
CallTable(t_60_min)
NextScan
EndProg

```