



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.12.18.31-TDI

## CARACTERIZAÇÃO DE PIRGEÔMETROS E CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS MEDIDOS

José Dias Neto

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. José Celso Thomaz Júnior, aprovada em 11 de junho de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GA8ETS>>

INPE  
São José dos Campos  
2014

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

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

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

Dr<sup>a</sup> 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:**

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.12.18.31-TDI

## CARACTERIZAÇÃO DE PIRGEÔMETROS E CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS MEDIDOS

José Dias Neto

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. José Celso Thomaz Júnior, aprovada em 11 de junho de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GA8ETS>>

INPE  
São José dos Campos  
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Dias Neto, José.

D543c Caracterização de pirgeômetros e controle de qualidade dos dados medidos / José Dias Neto. – São José dos Campos : INPE, 2014.

xxii + 67 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.12.18.31-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientador : Dr. José Celso Thomaz Júnior.

1. Radiação. 2. Instrumentação. 3. Calibração. 4. Onda longa.  
5. Pirgeômetro. I.Título.

CDU 551.508

---

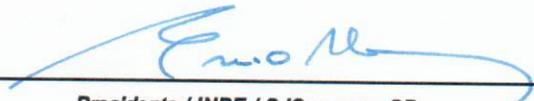


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

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

Dr. Enio Bueno Pereira

  
\_\_\_\_\_  
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

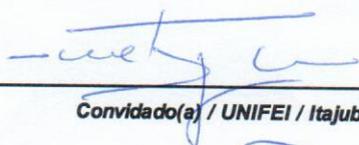
Dr. José Celso Thomaz Júnior

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / CPTEC/INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Simone Marilene Sievert da Costa  
Coelho

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

Dr. Marcelo de Paula Corrêa

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / UNIFEI / Itajubá - MG

Dr. Fernando Ramos Martins

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / UNIFESP / Santos - SP

**Este trabalho foi aprovado por:**

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **José Dias Neto**

**São José dos Campos, 11 de Junho de 2014**



יברכך יהוה וישמרך:  
יאר יהוה פניו אליך ויחנך:  
ישא יהוה פניו אליך וישם לך שלום:

תורה ויקרא

יהוה



*A todos que contribuíram para que este trabalho fosse realizado.*



## AGRADECIMENTOS

Ao יהוה que tem mantido-me com saúde durante todos esses dias e tem concedido-me inspiração para realizar este trabalho.

Aos meus pais que sempre estiveram dispostos a ajudar-me em todas as circunstâncias.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do INPE (PGMET) pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais por disponibilizar os dados utilizados.

Ao Dr. José Celso Thomaz Júnior, chefe do Laboratório de Instrumentação Meteorológica (LIM), por ter sido o orientador deste trabalho e que sem medir esforços cedeu parte do seu tempo, espaço físico e equipamentos necessários para realização de todos os experimentos. Ressalto ainda que desde os meus primeiros dias como aluno da PGMET ele demonstrou interesse em trabalhar com pesquisas voltadas para a Instrumentação. Ao Dr. Domingos Fernandes Urbano, pesquisador do LIM, que várias vezes auxiliou-me sugerindo ideias para melhorar o texto e o desempenho durante as apresentações de trabalhos. A ele também agradeço por ter concedido a oportunidade de participar de embarques para realizar atividades de campo.

Aos engenheiros Paulo Rogério de Arquivo Arlino, Cristiano Carvalho da Silva e Jorge Luiz Martins Nogueira e aos técnicos do LIM Antônio Carlos Barbosa, Alexandre Terra Alves de Lima, Jorge Martins de Melo, Jorge Marton, Nilson Luiz Rodrigues, Osvaldo Siqueira da Silva que sempre estiveram dispostos a ajudar-me com a montagem do aparato experimental.

Aos metrologistas Márcio Antônio Aparecido Santana e Patrícia Lúcia de Oliveira Guimarães pela concessão do sensor CG4 050748.

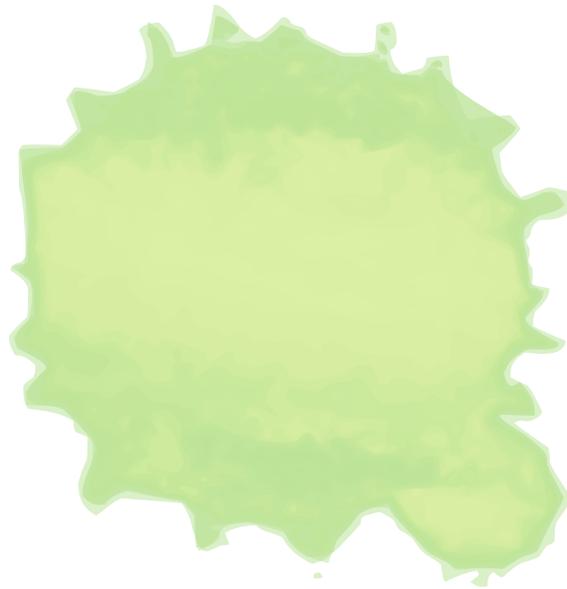
À analista de TI Jesarela da Silva Fonseca que sempre resolveu os problemas administrativos.

À Nívea Aparecida Silva que durante esses dois anos de trabalho realizou a limpeza da sala em todas as manhãs.

Ao Dr. Julian Gröbner head IR radiometry section do Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos que enviou-me relatórios da Primeira Comparação Internacional de Pirgeômetros e os procedimentos de calibração adotados no PMOD.

À Ana Beatriz ( $Bi + a$ ) amiga que tenho grande admiração. Ela tem incentivado-me a continuar fazendo ciência desde os primeiros anos da graduação.

Aos amigos do alojamento Bruno Zanetti Ribeiro que em todos os domingos preparava o mate para tomar-mos e Roberto Rodrigues Carlos Rodriguez Murguesa pelas várias parcerias culinárias. Também agradeço aos demais moradores do alojamento pelo companheirismo.



## RESUMO

Estudos científicos têm mostrado que mudanças climáticas é real e produz impactos significantes na agricultura, produção de energia elétrica e economia de um país. Portanto, uma melhor previsão do clima é necessária e só pode ser alcançado por um melhor entendimento das mudanças do clima atual. Para isso, é necessário que haja monitoramento do Sistema Terrestre por satélites, sondagens atmosféricas e estações de superfície durante longos períodos. Dentre as variáveis monitoradas a Radiação de Onda Longa (ROL) é uma que está diretamente relacionada com a temperatura da atmosfera. No Brasil, o Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) realiza observações de superfície com o objetivo de produzir dados confiáveis e de alta qualidade. Este trabalho apresenta uma metodologia para avaliar a acurácia das observações de ROL e melhorar a qualidade dos dados. A metodologia utiliza conceitos empregados na calibração em ambiente externo ao laboratório, onde são comparados os dados de sensores de diferentes modelos ou marcas com o dado do sensor padrão. A comparação entre os sensores é avaliada utilizando testes estatísticos. Utilizando esta metodologia foi possível minimizar o vies em  $7,49W/m^2$  para o sensor PIR e  $3,26W/m^2$  para o CGR4. Também foi possível corrigir o efeito de uma eventual incidência direta da Radiação de Onda Curta ROC. Ao meio-dia o valor corrigido foi de  $10W/m^2$  para o sensor PIR e de  $5W/m^2$  para o sensor CGR4.



# PYRGEOMETER CHARACTERIZATION AND QUALITY CONTROL OF MEASURED DATA

## ABSTRACT

Scientific assessments have established that climate change is real and has significant impacts on agriculture, power generation and the economy of a country. Hence a better prediction of future climate is necessary and can be achieved by a better understanding of the changing patterns of the present climate. This requires accurate monitoring of the Earth system through satellites, atmospheric soundings, and ground stations network over a long period of time. Among various monitored variables, atmospheric temperature is the one that directly modulates the Long Wave Radiation (LWR). In Brazil, the National Organization System of Environmental Data (SONDA) conducts environmental ground observations with the intent of generating high quality reliable data. The present work elucidates a methodology to evaluate the accuracy of the LWR observations as well as gives a technique for improving the data quality. Based on outdoor calibration concepts, it compares data from different models or brands of LWR sensors with data generated by a standard sensor. The sensor comparison is evaluated using statistical methods. Using this methodology the data bias produced by LWR sensors were minimized at  $7.49W/m^2$  for PIR sensor and  $3.26W/m^2$  for CGR4 sensor. To do correction of the effects of occasional incidence of direct Short Wave Radiation (SWR) over the sensors was possible. At noon the correction was  $10W/m^2$  for PIR sensor and  $5W/m^2$  for CGR4 sensor.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>	
2.1	Esquema do "Precise Infrared Radiometer"(PIR), pirgeômetro fabricado pela Eppley $\alpha_s$ é absortância da termopilha, $\tau_d$ é transmitância do domo, $\epsilon_d$ é a emitância do domo, $\rho_d$ é a reflectância do domo, $\epsilon_s$ é emitância da termopilha, $E_L$ é irradiância da onda longa, $T_b$ é a temperatura do corpo do sensor, $T_d$ é a temperatura do domo e $T_s$ é a temperatura da superfície da termopilha. $F_{in}$ é o fluxo que incide sobre a termopilha. $F_{out}$ é o fluxo emitido pela termopilha. . . . .	4
2.2	Esquema do CGR4 e CG4, pirgeômetro fabricado pela Kipp & Zonen. $\alpha_s$ é a absortância da termopilha, $\tau_d$ é a transmitância do domo, $\rho_d$ é a reflectância do domo, $\epsilon_s$ é a emitância da termopilha, $E_L$ é irradiância da onda longa, $T_b$ é a temperatura do corpo do sensor e $T_s$ é a temperatura da superfície da termopilha. $F_{in}$ é o fluxo que incide sobre a termopilha. $F_{out}$ é o fluxo emitido pela termopilha. . . . .	4
2.3	Espectro de emissão da radiação solar e atmosférica. . . . .	6
2.4	Esquema da cavidade de corpo negro empregados durante a calibração no PMOD . . . . .	9
2.5	Representação esquemática da cavidade de corpo negro usado no NREL .	10
2.6	Sensor "Absolute Sky-Scanning Radiometer". . . . .	12
2.7	Mapa de distribuição das estações da rede SONDA. . . . .	13
3.1	Experimento de coleta de dados destinados à avaliação da metodologia. Da esquerda para direita ver-se os sensores PIR (analisado), CG4 (padrão) e CGR4 (analisado). . . . .	19
3.2	Intervalo de dados PEC obtidos pelos sensores CGR4 (linha tracejada), padrão (linha espessa) e PIR (linha delgada). . . . .	21
3.3	As figuras (a) e (b) são os intervalos PEA 1 e PEA 2, respectivamente, obtidos pelos sensores CGR4 (linha tracejada), padrão (linha espessa) e PIR (linha delgada). . . . .	21
3.4	Período Instável de Avaliação obtidos pelos sensores CGR4 (linha tracejada), padrão (linha espessa) e PIR (linha delgada). . . . .	22
3.5	Carta de análise da superfície para o dia 182 de 2013 às 12z. . . . .	24
3.6	Carta de análise da superfície para o dia 185 de 2013 às 12z. . . . .	25
3.7	Sondagem no Campo de Marte-SP dia 182 de 2013. . . . .	26
3.8	Sondagem no Aeroporto do Galeão-RJ dia 182 de 2013. . . . .	26

3.9	Sondagem no Campo de Marte-SP dia 185 de 2013. . . . .	27
3.10	Sondagem no Aeroporto do Galeão-RJ dia 185 de 2013. . . . .	27
3.11	Série de dados coletados durante o experimento de Brasília. A curva espessa é para o sensor de referência e a curva delgada é para o sensor analisado. O gráfico inferior mostra a diferença entre o sensor padrão e o sensor em análise . . . . .	28
3.12	Experimento de coleta de dados destinados à avaliação dos dados de ROL de Brasília. Os sensores PIR (analisado), Piranômetro e CG4R 120512 (referência para campo) estão dispostos da esquerda para a direita. . . .	29
4.1	Os gráficos acima apresentam a correlação entre o sensor padrão e os sensores analisados. "B"corresponde ao coeficiente angular da reta suporte dos pontos. 4.1(a) Sensor PIR 33495F3 utilizando coeficientes de ajuste empregados pela rede SONDA, 4.1(b) sensor PIR 33495F3 com os coeficientes calculados, 4.1(c) sensor CGR4 120512 utilizando a equação 2.3 proposta pelo fabricante e 4.1(d) sensor CGR4 120512 com a equação 2.1 e os coeficientes calculados. . . . .	33
4.2	Correlação entre o sensor CGR4 120512 (padrão de campo) e sensor da estação de Brasília PIR 33E9133. B coeficiente angular da reta suporte dos dados. 4.2(a) Sensor PIR 33E9133 empregando os $k_s$ da rede SONDA e 4.2(b) Sensor PIR 33E9133 com os coeficientes calculados pela metodologia proposta. . . . .	35
4.3	Valores médios trimestrais desde 2006 até 2013 sem correção. Em amarelo (JAM) estão os meses de janeiro, fevereiro e março; em laranja (AMJ) os meses de abril, maio e junho; em azul (JAS) os meses de junho, agosto e setembro e em roxo (OND) os meses de outubro, novembro e dezembro. .	35
4.4	Valores médios trimestrais desde 2006 até 2013 corrigidos. Em amarelo (JFM) estão os meses de janeiro, fevereiro e março; em laranja (AMJ) os meses de abril, maio e junho; em azul (JAS) os meses de junho, agosto e setembro e em roxo (OND) os meses de outubro, novembro e dezembro. .	36
4.5	Diferença entre os dados atualmente armazenados e esses mesmos dados corrigidos. A escala de cores corresponde a intensidade da diferença $W/m^2$ . 37	
4.6	Diferença percentual entre os valores calculados pelas equações 2.1, 2.3, 2.2 e 2.4 e o valor obtido pelo sensor padrão. A curva em azul é para a equação 2.2 (Dickey). A curva em preto é para a equação 2.4 (Kipp&Zonen). A curva em vermelho é para a equação 2.1 (PMOD1). A curva em verde é para a equação 2.3 (PMOD2). . . . .	38

4.7	Diferença percentual entre os valores calculados pelas equações 2.1, 2.3, 2.2 e 2.4 e o obtido pelo sensor padrão. A curva em azul é para a equação 2.2 (Dickey). A curva em preto é para a equação 2.4 (Kipp&Zonen). A curva em vermelho é para a equação 2.1 (PMOD1). A curva em verde é para a equação 2.3 (PMOD2). . . . .	39
4.8	Diferença entre as intensidades de ROL medidas pelo sensor padrão e os dois sensores analisados no dia 261 com os sensores sombreados. A curva de diferença em vermelho é para o PIR 33495F3 e a curva em verde é para o CGR4 120511. . . . .	40
4.9	Diferença entre as intensidades de ROL medidas pelo sensor padrão e os dois sensores analisados no dia 293 com os sensores não sombreados. A curva de diferença em vermelho é para o PIR 33495F3 e a curva em verde é para o CGR4 120511. . . . .	41
4.10	Diferença entre as intensidades de ROL medidas pelo sensor padrão e os dois sensores analisados no dia 362 com os sensores não ventilados. A curva de diferença em vermelho é para o PIR 33495F3 e a curva em verde é para o CGR4 120511. . . . .	42
B.1	Diferença entre as intensidades de ROL medidas pelos os dois sensores analisados e o sensor padrão no dia 293 com os sensores não sombreados. A curva de diferença em vermelho é para o PIR 33495F3 e a curva em verde é para o CGR4 120511. . . . .	57
B.2	Coefficiente de proporcionalidade puntual. A curva em vermelho é para o PIR 33495F3 e a curva em verde é para o CGR4 120511. . . . .	58



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Tabela para o Primeiro Intervalo de dados. . . . .	20
3.2 Tabela para o Segundo Intervalo de dados. . . . .	22
4.1 Coeficientes de ajuste empregados na rede SONDA, os utilizados pelo fabricante e os calculados para os dois sensores. . . . .	31
4.2 Resultados obtidos para os testes estatísticos VIES, REQM, EMA e EPMA calculados para os coeficientes do SONDA, do fabricante (Fab) e o calculado com a MeCADROL (Calc). . . . .	32
4.3 Conjunto de coeficientes da rede SONDA e o calculado para estação de Brasília. . . . .	34
4.4 Testes estatísticos calculados com os coeficientes da rede SONDA e o calculado com a MeCADROL. . . . .	34



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	2
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>3</b>
2.1 Sensores . . . . .	3
2.2 Dificuldades na Medida . . . . .	5
2.3 Equações para calcular a intensidade da ROL . . . . .	5
2.4 Métodos de Calibração dos Sensores . . . . .	7
2.5 Base de dados de ROL . . . . .	11
<b>3 METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>15</b>
3.1 Descrição da MeCADROL . . . . .	15
3.1.1 Determinação dos coeficientes de ajuste $k_s$ . . . . .	15
3.1.2 Avaliação dos $k_s$ . . . . .	18
3.2 Obtenção dos dados Experimentais . . . . .	19
3.3 Caracterização dos períodos Estáveis . . . . .	23
3.4 Experimento de Brasília . . . . .	28
3.5 Termo de redução da ROC . . . . .	29
<b>4 RESULTADOS</b> . . . . .	<b>31</b>
4.1 Teste da metodologia . . . . .	31
4.2 Emprego da MeCADROL no sítio de Brasília . . . . .	33
4.3 Análise da correção dos dados da estação de Brasília . . . . .	34
4.4 Comparação das diferentes equações de cálculo da ROL . . . . .	37
4.5 Influência do Sombreamento e ventilação . . . . .	40
<b>5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES</b> . . . . .	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> . . . . .	<b>47</b>
<b>APÊNDICE A</b> . . . . .	<b>53</b>
A.1 Dedução teórica da Irradiância medida pelo sensor CGR4 . . . . .	53
<b>APÊNDICE B</b> . . . . .	<b>57</b>
B.1 Dedução da equação para calcular o termo rROC . . . . .	57

<b>ANEXO A.</b> . . . . .	<b>61</b>
A.1 Dedução teórica da Irradiância medida pelo sensor PIR . . . . .	61
<b>ANEXO B.</b> . . . . .	<b>65</b>
B.1 Certificado de calibração do sensor CG4 050748 . . . . .	65

# 1 INTRODUÇÃO

As recentes mudanças no clima ressaltam a importância em monitorar o comportamento das variáveis ambientais (TRENBERTH et al., 2006), principalmente aquelas que controlam o balanço de energia do planeta, como as componentes da radiação atmosférica e solar. A radiação emitida pela atmosfera é denominada de Radiação de Onda Longa (ROL) e desempenha um papel importante na determinação do saldo de radiação e do fluxo radiativo. Estes são parâmetros fundamentais para uma melhor compreensão dos acoplamentos continente-atmosfera e oceano-atmosfera (WEBSTER; LUKAS, 1992; DICKEY et al., 1994) e seus processos de retroalimentação (*feedbacks*). Tett et al. (1999) apresentaram evidências de alterações na temperatura global nos últimos anos, Mitchell et al. (1995) mostraram uma tendência do aumento do efeito estufa devido ao aumento dos níveis de aerossóis na atmosfera, enquanto Harries et al. (2001) evidenciaram mudança no espectro de emissão para a ROL causada por alteração na concentração de espécies químicas responsáveis pelo efeito estufa. Philipona et al. (2004) afirmaram que o uso das medidas da ROL em superfície combinadas com modelos de transferência radiativa possibilitam avaliar o efeito estufa para uma determinada região. Assim, variações de ROL refletem o processo de variações na temperatura da atmosfera, funcionando como um *proxi* para esse fenômeno.

O monitoramento *in situ* da radiação é fundamental para a calibração de dados obtidos por sensoriamento remoto, tais como aeronaves (ALBRECHT et al., 1974), satélites e validação dos resultados de modelos (CRAWFORD; DUCHON, 1999; JONSSON et al., 2006). No entanto, de acordo com o levantamento realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e publicado no relatório "Solar and Wind Energy Resource Assessment" (PEREIRA; LIMA, 2008) a base de dados de radiação de superfície necessária para a validação de modelos é extremamente deficiente no Brasil e em toda a América Latina. Diferente de outras variáveis como temperatura ou a radiação emitida pelo sol, denominada de Radiação de Onda Curta (ROC), as séries temporais de ROL apresentam qualidade questionável por não haver procedimentos de avaliação e controle de qualidade bem estabelecidos. No Brasil, o Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) visa aprimorar a base de dados de superfície necessária ao levantamento dos recursos de energia solar e eólica (THOMAZ, 2012) e dispõem em suas estações de sensores para medir a intensidade da ROL.

Uma particularidade no processo de amostragem da ROL é o fato da medida ser dependente de propriedades dos materiais que constituem cada instrumento (ALBRECHT; COX, 1977) e que são representadas pelos coeficientes de calibração na equação utilizada para calcular a ROL. Para garantir a confiabilidade dos dados gerados é necessário avaliar as séries temporais de ROL fornecidas pelos sensores de cada estação. Também é preciso avaliar o impacto nos dados produzidos pela mudança de modelos de pirgeômetros ao longo do tempo. Entretanto, não existe uma metodologia definida e consolidada na comunidade científica que esteja disponível para realizar essas análises e correções, principalmente quando pretende-se corrigir dados pretéritos depositados em bancos de dados. Desta forma, o propósito deste trabalho é apresentar uma metodologia capaz de realizar estimativas dos coeficientes dos pirgeômetros para que correções em séries temporais de ROL sejam realizadas.

## 1.1 Objetivos

Em vista do problema que será exposto na seção 2.5, este trabalho tem o objetivo principal de propor um método para avaliar dados históricos de Radiação de Onda Longa e corrigi-los. Para atingir o objetivo principal foram concebidos os seguintes objetivos específicos:

- avaliar a eficiência da metodologia em obter os coeficientes para correção dos dados;
- aplicar a metodologia na estação do sítio de Brasília;
- reprocessar os dados históricos da estação de Brasília;
- avaliar a influência do sombreamento na intensidade da ROL; e,
- comparar a intensidade calculada pelas equações PMOD1, PMOD2, Dickey e Kipp&Zonen.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os sensores empregado para medir a ROL, as dificuldades inerentes a medição, diferentes equações empregadas para a intensidade da ROL, os métodos utilizados para calibrar os sensores e a base de dados de ROL empregadas neste trabalho.

### 2.1 Sensores

Nesta seção serão apresentados dois modelos de sensores empregados para medir a ROL: O pirgeômetro PIR produzido pelo "The Eppley Laboratory, Inc." que é atualmente empregado na rede de estações do SONDA e o pirgeômetro CGR4, produzido pela Kipp & Zonen que foi adquirido para ser instalado nas novas estações da rede e eventualmente substituir os sensores PIR.

O sensor PIR (figura 2.1) é constituído por um corpo metálico em que há uma cavidade protegida por um domo de sílica. O domo é responsável por permitir a passagem de radiação que possui comprimento de onda entre  $3,5\mu m$  e  $50\mu m$ . Dentro da cavidade há uma termopilha que gera uma diferença de potencial proporcional ao gradiente de temperatura entre a sua superfície e o corpo do instrumento. Há também dois termistores para medir a temperatura. Um termistor está localizado no domo à 45 graus da superfície da termopilha e o outro na junção entre o domo e o corpo do sensor.

O sensor CGR4 (figura 2.2) é similar ao PIR quanto ao corpo metálico. Também apresenta uma cavidade protegida por um domo de sílica. O domo deste sensor apresenta uma curvatura menor que o domo do PIR, e permite a passagem de radiação que possui comprimento de onda entre  $4,5\mu m$  e  $42\mu m$ . Dentro da cavidade há uma termopilha que gera uma diferença de potencial proporcional ao gradiente de temperatura entre a sua superfície e o corpo do instrumento. Neste instrumento existe apenas um termistor para medir a temperatura e está localizado no corpo do sensor.

Além desses dois modelos de instrumentos apresentados, existem outros que foram desenvolvidos e são descritos nos trabalhos de Reda et al. (2012), Gröbner (2012), Sakai et al. (2009).

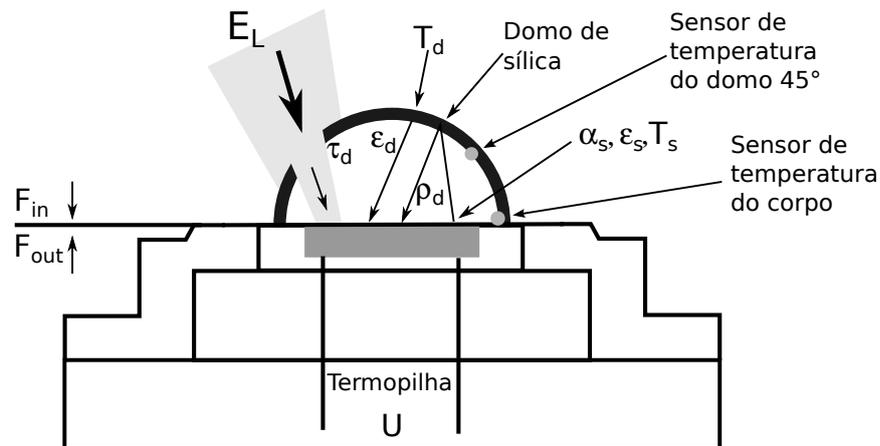


Figura 2.1 - Esquema do "Precise Infrared Radiometer"(PIR), pirgeômetro fabricado pela Eppley  $\alpha_s$  é absorvância da termopilha,  $\tau_d$  é transmitância do domo,  $\epsilon_d$  é a emitância do domo,  $\rho_d$  é a refletância do domo,  $\epsilon_s$  é emitância da termopilha,  $E_L$  é irradiância da onda longa,  $T_b$  é a temperatura do corpo do sensor,  $T_d$  é a temperatura do domo e  $T_s$  é a temperatura da superfície da termopilha.  $F_{in}$  é o fluxo que incide sobre a termopilha.  $F_{out}$  é o fluxo emitido pela termopilha. Fonte: Adaptado de Philipona et al. (1995).

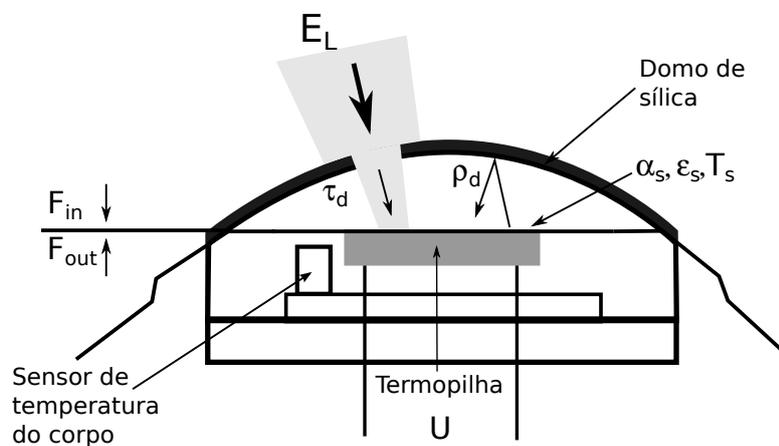


Figura 2.2 - Esquema do CGR4 e CG4, pirgeômetro fabricado pela Kipp & Zonen.  $\alpha_s$  é a absorvância da termopilha,  $\tau_d$  é a transmitância do domo,  $\rho_d$  é a refletância do domo,  $\epsilon_s$  é a emitância da termopilha,  $E_L$  é irradiância da onda longa,  $T_b$  é a temperatura do corpo do sensor e  $T_s$  é a temperatura da superfície da termopilha.  $F_{in}$  é o fluxo que incide sobre a termopilha.  $F_{out}$  é o fluxo emitido pela termopilha.

## 2.2 Dificuldades na Medida

A medição da Radiação de Onda Longa está fundamentada na lei de Stefan-Boltzmann, que afirma que a densidade de energia irradiada é proporcional a quarta potência da temperatura. Logo, medir a ROL consiste em medir a temperatura. Devido a natureza do mensurando, surgem as dificuldades associadas a medida pois existem influência de vários fatores (DUTTON et al., 2001).

Durante as medidas o sensor está exposto às variações de temperatura do ambiente. Devido a isto, tanto o corpo quanto o domo do instrumento emitem radiação, saturando o sinal obtido pela termopilha. A saturação é removida utilizando os valores da temperatura obtidos pelo termistor do domo e do corpo. Durante o período diurno, a incidência direta da ROC sobre o domo produz uma intensificação sistemática do sinal (ALADOS-ARBOLEDAS et al., 1988; ENZ et al., 1975) pois parte da radiação incidente é transmitida para termopilha. O domo do sensor PIR transmite a componente da ROC que tem comprimento de onda maior que  $3,5\mu m$  enquanto que o CGR4 transmite a onda com comprimento maior  $4,5\mu m$ , mesmo após terem ocorridos avanços significativos no desenvolvimento do domo (PHILIPONA et al., 1995).

A figura 2.3 apresenta as intensidades da ROC, multiplicada por um fator de  $10^{-6}$ , e da ROL em função do comprimento de onda. Nota-se que o espectro da ROC sobrepõe o espectro da ROL entre os comprimentos de onda de  $3\mu m$  e  $6\mu m$ , justificando assim a saturação observada no sinal. Para evitar isso adota-se o procedimento de instalar os sensores em um rastreador solar provido de um sombreador.

## 2.3 Equações para calcular a intensidade da ROL

Ao longo dos anos, foram desenvolvidas várias equações destinadas a quantificar a intensidade da ROL obtidas pelos pirgeômetros. Neste trabalho serão apresentadas as equações para o PIR e para o CGR4.

A equação 2.1 sugerida pela "Baseline Surface Radiation Network(BSRN)"(MCARTHUR, 2005) para calcular a ROL e que é utilizada pelo "Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos"(PMOD) (PHILIPONA et al., 1995), foi desenvolvida para ser aplicada ao sensor PIR. Trata-se de uma expressão geral para o cálculo da ROL, pois partindo desta as equações 2.2,2.3 e 2.4 podem ser obtidas (no ANEXO A encontra-se a dedução teórica desenvolvida por Philipona et al. (1995)).

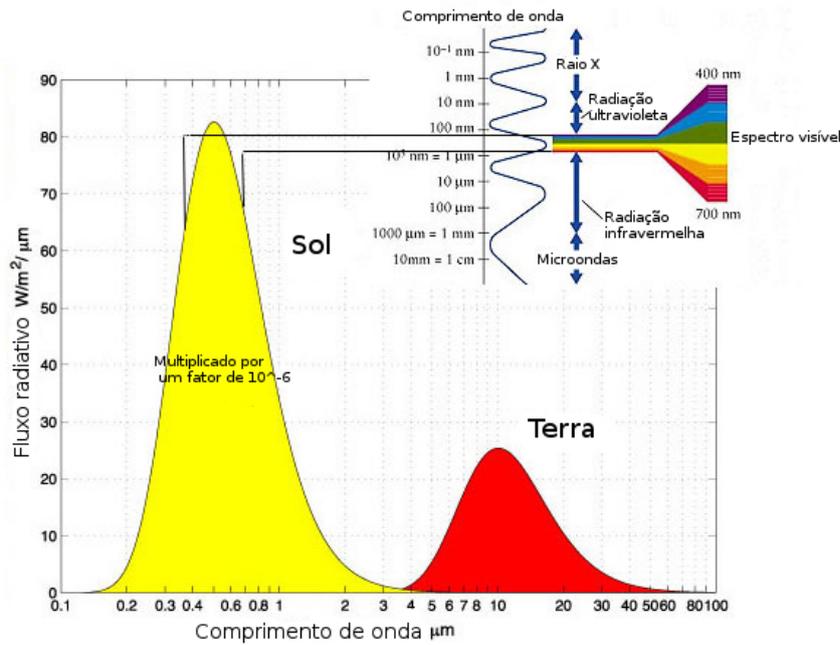


Figura 2.3 - Espectro de emissão da radiação solar e atmosférica.  
 Fonte: Adaptado de Kushnir (2013).

Para o PIR existe, ainda, a equação 2.2 proposta por Dickey et al. (1994) para ser usada em estações do tipo boias, que por não ser possível instalar um sistema de rastreamento devido ao constante movimento, a correção do efeito de saturação é realizada matematicamente pelo termo  $k_3SW$  onde  $k_3$  é determinado empiricamente e  $SW$  é a radiação global. Esta equação pode ser obtida a partir da equação 2.1, por método algébrico, considerando que não há contribuição cúbica da temperatura do corpo e fazendo  $f\Delta T_{S-N} = k_3SW$ . Os  $k_s$  desta equação foram obtidos a partir de medidas empíricas da transmitância, emitância e refletância de cada material (DICKEY et al., 1994), são eles:  $k_1 = 1,11 \pm 0,50$ ,  $k_2 = 2,11 \pm 0,036$  e  $k_3 = 0,036 \pm 0,013$ .

Para o sensor CGR4 o PMOD emprega a equação 2.3 que pode ser obtida fazendo  $T_d = T_b$  na equação 2.1, devido a ausência do termistor do domo (no APÊNDICE A encontra-se a dedução teórica). A apresentação da dedução é importante, pois não foi encontrada na literatura. A Kipp & Zonen propõe a equação simplificada 2.4 (KIPP & ZONEN, 2014) que pode ser obtida da equação 2.1 considerando que a contribuição cúbica da temperatura do corpo do sensor é nula,  $k_2$  é identicamente igual a 1 e  $T_d = T_b$

a) PMOD1

$$E_l = \frac{U}{C}(1 + k_1\sigma T_b^3) + k_2\sigma T_b^4 - k_3\sigma(T_d^4 - T_b^4) - f\Delta T_{S-N} \quad (2.1)$$

b) Dickey

$$E_l = \frac{U}{C} + k_1\sigma T_b^4 - k_2\sigma T_d^4 - k_3SW \quad (2.2)$$

c) PMOD2

$$E_l = \frac{U}{C}(1 + k_1\sigma T_b^3) + k_2\sigma T_b^4 - f\Delta T_{S-N} \quad (2.3)$$

d) Kipp&Zonen

$$E_l = \frac{U}{C} + \sigma T_b^4 \quad (2.4)$$

- $E_l$  é a intensidade da ROL;
- $U$  é a diferença de potencial;
- $C$  é a sensibilidade (constante de proporcionalidade, característica de cada sensor, usada para converter a diferença de potencial  $V$  em irradiância  $W/m^2$ );
- $T_b$ <sup>1</sup> é a temperatura do corpo e  $T_d$  é a temperatura do domo;
- Os  $k_s$  ( $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ ) são constantes determinadas através de sistemas de calibração;
- $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann;
- $f\Delta T_{S-N}$  e  $k_3SW$  representam a contribuição da ROC quando não há sombreamento.

## 2.4 Métodos de Calibração dos Sensores

Para garantir a validade dos dados de radiação medidos pelos sensores é necessário um laboratório de calibração para que os sensores possam ser avaliados. DeFelice (1998) afirma que os sensores devem ser submetidos a avaliações periódicas. O trabalho apresentado por Gröbner e Los (2007) mostra que o domo de cada pirgeômetro apresenta uma curva de transmissão espectral particular e não uniforme, o que torna

---

<sup>1</sup> $T_s = T_b + \gamma U$   $\gamma$  é constante que relaciona a diferença de potencial com a temperatura

evidente a necessidade da calibração de cada sensor com a caracterização dos próprios coeficientes  $k_s$ .

Existem, atualmente, vários métodos de calibração que podem ser usados em laboratório de calibração (REDA et al., 2002; REDA et al., 2006; MELONI et al., 2012; GRÖBNER; WACKER, 2012). Entre eles, os dois principais são: 1) método interno, que emprega um corpo negro como fonte de radiação; e, 2) o método externo, que utiliza um sensor de ROL como referência (MCARTHUR, 2005). Sendo este último o método empregado neste trabalho.

O corpo negro empregado na calibração interna consiste em uma cavidade na qual é possível controlar a temperatura interna através de um sistema de aquecimento e refrigeração. A parte interna da cavidade é revestida com uma pigmentação negra de alta emissividade. Estas características são utilizadas para tentar reproduzir o intervalo de temperatura que o sensor de ROL encontrará em campo.

No PMOD, como reportado por Philipona et al. (1995), o corpo negro consiste de uma cavidade cilíndrica de alumínio na qual é possível controlar as temperaturas do corpo e do domo do instrumento, com a possibilidade de mantê-la por um longo intervalo de tempo (as dimensões são  $L = 610mm$  e  $D = 180mm$ ; figura 2.4). A câmara interna do corpo negro possui um revestimento com emitância de  $\epsilon = 0,96$ , que somada a contribuição devido a fatores geométricos totaliza uma emitância de  $\epsilon_a = 0,9985$  (PHILIPONA et al., 1995). Dentro da cavidade a emissão de radiação comporta-se como um corpo cinza<sup>2</sup>. Ao longo de todo o procedimento é mantido em funcionamento o sistema de ventilação para minimizar a diferença de temperatura entre o domo e o corpo do sensor. Durante a caracterização as temperaturas do corpo negro e do pirgeômetro são continuamente verificadas e armazenadas. A caracterização é realizada entre as temperaturas de  $-10^\circ C$  e  $40^\circ C$ . São realizadas várias séries de medidas com objetivo de simular condições a que o instrumento será submetido em campo. O valor de  $C$  e dos coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são obtidos a partir do valor médio encontrado em cada série.

A cavidade de corpo negro do sistema de calibração usado no "National Renewable Energy Laboratory (NREL)", figura 2.5, foi desenvolvido em parceria com o "Eppley Laboratory". O corpo negro é constituído por dois hemisférios de cobre mergulhados em um fluido criogênico. A superfície interna superior é revestida com tinta negra que possui emissividade maior que 0,98. O hemisfério inferior que completa o sistema é revestido com ouro. Após o pirgeômetro ser inserido no hemisfério inferior a

---

<sup>2</sup>Denomina-se corpo cinza todo o corpo que não possui emissividade igual a um.

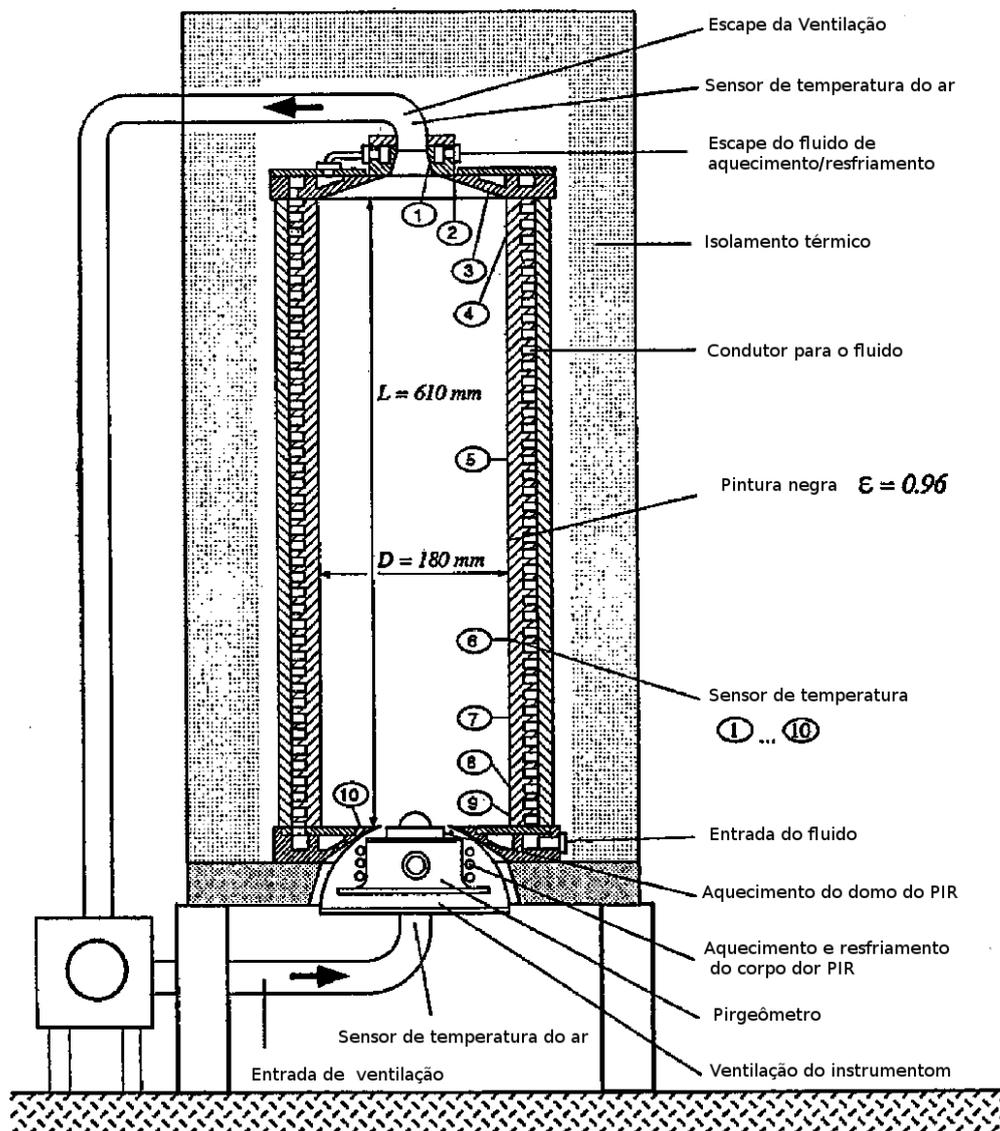


Figura 2.4 - Esquema da cavidade de corpo negro empregados durante a calibração no PMOD

Fonte: Adaptado de Philipona et al. (1995).

emissividade fica muito próxima de 1 (REDA et al., 2006). As temperaturas do hemisfério e do corpo do pirgeômetro podem ser controladas separadamente. Um sistema de circulação de ar seco é usado para evitar condensação a baixas temperaturas. A calibração é realizada usando oito valores de temperaturas para o corpo negro, sendo elas entre  $-35^{\circ}\text{C}$  e  $35^{\circ}\text{C}$  e que foram escolhidas com o objetivo de cobrir todas as possíveis temperaturas do ambiente. Após serem obtidos os valores da ROL para cada ponto aplica-se um método matemático para encontrar o valor de cada coeficiente  $k$ .

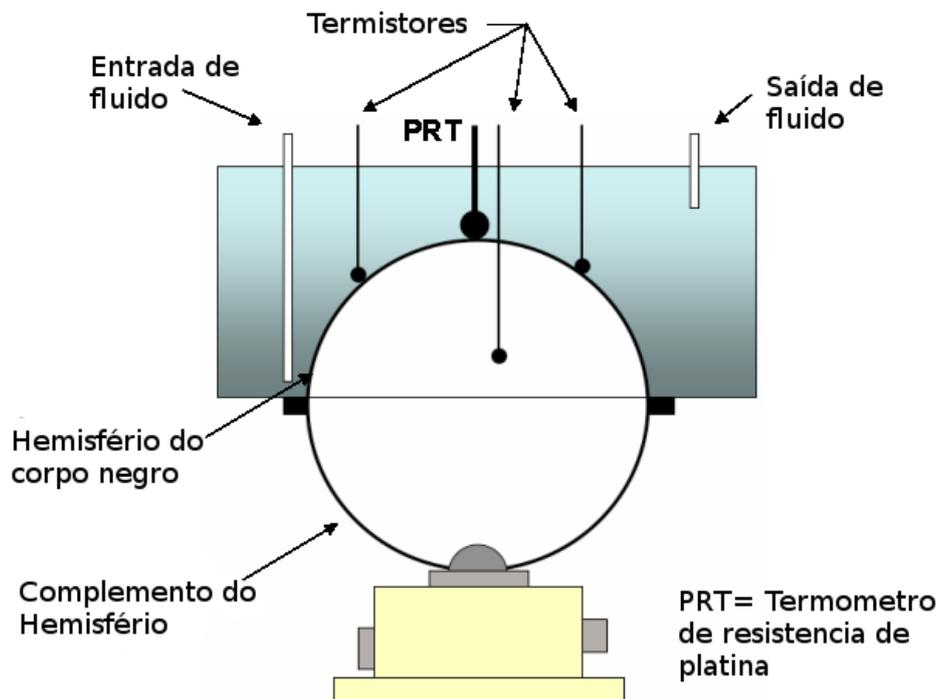


Figura 2.5 - Representação esquemática da cavidade de corpo negro usado no NREL  
 Fonte: Adaptado de Stoffel et al. ().

A calibração por método externo ao laboratório consiste em obter os coeficientes de calibração por comparação entre um ou mais pirgeômetros, calibrados, para serem usados como padrão de referência. Estes equipamentos devem ser expostos simultaneamente à condição de céu limpo e em condições de baixa umidade. Também é necessário que os pirgeômetros permaneçam realizando as medidas durante períodos noturnos (condição em que não ocorre influência da ROC).

O método externo, utilizado no PMOD, consiste em comparar o sensor analisado com o "World Infrared Standard Group"(WISG). O WISG é composto por quatro sensores sendo dois PIR e dois GG4<sup>3</sup>. As medidas de ROL são armazenadas como médias de um minuto de medidas por períodos de alguns dias. Os critérios aplicados para a escolha dos dados podem ser encontrado em Gröbner e Wacker (2012).

Outra forma de calibração desenvolvida no PMOD é baseada na comparação entre a radiação medida pelos pirgeômetros e um equipamento desenvolvido naquele labo-

<sup>3</sup>O sensor CG4 possui as mesmas características estruturais do sensor CGR4

ratório, o "Absolute Sky-Scanning Radiometer"(ASR), figura 2.6. O ASR não possui dispositivo para excluir a ROC, por isso, o procedimento é realizado exclusivamente durante a noite. A incerteza das medidas obtidas com o ASR é de  $0,98Wm^{-2}$  (PHILIPONA, 2001). Devido ao baixo nível de incerteza este é um dos mais importantes métodos para medir a ROL e calibrar os instrumentos.

No entanto, a calibração pelo método interno não é um bom indicador do desempenho do instrumento, pois dentro do laboratório não é possível reproduzir todas as condições encontradas em campo. Segundo o trabalho de Gröbner e Los (2007), o espectro de radiação emitida pelo corpo negro difere daquele emitido pela atmosfera. Portanto, para que esta calibração seja consistente é preciso que a transmitância espectral do domo seja conhecida. Os resultados apresentados por Gröbner e Wacker (2012) mostram que o método interno (baseado em corpo negro) não é eficiente, pois não é capaz de reproduzir as condições existentes em campo. Apresenta ainda uma discrepância entre os sensores de até  $13W/m^2$ . O melhor resultado é obtido usando o método externo pois apresenta o menor nível de radiação residual.

## 2.5 Base de dados de ROL

O SONDA foi concebido no âmbito do INPE para produzir dados ambientais confiáveis, através de uma rede de estações em funcionamento desde 2002. Os dados são destinados principalmente a aprimorar o conhecimento e suprir as necessidades sobre o potencial brasileiro em produzir energia a partir de fontes renováveis (MANTELLI N. et al., ).

A rede SONDA dispõe de estações distribuídas no território nacional (figura 2.7), sendo diferenciadas pela sua configuração em: anemométricas<sup>4</sup>, solarimétricas<sup>5</sup> ou anemométricas/solarimétricas<sup>6</sup>. Três destas estações integram a "Baseline Surface Radiation Network"(BSRN)<sup>7</sup> (SONDA, 2013) e estão situadas em São Martinho da Serra-RS, Brasília-DF, Petrolina-PE. Todas elas são equipadas com sensores que medem a intensidade da ROL (pirgeômetros). Os pirgeômetros empregados nessas estações são do tipo PIR, e são montados com sistema de sombreamento. A equação empregada para a medida é a 2.1 recomendada pela a BSRN. Os sensores coletaram longas séries temporais sem serem calibrados e permanecem utilizando os coeficientes

---

<sup>4</sup>Variáveis: Velocidade do vento (25 e 50m), Direção do vento (25 e 50m) e Temperatura (25 e 50m)

<sup>5</sup>Variáveis: Radiação global horizontal, Radiação difusa, PAR, Iluminância, Temperatura (superfície), Umidade relativa, Pressão atmosférica, Velocidade do vento (10m) e Direção do vento (10m)

<sup>6</sup>Variáveis: Radiação global horizontal, Radiação direta normal, Radiação difusa, Radiação de onda longa, PAR, Iluminância, Temperatura (superfície), Umidade relativa, Pressão atmosférica, Precipitação de chuva, Velocidade do vento (10m) e Direção do vento (10m)

<sup>7</sup>Rede que tem o objetivo de fornecer dados de ROL e de ROC com uma elevada taxa de amostragem e alta qualidade

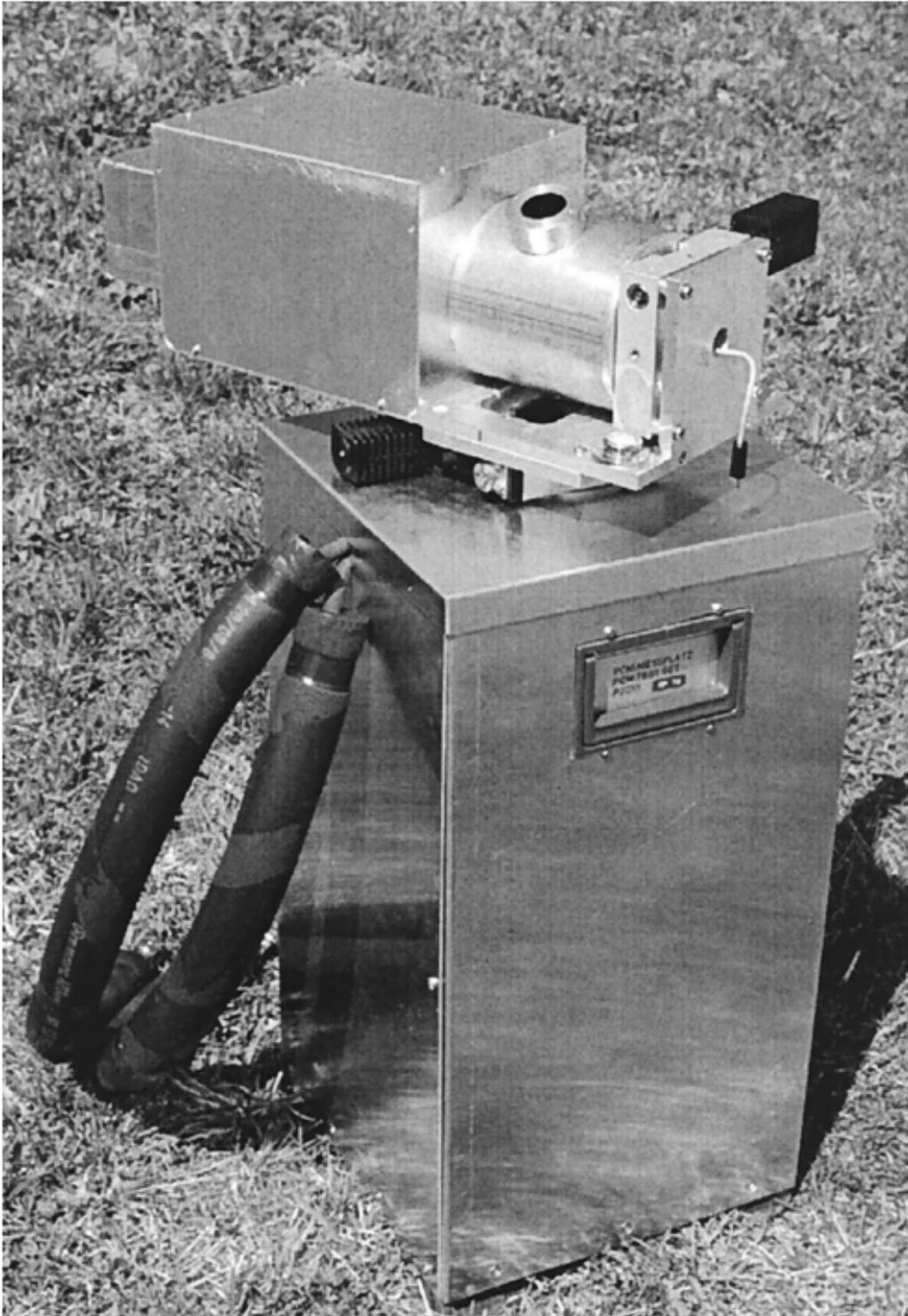


Figura 2.6 - Sensor "Absolute Sky-Scanning Radiometer".  
Fonte: (PHILIPONA et al., 2001).

$k_1 = 0,053$ ,  $k_2 = 1$  e  $k_3 = 3,65$  nas três estações.

Devido ao fato dos coeficientes  $k_s$  permanecerem sem correção e eventualmente ocorrerem falhas no sistema de sombreamento, há a necessidade de verificar e avaliar a qualidade dos dados armazenados.

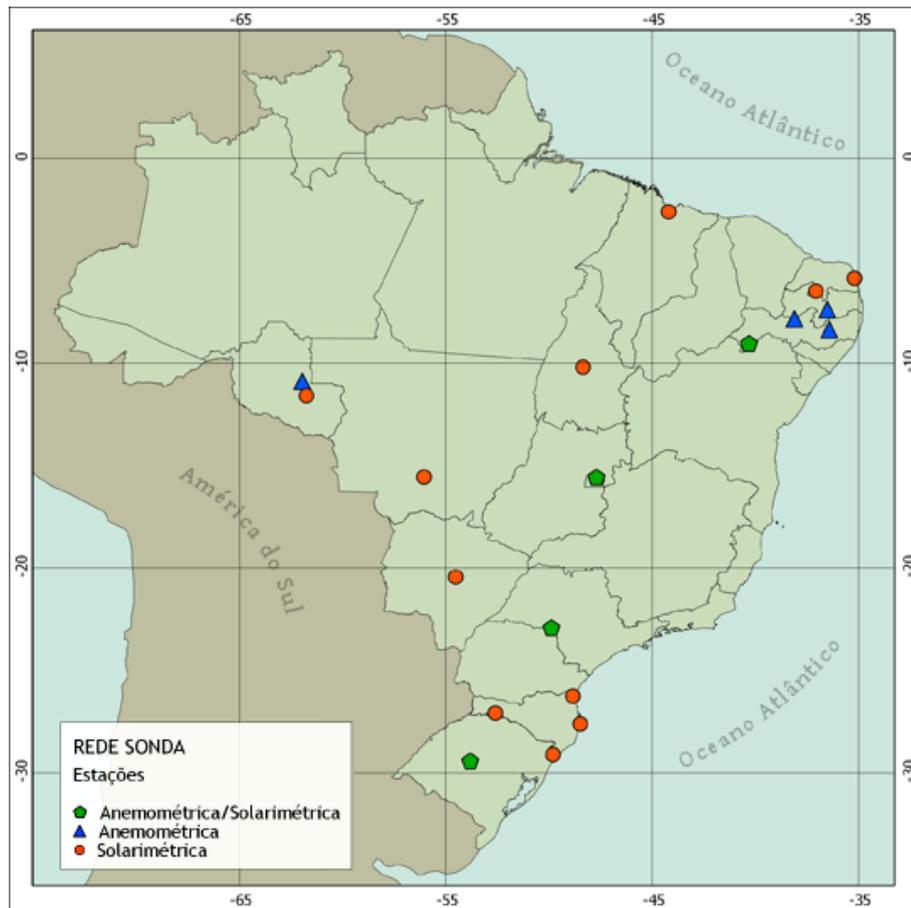


Figura 2.7 - Mapa de distribuição das estações da rede SONDA.  
Fonte: (SONDA, 2013).



### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados: 1) a Metodologia de Correção e Avaliação dos Dados de Radiação de Onda Longa (denominada de MeCADROL), desenvolvida neste trabalho; 2) o experimento realizado no Laboratório de Instrumentação Meteorológica (LIM) para verificar a eficiência da metodologia, a comparação entre as características dos dois modelos de sensores atualmente empregados na rede SONDA e o estabelecimento de um sensor de referência para ser usado em campo; 3) o experimento de campo (sítio de Brasília) para obtenção de dados destinados ao cálculo dos  $k_s$  do sensor da estação; e, 4) o cálculo do termo para redução da contribuição da ROC.

#### 3.1 Descrição da MeCADROL

Com o objetivo de calcular os coeficientes utilizados pelos sensores de ROL e realizar a correção/avaliação dos dados de onda longa, foi concebida uma metodologia (denominada de MeCADROL) para minimizar os desvios das medidas. A metodologia desenvolvida é baseada no método de calibração por comparação com um sensor padrão (método externo) utilizado pelo PMOD (GRÖBNER; WACKER, 2012). Esta metodologia é constituída por três etapas. A primeira etapa é responsável por identificar o conjunto de coeficientes  $k_s$  que minimizam a diferença entre a intensidade da ROL medida pelo sensor padrão e pelo sensor analisado. Na segunda etapa os coeficientes encontrados são submetidos a testes estatísticos onde é verificada a eficiência em corrigir os dados do sensor em análise. A terceira etapa consiste em verificar a validade dos coeficientes para períodos que diferem do utilizado para calcular os  $k_s$ . Esta última etapa é empregada para verificar a eficiência da metodologia.

##### 3.1.1 Determinação dos coeficientes de ajuste $k_s$

O conjunto de coeficientes  $k_s$  que minimiza a diferença entre os dados observados pelo sensor padrão e pelo sensor em análise são calculados aplicando o Método de Mínimos Quadrados (MMQ) (KREYSZIG, 2006) à equação usada para obter a ROL do sensor analisado. O método é definido como segue:

Considere um polinômio  $p(x)$  de grau  $m$

$$p(x) = b_0 + b_1x + \dots + b_mx^m \quad (3.1)$$

onde  $m \leq n - 1$  e  $n$  é o número de pontos da série temporal. O polinômio  $p(x)$

é a equação usada pelo sensor de radiação para quantificar a intensidade da ROL. Define-se então uma função  $q$  que é usada para minimizar a diferença entre a irradiância observada pelo sensor padrão e o analisado.

$$q = \sum_{j=1}^n (E_j^p - p(x_j))^2 \quad (3.2)$$

O termo  $E_j^p$  é a intensidade da ROL observada pelo sensor padrão e  $p(x_j)$  é a intensidade da ROL calculada com os dados obtidos pelo sensor em análise. Para minimizar o valor da função  $q$  calcula-se a derivada parcial com relação a cada um dos  $m + 1$  coeficientes e em seguida iguala-se a zero.

$$\frac{\partial q}{\partial b_0} = 0, \frac{\partial q}{\partial b_1} = 0, \dots, \frac{\partial q}{\partial b_m} = 0 \quad (3.3)$$

Obtendo assim um sistema de  $m + 1$  equações lineares. Aplicando esse método às equações 2.1 e 2.3 utilizadas para cada pirgeômetro são obtidos os sistemas que seguem:

- Para o sensor PIR:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \frac{U_j}{C} T_{bj}^3 (E_j^p - \frac{U_j}{C}) &= k_1 \sum_{j=1}^n (\frac{U_j}{C})^2 \sigma T_{bj}^6 + k_2 \sum_{j=1}^n \frac{U_j}{C} \sigma T_{bj}^7 \\ &+ k_3 \sum_{j=1}^n \sigma (T_{dj}^4 - T_{bj}^4) T_{bj}^3 \frac{U_j}{C} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\sum_{j=1}^n T_{bj}^4 (E_j^p - \frac{U_j}{C}) = k_1 \sum_{j=1}^n \sigma T_{bj}^7 + k_2 \sum_{j=1}^n \sigma T_{bj}^8 + k_3 \sum_{j=1}^n \sigma (T_{dj}^4 - T_{bj}^4) T_{bj}^4 \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n (E_j^p - \frac{U_j}{C}) (T_{dj}^4 - T_{bj}^4) &= k_1 \sum_{j=1}^n \frac{U_j}{C} \sigma T_{bj}^3 (T_{dj}^4 - T_{bj}^4) + k_2 \sum_{j=1}^n \sigma T_{bj}^4 (T_{dj}^4 - T_{bj}^4) \\ &+ k_3 \sum_{j=1}^n \sigma (T_{dj}^4 - T_{bj}^4)^2 \end{aligned} \quad (3.6)$$

- Para o sensor CGR4:

$$\sum_{j=1}^n T_{bj}^3 \left( E_j^p - \frac{U_j}{C} \right) = \sum_{j=1}^n \frac{U_j}{C} k_1 \sigma T_{bj}^6 + \sum_{j=1}^n k_2 \sigma T_{bj}^7 \quad (3.7)$$

$$\sum_{j=1}^n T_{bj}^4 \left( E_j^p - \frac{U_j}{C} \right) = \sum_{j=1}^n \frac{U_j}{C} k_1 \sigma T_{bj}^7 + \sum_{j=1}^n k_2 \sigma T_{bj}^8 \quad (3.8)$$

O cálculo dos valores dos  $k_s$  é realizado computacionalmente onde ambos os sistemas são representados na forma matricial, como segue:

- Para o sensor PIR:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix}$$

- Para o sensor CGR4:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}$$

Essas matrizes podem ser escritas de forma generalizada como uma Transformação Linear:

$$B = A \times K$$

A matriz  $B$  é a matriz dos termos que independem dos  $k_s$  e representa a Transformação Linear.  $A$  é a matriz dos autovetores sendo formada pelos termos que dependem dos  $k_s$ .  $K$  é a matriz dos autovalores, composta pelos  $k_s$  procurados para solucionar o sistema. Entretanto, para garantir que estes coeficientes possuam significado físico foram adotados as restrições que são estabelecidas por [McArthur \(2005\)](#).

- O número de dias estáveis usados para comparação entre os sensores deve ser de no mínimo 2 e no máximo 5. Nesses dias não pode haver precipitação.

- Os dados para serem usados devem ser estatisticamente estáveis. Isso é garantido excluindo os dados dos termistores que possuem o desvio padrão acima de 0,25%, em uma amostragem de um minuto.

O processo de cálculo é realizado para cada dia do período escolhido. Obtendo assim o valores diários para cada coeficiente ( $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ ). Finalmente, calcula-se a média aritmética para cada coeficiente usando os seus respectivos valores diários.

### 3.1.2 Avaliação dos $k_s$

A avaliação da capacidade dos  $k_s$  em corrigir os dados é realizada aplicando os seguintes testes estatísticos Vies, Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (REQM), Erro Médio Absoluto (EMA) e Percentual do Erro Relativo Médio (PERM)(DUARTE et al., 2006).

$$\text{VIES} = \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - Y_t)}{n} \quad (3.9)$$

$$\text{REQM} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t - Y_t)^2}{n}}. \quad (3.10)$$

$$\text{EMA} = \frac{\sum_{t=1}^n |y_t - Y_t|}{n} \quad (3.11)$$

$$\text{PERM} = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{y_t - Y_t}{Y_t} \right| \quad (3.12)$$

Onde  $y_t$  é a série gerada pelo sensor analisado e  $Y_t$  é a série produzida pelo sensor padrão. Também é realizada uma análise de correlação linear, para verificar a resposta de cada sensor às variações das condições ambientais, comparando com o sensor padrão. Nessa análise usou-se ainda o coeficiente angular da reta de correlação  $B$ . Definido como:

$$B = \frac{\sum_{t=1}^n y_t Y_t}{\sum_{t=1}^n Y_t Y_t} \quad (3.13)$$

Os testes estatísticos são aplicados na segunda etapa. Para isso, utiliza-se a série de dados  $y_t$  original<sup>1</sup> utilizada para calcular os  $k_s$  e a mesma série de dados  $y_t$  reprocessada com os novos  $k_s$ . Para garantir a aplicabilidade dos novos coeficientes a períodos que diferem do utilizado para cálculo, foi criada uma terceira etapa em que os testes estatísticos são aplicados para intervalos de dados diferentes do utilizado na obtenção dos  $k_s$ .

### 3.2 Obtenção dos dados Experimentais

As séries temporais foram obtidas a partir da montagem de um aparato experimental (figura 3.1) nas instalações do Laboratório de Instrumentação Meteorológica (LIM) do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). O LIM está localizado na latitude  $-22,68^\circ$ , longitude  $-45,00^\circ$  e altitude 574m.



Figura 3.1 - Experimento de coleta de dados destinados à avaliação da metodologia. Da esquerda para direita ver-se os sensores PIR (analisado), CG4 (padrão) e CGR4 (analisado).

---

<sup>1</sup>Para o PIR a série é calculada com os  $k_s$  utilizados na rede SONDA. Para o CGR4 a série é calculada com a equação 2.3.

Um rastreador solar Solys II da Kipp & Zonen foi equipado com o pirgeômetro CG4 050748 calibrado no PMOD (o certificado de calibração encontra-se ANEXO B). Dois pirgeômetros foram adicionados a esta estrutura para comparação: o PIR 33495F3 e o CGR4 120512. Os três sensores foram sombreados e tiveram sistemas de ventilação instalados para evitar a saturação do sinal, como discutido na seção 2.2. Uma unidade de armazenamento e processamento de dados *datalogger* modelo CR3000, fabricado pela "Campbell Scientific, Inc.", foi configurada para fazer a leitura dos sensores a cada segundo e armazenar os valores médios a cada minuto.

As séries de dados foram separadas em dois intervalos. Os dados do Primeiro Intervalo (PI), destinados à avaliação da metodologia, foram coletados entre os dias 130 e 220 de 2013 (dia do ano) e totalizam 90 dias. Os dados do Segundo Intervalo (SI), destinados a simular possíveis problemas que ocorrem em campo, foram coletados entre os dias 253 e 365 de 2013 totalizam 112 dias. No dia 253 o sensor CGR4 120512 foi removido para ser levado a estação de Brasília. Para dar continuidade ao experimento o sensor CGR4 120512 foi substituído pelo CGR4 120511.

Dentro do intervalo PI foram escolhidos quatro períodos: Período Estável<sup>2</sup> para Cálculo (PEC) selecionando para obter os coeficientes de ajustes  $k_s$  (figura 3.2); Período Estável para Avaliação 1 (PEA1) e Período Estável para Avaliação 2 (PEA2) destinados a avaliar as correções obtidas com os novos coeficientes encontrados (figuras 3.3(a) e 3.3(b)) e o Período Instável para Avaliação (PIA) empregado para avaliar a correção obtida para uma série normal de ROL (figura 3.4). Os critérios para determinação da estabilidade foram fundamentados nas normas estabelecidas pela BSRN (MCARTHUR, 2005). Na tabela 3.1 estão sumarizados os quatro períodos com as respectivas durações.

Tabela 3.1 - Tabela para o Primeiro Intervalo de dados.

<b>Períodos</b>	Intervalos	Duração (Dias)	Siglas
Estáveis	131 a 135	4	PEA1
	185 a 189	4	PEC
	213 a 217	4	PEA2
Instável	185 a 204	20	PIA

<sup>2</sup>Período estável é usado para designar o intervalo de dados de ROL em que observa-se a permanência apenas do padrão do ciclo diário por períodos maiores que dois dias.

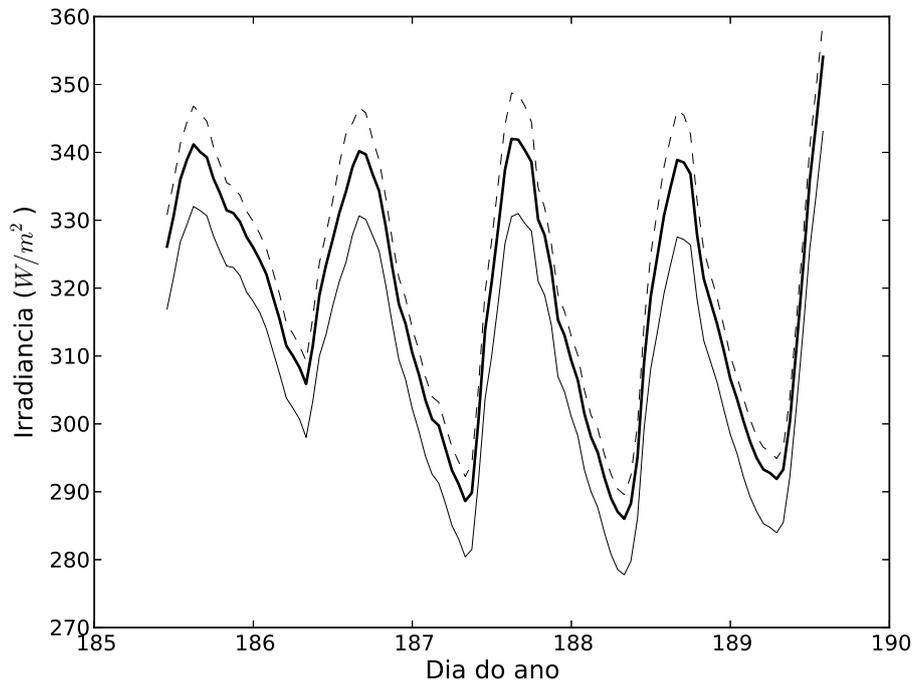


Figura 3.2 - Intervalo de dados PEC obtidos pelos sensores CGR4 (linha tracejada), padrão (linha espessa) e PIR (linha delgada).

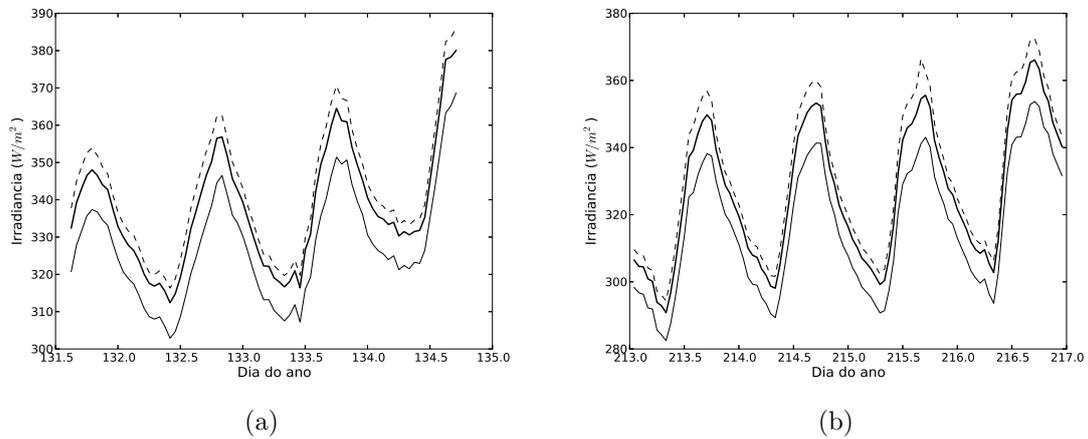


Figura 3.3 - As figuras (a) e (b) são os intervalos PEA 1 e PEA 2, respectivamente, obtidos pelos sensores CGR4 (linha tracejada), padrão (linha espessa) e PIR (linha delgada).

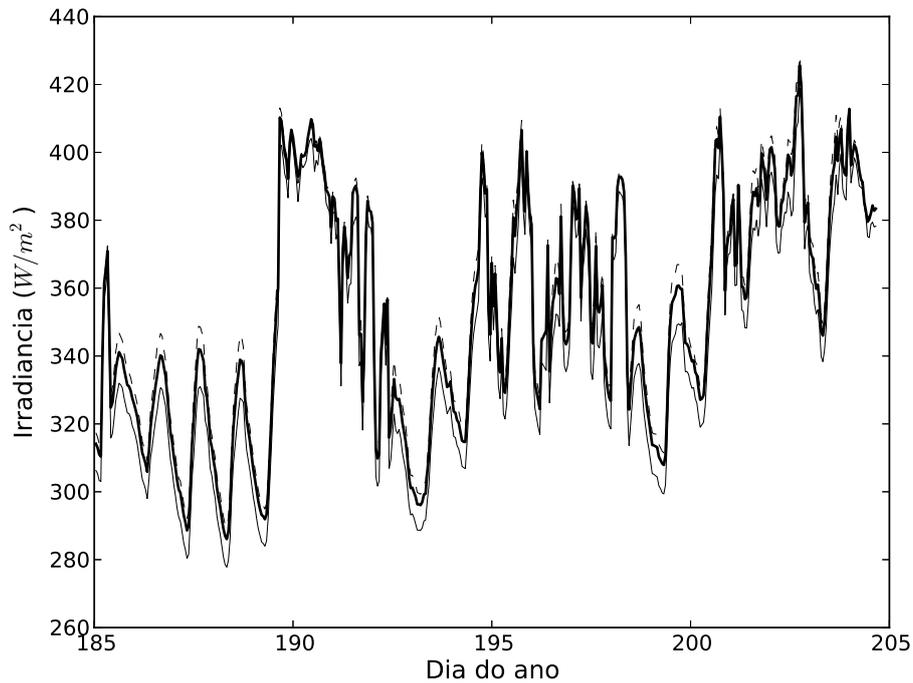


Figura 3.4 - Período Instável de Avaliação obtidos pelos sensores CGR4 (linha tracejada), padrão (linha espessa) e PIR (linha delgada).

Durante o intervalo SI foram estabelecidos quatro períodos de dados, que são: Período de Referência (PR), Período Sem Sombreamento (PSS), Período de Cálculo dos Coeficientes (PCC) e Período Sem Ventilação (PSV). Durante o PR os sensores foram mantidos sombreados e ventilados para servir de referência para o PSS e PSV. No PSS os sensores analisados PIR 33495F3 e CGR4 120511 tiveram apenas os sombreadores removidos, permanecendo sombreado apenas o sensor padrão. O PCC foi utilizado para obter os coeficientes do sensor CGR4 120511. Ao longo do PSV os sensores PIR 33495F3 e CGR4 tiveram os respectivos sistemas de ventilação desligados, permanecendo apenas o sensor padrão ventilado. A tabela 3.2 apresenta um resumo para a separação dos intervalos do Segundo Período.

Tabela 3.2 - Tabela para o Segundo Intervalo de dados.

Períodos	Intervalos	Duração (Dias)	Siglas
	252 a 286	14	PR
Simulações	275 a 293	18	PSS
	337 a 365	28	PSV
Estável	295 a 298	3	PCC

### 3.3 Caracterização dos períodos Estáveis

Os períodos estáveis foram identificados como sendo uma curva de comportamento suave para médias horárias da ROL. No gráfico 3.4 contêm um período estável que inicia ao meio-dia do dia 185 e termina próximo do meio-dia do dia 189. Para a estação situada no LIM os períodos estáveis, com duração entre três e cinco dias, ocorreram entre os dias 131 e 298. Dentro deste intervalo apenas quatro intervalos satisfizeram os critérios adotados para selecionar os dados.

Esses períodos foram verificados após passagem de um sistema frontal. Na carta de superfície do dia 182 às 12Z (figura 3.5), disponibilizada pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) ver-se a presença deste sistema. Após a passagem do sistema a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) reconfigura-se e mantém a atmosfera estável. Na carta de superfície do dia 185 às 12Z (figura 3.6) é possível observar a atuação da ASAS e que a borda oeste está sobre o continente. Garantindo assim a ausência de nebulosidade durante o período devido a subsidência que inibe a atividade convectiva.

A partir de dados obtidos por sondagem atmosférica no Campo de Marte (Lat -23,52°e Long -46,63°) (figura 3.7) e no aeroporto do Galeão (Lat -22,81°e Long -43,25°) é possível observar que (figura 3.8) os perfis da temperatura e temperatura do ponto de orvalho para o dia 182 a atmosfera apresentava um elevado teor de umidade. As sondagens do dia 185 mostram que atmosfera estava com baixo índice de umidade (figuras 3.9 e 3.10). As mesmas condições meteorológicas foram verificadas na estação situada no LIM.

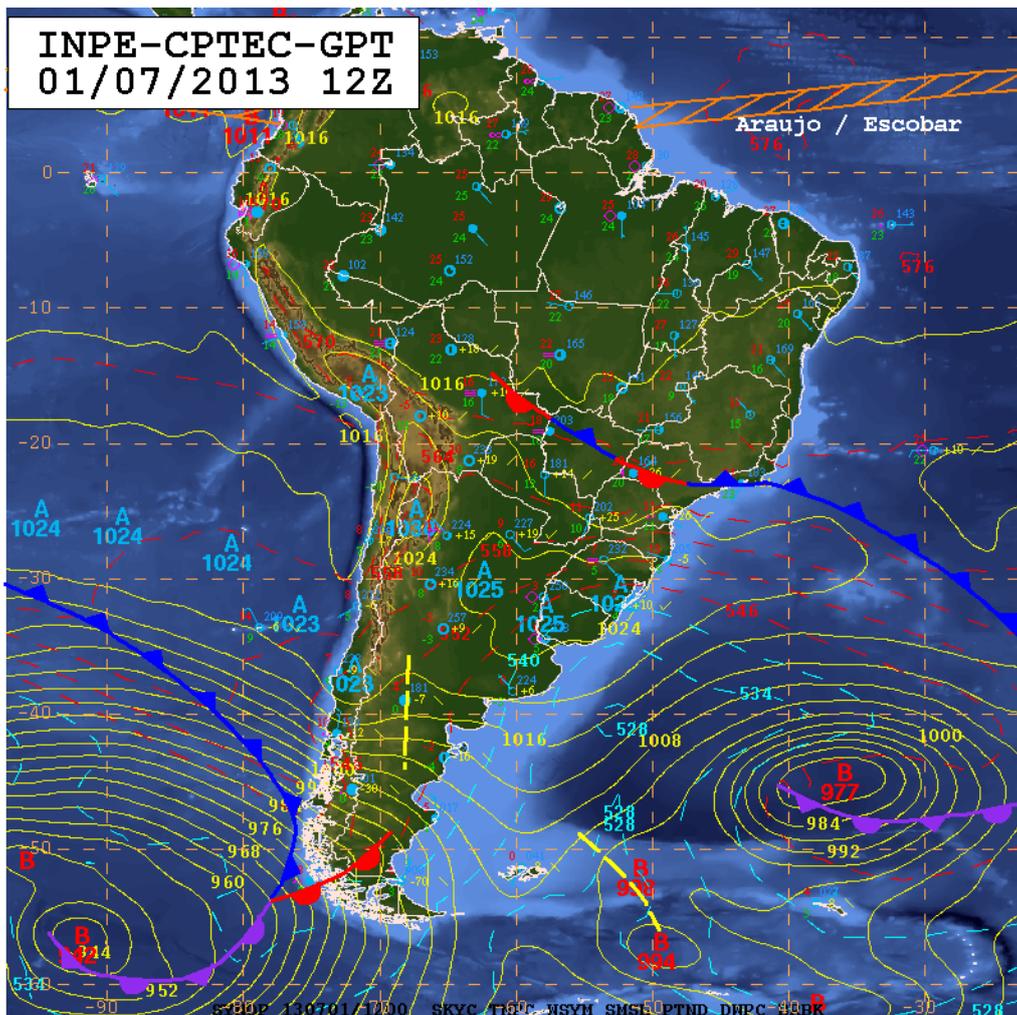


Figura 3.5 - Carta de análise da superfície para o dia 182 de 2013 às 12z.  
 Fonte: (ESPACIAIS; CLIMÁTICOS, 2013).

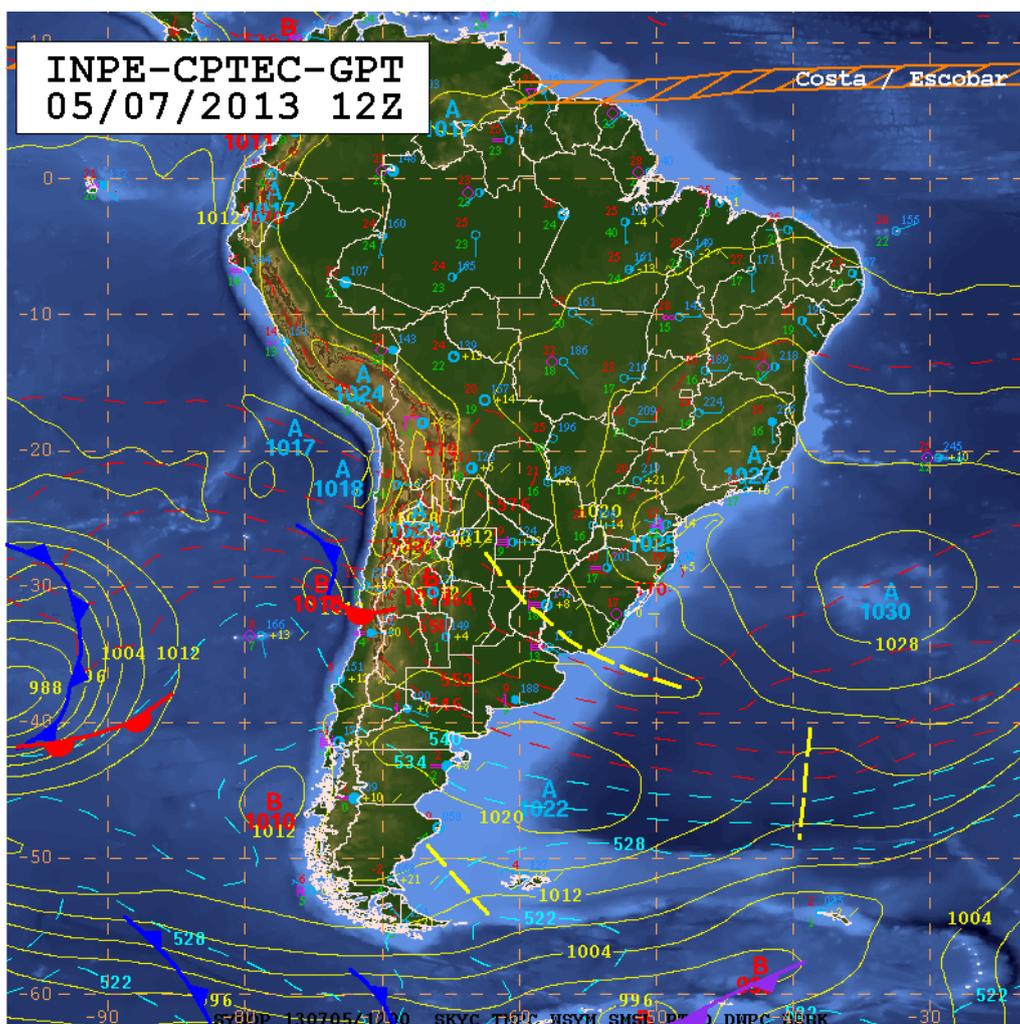


Figura 3.6 - Carta de análise da superfície para o dia 185 de 2013 às 12z.  
 Fonte: (ESPACIAIS; CLIMÁTICOS, 2013).

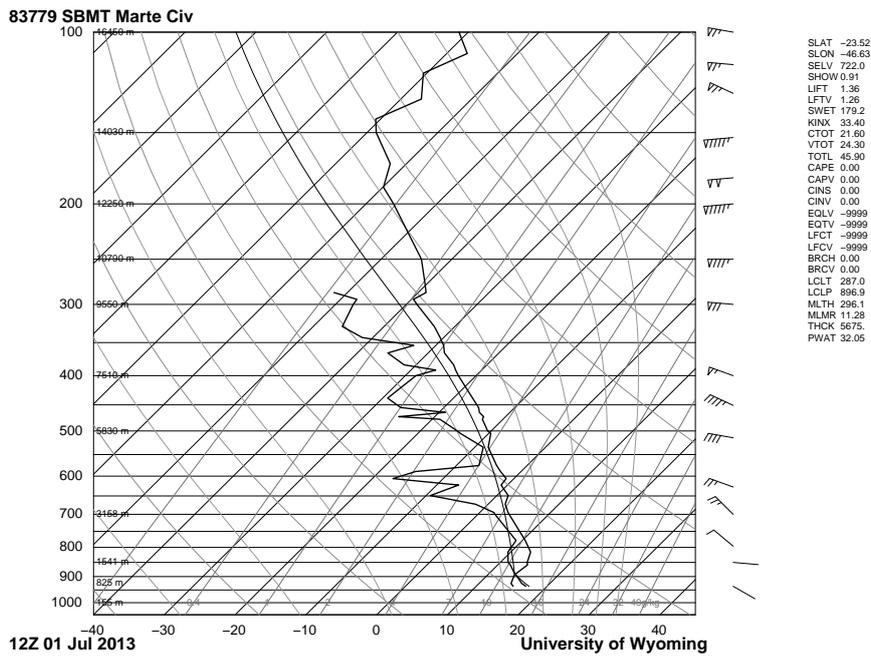


Figura 3.7 - Sondagem no Campo de Marte-SP dia 182 de 2013.  
 Fonte: (WYOMING, 2013).

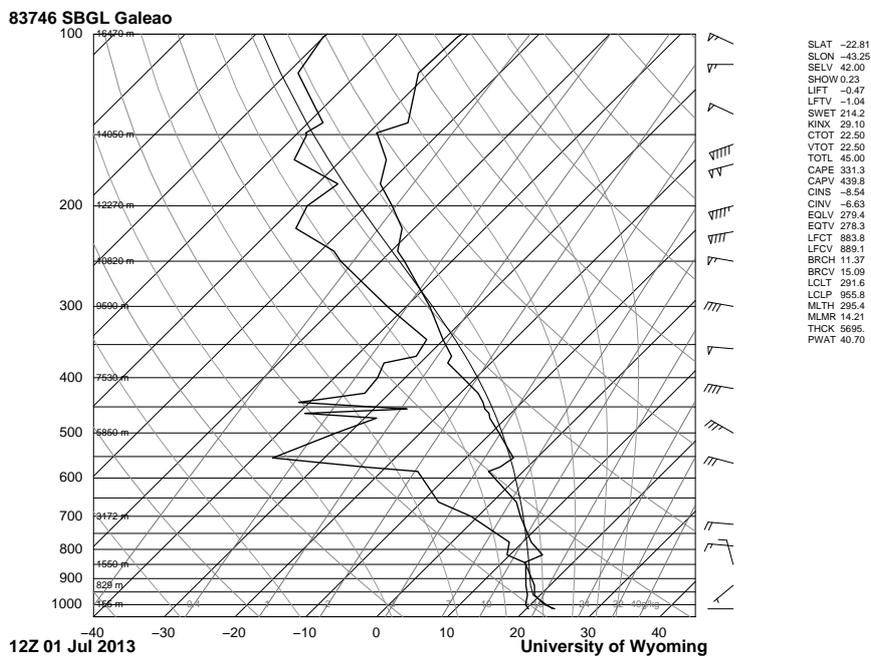


Figura 3.8 - Sondagem no Aeroporto do Galeão-RJ dia 182 de 2013.  
 Fonte: (WYOMING, 2013).

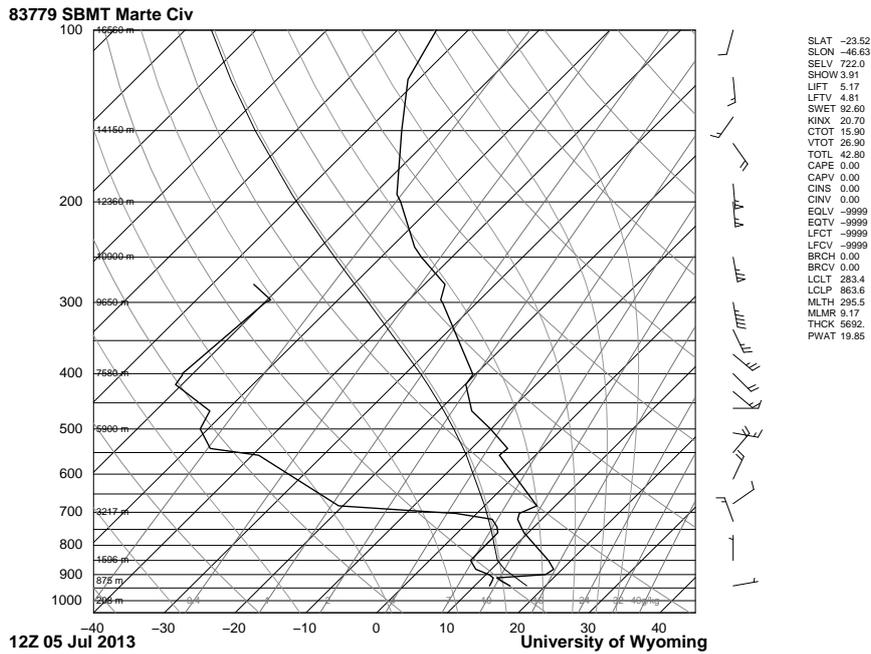


Figura 3.9 - Sondagem no Campo de Marte-SP dia 185 de 2013.  
Fonte: (WYOMING, 2013).

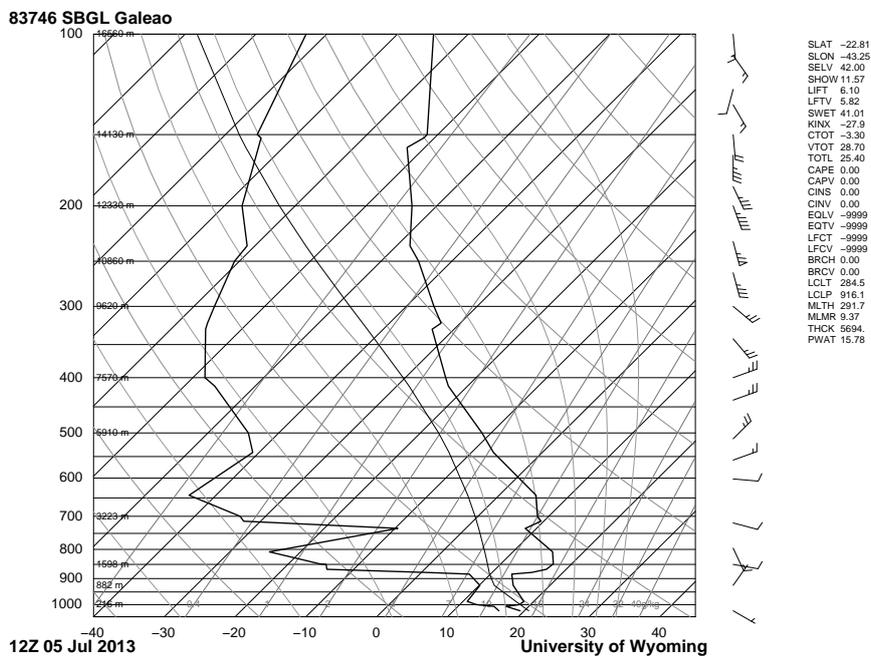


Figura 3.10 - Sondagem no Aeroporto do Galeão-RJ dia 185 de 2013.  
Fonte: (WYOMING, 2013).

### 3.4 Experimento de Brasília

Foi realizado um experimento de campo na estação de Brasília no período entre os dias 256 e 261 de 2013 localizada na latitude  $-15,60^\circ$ , longitude  $-47,71^\circ$  e altitude de  $1023m$  (figura 2.7). Este teve como objetivo a aquisição de dados destinados calcular os novos coeficientes  $k_s$  para o sensor PIR 33E9133 desta estação (figura 3.11). O aparato experimental foi montado de forma análoga ao montado no LIM (seção 3.2). O sensor CGR4 120512 foi instalado no mesmo rastreador em que está instalado o PIR 33E9133 (figura 3.12). A aquisição dos dados foi realizada por um *datalogger* modelo CR23X da "Campbell Scientific, Inc." A leitura dos sensores foi realizada à taxa de  $1Hz$  e foram armazenados os valores médios após um minuto de medidas.

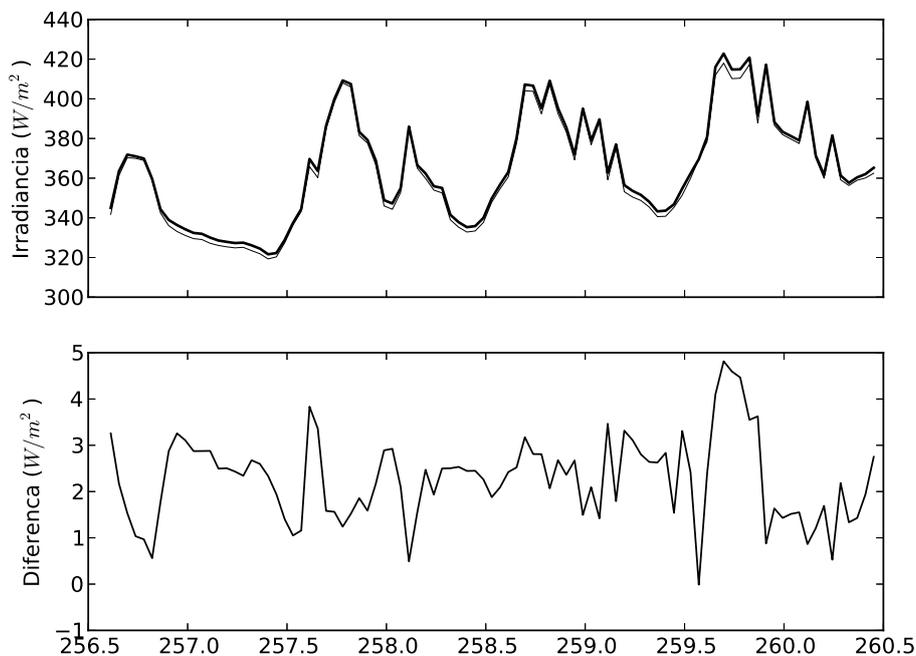


Figura 3.11 - Série de dados coletados durante o experimento de Brasília. A curva espessa é para o sensor de referência e a curva delgada é para o sensor analisado. O gráfico inferior mostra a diferença entre o sensor padrão e o sensor em análise



Figura 3.12 - Experimento de coleta de dados destinados à avaliação dos dados de ROL de Brasília. Os sensores PIR (analisado), Piranômetro e CG4R 120512 (referência para campo) estão dispostos da esquerda para a direita.

### 3.5 Termo de redução da ROC

Na seção 2.3 foram apresentadas as equações empregadas para calcular a intensidade da ROC. Com o intuito de minimizar o efeito de saturação da ROC produzido pela incidência direta da ROC é utilizado um termo específico para isto nas equações 2.1, 2.2 e 2.3 nas estações sem sombreamento. Nesta seção é apresentada uma equação obtida empiricamente. Ela foi desenvolvida para calcular o termo de redução do efeito de incidência direta da ROC (rROC), definido como:

$$f\Delta T_{S-N} = \text{rROC} = \phi G \quad (3.14)$$

Onde  $G$  é a radiação global obtida por um piranômetro e  $\phi$  é obtido com a equação à seguir

$$\phi = \frac{1}{D} \left( \sum_{d=1}^D \frac{1}{P_d} \sum_{p=1}^{P_d} \frac{ROL_{dp}^{ana} - ROL_{dp}^{std}}{G_{dp}} \right) \quad (3.15)$$

$D$  é o número de dias escolhidos para cálculo,  $P$  é o número de pontos de ROL para o dia escolhido que estão entre a fração do dia 0,45 e 0,55 (horário local),  $ROL^{ana}$  é a intensidade da ROL medida pelo pirgeômetro analisado,  $ROL^{std}$  é a intensidade da ROL medida pelo pirgeômetro de referência e  $G$  é a intensidade da radiação Global medida pelo piranômetro. Durante este experimento o PIR 33495F3 e o CGR4 120511 foram analisados e comparados com o pirgeômetro de referência CG4 050748. A radiação global foi obtida pelo piranômetro CMP22 090185. No APÊNDICE B está o procedimento empregado para obter a equação 3.15.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo, a descrição dos resultados obtidos obedecerá a seguinte ordem: 1) avaliação da MeCADROL para obtenção dos  $k_s$ ; 2) aplicação da MeCADROL na estação de Brasília; 3) reprocessamento dos dados históricos de Brasília; 4) a comparação entre as metodologias usadas para quantificar a intensidade da ROL; e, 5) avaliação da influência do sombreamento na intensidade da ROL.

### 4.1 Teste da metodologia

Aplicando a MeCADROL aos dados obtidos durante o período PEA foram encontrados os coeficientes apresentados na tabela 4.1. Os novos coeficientes do sensor PIR 33495F3 diferem dos valores atualmente empregados nas estações SONDA. Os coeficientes calculados para o sensor CGR4 120512 também apresentam diferenças dos valores utilizados na equação adotada pela Kipp & Zonen (KIPP & ZONEN, 2014).

Tabela 4.1 - Coeficientes de ajuste empregados na rede SONDA, os utilizados pelo fabricante e os calculados para os dois sensores.

sensor	$k_s$	$k_1$	$k_2$	$k_3$
PIR 33495F3	Sonda	0,0530	1	3,6500
	Calculado	0,0223	1,0163	2,4833
CGR4 120512	Fabricante	0	1	-
	Calculado	0,0387	1,0008	-

Os novos coeficientes foram substituídos nas equações 2.1 e 2.3 e em seguida os períodos PEC, PEA1, PEA2 e o PIA foram reprocessados. Como apresentado na descrição da MeCADROL (seção 3.1), os testes estatísticos que integram o processo de análise foram aplicados aos dados originais e os dados reprocessados. A tabela 4.2 apresenta os valores médios dos testes, obtidos para ambos os sensores, durante os quatro períodos escolhidos. Para o PEC, o sensor PIR 33495F3 [CGR4 120512] apresentou um VIES de  $-8,95W/m^2$  [ $4,53W/m^2$ ] e REQM de  $9,02W/m^2$  [ $4,71W/m^2$ ]. Após ser aplicada a correção os valores dos testes passaram a ser  $-0,002W/m^2$  [ $-0,003W/m^2$ ] para o VIES e  $0,43W/m^2$  [ $0,31W/m^2$ ] para o REQM. Uma vez que os novos  $k_s$  mostraram-se eficientes para corrigir os dados desse período, prosseguiu-se com o teste para os períodos PEA1 e PEA2. Os coeficientes foram capazes de corrigir os dados para ambos os períodos. O VIES e o REQM passaram a ter valores absolutos menores que  $1W/m^2$ . Na última etapa da metodologia

os  $k_s$  foram avaliados para o PIA. O sensor PIR 33495F3 [CGR4 120512] apresentou VIES de  $-7,99W/m^2$  [ $3,53W/m^2$ ], REQM de  $8,33W/m^2$  [ $4,11W/m^2$ ], EMA de  $7,99W/m^2$  [ $3,71W/m^2$ ] e PERM de  $2,30\%$  [ $1,07\%$ ]. Após a correção os dados passaram a ter o VIES de  $0,50W/m^2$  [ $0,27W/m^2$ ], REQM de  $1,43W/m^2$  [ $1,21W/m^2$ ], EMA de  $0,85W/m^2$  [ $0,54W/m^2$ ] e PERM de  $0,23\%$  [ $0,14\%$ ].

Tabela 4.2 - Resultados obtidos para os testes estatísticos VIES, REQM, EMA e EPMA calculados para os coeficientes do SONDA, do fabricante (Fab) e o calculado com a MeCADROL (Calc).

		PIR 33495F3		CGR4 120512	
		$k_s$ SONDA	$k_s$ Calc	$k_s$ Fab	$k_s$ Calc
PEC	VIES( $W/m^2$ )	-8,95	-0,002	4,53	-0,003
	REQM( $W/m^2$ )	9,02	0,43	4,71	0,31
PEA1	VIES( $W/m^2$ )	-10,23	-0,84	4,30	0,02
	REQM( $W/m^2$ )	10,34	0,91	4,44	0,21
PEA2	VIES( $W/m^2$ )	-10,07	-0,76	4,64	-0,06
	REQM( $W/m^2$ )	10,22	0,92	4,94	0,52
PIA	VIES( $W/m^2$ )	-7,99	0,50	3,53	0,27
	REQM( $W/m^2$ )	8,33	1,43	4,11	1,21
	EMA( $W/m^2$ )	7,99	0,85	3,71	0,54
	PERM(%)	2,30	0,23	1,07	0,14

Os gráficos 4.1(a) à 4.1(d) apresentam a correlação entre a intensidade da ROL obtida pelos sensores analisados e a obtida pelo sensor padrão para os diversos períodos descritos na tabela 4.2. No gráfico 4.1(a) [4.1(c)] o sensor PIR 33495F3 [CGR4 120512] é analisado com os coeficientes da rede SONDA [do fabricante]. O gráfico 4.1(a) [4.1(c)] mostra que o sensor em análise subestima [superestima] os valores da ROL. Em ambos os gráficos, quando a intensidade ultrapassa  $320W/m^2$  observa-se o aumento da dispersão dos dados entorno da reta suporte de inclinação 1. Os gráficos 4.1(b) e 4.1(d) mostram que após as correções dos dados com os  $k_s$  calculados com a MeCADROL, o VIES foi reduzido e a dispersão tornou-se uniforme em todo o intervalo de intensidade. O coeficiente B (equação 3.13) não sofreu alterações significativas, mostrando que os sensores analisados respondem de forma equivalente ao sensor padrão quando submetidos às variações ambientais lentas.

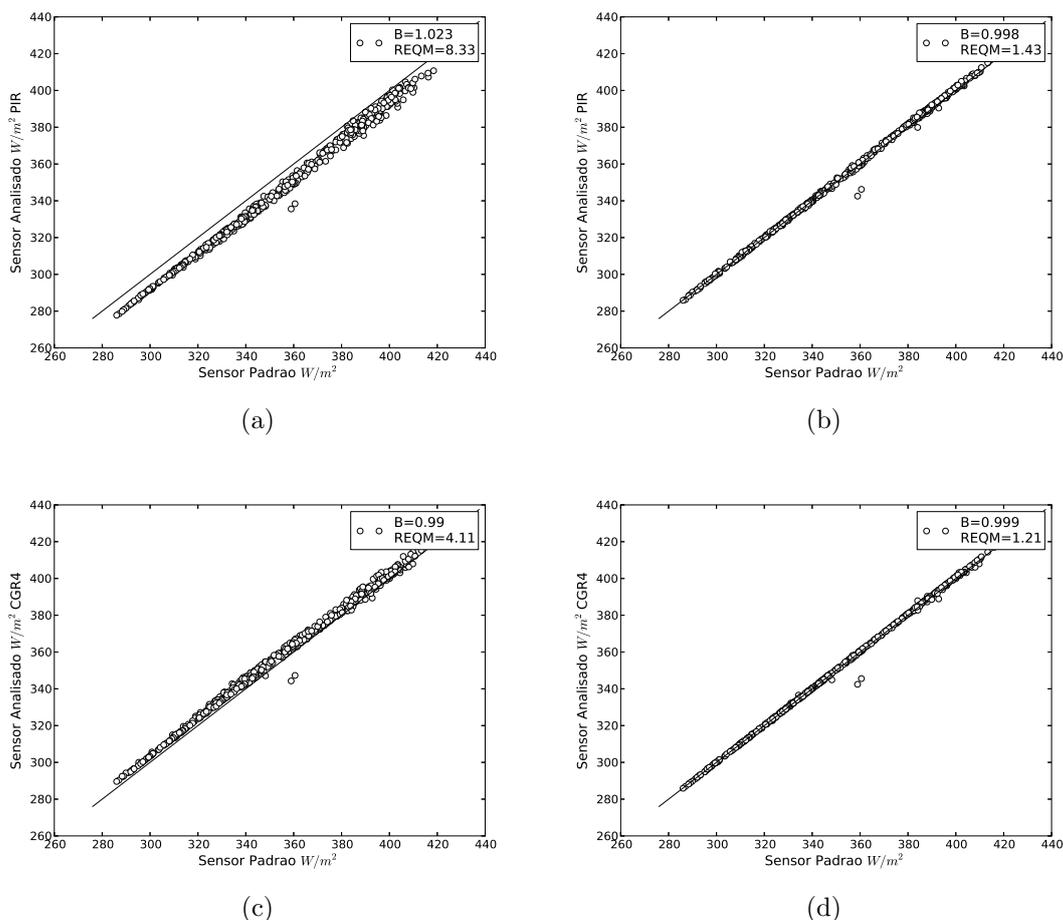


Figura 4.1 - Os gráficos acima apresentam a correlação entre o sensor padrão e os sensores analisados. "B" corresponde ao coeficiente angular da reta suporte dos pontos. 4.1(a) Sensor PIR 33495F3 utilizando coeficientes de ajuste empregados pela rede SONDA, 4.1(b) sensor PIR 33495F3 com os coeficientes calculados, 4.1(c) sensor CGR4 120512 utilizando a equação 2.3 proposta pelo fabricante e 4.1(d) sensor CGR4 120512 com a equação 2.1 e os coeficientes calculados.

## 4.2 Emprego da MeCADROL no sítio de Brasília

Os dados obtidos durante o experimento de Brasília foram submetidos ao processamento pela MeCADROL e foram obtidos os novos valores de cada  $k$ . O intervalo de dados é o mesmo apresentado na seção 3.4. A tabela 4.3 contém os coeficientes atualmente empregados na rede de estações (SONDA) e os coeficientes que foram obtidos aplicando a metodologia proposta (Calculado).

Em continuidade ao procedimento, os testes estatísticos foram calculados usando os  $k_s$  empregados na rede SONDA. O VIES obtido é igual a  $-2,26W/m^2$  mostrando que os dados estavam subestimados. A dispersão dos dados avaliada pelo REQM teve

Tabela 4.3 - Conjunto de coeficientes da rede SONDA e o calculado para estação de Brasília.

sensor	$k_s$	$k_1$	$k_2$	$k_3$
PIR	SONDA	0,0530	1	3,6500
33E9133	Calculado	0,0210	0,9980	2,6593

um valor de  $2,44W/m^2$ . Após aplicar os coeficientes encontrados com o MeCADROL os testes estatísticos tiveram seus valores reduzidos. O VIES passou para  $-0,01W/m^2$  indicando que os novos valores estão mais próximo do observado pelo sensor padrão. A dispersão foi reduzida para  $0,69W/m^2$ . Os outros testes, EMA e EPMA também apresentaram redução. Na tabela 4.4 encontram-se o valores de todos os testes.

Tabela 4.4 - Testes estatísticos calculados com os coeficientes da rede SONDA e o calculado com a MeCADROL.

Coefficientes	VIES ( $W/m^2$ )	REQM ( $W/m^2$ )	EMA ( $W/m^2$ )	EPMA (%)
SONDA	-2,26	2,44	2,26	0,62
Calculado	-0,01	0,69	0,49	0,13

Na verificação usando correlação linear fica evidenciado graficamente que a intensidade do sinal está subestimado. Observa-se, também, que o valor encontrado para o coeficiente B está muito próximo de um. Isto corresponde a uma boa concordância entre as observações de ambos os sensores. Este comportamento é apresentado nos gráficos 4.2(a) e 4.2(b).

### 4.3 Análise da correção dos dados da estação de Brasília

Para avaliar a situação dos dados da estação de Brasília, foram feitas médias trimestrais desde o ano de 2006 até 2013. O gráfico 4.3 mostra que existe uma descontinuidade nos dados no segundo trimestre de 2008. Nota-se ainda que a intensidade da ROL obtida desde 2006 até o segundo semestre de 2008 apresentam discrepâncias, quando comparados com os valores obtidos desde o terceiro trimestre de 2008 até 2013. Os invernos de 2006 e 2007 apresentam valores mais elevados que os verões a partir de 2009 e dos anos seguintes.

A fonte de erro que produziu essa discrepância foi identificada na programação do *datalogger*. Erroneamente o numerador da razão entre a diferença de potencial e a sensibilidade foi multiplicado por  $C$ , ficando:

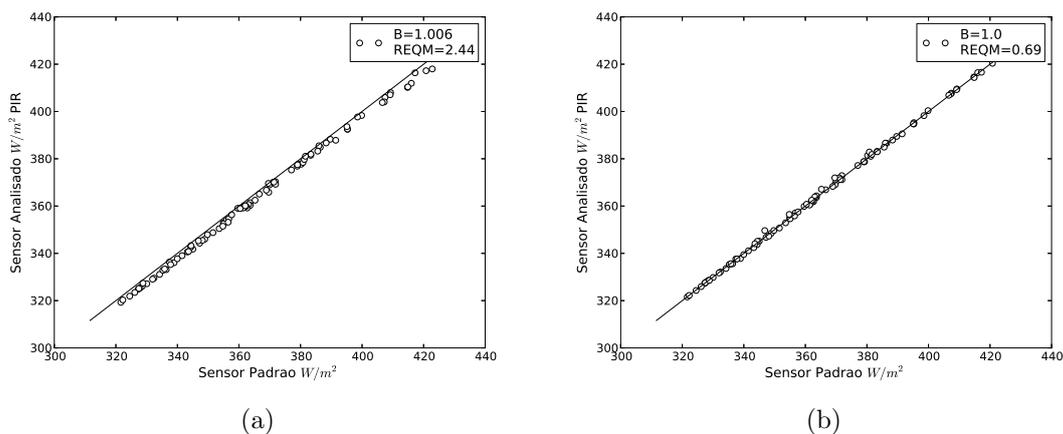


Figura 4.2 - Correlação entre o sensor CGR4 120512 (padrão de campo) e sensor da estação de Brasília PIR 33E9133. B coeficiente angular da reta suporte dos dados. 4.2(a) Sensor PIR 33E9133 empregando os  $k_s$  da rede SONDA e 4.2(b) Sensor PIR 33E9133 com os coeficientes calculados pela metodologia proposta.

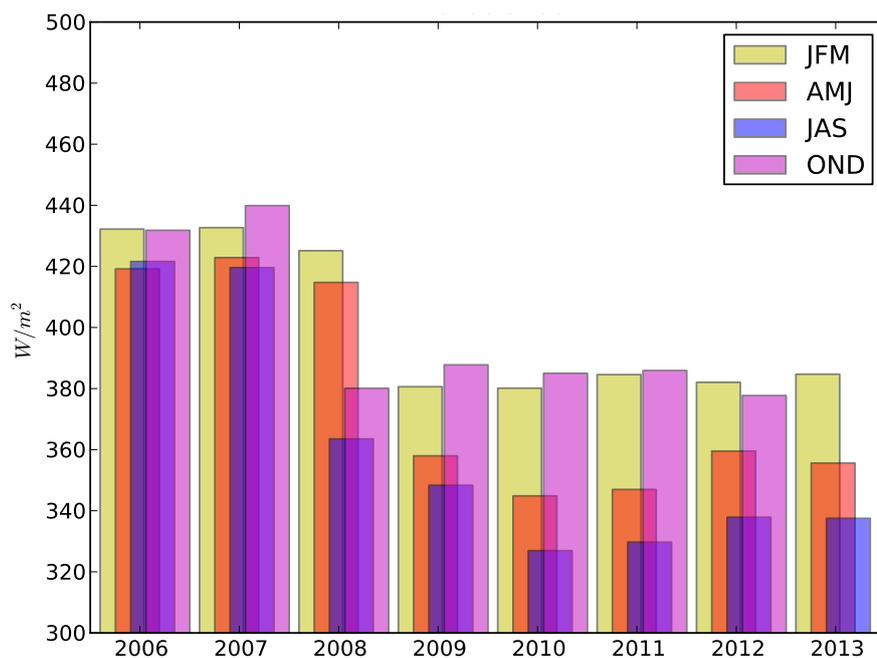


Figura 4.3 - Valores médios trimestrais desde 2006 até 2013 sem correção. Em amarelo (JAM) estão os meses de janeiro, fevereiro e março; em laranja (AMJ) os meses de abril, maio e junho; em azul (JAS) os meses de junho, agosto e setembro e em roxo (OND) os meses de outubro, novembro e dezembro.

$$\frac{U}{C^2}$$

Os resultados das correções pelos novos  $k_s$  e da remoção do fator  $C$  podem ser observados na figura 4.4. As discrepâncias foram removidas e observa-se que os dados apresentam coerência com relação ao observado nos anos subsequentes. O impacto da correção proporcionada pelos novos  $k_s$  é apresentado na figura 4.5. Nela está a diferença entre o dado não corrigido e o corrigido, ao longo do ano de 2012 para cada minuto do dia. É possível observar que em média os valores estão subestimados em  $2W/m^2$ . Nota-se também a presença de dois picos, um de máximo e outro de mínimo. O pico de máximo ocorre nas proximidades do dia 60 entre as 1 e 3 GMT com um desvio entre  $2W/m^2$  e  $4W/m^2$ . O pico de mínimo é verificado nas vizinhanças do dia 305 entre as 10 e 19 GMT com o desvio entre  $-8W/m^2$  e  $-12W/m^2$ .

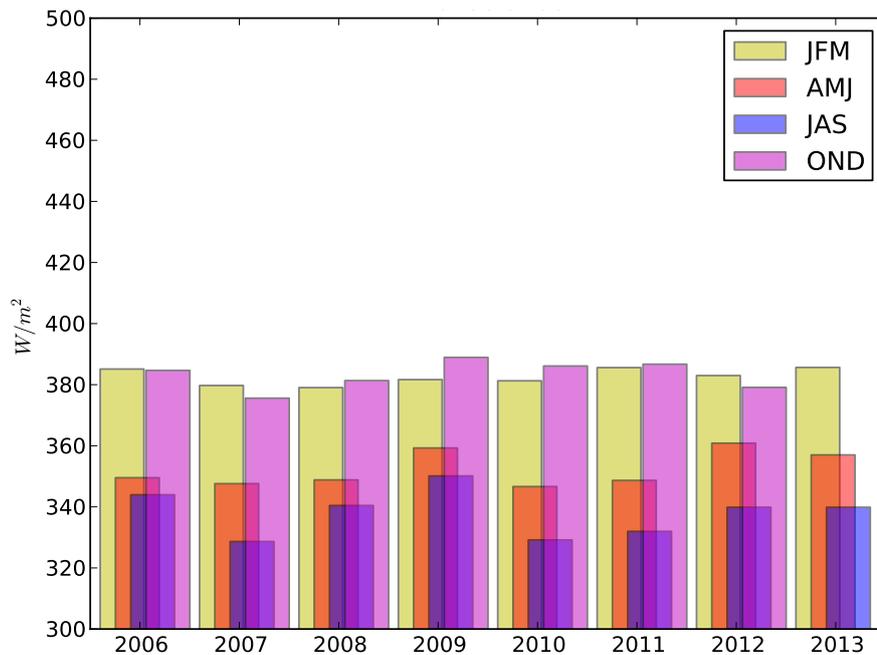


Figura 4.4 - Valores médios trimestrais desde 2006 até 2013 corrigidos. Em amarelo (JFM) estão os meses de janeiro, fevereiro e março; em laranja (AMJ) os meses de abril, maio e junho; em azul (JAS) os meses de junho, agosto e setembro e em roxo (OND) os meses de outubro, novembro e dezembro.

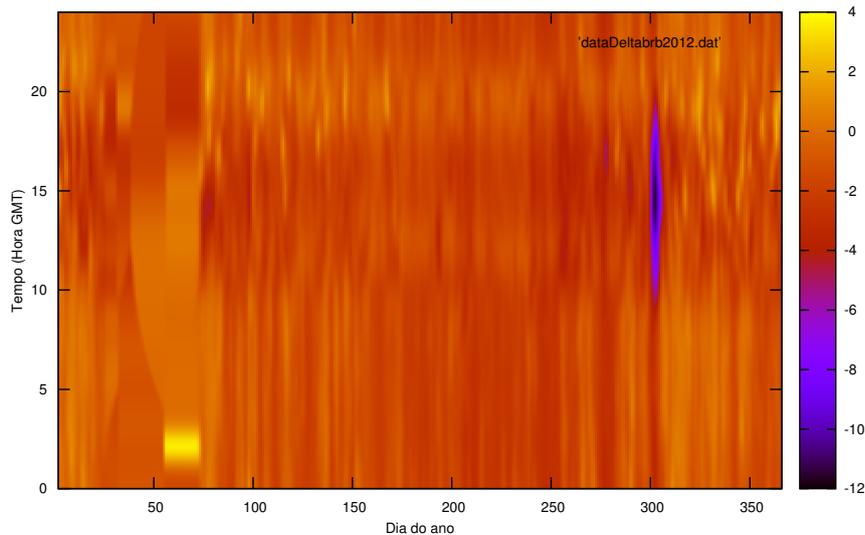


Figura 4.5 - Diferença entre os dados atualmente armazenados e esses mesmos dados corrigidos. A escala de cores corresponde a intensidade da diferença  $W/m^2$ .

#### 4.4 Comparação das diferentes equações de cálculo da ROL

A intensidade da ROL medida para cada sensor é dependente da equação empregada no cálculo. Nesta seção é apresentado o resultado obtido pela comparação entre as intensidades provenientes das equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 apresentadas na seção 2.3. Para esta comparação foram calculadas as diferenças percentuais entre a intensidade calculada para cada equação e a intensidade medida pelo sensor de referência.

Na figura 4.6 são apresentadas as curvas obtidas para cada equação durante o período PR (ver seção 3.2). O termo  $k_3SW$  da equação 2.2 foi igualado a zero por não haver a incidência direta da ROC. A intensidade calculada com a equação 2.2 (Dickey) apresenta uma acentuada discordância (curva azul). Seus valores estão subestimados e oscilam predominantemente entre  $-1\%$  e  $-2,5\%$ . A intensidade calculada com a equação 2.4 (Kipp&Zonen) corresponde a curva em preto. A intensidade da ROL calculada está superestimada e os valores encontrados estão entre  $1\%$  e  $2\%$ . A equação 2.1 (PMOD1) é representada pela curva vermelha e a equação 2.3 (PMOD2) é representada pela curva verde. Para ambas as curvas o valor do desvio é menor que um  $1\%$ .

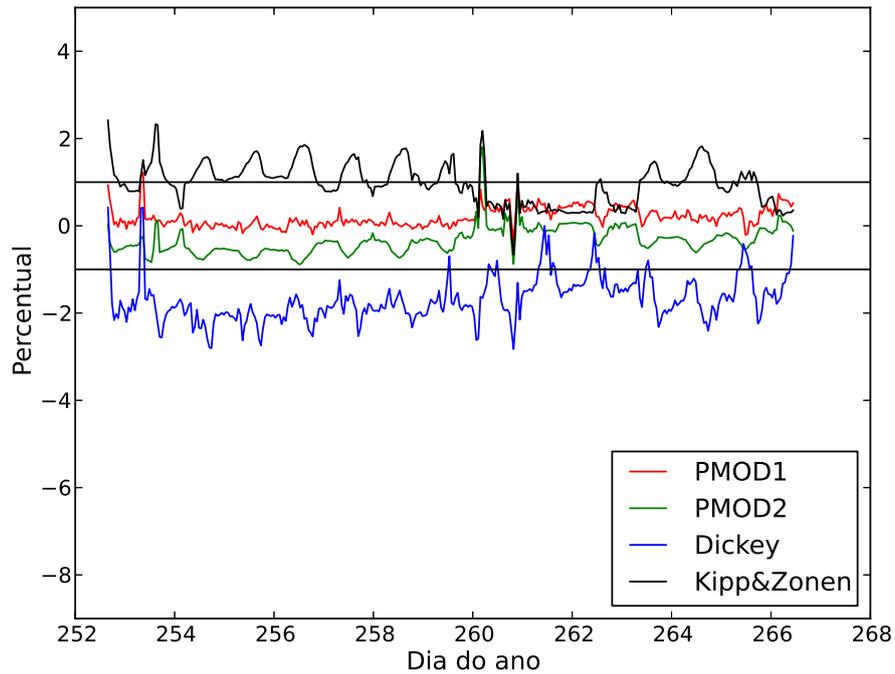


Figura 4.6 - Diferença percentual entre os valores calculados pelas equações 2.1, 2.3, 2.2 e 2.4 e o valor obtido pelo sensor padrão. A curva em azul é para a equação 2.2 (Dickey). A curva em preto é para a equação 2.4 (Kipp&Zonen). A curva em vermelho é para a equação 2.1 (PMOD1). A curva em verde é para a equação 2.3 (PMOD2).

A figura 4.7, similar a figura 4.6, mostra os dados dos mesmos sensores para o período PSS (ver seção 3.2). Foram adicionados os termos de redução da ROC para as respectivas equações. Na equação 2.2 utilizou-se o termo  $k_3SW$  com  $k_3 = 0,036$  conforme o proposto por Dickey et al. (1994). Nas equações 2.1 e 2.3 o termo  $f\Delta T_{S-N}$  foi igualado a  $\phi G$ , os valores dos coeficientes para os sensores PIR 33495F3 e CGR4 120511 são respectivamente  $\phi^{PIR} = 6,8 \cdot 10^{-3}$  e  $\phi^{CGR4} = 4,3 \cdot 10^{-3}$ . Os valores de  $\phi$  foram obtidos como apresentado na seção 3.5, utilizando os dias 282, 283, 284 e 286, os dias foram escolhidos de acordo com o descrito no APÊNDICE B. Os valores para SW e G foram medidos pelo piranômetro CMP22 090185.

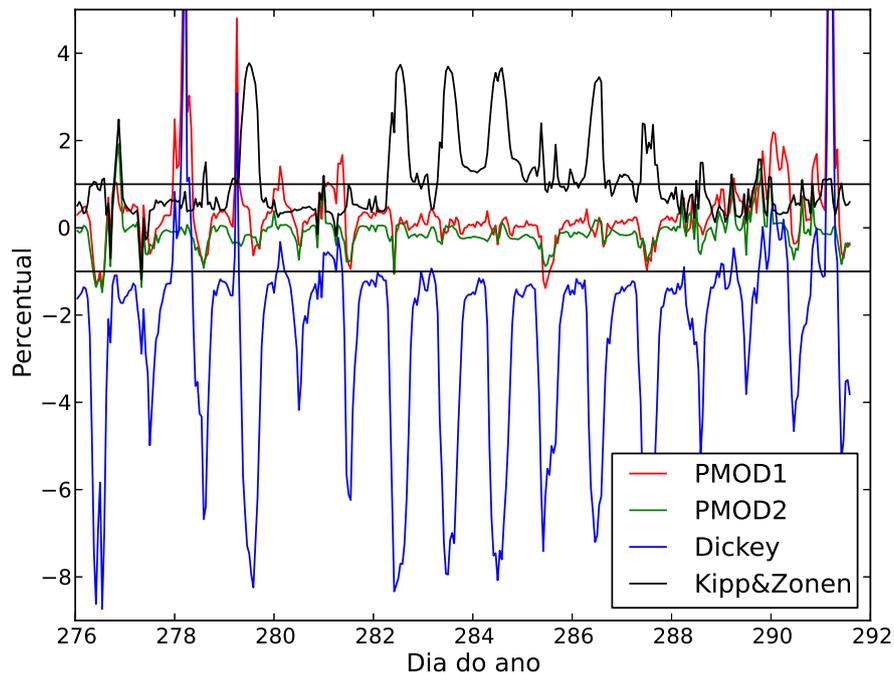


Figura 4.7 - Diferença percentual entre os valores calculados pelas equações 2.1, 2.3, 2.2 e 2.4 e o obtido pelo sensor padrão. A curva em azul é para a equação 2.2 (Dickey). A curva em preto é para a equação 2.4 (Kipp&Zonen). A curva em vermelho é para a equação 2.1 (PMOD1). A curva em verde é para a equação 2.3 (PMOD2).

A curva para equação Dickey mostra que, a medida que o sol aproxima-se do zênite, a intensidade passa a ser subestimada em até 8%. A curva para equação Kipp&Zonen superestima a ROL com valores maiores que 3,5% ao meio-dia. As curvas para PMOD1 e PMOD2 não apresentam os desvios causados pela incidência direta da ROC. Em ambos os gráficos ocorrem períodos em que as curvas para as equações PMOD1, PMOD2 e Kipp&Zonen apresentam o desvio menor que 1%. Esses períodos estão relacionados a ocorrência de dias completamente nublados. Mesmo havendo esses períodos a equação Dickey não apresentou um bom ajuste em comparação com as outras.

## 4.5 Influência do Sombreamento e ventilação

Como mencionado na seção 3.2, durante o experimento de simulação, os sensores foram submetidos a situações em que simulam uma pane nos sistemas de ventilação e rastreamento. A seguir serão apresentados três resultados obtidos: 1) situação em que os sistemas de ventilação e sombreamento estão funcionando (figura 4.8); 2) situação em que o sombreador foi removido enquanto o sistema de ventilação permaneceu funcionando (figura 4.9); e, 3) a situação em que os sensores foram sombreados e tiveram seus sistemas de ventilação desligados (figura 4.10). Estas figuras apresentam as diferenças obtidas entre os sensores analisados e o sensor padrão, para uma análise qualitativa.

A figura 4.8 mostra os dados de ROL obtidos para o dia 261. Observa-se que o sensor PIR 33495F3 desvia do sensor padrão em aproximadamente  $2W/m^2$  e que tem  $\pm 1W/m^2$  de incerteza. O sensor CGR4 120511 apresenta um desvio nas vizinhanças de zero e sua incerteza também está nas proximidades de zero. Nota-se que ambos os sensores apresentam a mesma tendência ao longo do dia.

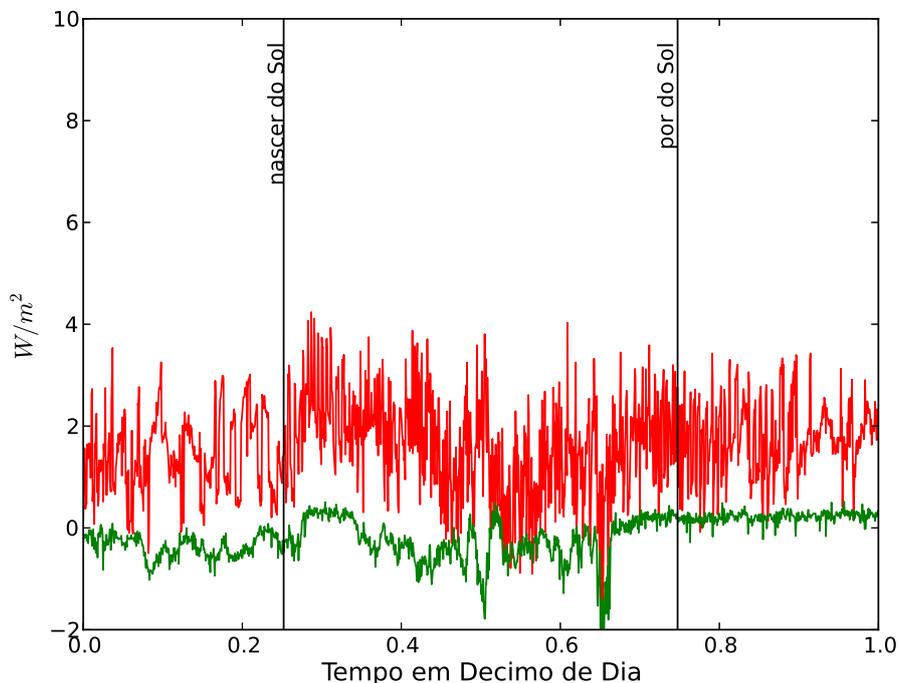


Figura 4.8 - Diferença entre as intensidades de ROL medidas pelo sensor padrão e os dois sensores analisados no dia 261 com os sensores sombreados. A curva de diferença em vermelho é para o PIR 33495F3 e a curva em verde é para o CGR4 120511.

A figura 4.9, referente ao dia 293, mostra os mesmos sensores sem sombreamento. Ambos os sensores apresentam aumento da diferença, que inicia perto das 5:00 HL<sup>1</sup> (próximo ao nascer do sol), atinge o máximo ao meio-dia e minimiza completamente próximo às 19:00 HL (próximo ao por do sol). O sensor PIR 33495F3 apresenta a diferença máxima de aproximadamente  $10W/m^2$ . Enquanto o sensor CGR4 120511 tem o seu máximo de diferença em aproximadamente  $5W/m^2$ . A incerteza de ambos os sensores é análoga à observada no figura 4.8.

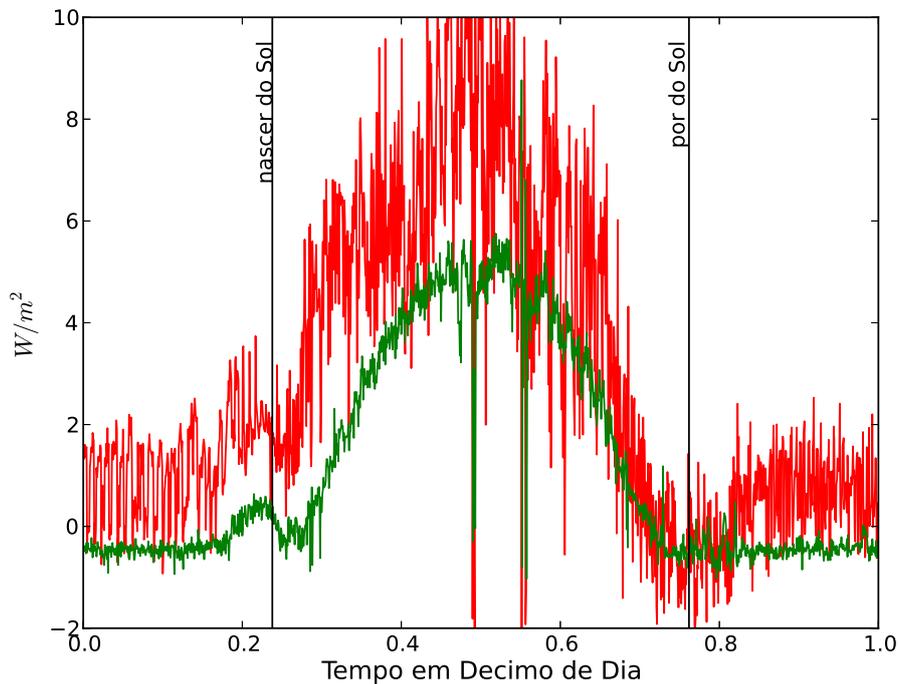


Figura 4.9 - Diferença entre as intensidades de ROL medidas pelo sensor padrão e os dois sensores analisados no dia 293 com os sensores não sombreados. A curva de diferença em vermelho é para o PIR 33495F3 e a curva em verde é para o CGR4 120511.

No dia 362 (figura 4.10) os sensores estavam sombreados e sem sistema de ventilação. É observado que ambos sensores apresentam um comportamento mais próximo do observado na figura 4.8. Nota-se, também, que há um ligeiro incremento da incerteza a medida que aproxima-se do meio-dia. O PIR 33495F3 passou a apresentar uma incerteza de aproximadamente  $\pm 2W/m^2$  enquanto que o CGR4 apresentou uma incerteza de aproximadamente  $\pm 0,5W/m^2$ .

<sup>1</sup>Hora Local

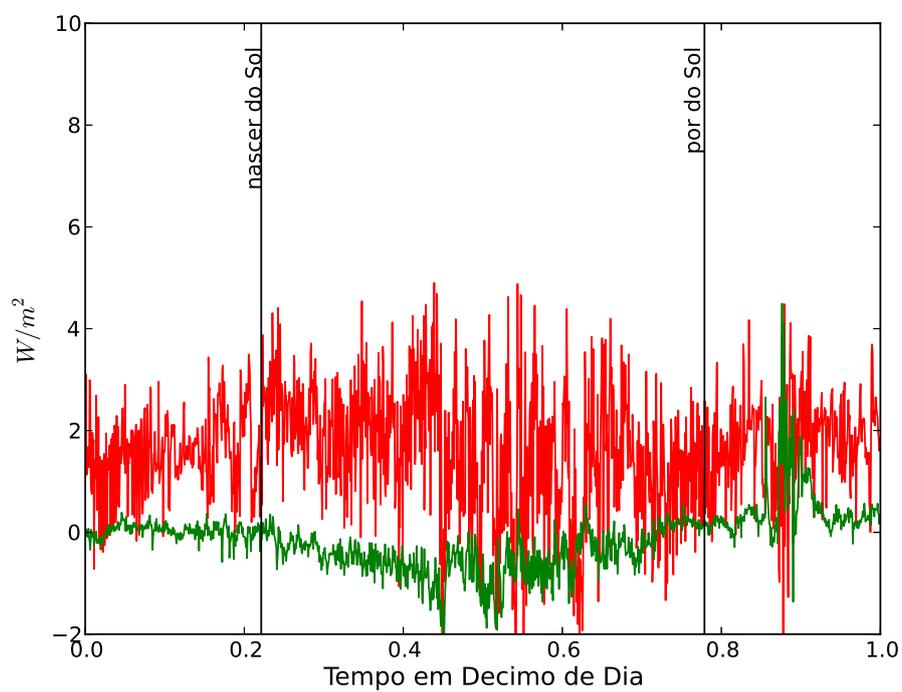


Figura 4.10 - Diferença entre as intensidades de ROL medidas pelo sensor padrão e os dois sensores analisados no dia 362 com os sensores não ventilados. A curva de diferença em vermelho é para o PIR 33495F3 e a curva em verde é para o CGR4 120511.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para calcular os coeficientes  $k_s$  destinados à correção dos dados obtidos com sensores de ROL. Os sensores usados são fabricados pela Eppley e pela Kipp & Zonen. Os conceitos e os critérios empregados no desenvolvimento do método estão baseados na calibração por comparação que é proposta pela BSRN e utilizada pelo PMOD. Foi avaliada a contribuição da incidência direta da radiação solar devido à ausência de sombreamento. Avaliou-se também quatro equações distintas para calcular a intensidade da ROL, sendo duas equações para o PIR e duas para o CGR4.

A MeCADROL utiliza séries temporais obtidas pelo sensor padrão e pelos sensores analisados e através do método matemático de mínimos quadrados calcula os coeficientes de cada sensor. Ao final do processo é apresentado o resultado dos testes estatísticos.

Os resultados obtidos com o teste do MeCADROL mostraram que o cálculo dos coeficientes  $k_s$  apresentaram boa precisão. Isto é confirmado utilizando os  $k_s$  obtidos para o período estável (PEC) pois corrigiram os dados de dois períodos estáveis, que diferem do PEC, e de um período de instável (PIA). De acordo com os resultados apresentados na tabela 4.2 verifica-se que houve uma redução do VIES de  $7,49W/m^2$  para o sensor PIR e de  $3,26W/m^2$  para o CGR4. A redução obtida para o REQM foi de  $6,9W/m^2$  para o PIR e de  $2,9W/m^2$  para o CGR4. O que permite concluir que o método poderá ser aplicado para obter os coeficientes em outras estações e assim corrigir os dados armazenados. Por tratar-se de um método que exige baixo processamento computacional esta metodologia pode ser executada em um computador portátil, permitindo que o funcionamento do sensor seja verificado em campo.

Uma vez que a MeCADROL apresentou bom desempenho na obtenção dos  $k_s$  durante o período de teste, a metodologia foi empregada no sítio de Brasília. Este procedimento permitiu calcular os novos coeficientes para o sensor. Os resultados dos testes estatísticos mostraram que os dados estão com um VIES médio de  $2W/m^2$ .

Com relação aos métodos de calibração, o método externo possibilita obter a melhor eficiência de calibração, pois submete os sensores às condições próximas das que são observadas em campo. Entretanto, para que este método seja aplicado operacionalmente é preciso determinar o intervalo de dias do ano em que os períodos estáveis ocorrem com mais frequência. Durante o experimento realizado no LIM, verificou-se que os períodos estáveis, ideais para a calibração do sensor, ocorreram

entre os meses de junho e setembro correspondendo ao inverno do hemisfério sul. Foram determinados três eventos neste período. A desvantagem deste método é que só é possível empregá-lo durante a ocorrência de períodos estáveis. Por outro lado, o método interno, que faz uso de um corpo negro como fonte de radiação, permite que os sensores sejam aferidos durante o ano todo independentemente das condições meteorológicas, pois não necessita de um período específico para determinar os coeficientes. Embora não haja restrições quanto ao período de emprego para calibração, uma desvantagem deste método (corpo negro) é a diferença entre o espectro de emissão da ROL em relação à emitida pela atmosfera.

O experimento de sombreamento dos sensores mostrou que a incidência direta da ROC persiste como uma fonte de erro sistemático mesmo após serem implementadas melhoras nas propriedades do material de fabricação do domo. Após a remoção do sombreamento, nota-se que ambos os sensores superestimaram a intensidade da ROL. O sensor PIR 33495F3 mostrou-se mais suscetível apresentando ao meio-dia um valor superestimado em  $10W/m^2$  enquanto o CGR4 120511 apresentou um valor superestimado em  $5W/m^2$ . Estes resultados evidenciam que além da calibração de cada sensor é necessário avaliar a resposta de cada sensor a incidência direta da ROC, pois frequentemente o sistema de sombreamento apresenta problemas. Conhecer esta resposta é o que possibilitará corrigir os dados quando os sensores não estiverem sombreados.

A comparação entre as quatro equações de cálculo da ROL mostraram que para um mesmo sensor a intensidade apresenta diferenças significativas. As equações que melhor concordam com o valor calculado pelo sensor padrão são as equações 2.1 para o sensor PIR e a 2.3 para o CGR4, ambas são sugeridas pelo PMOD. A equação 2.4 do manual do CGR4 apresenta um desvio acima dos valores observados pelo sensor padrão e também mostra dependência com a incidência da ROC. A equação 2.2 é a que apresenta o maior desvio dos dados e menor eficiência para remover a influência da ROC. Estes resultados mostram que as equações 2.1 e 2.3 combinada com o termo  $\phi G$  são as que apresentam o melhor desempenho. Por essa razão, a equação 2.4 para o Kipp & Zonen deve ser substituída pela 2.3.

Os resultados apresentados mostraram que cada sensor responde de uma forma particular às variações abruptas das condições atmosféricas, em concordância com o que foi apresentado por Fairall et al. (1998), Payne e Anderson (1999). Estes resultados evidenciam a necessidade de que cada sensor seja caracterizado com os próprios coeficientes de calibração. Deve-se seguir as recomendações de McArthur

(2005) que afirma que todos os pirgeômetros empregados nas estações devem ser calibrados a cada quatro meses e a cada três meses para regiões em que o sensor estará sujeito a intempéries. Desta forma, para o projeto SONDA (BSRN) ou para uma rede de sensores ROL é necessário: 1) a implementação do sistema de calibração com corpo negro; 2) a aquisição de um sensor PIR, com rastreabilidade do PMOD, para em conjunto com o CG4 050748 serem utilizados como referência durante a calibração externa; e, 3) a aquisição de sensores sobressalentes para que possam substituir os que estão na estação, quando forem recolhidos para calibração.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALADOS-ARBOLEDAS, L.; VIDA, J.; JIMENEZ, J. Effects of solar radiation on the performance of pyrgeometers with silicon domes. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 5, n. 5, p. 666–670, 1988. 5

ALBRECHT, B.; COX, S. K. Procedures for improving pyrgeometer performance. **Journal of Applied Meteorology**, v. 16, n. 2, p. 188–197, 1977. 2

ALBRECHT, B.; POELLOT, M.; COX, S. K. Pyrgeometer measurements from aircraft. **Review of Scientific Instruments**, AIP Publishing, v. 45, n. 1, p. 33–38, 1974. 1

CRAWFORD, T. M.; DUCHON, C. E. An improved parameterization for estimating effective atmospheric emissivity for use in calculating daytime downwelling longwave radiation. **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, n. 4, p. 474–480, 1999. 1

DEFELICE, T. P. **An introduction to meteorological instrumentation and measurements**. New Jersey: Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 1998. 7

DICKEY, T. D.; MANOV, D. V.; WELLER, R. A.; SIEGEL, D. A. Determination of longwave heat flux at the air-sea interface using measurements from buoy platforms. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 11, n. 4, p. 1057–1078, 1994. 1, 6, 38

DUARTE, H. F.; DIAS, N. L.; MAGGIOTTO, S. R. Assessing daytime downward longwave radiation estimates for clear and cloudy skies in southern Brazil. **Agricultural and forest meteorology**, Elsevier, v. 139, n. 3, p. 171–181, 2006. 18

DUTTON, E. G.; MICHALSKY, J. J.; STOFFEL, T.; FORGAM, B. W.; HICKEY, J.; NELSON, D. W.; ALBERTA, T. L.; REDA, I. Measurement of broadband diffuse solar irradiance using current commercial instrumentation with a correction for thermal offset errors. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 18, p. 297–314, 2001. 5

ENZ, J. W.; KLINK, J. C.; BAKER, D. G. Solar radiation effects on pyrgeometer performance. **Journal of Applied Meteorology**, v. 14, n. 7, p. 1297–1302, 1975. 5

ESPACIAIS, I. N. D. P.; CLIMÁTICOS, C. de Previsão do Tempo e E. **Cartas de análise**. 2013. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 10 Fevereiro. 24, 25

FAIRALL, C. W.; PERSSON, P. O. G.; BRADLEY, E. F.; PAYNE, R. E.; ANDERSON, S. P. A new look at calibration and use of eppley precision infrared radiometers. part i: Theory and application. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 15, p. 1229–1241, 1998. 44

GRÖBNER, J. A transfer standard radiometer for atmospheric longwave irradiance measurements. **IOP Publishing Metrologia**, v. 49, p. S105–S111, 2012. 3

GRÖBNER, J.; LOS, A. Laboratory calibration of pyrgeometers with known spectral responsivities. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 46, n. 30, p. 7419–7425, 2007. 7, 11

GRÖBNER, J.; WACKER, S. **Pyrgeometer Calibration Procedure at the PMOD/WRC-IRS**. Davos: [s.n.], 2012. 13 p. 8, 10, 11, 15

HARRIES, J. E.; BRINDLEY, H. E.; SAGOO, P. J.; BANTGES, R. J. Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the earth in 1970 and 1997. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 410, n. 6826, p. 355–357, 2001. 1

JONSSON, P.; ELIASSON, I.; HOLMER, B.; GRIMMOND, C. Longwave incoming radiation in the tropics: results from field work in three african cities. **Theoretical and applied climatology**, Springer, v. 85, n. 3-4, p. 185–201, 2006. 1

KIPP & ZONEN. **CGR4 Pyrgeometer Instruction Manual**. The Netherlands, 2014. 35 p. 6, 31

KREYSZIG, E. **Advanced engineering mathematics**. Ninth edition. United States of America: Jhon Wiley & Sons, Inc, 2006. 1094 p. ISBN 978-0-471-48885-9. 15

KUSHNIR, Y. **The electromagnetic spectrum**. 2013. Disponível em: <<http://www.learner.org/courses/envsci/unit/text.php?unit=2&secNum=3>>. Acesso em: 20 Abril. 6

MANTELLI N., S. L.; PEREIRA, E. B.; THOMAZ J., J. C.; COLLE, S. Sistema de organização nacional de dados ambientais para o setor de energia. in: Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica. In: . [S.l.: s.n.]. 11

MCARTHUR, L. J. B. **World Climate Research Programme-Baseline Surface Radiation Network (BSRN)-Operations Manual Version 2.1.**

Segunda edição. Downsview, Ontario, Canada: Experimental Studies Division, Atmospheric Environment Service, 2005. 188 p. 5, 8, 17, 20, 45

MELONI, D.; BIAGIO, C. D.; SARRA, A. D.; MONTELEONE, F.; PACE, G.; SFERLAZZO, D. M. Accounting for the solar radiation influence on downward longwave irradiance measurements by pyrgeometers. **Journal of Atmospheric & Oceanic Technology**, v. 29, n. 11, p. 1629–1643, 2012. 8

MITCHELL, I. F. B.; JOHNS, T. C.; GREGORY, J. M.; TETT, S. F. B. Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols. **Nature**, v. 376, p. 501–504, 1995. 1

PAYNE, R. E.; ANDERSON, S. P. A new look at calibration and use of eppley precision infrared radiometers. part ii: Calibration and use of the woods hole oceanographic institution improved meteorology precision infrared radiometer. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 16, p. 739–751, 1999. 44

PEREIRA, E.; LIMA, J. H. G. **Solar and wind energy resource assessment in Brazil.** Primeira edição. São José dos Campos: [s.n.], 2008. 100 p. ISBN 978-85-17-00038-6. 1

PHILIPONA, R. Sky-scanning radiometer for absolute measurements of atmospheric long-wave radiation. **Applied Optics**, v. 40, n. 15, p. 2376–2383, 2001. 11

PHILIPONA, R.; DÜRR, B.; MARTY, C. Greenhouse effect and altitude gradients over the alps - by surface longwave radiation measurements and model calculated lor. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 7, p. 1–7, 2004. 1

PHILIPONA, R.; DUTTON, E. G.; STOFFEL, T.; MICHALSKY, J.; REDA, I.; STIFTER, A.; WENDLING, P.; WOOD, N.; CLOUGH, S. A.; MLAWER, E. J.; ANDERSON, G.; REVERCOMB, H. E.; SHUPPERT, T. R. Atmospheric longwave irradiance uncertainty: Pyrgeometers compared to an absolute sky-scanning radiometer, atmospheric emitted radiance interferometer, and radiative transfer model calculations. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. D22, p. 28,129–28,141, 2001. 12

PHILIPONA, R.; FRÖHLICH, C.; BETZ, C. H. Characterization of pyrgeometers and the accuracy of atmospheric long-wave radiation measurements. **Applied Optics**, v. 34, n. 9, p. 1598–1605, 1995. 4, 5, 8, 9

- REDA, I.; HICKEY, J. R.; GRÖBNER, J.; ANDREAS, A.; STOFFEL, T. Calibrating pyrgeometers outdoors independent from the reference value of the atmospheric longwave irradiance. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 68, p. 1416–1424, 2006. 8, 9
- REDA, I.; HICKEY, J. R.; STOFFEL, T.; MYERS, D. Pyrgeometer calibration at the national renewable energy laboratory (nrel). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, p. 1623–1629, 2002. 8
- REDA, I.; ZENG, J.; SHEUCH, J.; HANSEN, L.; WILTHAN, B.; MYERS, D.; STOFFEL, T. An absolute cavity pyrgeometer to measure the absolute outdoor longwave irradiance with traceability to international system of units, si. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 77, p. 132–143, 2012. 3
- SAKAI, S.; ITO, A.; UMETANI, K.; IIZAWA, I.; ONISHI, M. A practical pyrgeometer using the representative angle. **Journal of Atmospheric & Oceanic Technology**, v. 26, n. 3, p. 647–655, 2009. 3
- SONDA. **Localização das Estações Sonda**. 2013. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/>>. Acesso em: 20 Abril. 11, 13
- STOFFEL, T.; REDA, I.; HICKEY, J.; DUTTON, E.; MICHALSKY, J. Pyrgeometer calibrations for the atmospheric radiation measurement program: Updated approach. in: Sixteenth arm science team meeting proceedings. In: . [S.l.: s.n.]. 10
- TETT, S. F.; STOTT, P. A.; ALLEN, M. R.; INGRAM, W. J.; MITCHELL, J. F. Causes of twentieth-century temperature change near the earth's surface. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 399, n. 6736, p. 569–572, 1999. 1
- THOMAZ, J. C. **Perspectiva da gestão/administração de sistemas integrados de observação terrestre**. 53 p. Trabalho de Conclusão de curso, São José dos Campos, 2012. 1
- TRENBERTH, K. E.; MOORE, B.; KARL, T. R.; NOBRE, C. Monitoring and prediction of the earth's climate: A future perspective. **Journal of climate**, v. 19, n. 20, p. 5001–5008, 2006. 1
- WEBSTER, P. J.; LUKAS, R. Toga coare: The coupled ocean-atmosphere response experiment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 73, n. 9, p. 1377–1416, 1992. 1

WYOMING, U. of. **Sondagem Atmosférica**. 2013. Disponível em:  
<<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>>. Acesso em: 10  
Fevereiro. 26, 27



## APÊNDICE A

### A.1 Dedução teórica da Irradiância medida pelo sensor CGR4

A partir do esquema apresentado na figura 2.2 o saldo do fluxo de radiação na superfície da termopilha  $F_{net}$  é:

$$F_{net} = F_{in} - F_{out} \quad (\text{A.1})$$

O fluxo que incide sobre a termopilha  $F_{in}$  pode ser descrito como sendo composto por duas componentes: a irradiância atmosférica que incide sobre o domo e é transmitida, e a componente emitida pela termopilha e que é refletida pelo domo. Devido este instrumento não possuir termistor no domo a componente da radiação produzida pelo domo não será calculada. Logo o fluxo incidente é descrito por:

$$F_{in} = \alpha_s \tau_d E_L + \alpha_s \rho_d \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (\text{A.2})$$

onde  $\alpha_s$  é a absorvância da termopilha,  $\tau_d$  é a transmitância do domo,  $\rho_d$  é a refletância do domo,  $\epsilon_s$  é a emitância da termopilha,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann,  $E_L$  é irradiância da onda longa e  $T_s$  é a temperatura da superfície da termopilha.

O fluxo emitido pela superfície da termopilha  $F_{out}$  é:

$$F_{out} = \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (\text{A.3})$$

Substituindo as equações do fluxo incidente (A.2) e a do fluxo emitido (A.3) na equação do saldo (A.1) do encontramos que:

$$F_{net} = \alpha_s \tau_d E_L + \alpha_s \rho_d \epsilon_s \sigma T_s^4 - \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (\text{A.4})$$

Considerando que a termopilha está em equilíbrio termodinâmico podemos então usar a lei de Kirchoff para garantir que a absorvância e a emitância são numericamente iguais  $\alpha_s = \epsilon_s$ .

O saldo do fluxo  $F_{net}$  também é escrito como proporcional a diferença de temperatura entre a superfície da termopilha e a junção com o corpo do instrumento.

$$F_{net} = \frac{T_s - T_b}{c} \quad (\text{A.5})$$

A diferença de potencial gerada pela termopilha  $U$  é proporcional a diferença de temperatura e é descrita por:

$$U = \frac{T_s - T_b}{\gamma} \quad (\text{A.6})$$

$T_b$  é temperatura na qual o corpo do instrumento,  $\gamma$  a constante que relaciona a diferença de temperatura com a diferença de potencial e tem unidade de Kelvin por milivolt e  $c$  é constante que relaciona a diferença de temperatura com irradiância e tem unidade de Kelvin por watt por metro quadrado.

Da equação (A.6) pode-se obter a temperatura da superfície da termopilha como

$$T_s = T_b + \gamma U \quad (\text{A.7})$$

Elevando a equação (A.7) a quarta potência

$$T_s^4 = T_b^4 + 4T_b^3\gamma U + 6T_b^2(\gamma U)^2 + 4T_b(\gamma U)^3 + (\gamma U)^4 \quad (\text{A.8})$$

como a diferença de potencial é da ordem de  $10^{-6}V$  os termos com potência de  $U$  maiores que um serão desprezados por apresentar uma contribuição muito pequena. Portanto a  $T_s$  será aproximada por

$$T_s^4 \approx T_b^4 + 4T_b^3\gamma U \quad (\text{A.9})$$

substituindo as equações (A.5), (A.6) e (A.9) em (A.4)

$$\frac{\gamma U}{c} = \alpha_s \tau_d E_l + \alpha_s \rho_d \epsilon_s \sigma (T_b^4 + 4T_b^3 \gamma U) - \epsilon_s \sigma (T_b^4 + 4T_b^3 \gamma U). \quad (\text{A.10})$$

Resolvendo (A.10) para  $E_L$  e rearranjando os termos

$$E_L = \left(\frac{1 - \rho_d \epsilon_s}{\tau_d}\right) \sigma T_b^4 + 4\gamma \left(\frac{1 - \rho_d \epsilon_s}{\tau_d}\right) U \sigma T_b^3 + \frac{\gamma U}{c \epsilon_s \tau_d} \quad (\text{A.11})$$

Fazendo as seguintes definições

$$C \equiv \frac{c \epsilon_s \tau_d}{\gamma} \quad (\text{A.12})$$

$$k_1 \equiv 4\gamma C \left(\frac{1 - \rho_d \epsilon_s}{\tau_d}\right) \quad k_2 \equiv \left(\frac{1 - \rho_d \epsilon_s}{\tau_d}\right) \quad (\text{A.13})$$

$C$  é a sensibilidade do instrumento  $k_1$  e  $k_2$  são coeficientes e são obtidos com a calibração do instrumentos. Substituindo as definições (A.12) e (A.13) em (A.11) obtemos

$$E_L = \frac{U}{C} (1 + k_1 \sigma T_b^3) + k_2 \sigma T_b^4 \quad (\text{A.14})$$

Se for usado  $k_1 = 0$  e  $k_2 = 1$  encontra-se uma equação simplificada para obtenção de  $E_L$ .

$$E_L = \frac{U}{C} + \sigma T_b^4 \quad (\text{A.15})$$

Esta é a equação sugerida pela Kipp & Zonen para ser usada.



## APÊNDICE B

### B.1 Dedução da equação para calcular o termo rROC

O erro sistemático produzido devido à incidência direta da ROC nos pirgeômetros pode ser descrito como sendo uma curva que é proporcional a Radiação Global  $G$ . O termo de redução da ROC ( $rROC$ ) é descrito como  $\phi G$ .  $\phi$  é um coeficiente de proporcionalidade obtido empiricamente.

$$rROC = \phi G \quad (B.1)$$

A partir do gráfico da diferença entre os pirgeômetros analisados  $ROL_p^{ana}$  e o pirgeômetro de referência  $ROL_p^{std}$  (figura B.1) verifica-se que ambas as curvas seguem um comportamento similar ao apresentado pela Radiação Global.

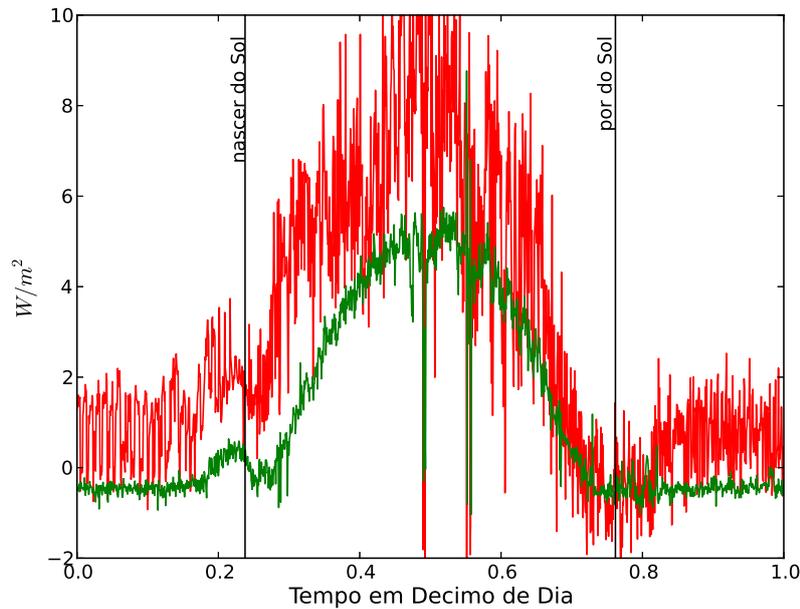


Figura B.1 - Diferença entre as intensidades de ROL medidas pelos os dois sensores analisados e o sensor padrão no dia 293 com os sensores não sombreados. A curva de diferença em vermelho é para o PIR 33495F3 e a curva em verde é para o CGR4 120511.

Realizando a razão entre as curvas da diferença e curva da Radiação Global, encontra-se uma curva que representa o coeficiente de proporcionalidade puntual  $\phi_p$  (figura B.2).

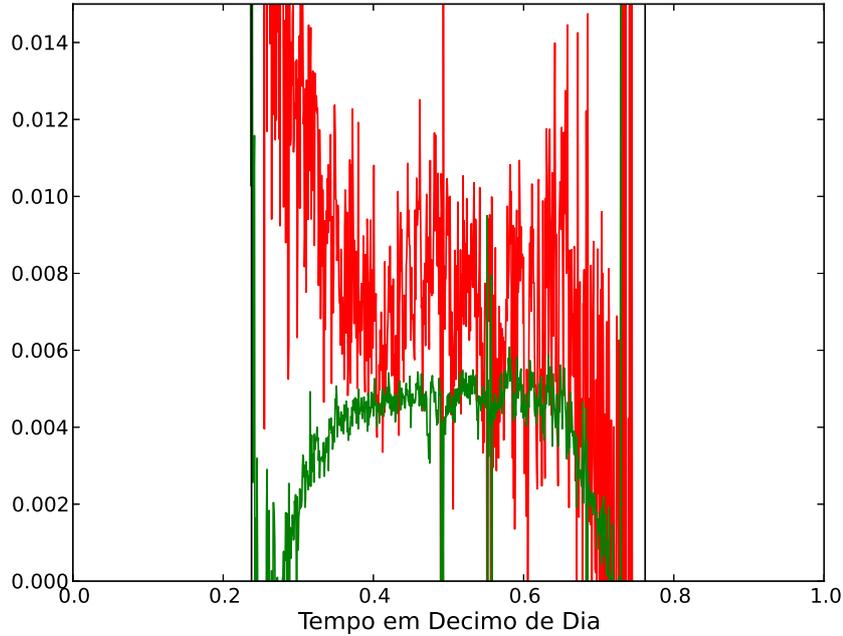


Figura B.2 - Coeficiente de proporcionalidade puntual. A curva em vermelho é para o PIR 33495F3 e a curva em verde é para o CGR4 120511.

$$\phi_p = \frac{ROL_p^{ana} - ROL_p^{std}}{G_p} \quad (B.2)$$

Observa-se a ocorrência de dois períodos transientes, um após o nascer do sol e outro antes do pôr do sol. Entre os transientes ocorre um período de estabilidade. Para garantir que os valores pontuais estejam fora do período transiente armazena-se os  $\phi_p$  que ocorrem entre o décimo do dia<sup>1</sup> maior que 0,45 e menor que 0,55. Calcula-se então o valor médio para os  $P$  valores de  $\phi_p$

$$\phi_d = \langle \phi_p \rangle = \frac{1}{P_d} \sum_{p=1}^{P_d} \phi_p \quad (B.3)$$

<sup>1</sup>Calcula-se o tempo em décimos do dia através da razão entre tempo em minutos e a duração do dia em minutos.

$P_d$  é número pontos de  $\phi_p$  que foram armazenados para um determinado dia. Obtendo com isso o coeficiente para um determinado dia  $\phi_d$ . Para obter o valor do coeficiente mais próximo do ideal, realiza-se o mesmo procedimento para outros dias que apresentam comportamento equivalente ao da figura B.1 obtendo assim  $D$  valores de  $\phi_d$ .  $D$  é número de dias utilizados. Calcula-se então o valor médio para todos os  $\phi_d$

$$\phi = \langle \phi_d \rangle = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D \phi_d. \quad (\text{B.4})$$

Substituindo a equação B.2 na equação B.3

$$\langle \phi_p \rangle = \frac{1}{P_d} \sum_{p=1}^{P_d} \frac{ROL_p^{ana} - ROL_p^{std}}{G_p} \quad (\text{B.5})$$

Substituindo a equação B.5 na equação B.4 encontra-se a expressão final

$$\phi = \frac{1}{D} \left( \sum_{d=1}^D \frac{1}{P_d} \sum_{p=1}^{P_d} \frac{ROL_{dp}^{ana} - ROL_{dp}^{std}}{G_{dp}} \right) \quad (\text{B.6})$$



## ANEXO A

### A.1 Dedução teórica da Irradiância medida pelo sensor PIR

Observando a figura B.1 o saldo do fluxo radiativo na superfície da termopilha é equacionado como segue:

$$F_{net} = F_{in} - F_{out} \quad (\text{A.1})$$

O fluxo que incide sobre a termopilha  $F_{in}$  pode ser descrito por três componentes, são elas: a componente da irradiância atmosférica que é transmitida pelo domo, a componente produzida pelo domo por está a uma determinada temperatura e a componente emitida pela termopilha que é refletida pelo domo para a superfície da termopilha. Este fluxo é equacionado como segue:

$$F_{in} = \alpha_s \tau_d E_l + \alpha_s \epsilon_d \sigma T_d^4 + \alpha_s \rho_d \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (\text{A.2})$$

onde  $\alpha_s$  é absorptância da termopilha,  $\tau_d$  é transmitância do domo,  $\epsilon_d$  é a emitância do domo,  $\rho_d$  é a reflectância do domo,  $\epsilon_s$  é emitância da termopilha,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann,  $T_d$  é a temperatura do domo e  $T_s$  é a temperatura da superfície da termopilha.

O fluxo que é emitido pela termopilha  $F_{out}$  é:

$$F_{out} = \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (\text{A.3})$$

Substituindo as equação do fluxo incidente (A.2) e a do fluxo emitido (A.3) na equação do saldo (A.1) obtemos

$$F_{net} = \alpha_s \tau_d \epsilon E_l + \alpha_s \epsilon_d \sigma T_d^4 + \alpha_s \rho_d \epsilon_s \sigma T_s^4 - \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (\text{A.4})$$

Considerando que a termopilha atingiu o estado de equilíbrio termodinâmico pode-se usar a lei de Kirchhoff para afirmar que a emitância e a absorptância são numericamente iguais  $\epsilon_s = \alpha_s$ .

O saldo do fluxo  $F_{net}$  que incide sobre a superfície da termopilha pode, também, ser descrito a partir da diferença de temperatura entre a superfície e a junção com o corpo do pirgeômetro.

$$F_{net} = \frac{T_s - T_b}{c} \quad (\text{A.5})$$

A diferença de potencial produzida é proporcional a diferença de temperatura entre a superfície e a junção com o corpo do sensor.

$$U = \frac{T_s - T_b}{\gamma} \quad (\text{A.6})$$

onde  $c$  e  $\gamma$  são constantes de sensibilidade e possuem respectivamente unidades de Kelvin por watt por metro quadrado e Kelvin por milivolt. Como não existe nenhum termistor na superfície da termopilha a temperatura da superfície  $T_s$  é obtida a partir de uma aproximação como demonstrado a seguir. Da equação A.6  $T_s$  é obtido como:

$$T_s = T_b + \gamma U \quad (\text{A.7})$$

Elevando  $T_s$  a quarta potência obtemos

$$T_s^4 = T_b^4 + 4\gamma U T_b^3 + 6(\gamma U)^2 T_b^2 + 4(\gamma U)^3 T_b + (\gamma U)^4 \quad (\text{A.8})$$

Como o valor de  $U$  é da ordem de  $10^{-6}V$  portanto os termos com potência maiores que um podem ser negligenciados pois possuem uma contribuição muito pequena. A equação aproximada fica como segue:

$$T_s^4 \approx T_b^4 + 4\gamma U T_b^3 \quad (\text{A.9})$$

Substituindo (A.5), (A.7) e (A.9) na equação(A.4) ficamos com

$$\frac{\gamma U}{c} = \alpha_s \tau_d E_l + \alpha_s \epsilon_d \sigma T_d^4 + \alpha_s \rho_d \epsilon_s \sigma [T_b^4 + 4\gamma U T_b^3] - \epsilon_s \sigma [T_b^4 + 4\gamma U T_b^3] \quad (\text{A.10})$$

Resolvendo (A.10) para  $E_l$  encontramos que

$$E_l = \frac{\gamma U}{\alpha_s \tau_d C} + \frac{(1 - \rho_d \epsilon_s)}{\tau_d} 4\gamma U \sigma T_b^3 + \frac{(1 - \rho_d \epsilon_s - \epsilon_d)}{\tau_d} \sigma T_b^4 - \frac{\epsilon_d}{\tau_d} \sigma (T_d^4 - T_b^4) \quad (\text{A.11})$$

fazendo as seguintes definições

$$C = \frac{\alpha_s \tau_d C}{\gamma} \quad (\text{A.12})$$

$$K_1 = 4C\gamma \frac{1 - \rho_d \epsilon_s}{\tau_d} \quad K_2 = \frac{(1 - \rho_d \epsilon_s - \epsilon_d)}{\tau_d} \quad K_3 = \frac{\epsilon_d}{\tau_d} \quad (\text{A.13})$$

e substituindo essas definições em (A.11) chegamos a seguinte expressão

$$E_l = \frac{U}{C} (1 + k_1 \sigma T_b^3) + k_2 \sigma T_b^4 - k_3 \sigma (T_d^4 - T_b^4) \quad (\text{A.14})$$

os valores para  $C$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são determinados por meio de calibração em laboratório.



## ANEXO B

### B.1 Certificado de calibração do sensor CG4 050748

 **Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos**  
World Radiation Center



---

## Calibration Certificate

No. 2012\_065\_02

<b>Calibration Item</b>	<b>Pyrgeometer</b>
	Manufacturer Kipp & Zonen
	Type CG4 with YSI body thermistor
	Serial Number 050748
<b>Customer</b>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais CPTEC/LIM Radovia Presidente Dutra, km 40, SP-RJ 12630-000, Cachoeira Paulista, SP Brazil
<b>Calibration Mark</b>	2012_065_02
<b>Period of Calibration</b>	31 July to 15 August 2012



Davos Dorf, 16 August 2012

Dr. S. Wacker  
In charge of calibration

Dr. J. Gröbner  
Head IR radiometry section

Calibration certificates without signature are not valid. This calibration certificate shall not be reproduced except in full, without the written approval of the Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos and World Radiation Center.

Dorfstrasse 33, CH-7260 Davos Dorf  
Phone +41 81 417 51 11, Fax +41 81 417 51 00  
www.pmodwrc.ch

Page 1 of 3

Certificate No. 2012\_065\_02

### Calibration procedure

This instrument was calibrated by an outdoor comparison to the pyrgeometer reference group (PIR 31463F3, PIR 31464F3, CG4 FT004, and CG4 010535) of the infrared radiometry section of the World radiation Center (WRC-IRS) at PMOD/WRC according to the SOP "IRS\_Pyrgeometer\_calibration". The comparison is made during nighttime with cloudy and cloud-free situations. The pyrgeometer was installed in a PMOD-VHS ventilation unit with a heated air flow around the dome.

From the measurements the sensitivity factor  $C$  is determined by using the standard relation (see Eq. 1 below), which involves the pyrgeometer signal  $U_{\text{emf}}$  and the body temperature  $T_B$  of the pyrgeometer. Body temperature is determined using equation (2) below. The longwave downward irradiance  $E$  is calculated using the following equation:

$$E = \frac{U_{\text{emf}}}{C} (1 + k_1 \cdot \sigma T_B^3) + k_2 \cdot \sigma T_B^4 \quad (1)$$

The Stefan-Boltzmann constant was set to the 2006 recommended CODATA value

$$\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

The conversion of resistance to temperature used the Steinhart and Hart equation shown below:

$$\frac{1}{T} = a + b \cdot \log(R) + c \cdot \log(R)^3 \quad (2)$$

where the temperature  $T$  is given in Kelvin and the thermistor resistance  $R$  is given in Ohm. The constants  $a$ ,  $b$ , and  $c$ , were determined for the temperature range  $-30$  °C to  $+40$  °C using the nominal resistance to temperature values provided by the manufacturer. These coefficients are listed below:

$$a = 10297.2 \cdot 10^{-7}$$

$$b = 2390.6 \cdot 10^{-7}$$

$$c = 1.5677 \cdot 10^{-7}$$

Certificate No. 2012\_065\_02

### Calibration results

**Sensitivity:**  $C = 11.98 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$

$u = 0.41 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$

The sensitivity C was derived using the following pyrometer coefficients  $k_1$  and  $k_2$ :

$k_1=0.05$

$k_2=0.9991$

The reported expanded uncertainty of measurement  $u$  is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor  $k=2$ , which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%.

### Calibrations Remarks

Radiation and temperature conditions during the calibration:

Longwave downward radiation (LDR)	266 W/m <sup>2</sup>	to	311 W/m <sup>2</sup>
Net radiation	-104 W/m <sup>2</sup>	to	-73 W/m <sup>2</sup>
Pyrometer body temperature	7.0 °C	to	15.8 °C
Integrated water vapour (IWV)	13 mm	to	21 mm
Residuals (2.5% to 97.5% percentile)	0.6 W/m <sup>2</sup>		

Measurement period	31 July to 15 August 2012
Measurement days	12

### Comments

The coefficients  $k_1$ , and  $k_2$  were determined in the reference blackbody source of PMOD/WRC on 23 July 2012 using blackbody temperatures between -18 °C and +15 °C and pyrometer body temperatures between -10 °C and +19 °C.

