



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

## **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL SOLAR DO SUL DO BRASIL III**

### **RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA PIBIC/INPE – CNPq/MCT**

**PROCESSO N° 104508/2005-0**

**Marcio Ceconi – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT**  
**Laboratório de Recursos de Energias Renováveis**  
**LRER/CRS/CIE/INPE – MCT**  
**Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais**  
**CRS/CIE/INPE – MCT**  
**E-mail: [ceconi@lancesm.ufsm.br](mailto:ceconi@lancesm.ufsm.br)**

**Dr. Fernando Ramos Martins**  
**Orientador**  
**Divisão de Clima e Meio Ambiente**  
**DMA/CPTEC/INPE – MCT**  
**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**  
**INPE – MCT**  
**E-mail: [fernando@dge.inpe.br](mailto:fernando@dge.inpe.br)**

Santa Maria, Junho de 2008.



**RELATÓRIO FINAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO PROGRAMA:  
PIBIC/INPE – CNPq/MCT**

**PROJETO**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL SOLAR DO SUL DO BRASIL III**

**PROCESSO: 104508/2005-0**

**Relatório elaborado por Marcio Ceconi relativo ao período  
Outubro de 2007 a Julho de 2008 de execução das atividades:**

**Marcio Ceconi** – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT  
em substituição do aluno Marcus Guedes  
**E-mail:** ceconi@lacesm.ufsm.br

**Dr. Nelson Jorge Schuch** – Co-Orientador  
**Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE – MCT**  
**E-mail:** njschuch@lacesm.ufsm.br

**Dr. Enio Bueno Pereira** – Co-Orientador  
**Divisão de Clima e Meio Ambiente**  
DMA/CPTEC/INPE – MCT  
**E-mail:** <enio.pereira@cptec.inpe.br>



## **DADOS DE IDENTIFICAÇÃO**

**Título: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL SOLAR DO SUL DO BRASIL III**

**Processo CNPq N°: 104508/2005-0**

**Bolsista no período de Outubro/07 a Julho/08:**

**Marcio Ceconi**

Curso de Física Bacharelado

Centro de Ciências Naturais e Exatas – CCNE/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

**Bolsista no período de Agosto/07 a Setembro/2007:**

Marcus Guedes – aluno substituído

Curso de Engenharia Elétrica

Centro de Tecnologia – CT/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

**Orientador:**

**Dr. Fernando Ramos Martins**

Divisão de Clima e Meio Ambiente - DMA/ CPTEC/INPE - MCT

Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE - MCT

**Co-Orientadores:**

**Dr. Nelson Jorge Schuch**

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE – MCT

**Dr. Enio Bueno Pereira**

Divisão de Clima e Meio Ambiente - DMA/CPTEC/INPE - MCT



**Colaboradores:**

Me. Eng. Ricardo A. Guarnieri – DMA/CPTEC/INPE – MCT

Daniel Vinícius Fiorin – Estagiário LRER/CRS/CIE/INPE-MCT e Graduando do curso de Engenharia Química da UFSM

Rodrigo Brackmann – Bolsista I.C. e Graduando do curso de Engenharia Química da UFSM

Alexandre Ceretta Dalla Favera – Estagiário do Curso de Automação Industrial CTISM/UFSM

**Locais de Trabalho/Execução do Projeto:**

Laboratório de Recursos de Energias Renováveis – CRS/CIE/INPE – MCT

Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT

Trabalho desenvolvido no âmbito da Parceria: INPE/MCT – UFSM, através do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM.



## DIRETÓRIO DOS GRUPOS DE PESQUISA

### Grupo de Pesquisa Ciências Atmosféricas - Ozônio x Radiação - Energias Renováveis



| Identificação | Recursos Humanos | Linhas de Pesquisa | Indicadores do Grupo |
|---------------|------------------|--------------------|----------------------|
|---------------|------------------|--------------------|----------------------|

#### Identificação

##### Dados básicos

**Nome do grupo:** Ciências Atmosféricas - Ozônio x Radiação - Energias Renováveis

**Status do grupo:** **certificado pela instituição**

**Ano de formação:** 1992

**Data da última atualização:** 18/06/2008 11:32

**Líder (es) do grupo:** Nelson Jorge Schuch - [nelson.schuch@pq.cnpq.br](mailto:nelson.schuch@pq.cnpq.br)

Damaris Kirsch Pinheiro - [damaris@lacesm.ufsm.br](mailto:damaris@lacesm.ufsm.br)

**Área predominante:** Ciências Exatas e da Terra; Geociências

**Instituição:** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

**Órgão:** Coordenação de Gestão Científica - CIE

**Unidade:** Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS

#### Endereço

**Logradouro:** Caixa Postal 5021

**Bairro:** Camobi

**CEP:** 97110970

**Cidade:** Santa Maria

**UF:** RS

**Telefone:** 33012026

**Fax:** 33012030

**E-mail:** [njschuch@lacesm.ufsm.br](mailto:njschuch@lacesm.ufsm.br)

**Home page:** <http://>

#### Repercussões dos trabalhos do grupo

O Grupo de Pesquisa - Ciências Atmosféricas - Ozônio x Radiação - Energias Renováveis, do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE-MCT, em Santa Maria, e Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CIE/INPE - MCT, Latitude: 29°26'24"S, Longitude: 53°48'38"W, Altitude 488m, em São Martinho da Serra, RS, colabora com pesquisadores do INPE (CEA e CPTEC), da USP (DM/ICB e IAG), do DBG/CB-UFRN, do LACESM-UFSM e internacionais: Japão (Universidades de Takushoku e Rikkyo) e EUA (NASA). Linhas de Pesquisas: CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS: OZÔNIO x RADIAÇÃO, ENERGIAS RENOVÁVEIS. Pesquisa: a composição, a estrutura, os processos físico-químicos e dinâmicos, o potencial energético renovável e o transporte de energia, com medidas in situ e fenômenos: Atmosféricos, Biosféricos e Genéticos. O Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico - PMOA, criado por Nelson Jorge Schuch em maio de 1992, executado em Convênio: CRS/CIE/INPE-MCT - LACESM/CT-UFSM, objetiva: a análise de sua concentração; o comportamento de sua "camada", a +/- 25 km no RS, suas correlações com: Radiação Ultravioleta (UV-A, UV-B); gases traçadores (NO<sub>2</sub> - SO<sub>2</sub> - CO<sub>2</sub>); aerossóis - queimadas; dados físicos e meteorológicos de sondagens troposféricas e estratosféricas; precipitação de partículas na Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS. Pesquisa e monitoramento da Radiação Ultravioleta - UV: UV-A (400-320 nm), UV-B (320 e 280 nm). Pesquisa da sensibilidade à Radiação UV: de seu Espectro de Ação; obtenção de Dose; do Índice Ultravioleta, I-UV; efeitos biológicos da Radiação UV-B em: nível celular, humanos, animais, vegetais, ecossistemas aquáticos. Pesquisa de Energias Renováveis com ênfase nas

*Relatório Final de Atividades, 2008*

fontes solar e eólica. Vice-Líderes: Damaris K. Pinheiro, Marcelo B. da Rosa, Enio B. Pereira.

| <b>Recursos humanos</b>  |  |
|--|--|
| <b>Pesquisadores</b>   | <b>Total: 17</b>                               |
| <a href="#">André Passaglia Schuch</a>   | <a href="#">Lucymara Fassarella Agnez Lima</a> |
| <a href="#">Augusta Maria Passaglia Schuch</a>   | <a href="#">Marcelo Barcellos da Rosa</a>      |
| <a href="#">Carlos Frederico Martins Menck</a>   | <a href="#">Marcelo Pizzuti Pes</a>            |
| <a href="#">Damaris Kirsch Pinheiro</a>  | <a href="#">Nelson Jesus Ferreira</a>          |
| <a href="#">Enio Bueno Pereira</a>   | <a href="#">Nelson Jorge Schuch</a>            |
| <a href="#">Ezequiel Echer</a>   | <a href="#">Neusa Maria Paes Leme</a>          |
| <a href="#">Fernanda de São Sabbas Tavares</a>   | <a href="#">Plínio Carlos Alvalá</a>           |
| <a href="#">Fernando Luís Guarnieri</a>  | <a href="#">Ricardo André Guarnieri</a>        |
| <a href="#">Fernando Ramos Martins</a>   |  |
| <b>Estudantes</b>  | <b>Total: 13</b>                               |
| <a href="#">Alexandre Ceretta Dalla Favera</a>   | <a href="#">Marcio Ceconi</a>                  |
| <a href="#">Ana Marcelli Soares</a>  | <a href="#">Nadiara Pereira</a>                |
| <a href="#">Caitano Luiz da Silva</a>  | <a href="#">Pabulo Henrique Rampelotto</a>     |
| <a href="#">Daniel Vinicius Fiorin</a>   | <a href="#">Rodrigo Brackmann</a>              |
| <a href="#">Germano Possani</a>  | <a href="#">Sarah Lemes Freitas</a>            |
| <a href="#">Gustavo Pereira Guerra</a>   | <a href="#">Simone Spiazzi Favarin</a>         |
| <a href="#">Luana Serafini dos Santos</a>  |  |
| <b>Técnicos</b>  | <b>Total: 4</b>                                |
| Anderson Colvero - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Eletrônica  |  |
| Eduardo Ceretta Dalla Favera - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Computação  |  |
| Koiti Ozaki - Especialização - Analista de Sistemas  |  |
| Vinicius Ceregati Costa - Graduação - \Outra Função  |  |
| <b>Linhas de pesquisa</b>  | <b>Total: 2</b>                                |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• <a href="#">Ciências Atmosféricas: Ozônio x Radiação</a></li><li>• <a href="#">Energias Renováveis</a></li></ul> |  |
| <b>Indicadores de recursos humanos do grupo</b>  |  |
| <b>Integrantes do grupo</b>  | <b>Total</b>                                   |
| Pesquisador(es)  | 17   |
| Estudante(s)   | 13   |
| Técnico(s)   | 4  |



## Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



### Linha de Pesquisa

## Energias Renováveis

**Linha de pesquisa**

**Energias Renováveis**

**Nome do grupo:** [Ciências Atmosféricas - Ozônio x Radiação - Energias Renováveis](#)

**Palavras-chave:** Energias Renováveis; Fontes de energia renováveis - Solar e Eólica; Setor Energético;

**Pesquisadores:**

- [Enio Bueno Pereira](#)
- [Fernando Ramos Martins](#)
- [Marcelo Pizzuti Pes](#)
- [Nelson Jorge Schuch](#)
- [Ricardo André Guarnieri](#)

**Estudantes:**

- [Alexandre Ceretta Dalla Favera](#)
- [Daniel Vinicius Fiorin](#)
- [Marcio Ceconi](#)
- [Rodrigo Brackmann](#)

**Árvore do conhecimento:**

- Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Setor Energético;
- Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Energias Renováveis;
- Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Fontes de energia renováveis - Solar e Eólica;

**Setores de aplicação:**

Produtos e serviços voltados para a defesa e proteção do meio ambiente, incluindo o desenvolvimento sustentado

**Objetivo:**

Tem como objetivo o estudo e o desenvolvimento de pesquisas com uma Estação de Referência (SMS) da Rede Nacional SONDA - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais, voltados ao setor energético, no Observatório Espacial do Sul, situado na região central do Rio Grande do Sul, na área de energias renováveis, com ênfase nas fontes solar e eólica. Vice-Líder: Enio B. Pereira



## **AGRADECIMENTOS**

O Bolsista agradece ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, do MCT, e a Coordenação do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela aprovação do Projeto de Pesquisa de Iniciação Científica.

Um obrigado especial ao Dr. Fernando Ramos Martins, Pesquisador da Divisão de Clima e Meio Ambiente DMA/CPTE/INPE – MCT, por estar sempre pronto para orientar e atender o Bolsista e esclarecer suas dúvidas.

Agradeço ao Dr. Nelson Jorge Schuch, mentor e criador do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais e do Laboratório de Recursos de Energias Renováveis, em Santa Maria, RS, por acreditar no potencial do Bolsista e dedicar muito de seu tempo para orientar e aconselhar o Bolsista, contribuindo de maneira significativa para o desenvolvimento do Bolsista tanto pessoalmente como profissionalmente.

Obrigado aos colegas Daniel Vinícius Fiorin, que tanto ajudou e incentivou o Bolsista, Rodrigo Brackmann e Alexandre Ceretta Dalla Favera pelo companheirismo e cooperação no LRER/CRS/CIE/INPE – MCT, que se tornaram verdadeiros amigos do Bolsista.

Por fim, gostaria de agradecer meus pais, Luiz Ceconi e Leila Maria Ceconi, e meu irmão, Marcelo Ceconi, que sempre estiveram presentes na vida do Bolsista, apoiando-o e dando forças para que seguisse em frente.



## RESUMO

O presente Projeto de Pesquisa, desenvolvido no Laboratório de Recursos de Energias Renováveis do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - LRER/CRS/CIE/INPE – MCT, tem como objetivo o estudo do potencial energético solar do Sul do Brasil, bem como a análise da influência da sazonalidade e variáveis climáticas sobre a incidência de radiação solar na Região Central do Rio Grande do Sul. O modelamento energético é uma importante ferramenta para a previsão dos recursos de energia solar útil para o desenvolvimento de projetos que visem o seu aproveitamento como fonte energética limpa e de caráter renovável. Quando a radiação solar atinge a atmosfera, sofre processos de absorção e espalhamento devido aos constituintes atmosféricos e aerossóis. A quantidade total de energia que atinge a superfície é denominada irradiação solar global. A irradiação solar global divide-se em duas componentes: a irradiação direta é a parcela que não sofre interação com a atmosfera, atingindo a superfície na mesma direção do disco solar; a irradiação solar difusa representa a parcela da irradiação global que interagiu com a atmosfera, e que atinge a superfície em todas as direções. O índice de nebulosidade  $Kt$  é definido como a razão entre a irradiação solar global na superfície do planeta e a irradiação solar que atinge o topo da atmosfera (TOA). O parâmetro  $K$  é a razão entre a irradiação solar difusa e a irradiação solar global na superfície e o parâmetro  $Kd$  é a razão entre a irradiação solar difusa na superfície e a irradiação no TOA. Dados de irradiação solar global e difusa coletados na Estação SONDA – SMS instalada no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CIE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra – RS, foram integrados ao longo do dia para o cálculo dos parâmetros  $K$ ,  $Kd$  e  $Kt$ . Desenvolveu-se um modelo empírico para a estimativa do parâmetro  $K$  a partir do índice de nebulosidade  $Kt$ , denominado Modelo SMS, adotando metodologia semelhante à empregada no desenvolvimento dos modelos CPR (Collares-Pereira and Rabl, 1979) e RC



(Ruth e Chant, 1976). Os desvios estatísticos MBE e RMSE dos modelos CPR, RC e SMS foram comparados para as diferentes estações do ano e para dias de céu claro. O modelo SMS apresentou os menores desvios estatísticos em todas as estações do ano, MBE (3%) e RMSE (20%), em especial em dias de céu claro, mostrando ser o que melhor representa as condições climatológicas da Região Central do Rio Grande do Sul. Verificou-se que a dependência sazonal dos desvios deve ser posteriormente relacionada a fatores meteorológicos e antropogênicos característicos da região. A comparação do modelo SMS com medidas de irradiação solar de outras estações SONDA e com as estimativas do Atlas Brasileiro de Energia Solar darão continuidade ao Projeto.



## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1</b> .....  | <b>16</b> |
| INTRODUÇÃO.....  | 16        |
| <b>CAPÍTULO 2</b> .....  | <b>18</b> |
| INFRA-ESTRUTURA UTILIZADA.....   | 18        |
| <b>2.1 – O Projeto SONDA</b> .....   | <b>18</b> |
| <b>2.2 – Estação de Referência instalada no Observatório Espacial do Sul OES/CRS/CIE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra – RS</b> ..... | <b>19</b> |
| <b>2.3 – Laboratório de Recursos de Energias Renováveis – LRER/CRS/CIE/INPE – MCT</b> .....  | <b>22</b> |
| <b>CAPÍTULO 3</b> .....  | <b>24</b> |
| A RADIAÇÃO SOLAR E A ATMOSFERA TERRESTRE .....   | 24        |
| <b>3.1 – O Sol</b> .....   | <b>24</b> |
| <b>3.2 – Descrição Quantitativa da Radiação Solar</b> .....  | <b>25</b> |
| <b>3.2.1 – Leis da Radiação para Corpos Negros</b> .....   | <b>27</b> |
| <b>3.3 – Interações da Radiação com a Atmosfera Terrestre</b> .....  | <b>29</b> |
| <b>3.4 – Efeito das Nuvens sobre a Radiação Solar</b> .....  | <b>32</b> |
| <b>3.5 – Efeito dos Aerossóis na Atmosfera</b> .....   | <b>34</b> |
| <b>CAPÍTULO 4</b> .....  | <b>36</b> |
| METODOLOGIA.....   | 36        |
| <b>4.1 – Medidas de Radiação Solar</b> .....   | <b>36</b> |
| <b>4.2 – Análise de Dados de Radiação Solar</b> .....  | <b>38</b> |
| <b>CAPÍTULO 5</b> .....  | <b>41</b> |
| ATIVIDADES OPERACIONAIS DESENVOLVIDAS .....  | 41        |
| <b>5.1 – Revisão Bibliográfica</b> .....   | <b>41</b> |
| <b>5.2 – Manutenção dos Equipamentos da Estação SONDA – SMS</b> .....  | <b>41</b> |
| <b>5.3 – Coleta, Qualificação e Análise dos Dados Coletados na Estação SONDA – SMS</b> .....   | <b>42</b> |
| <b>CAPÍTULO 6</b> .....  | <b>44</b> |
| RESULTADOS .....   | 44        |
| <b>CONCLUSÃO</b> .....   | <b>49</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....  | <b>50</b> |
| <b>ANEXO</b> .....   | <b>54</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 2.1</b> – Estações coletoras de dados do Projeto SONDA. Fonte: SONDA (2008).....   | 19 |
| <b>Figura 2.2</b> – Plataforma com os equipamentos da Estação SONDA – SMS junto ao Prédio 1 do Observatório Espacial do Sul OES/CRS/CIE/INPE – MCT. ....   | 21 |
| <b>Figura 2.3</b> – Torre anemométrica instalada no Observatório Espacial do Sul OES/CRS/CIE/INPE – MCT. ....  | 22 |
| <b>Figura 3.1</b> – Foto do Sol obtida pelo Observatório Heliosférico e Solar (SOHO).....  | 24 |
| <b>Figura 3.2</b> – Espectro eletromagnético com escala de frequência e comprimento de onda. Fonte: Halliday et al (1997). ....  | 27 |
| <b>Figura 3.3</b> – Espectro solar no topo da atmosfera, comparado com o espectro de um corpo negro a 6000 K e com o espectro solar a nível do mar. Fonte: Modificado de Robinson (1966). ....   | 30 |
| <b>Figura 3.4</b> – (a) Curvas de corpo negro para a radiação solar (6000 K) e radiação terrestre (255 K). (b) Espectro de absorção para toda a extensão vertical da atmosfera. (c) Espectro de absorção para a atmosfera acima de 11 km. (d) Espectros de absorção para vários gases atmosféricos entre o topo da atmosfera e a superfície da Terra. Fonte: Modificado de Peixoto e Oort (1992). .... | 31 |
| <b>Figura 4.1</b> – Foto dos dois equipamentos para coleta dos dados utilizados neste Projeto. (a) Piranômetro CM 21 ( <i>Kipp &amp; Zonen</i> ). (b) Piranômetro CM 22 ( <i>Kipp &amp; Zonen</i> ).....   | 37 |
| <b>Figura 6.1</b> – Dispersão dos valores de $K$ medidos no Observatório Espacial do Sul em comparação com os modelos empíricos CPR e RC.....  | 44 |
| <b>Figura 6.2</b> – Modelo SMS desenvolvido no Laboratório de Recursos de Energias Renováveis do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, em Santa Maria – RS, a partir de medidas realizadas no Observatório Espacial do Sul. ....   | 45 |
| <b>Figura 6.3</b> – Dispersão dos parâmetros de radiação solar durante o cálculo dos desvios estatísticos MBE e RMSE para os modelos empíricos CPR, RC e SMS. ....   | 46 |



## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 6.1</b> – Desvios estatísticos calculados para os modelos empíricos CPR, RC e SMS nas diferentes estações do ano. ....                  | 47 |
| <b>Tabela 6.2</b> – Desvios estatísticos calculados para os modelos CPR, RC e SMS em dias de céu claro. ....                                      | 48 |
| <b>Tabela 6.3</b> – Desvios estatísticos calculados para os modelos CPR e RC em dias de céu claro com os dados separados em estações do ano. .... | 48 |



## **SIGLAS E ABREVIATURAS**

CCD - Charge Coupled Device

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CT – ENERG - Fundo Setorial de Energia

CRS/CIE - Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais

DMA - Divisão de Meio-Ambiente

DU - Unidades Dobson

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos

*H* - Integral diária da radiação solar global

*H<sub>d</sub>* - Integral diária da radiação solar difusa

*I<sub>sc</sub>* - Constante Solar

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

*Jm<sup>-2</sup>* ou *J/m<sup>2</sup>* - Joules por metro quadrado

K - Escala de temperatura Kelvin

*K* - Razão entre a irradiação solar difusa e a irradiação solar global

*K<sub>d</sub>* - Razão entre a irradiação solar difusa e a TOA

*km* - Quilômetro

*K<sub>t</sub>* - Razão entre a irradiação solar global e a TOA

L - Radiância

LACESM - Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria

LRER - Laboratório de Recursos de Energias Renováveis

MBE - Mean Bias Error

MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NIP - Normal Incidence Pyrheliometer



NIR - Near Infra Red

OES - Observatório Espacial do Sul

PAR - Photosynthetically Active Radiation

PIR - Precision Infrared Radiometer

PMOA - Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico

RMSE - Root Mean Square Error

RS - Rio Grande do Sul

SMS - São Martinho da Serra

SONDA - Sistema de Organização de Dados Ambientais

TOA - Top Of Atmosphere (Topo da Atmosfera)

TSI - Total Sky Imager

UFES - Universidade Federal de Santa Maria

UV – Radiação Ultravioleta

W - Watt

$Wm^{-2}$  - Watts por metro quadrado

$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$  - Watts por metro quadrado por esterradiano

$\mu m$  - Micrometro

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Um bom planejamento do setor energético é determinante para o desenvolvimento de um país. No entanto, o contraste entre o aumento do consumo de energia decorrente principalmente do crescimento econômico dos países em desenvolvimento, e a escassez dos recursos energéticos mais utilizados atualmente, bem como a preocupação com a degradação ambiental gerada pela própria extração e aplicação desses recursos, têm incentivado a busca por fontes alternativas de energia, limpas e de caráter renovável, principalmente solar e eólica.

Com tudo isso, torna-se necessário o estudo da disponibilidade dos recursos energéticos renováveis para diferentes localidades e em diferentes épocas do ano, viabilizando investimentos na área e propiciando o desenvolvimento de novas formas de aplicação das mesmas com novas tecnologias.

Define-se por energia renovável toda forma cuja taxa de utilização é inferior à sua taxa de renovação. As energias renováveis podem ter origem gravitacional (energia das marés), terrestre (energia geotérmica) ou solar (energia eletromagnética emitida pelo Sol, energia eólica e energia armazenada na biomassa).

A energia solar constitui uma fonte gratuita e teoricamente inesgotável de energia. Essa forma de energia pode ser convertida em energia térmica, química ou elétrica. A conversão da energia solar em energia elétrica é realizada através da utilização de painéis fotovoltaicos, constituídos por células solares que produzem uma diferença de potencial elétrico pela ação dos fótons da radiação.

Estudar radiação solar incidente na superfície terrestre tem implicações diretas na meteorologia, especialmente nos estudos sobre o clima e suas mudanças. Informações oriundas do estudo da radiação solar são também importantes para atividades econômicas como a agropecuária (seleção dos produtos a serem cultivados, processo de irrigação,



períodos de plantio e colheita, etc.), a arquitetura (eficiência energética, conforto térmico e iluminação de ambientes), e diversos outros setores do conhecimento. (Guarnieri, 2006).

Informações provenientes da previsão de radiação solar incidente são de vital importância na operação de sistemas híbridos de geração de eletricidade, permitindo um gerenciamento mais eficiente das fontes de energia e o emprego otimizado de energia solar-fotovoltaica, em prol da economia de outros recursos. Além de permitir o conhecimento antecipado da disponibilidade de energia solar para geração fotovoltaica em locais isolados, as previsões de radiação solar permitem estimar a demanda por aquecimento resistivo complementar em sistemas solar-térmicos. (Guarnieri, 2006).

Visando implementar uma rede de infra-estrutura física e de recursos humanos destinada à coleta e qualificação de dados solarimétricos, eólicos e meteorológicos de alta qualidade e confiabilidade, o Projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais voltados ao setor de energia), coordenado e executado pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais CPTEC/INPE – MCT, mantém em operação estações de coleta de dados em diferentes sítios do Brasil, contemplando grande amplitude de fatores climatológicos e ambientais característicos de cada região.

O presente Projeto de Pesquisa visa fazer uma avaliação do potencial de energia solar do Sul do Brasil e verificar a influência de algumas variáveis climatológicas sobre a incidência de radiação solar na mesma região. Para isso, desenvolveu-se um modelo empírico para estimativa da irradiação solar difusa a partir do índice de nebulosidade da atmosfera. Modelos para estimativas de radiação solar são estudados visando uma maior confiabilidade aos bancos de dados, porém observa-se à influência da presença de aerossóis e materiais particulados na taxa de radiação solar que chega a superfície. As nuvens são o principal fator de modulação da irradiação solar incidente na superfície. Os aerossóis são a principal fonte de incertezas das estimativas de radiação solar que atinge a superfície em condições de céu claro.

## CAPÍTULO 2

### INFRA-ESTRUTURA UTILIZADA

#### 2.1 – O Projeto SONDA

O Projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais voltados ao setor energético) é coordenado e executado pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais CPTEC/INPE – MCT e financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), através do Fundo Setorial de Energia – CT-ENERG.

O objetivo do Projeto SONDA é a implantação de uma rede de infra-estrutura física e de recursos humanos destinada à coleta e qualificação de dados meteorológicos, eólicos e solarimétricos de superfície com grande confiabilidade, tornando possível o estudo dos potenciais de energia solar e eólica e a validação de modelos climáticos.

A rede SONDA possui estações de coleta de dados em diversos sítios do Brasil, conforme apresentado na Figura 2.1, contemplando grande amplitude de fatores climáticos e ambientais. As estações do Projeto SONDA são classificadas em Estações de Referência, Solares, Solares Avançadas e Eólicas.

As Estações de Referência são dotadas de um conjunto completo de equipamentos para monitoramento da radiação solar e do vento. Estas estações possuem sensores solares, meteorológicos e eólicos que coletam dados das seguintes variáveis:

a) Medidas Solares: radiação global horizontal, radiação difusa horizontal, radiação direta normal, radiação de onda longa descendente, radiação fotossinteticamente ativa e iluminância;

- b) Medidas Meteorológicas: temperatura, umidade relativa e pressão do ar atmosférico à superfície, e precipitação;
- c) Medidas Eólicas: velocidade e direção do vento nas alturas de 10, 25 e 50 metros a partir da superfície, e temperatura nas alturas de 25 e 50 metros.

As Estações Solares contam com sensores solares e meteorológicos, e as Estações Eólicas apenas com sensores eólicos.



**Figura 2.1** – Estações coletoras de dados do Projeto SONDA. Fonte: SONDA (2008)

## **2.2 – Estação de Referência instalada no Observatório Espacial do Sul OES/CRS/CIE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra – RS**

A Estação de Referência SONDA – SMS está instalada no Observatório Espacial do Sul OES/CRS/CIE/INPE – MCT (Latitude: 29°26'34"S, Longitude: 53°49'23"O), que

pertence ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais CRS/CIE/INPE – MCT, localizado em São Martinho da Serra – RS.

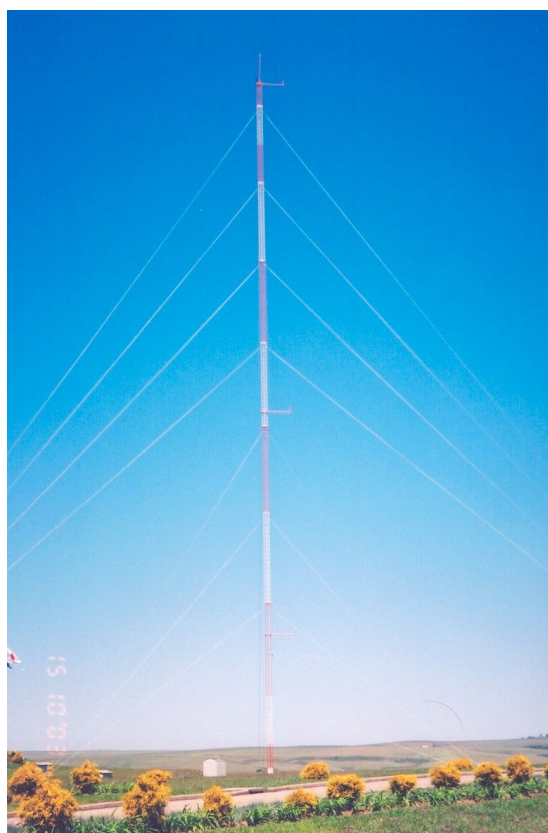
Os principais equipamentos instalados na Estação SONDA – SMS estão listados abaixo:

- Piranômetro CM 21 (*Kipp & Zonen*) – efetua medidas de radiação solar global horizontal na faixa espectral de 0,3  $\mu\text{m}$  a 2,8  $\mu\text{m}$ .
- Piranômetro CM 22 (*Kipp & Zonen*) – efetua medidas de radiação solar difusa horizontal na faixa espectral de 0,2  $\mu\text{m}$  a 3,6  $\mu\text{m}$ .
- Pireliômetro NIP (*Eppley Laboratory, Inc*) – efetua medidas de radiação solar direta num plano normal à incidência da radiação.
- Pirgeômetro PIR (*Eppley Laboratory, Inc*) – efetua medidas de radiação de onda longa, ou radiação terrestre, na faixa espectral de 3,5  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$ .
- LUX Lite (*Kipp & Zonen*) – efetua medidas de luz visível, expressando o resultado em iluminância.
- PAR Lite (*Kipp & Zonen*) – efetua medidas de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) sob ocorrência natural da luz do dia, na faixa de 400 nm a 700 nm.
- Two Axis Positioner – 2AP (*Kipp & Zonen*) – é um rastreador, ou *tracker*, responsável pelo posicionamento dos ocultadores do disco solar e dos equipamentos.
- Total Sky Imager TSI – 440 (*YES, Inc*) – é um imageador que capta imagens do céu através de uma câmera CCD apontada para o centro de um espelho convexo, que reflete a imagem do céu diretamente para as lentes da câmera.
- Sensor Temperatura e Umidade do Ar Model 41372 (*R. M. Young Company*) – efetua medidas de temperatura e umidade relativa do ar.
- Sensor Temperatura do Ar Model 41342 (*R. M. Young Company*) – efetua medidas de temperatura do ar através de um sensor de latina.
- Sensor de Pressão Barométrica Vaisala PTB101 – efetua medidas de pressão na faixa de 600 mb a 1060 mb, utilizando um sensor capacitivo.
- Anemômetro Modelo 05106 (*R. M. Young Company*) – mede a velocidade horizontal e a direção do vento de 0 até 60 m/s.



**Figura 2.2** – Plataforma com os equipamentos da Estação SONDA – SMS junto ao Prédio 1 do Observatório Espacial do Sul OES/CRS/CIE/INPE – MCT.

Esses equipamentos, juntamente com os equipamentos do Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico – PMOA, estão distribuídos em uma plataforma de 3 m de altura ao lado do Prédio Um do Observatório Espacial do Sul (Figura 2.2) e numa torre eólica (Figura 2.3), onde estão instalados três anemômetros a 10, 25 e 50 metros e medidores da temperatura do ar a 1 e 50 metros de altura.



**Figura 2.3** – Torre anemométrica instalada no Observatório Espacial do Sul OES/CRS/CIE/INPE – MCT.

Os dados coletados pelos equipamentos são armazenados em um Datalogger CR23X Micrologger (*Campbell Sci.*), situado no interior do Prédio 1, com uma resolução temporal de 1 a 10 minutos.

### **2.3 – Laboratório de Recursos de Energias Renováveis – LRER/CRS/CIE/INPE – MCT**

O Laboratório de Recursos de Energias Renováveis – LRER/CRS/CIE/INPE – MCT, pertencente ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais CRS/CIE/INPE – MCT,



criado pelo Dr. Nelson Jorge Schuch no ano de 2003, tem como principal função a avaliação do potencial de energia solar e eólica na Região Central do Rio Grande do Sul.

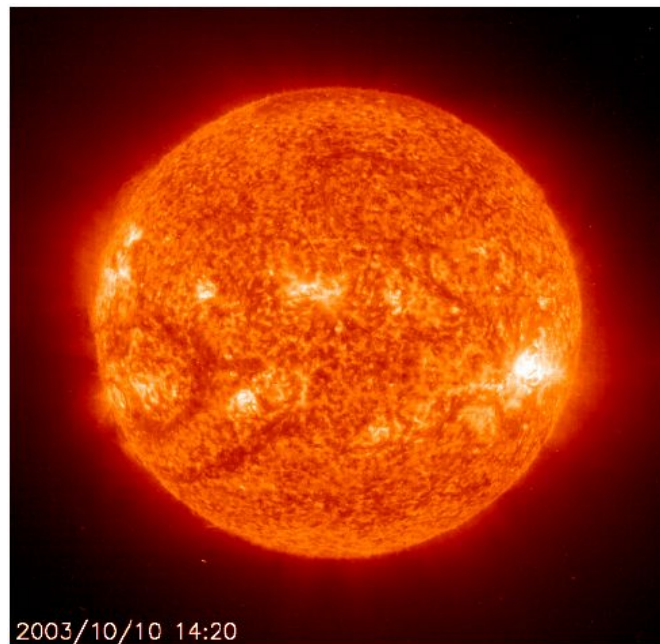
O LRER possui uma parceria com o Projeto SONDA para a formação de recursos humanos e o desenvolvimento de pesquisas na área de energias renováveis, gerando resultados que são apresentados em eventos científicos.

## CAPÍTULO 3

### A RADIAÇÃO SOLAR E A ATMOSFERA TERRESTRE

#### 3.1 – O Sol

O Sol é a estrela mais próxima da Terra. Seu diâmetro, de aproximadamente 1,4 milhões de quilômetros, o torna uma estrela de tamanho médio. Apesar disso, o Sol está entre os 5 % dos astros mais brilhantes da Via Láctea. (*Super Interessante*, março de 1995).



**Figura 3.1** – Foto do Sol obtida pelo Observatório Heliosférico e Solar (SOHO).

O Sol é um corpo de gás incandescente composto principalmente de hidrogênio. Sua estrutura física é complexa, mas pode ser considerada como composta das seguintes partes: o núcleo, a zona de convecção, a fotosfera, a camada de reversão, a cromosfera e a coroa. (Iqbal, 1983).



A região mais interna, o núcleo, é a parte mais densa e quente do Sol. A temperatura no núcleo é de cerca de 15 milhões de kelvins. O núcleo funciona como um reator nuclear, produzindo praticamente toda a energia emitida pelo Sol através de reações termonucleares.

A fotosfera é a camada visível do Sol, sendo responsável pela maior parte da radiação que chega à superfície da Terra. A fotosfera tem a aparência da superfície de um líquido em ebulição, apresentando bolhas ou grânulos. A temperatura nesta região é de cerca de 5000 K.

Em seqüência, encontram-se a camada de reversão e a cromosfera, que juntas constituem a atmosfera do Sol. A cromosfera, composta principalmente de hidrogênio e hélio, não é visível, mas pode ser observada durante eclipses, quando a Lua encobre a fotosfera.

A coroa é a porção mais externa do Sol, composta de gases extremamente rarefeitos (vento solar). A temperatura da coroa solar é da ordem de  $10^6$  K.

### **3.2 – Descrição Quantitativa da Radiação Solar**

A transferência radiativa é o mecanismo pelo qual o sistema Terra-Atmosfera realiza praticamente toda a troca de energia com o resto do Universo (Wallace e Hobbs, 1977). A energia proveniente do Sol é emitida na forma de radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda do espectro. Quando parte dessa energia é interceptada pela Terra, os diferentes comprimentos de onda da radiação interagem de forma diferente com os constituintes atmosféricos, sofrendo processos de absorção e espalhamento.

Define-se por fluxo radiante a quantidade de energia transportada por unidade de tempo, o que representa a intensidade de radiação. O fluxo radiante é expresso nas unidades de Joules por segundo, ou Watts ( $W$ ). A densidade de fluxo radiante é definida como sendo o fluxo radiante por unidade de área, e é expressa em unidades de Watts por metro quadrado ( $Wm^{-2}$ ). A densidade de fluxo radiante é também denominada emitância (quando

se refere ao fluxo que emerge de uma área) ou irradiância (quando se refere ao fluxo que incide em uma área).

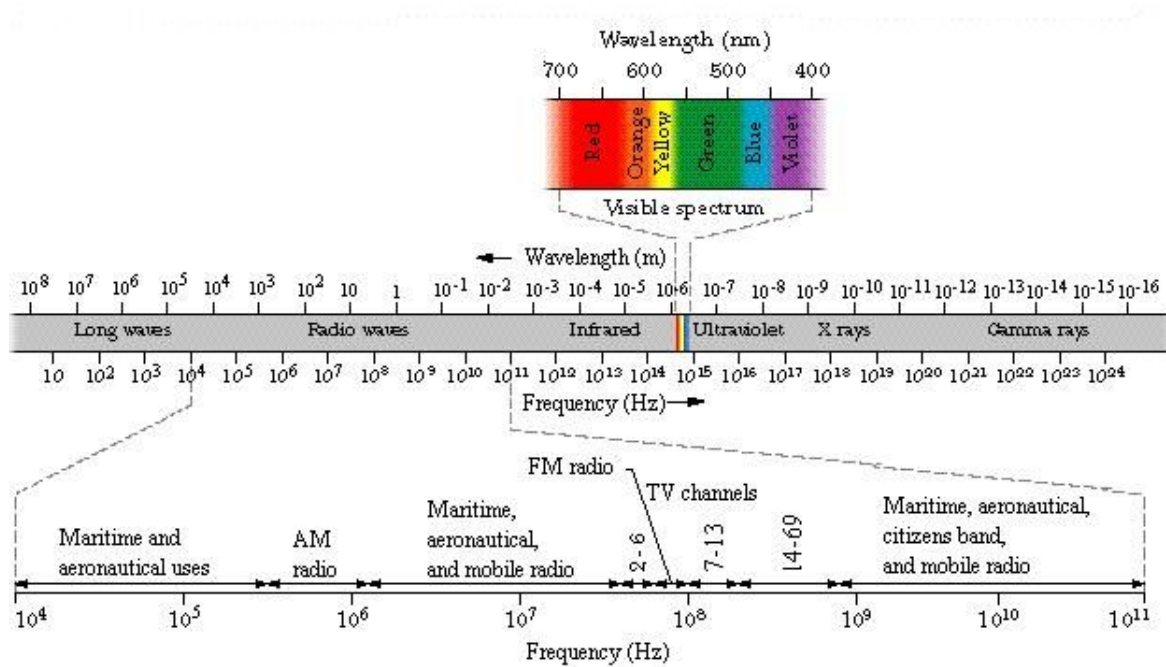
A irradiância incidente sobre um elemento de área superficial pode consistir de contribuições oriundas de uma infinidade de diferentes direções, sendo necessário, às vezes, identificar a parte da irradiância que provém de direções dentro de um determinado arco infinitesimal de ângulo sólido  $d\Omega$ . Define-se, assim, a radiância ( $L$ ), que é a irradiância por unidade de ângulo sólido, expressa em watts por metro quadrado por esterradiano ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ ) (Wallace e Hobbs, 1977).

A quantidade total média de energia radiante que atinge a órbita da Terra num plano perpendicular aos raios solares no topo da atmosfera é denominada constante solar ( $I_{sc}$ ). Seu valor é de aproximadamente  $1367 Wm^{-2}$ . Apesar do nome, a constante solar é, na verdade, variável. A constante solar varia ligeiramente devido à variação da distância Terra-Sol durante o ano e com o ciclo solar, cuja duração é de aproximadamente 11 anos, onde há alternância entre um período de máximo número de manchas solares em sua superfície e um período de mínima quantidade.

O Sol emite um espectro contínuo de radiação eletromagnética, com uma distribuição espectral similar a da radiação de um corpo negro a 6000 K, seguindo aproximadamente a lei de Plank para a emissão de radiação (Coulson, 1975; Brasseur and Solomon, 1986; Lenoble, 1993). A radiação solar cobre todo o espectro eletromagnético, mas a porção mais significativa do espectro, associada com transferência de energia radiativa no sistema climático, é compreendida entre o ultravioleta e o infravermelho próximo (Peixoto e Oort, 1992).

Uma vez que as temperaturas da atmosfera e dos materiais da superfície terrestre são bastante menores quando comparadas com a elevada temperatura do Sol, suas emissões de radiação ocorrem em comprimentos de onda maiores, entre 4 e 100  $\mu m$  (Coulson, 1975). O pico das emissões da superfície terrestre para a atmosfera ou da Terra como um todo para o espaço, ocorre entre 10 e 12  $\mu m$ . Assim, costuma-se dividir o espectro eletromagnético em aproximadamente 4  $\mu m$  (Coulson, 1975). A radiação menor que 4  $\mu m$  é chamada

radiação de onda curta e a radiação maior que  $4 \mu\text{m}$  é chamada radiação de onda longa. A radiação de onda longa é a emitida pela Terra para a atmosfera (Iqbal, 1983), embora se utilize também o termo radiação atmosférica.



**Figura 3.2** – Espectro eletromagnético com escala de frequência e comprimento de onda.

Fonte: Halliday et al (1997).

### 3.2.1 – Leis da Radiação para Corpos Negros

Conforme mencionado anteriormente, o Sol emite um espectro contínuo de radiação eletromagnética com uma distribuição espectral semelhante a da radiação de um corpo negro a 6000 K (5777 K, segundo alguns autores). Desta forma, torna-se importante o conhecimento destas leis.

Um corpo negro é um corpo hipotético que emite ou absorve radiação em todos os comprimentos de onda de tal forma que toda a radiação incidente é absorvida e que é emitida a máxima radiação possível em uma dada temperatura do corpo para todos os comprimentos de onda do espectro e em todas as direções. (Grimm, *Meteorologia Básica – Notas de Aula*).

De acordo com a lei de Planck, um corpo a uma temperatura acima do zero absoluto emite radiação em todos os comprimentos do espectro e em todas as direções, sendo a intensidade da radiação diferente para cada comprimento de onda e variável com a temperatura. A irradiância monocromática emitida por um corpo negro é dada pela equação (3.1), conforme determinado por Planck.

$$E_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\left(e^{hc/\lambda kT} - 1\right)} \quad (3.1)$$

Onde  $h$  é a constante de Planck ( $h = 6,63 \times 10^{-24} \text{ J/K}$ );  $c$  é a velocidade da luz no vácuo ( $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ );  $k$  é a constante de Boltzmann ( $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ );  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação e  $T$  é a temperatura do corpo.

Integrando a lei de Planck sobre todos os comprimentos de onda, obtém-se a Lei de Stefan-Boltzmann, dada na equação (3.2), da qual se pode perceber que corpos com maior temperatura emitem mais energia.

$$E = \sigma T^4 \quad (3.2)$$

Onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ).

Partindo da lei de Planck, pode-se demonstrar a lei de Wien, dada pela equação (3.3), que afirma que é possível estimar a temperatura de uma fonte a partir do conhecimento do comprimento de onda da máxima emissão para um corpo negro ( $\lambda_m$ ).

$$\lambda_m = \frac{2897}{T} \quad (3.3)$$

Da lei de Wien, é possível estimar a temperatura de corpo negro do Sol. A máxima emissão solar ocorre em aproximadamente  $0,5 \mu\text{m}$ , o que permite afirmar que a temperatura de corpo negro do Sol é de cerca de  $5777 \text{ K}$ .

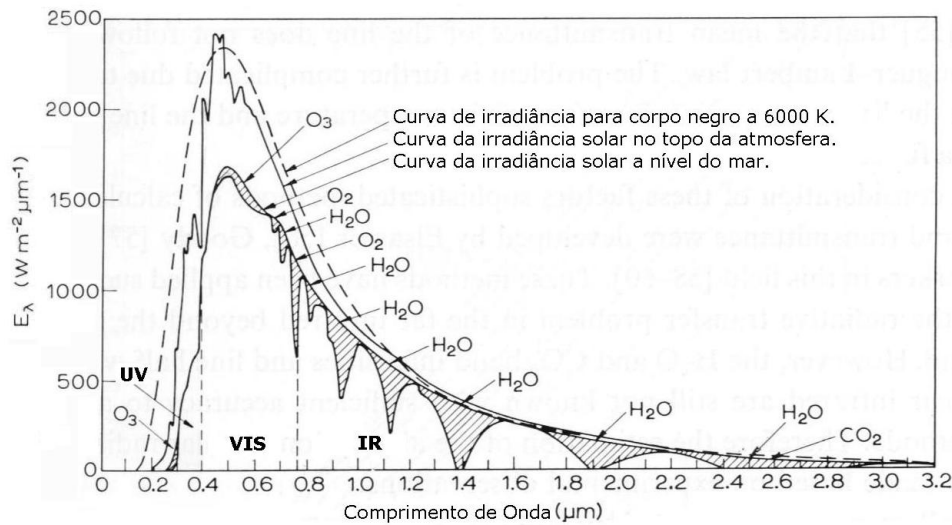
### **3.3 – Interações da Radiação com a Atmosfera Terrestre**

A radiação solar, após atingir o topo da atmosfera e penetrá-la, sofre processos de absorção e o espalhamento (Liou, 1980). A Figura 3.1 mostra o espectro de radiação solar que atinge o TOA e o espectro de radiação solar que atinge a superfície da Terra, em termos de irradiância. A área entre as curvas representa a redução sofrida pela radiação solar incidente, durante sua passagem através da atmosfera. Essa redução é dividida em duas partes: a área não sombreada representa o espalhamento sofrido pela radiação e a área sombreada a absorção pelas moléculas do ar, primariamente por  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$  e  $\text{O}_2$  (Robinson, 1966; Wallace e Hobbs, 1977; Liou, 1980). Para comparação é apresentada uma curva de emissão de um corpo negro a  $6000 \text{ K}$  (linha tracejada).

Devido à absorção ineficiente em caso de ausência de nuvens, a atmosfera é considerada praticamente transparente à radiação solar, especialmente nos comprimentos de onda do visível.

Dependendo do tipo de transição ou interação, a absorção da radiação pode ocorrer num continuum de comprimentos de onda, ou em comprimentos de onda discretos. Os gases atmosféricos absorvem diferentemente os comprimentos de onda da radiação solar e da radiação terrestre como se observa na Figura 3.4.

Segundo Liou (1980), o espalhamento ocorre em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Espalhamento é um processo físico no qual uma partícula no caminho da onda eletromagnética continuamente remove energia da onda incidente e dispersa essa energia em todas as direções. Uma vez que parte da energia solar é espalhada para trás e para os lados, a quantidade de energia que atinge a superfície da Terra, após atravessar a atmosfera, é atenuada (Peixoto e Oort, 1992).



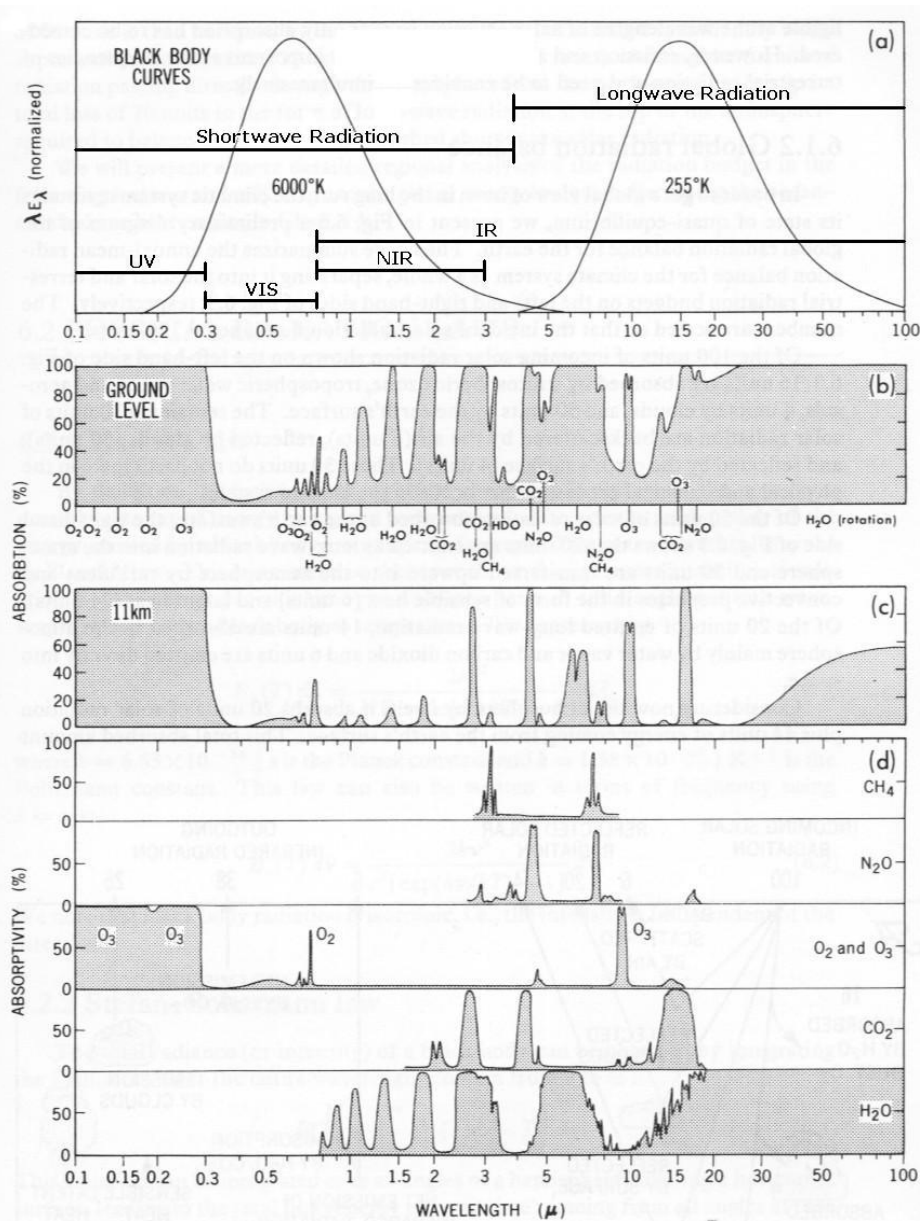
**Figura 3.3** – Espectro solar no topo da atmosfera, comparado com o espectro de um corpo negro a 6000 K e com o espectro solar a nível do mar. Fonte: Modificado de Robinson (1966).

O processo de espalhamento da radiação solar depende, basicamente, do tamanho das partículas espalhadoras. No caso de um comprimento de onda bem maior que o diâmetro da partícula espalhadora, tem-se um regime de espalhamento denominado Espalhamento Rayleigh. Quando o raio das partículas espalhadoras se aproxima do comprimento de onda da radiação ou o excede em até oito vezes, tem-se o Espalhamento Mie.

O regime de Espalhamento Rayleigh afirma que a irradiância monocromática espalhada é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda da radiação incidente. Esse regime aplica-se, por exemplo, no caso do espalhamento da luz visível pelos gases constituintes da Atmosfera.

No regime Mie a dispersão é menos seletiva ao comprimento de onda (van de Hulst, 1957) e ocorre predominância do pró-espalhamento sobre o retroespalhamento. Ocorre, neste regime, o espalhamento da luz do Sol por aerossóis, neblina, fumaça, smog e poeira (Wallace e Hobbs, 1977; Kidder e Vonder Haar, 1995). Aerossóis são definidos como

suspensões de partículas líquidas ou sólidas no ar (excluindo-se as gotículas de nuvem e precipitação).



**Figura 3.4** – (a) Curvas de corpo negro para a radiação solar (6000 K) e radiação terrestre (255 K). (b) Espectro de absorção para toda a extensão vertical da atmosfera. (c) Espectro de absorção para a atmosfera acima de 11 km. (d) Espectros de absorção para vários gases

atmosféricos entre o topo da atmosfera e a superfície da Terra. Fonte: Modificado de Peixoto e Oort (1992).

O espalhamento da radiação visível pelas gotículas de nuvens, gotas de chuva e partículas de gelo, é descrito pelos princípios da ótica geométrica. A ótica geométrica e o espalhamento Rayleigh são tomados como casos-limite da teoria de espalhamento Mie, considerada mais geral.

Após atravessar uma camada de agentes espalhadores, como a atmosfera, a radiação de onda curta que atinge uma superfície pode ser subdividida entre uma componente proveniente da própria direção da fonte e uma componente que engloba a radiação vinda de todas as demais direções devido ao espalhamento. Segundo Plana-Fattori e Ceballos (2005) podem-se definir as seguintes irradiâncias:

- (a) Irradiância difusa: Consiste na irradiância descendente numa superfície horizontal, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens, etc.).
- (b) Irradiância normal: Consiste na irradiância direta numa superfície normal à incidência do feixe direto, dada pela irradiância solar incidente no TOA (constante solar) que ainda resta no nível de observação, somados os efeitos de pró-espalhamento atmosférico.
- (c) Irradiância direta: Consiste no produto entre a irradiância normal e o cosseno do ângulo zenital solar.
- (d) Irradiância global: Consiste na irradiância descendente numa superfície horizontal, constituída pelo somatório das irradiâncias direta e difusa.

### **3.4 – Efeito das Nuvens sobre a Radiação Solar**

Uma importante característica da Terra é sua cobertura de nuvens. A todo instante, cerca de 50% da superfície da Terra é coberta por nuvens que ocorrem de altitudes variáveis desde a superfície até aproximadamente 20 km (Wallace e Hobbs, 1977). As nuvens possuem um papel importante para o balanço radioativo terrestre, assim como para



o clima como um todo, afetando o albedo, a absorvidade e a transmissividade da radiação incidente (Peixoto e Oort, 1992).

Atingida a supersaturação da atmosfera, a água condensa-se na superfície de núcleos de condensação formando gotículas que compõe a nuvem (Wallace e Hobbs, 1977). Os aerossóis atuam como núcleos de condensação, sendo que suas características - tamanho, forma e solubilidade - influem diretamente na supersaturação necessária para que ocorra a condensação e formação da gotícula.

Dentro da nuvem, o espalhamento múltiplo é a forma de atenuação predominante da radiação solar. As nuvens são fortes absorvedores de radiação terrestre (onda longa), com absorção ocorrendo em gotas, cristais de gelo, e, em menor extensão, no vapor d'água. (Peixoto e Oort, 1992).

Considerando as propriedades óticas – elevado albedo e espalhamento eficiente – pode-se considerar as nuvens como o principal fator modulador da radiação solar que chega à superfície. O espalhamento da radiação solar por nuvens depende da espessura ótica, da distribuição de tamanhos das gotículas, do conteúdo e do estado físico da água (Paltridge e Platt, 1976), características estas que variam de acordo com o tipo de nuvem.

As nuvens são normalmente classificadas de acordo com características físicas como altitude e forma. A base para a classificação internacional de nuvens é o sistema proposto em 1803 por Howard (Luke Howard, 1772-1864) que utilizou quatro nomes latinos: cumulus (uma pilha ou monte) para nuvens convectivas; stratus (uma camada) para nuvens em camadas; cirrus (um filamento de cabelo) para nuvens fibrosas; e nimbus para nuvens de chuva. Além dos tipos básicos, Howard utilizava combinações como cirrocumulus e cirrostratus. Na classificação internacional, nimbus, ou nimbo, é usado somente em nomes compostos para indicar nuvens de precipitação (nimbostratus e cumulonimbus), e utiliza-se o prefixo alto para indicar nuvens de níveis médios (Wallace e Hobbs, 1977).

### **3.5 – Efeito dos Aerossóis na Atmosfera**

Os aerossóis exercem importante influência na atmosfera. As interações da radiação solar entre diferentes camadas de aerossóis podem modificar o balanço energético na atmosfera, espalhando e absorvendo radiação solar. Desta forma, a superfície terrestre é resfriada, devido a uma redução do total de radiação solar incidente. Simultaneamente os aerossóis acabam por aquecer camadas da mais baixa atmosfera onde estão localizados (Keil and Haywood, 2003; Pace et al., 2006).

A quantidade de radiação solar removida pelos aerossóis é geralmente referida como forçante radioativa dos aerossóis, definida como a diferença entre os fluxos efetivos de radiação solar que atinge a superfície com e sem a camada de aerossóis. (Martins et al, 2005). Christopher et al. (1996), encontrou um efeito de resfriamento efetivo na atmosfera causado por camadas de aerossóis sobre as regiões Amazônica e Cerrado no Brasil.

As partículas finas de aerossóis exercem uma grande influência na atenuação da irradiação solar em comprimentos de onda mais curtos (Reid et al., 1998). Elas são especialmente seletivas ao espalhamento, sendo responsável por 82% do espalhamento na atmosfera (Molnàr and Mészáros, 2001).

Por outro lado, uma alta percentagem de partículas grossas absorve menos irradiação em menores comprimentos de onda, absorvendo mais em comprimentos de onda maiores. (Badarinath et al, 2006). A atenuação da irradiação na atmosfera decresce continuamente com o comprimento de onda (Iqbal, 1983), desta forma, no espectro do infravermelho próximo, as diferenças nos valores de irradiância devido às diferenças da concentrações de aerossóis passam a ser pequenos.

Uma alta carga de aerossóis pode, de maneira benéfica, reduzir em até 50% o fluxo de radiação ultravioleta na superfície (Liu et al., 1991; Kylling et al., 1998). Em uma escala regional, mesmo um decréscimo de 50 DU na quantidade de ozônio em combinação com um aumento na carga de aerossóis pode conduzir a uma diminuição da radiação UV. (Balis et al., 2002; Papayannis et al., 1998).

Além dos efeitos radioativos, os aerossóis atuam como núcleo de condensação de nuvens modificando as suas propriedades microfísicas. A densidade do número de aerossóis, composição química, e distribuição de tamanho podem influenciar no albedo e no tempo de vida das nuvens assim como na taxa e quantidade de precipitação. (Abel et al., 2005; Lohmann and Feichter, 2005). Os aerossóis marinhos são cruciais na formação de nuvens na camada limite e são também importantes para a união radiativa entre oceano e atmosfera.

Os aerossóis podem afetar o clima não só em caráter regional, mas também em escalas globais. Através de interações diretas, atuando como centros espalhadores ou absorvedores de luz solar (Jacobson, 2001) ou indiretamente atuando sobre a formação e o ciclo de vida de nuvens, e assim modificando ciclos hidrológicos (Kaufman, 1995). Os aerossóis podem ser transportados por correntes de ar favorecendo na interferência da química e na física da atmosfera não somente em escala local, mas potencialmente em escalas regionais e até globais (Freitas et al., 2005).

O IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) estima que o efeito direto global dos aerossóis no balanço radiativo situa-se entre 0,2 a 1,5 W/m<sup>2</sup> no sentido de favorecer o resfriamento. Esse efeito é diretamente comparável ao efeito dos chamados gases estufa antropogênicos, tais como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC. Porém, devida a distribuição espacial não homogênea dos aerossóis no globo terrestre, os efeitos locais podem ser centenas de vezes maiores em locais de elevadas concentrações de aerossóis (e.g. Procópio et al., 2004).

## CAPÍTULO 4

### METODOLOGIA

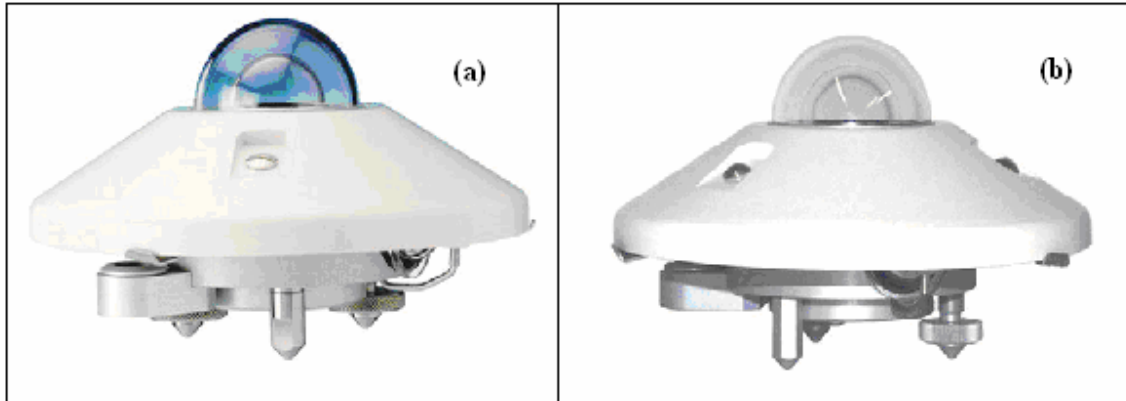
O estudo da disponibilidade de radiação solar pode ser feito através do uso de modelos computacionais baseados em dados de satélites, ou por meio de medidas em superfície. Modelos computacionais são utilizados para prover estimativas da distribuição espacial da radiação incidente. Estudos com estes modelos mostram que o Rio Grande do Sul, apesar de sua localização no extremo sul do Brasil, apresenta um grande potencial para aproveitamento da energia solar como fonte de energia renovável (Pereira et al., 2006).

Quando o conhecimento de valores locais exige maior precisão, é necessário o uso de dados medidos em superfície para que tenhamos uma maneira de validar modelos computacionais. Grande parte das medidas de radiação em superfície contempla apenas a radiação solar global. Contudo, o conhecimento da componente difusa encontra aplicações em diversos ramos da atividade humana, dentre as quais aquelas mencionadas anteriormente.

#### 4.1 – Medidas de Radiação Solar

Os dados utilizados neste Projeto de Pesquisa foram coletados na Estação SONDA – SMS instalada no Observatório Espacial do Sul OES/CRS/CIE/INPE – MCT, na cidade de São Martinho da Serra – RS.

A Estação é dotada de um Piranômetro CM 21 (*Kipp & Zonen*) para medidas de irradiância solar global na faixa espectral de 0,3  $\mu\text{m}$  a 2,8  $\mu\text{m}$ . Um Piranômetro CM 22 (*Kipp & Zonen*) realiza medidas de irradiância solar difusa na faixa de 0,2  $\mu\text{m}$  a 3,6  $\mu\text{m}$ . Um Pireliômetro NIP (*Eppley Laboratory, Inc*) realiza medidas de irradiância solar direta em um plano normal à incidência da radiação, tratando-se, portanto, da irradiância direta normal, e um Pirgeômetro PIR (*Eppley Laboratory, Inc*) efetua medidas da radiação solar de onda longa, ou radiação terrestre, numa faixa espectral de 3,5  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4.1** – Foto dos dois equipamentos para coleta dos dados utilizados neste Projeto. (a) Piranômetro CM 21 (*Kipp & Zonen*). (b) Piranômetro CM 22 (*Kipp & Zonen*).

O Piranômetro CM22, o Pireliômetro NIP e o Pirgeômetro PIR operam em conjunto com um sistema de rastreamento do Sol para o posicionamento dos equipamentos, o “*tracker*” 2AP – Two Axis Positioner (*Kipp & Zonen*), ou Posicionador de Dois Eixos, uma vez que é necessário que o Pireliômetro fique apontado para o Sol, e que o Piranômetro CM22 e o Pirgeômetro tenham seus domos sombreados por ocultadores do disco solar.

Além desses equipamentos, a Estação SONDA – SMS conta com um luxímetro LUX Lite (*Kipp & Zonen*) para medidas de iluminância na faixa espectral do visível, com um radiômetro PAR Lite (*Kipp & Zonen*) para medidas da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) sob ocorrência normal da luz do dia e com um imageador Total Sky Imager TSI – 440 (*YES, Inc*), que capta imagens do céu a cada 15 minutos através de uma câmera CCD apontada para o centro de um espelho convexo.

Os equipamentos efetuam medidas a cada segundo e armazenam a média para 60 segundos, totalizando 1440 medidas diárias, que integradas durante o período de um dia, resultam na quantidade total de energia radiante que atinge a superfície, expressa em  $Jm^{-2}$

(Joules por metro quadrado). As integrais da irradiância solar global e difusa serão representadas por  $H$  e  $H_d$ , respectivamente.

#### 4.2 – Análise de Dados de Radiação Solar

A irradiação solar total que atinge o topo da atmosfera (TOA) durante um dia, aqui referenciada por  $H_0$ , pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$H_0 = \frac{I_{sc}}{\pi} \left( \frac{d_m}{d} \right)^2 [h_0 \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}(h_0)] \quad (4.1)$$

Onde  $I_{sc}$  é a constante solar, cujo valor é de aproximadamente  $1368 \text{ Wm}^{-2}$ ;  $(d_m / d)^2$  é o fator de correção de excentricidade, sendo  $d_m$  a distância média entre a Terra e o Sol e  $d$  representa a distância para o dia específico;  $h_0$  representa o ângulo horário ao nascer e pôr do Sol;  $\varphi$  representa a latitude do sítio em questão; e  $\delta$  é a declinação solar, definida como o ângulo entre o plano da órbita da Terra em torno do Sol e o plano da linha do Equador.

Segundo Liu e Jordan (1960), pode-se definir a limpidez da atmosfera, no que se refere à presença de material particulado que atenua a radiação solar, através do índice de nebulosidade  $Kt$ , dado pela equação (4.2), que representa a relação entre a quantidade de radiação solar que atinge a superfície (irradiação global) e a irradiação solar incidente no topo da atmosfera (TOA).

$$Kt = \frac{H}{H_0} \quad (4.2)$$

Analisando o índice de nebulosidade  $Kt$ , percebe-se que ele varia de 0 a 1, sendo estes extremos teoricamente representativos de uma atmosfera totalmente transparente à radiação solar ( $Kt = 1$ ) e totalmente opaca ( $Kt = 0$ ). É usual a definição de que para

valores de  $Kt < 0,3$  o dia está completamente nublado, para  $0,3 < Kt < 0,7$  o dia está parcialmente nublado, e para valores de  $Kt > 0,7$  o dia está com céu claro.

Além do índice de nebulosidade  $Kt$ , são definidos os parâmetros  $K$  e  $Kd$ , que representam, respectivamente, a razão entre a irradiação solar difusa e a irradiação solar global, e a razão entre a irradiação difusa e a TOA, conforme apresentado em (4.3).

$$K = \frac{H_d}{H} \quad Kd = \frac{H_d}{H_0} \quad (4.3)$$

Utilizando as equações contidas em (4.2) e (4.3), Ruth e Chant (1976), desenvolveram um modelo empírico para estimativa de  $K$  a partir de  $Kt$ , aqui denotado por  $K_T$  e apresentado na equação (4.4), analisando dados coletados em estações solarimétricas do Canadá. Colleres – Pereira e Rabl (1979) desenvolveram um modelo empírico semelhante, porém com dados coletados em cinco estações solarimétricas dos Estados Unidos, denotado por CPR e apresentado em (4.5).

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.98 & (K_T \leq 0.1) \\ 0.910 + 1.154K_T - 4.936K_T^2 + 2.848K_T^3 & (0.1 \leq K_T \leq 0.7) \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.99 & (K_T \leq 0.17) \\ 1.188 - 2.272K_T + 9.473K_T^2 - 21.856K_T^3 + 14.648K_T^4 & (0.17 \leq K_T \leq 0.8) \end{cases} \quad (4.5)$$

Para a validação de modelos numéricos, faz-se necessário o uso de ferramentas estatísticas para a análise das discrepâncias apresentadas entre as estimativas fornecidas pelos modelos e as medidas realizadas em superfície. Neste Projeto, foram calculados os

desvios estatísticos MBE (*Mean Bias Error*) e RMSE (*Root Mean Square Error*), definidos em (4.6).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{N} \quad RMSE = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{N} \right\}^{1/2} \quad (4.6)$$

Onde  $x_i$  e  $y_i$  representam, respectivamente, os valores medidos e os valores estimados pelos modelos, e  $N$  representa o número total de medidas empregadas na análise.

Os desvios estatísticos MBE e RMSE são divididos pelo valor médio das medidas e se expressa, então, o resultado em percentagem.



## CAPÍTULO 5

### ATIVIDADES OPERACIONAIS DESENVOLVIDAS

Durante o período de vigência deste Projeto de Iniciação Científica, o Bolsista realizou as atividades descritas nos tópicos seguintes.

#### **5.1 – Revisão Bibliográfica**

O Bolsista realizou a leitura de diferentes referências bibliográficas com o objetivo de introduzi-lo no tema de seu Projeto de Iniciação Científica, dentre as quais se destacando a temática de energias renováveis, principalmente no tocante à energia solar, radiação solar, física de radiações e transferência radioativa, conforme o que se apresenta no item Referências Bibliográficas deste relatório.

#### **5.2 – Manutenção dos Equipamentos da Estação SONDA – SMS**

Semanalmente, são realizadas visitas à Estação SONDA – SMS instalada no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CIE/INPE – MCT, com o intuito de fazer as manutenções necessárias à conservação física dos equipamentos e manter a confiabilidade dos dados coletados.

As principais atividades desenvolvidas são a verificação do nível do *tracker* 2AP, a limpeza dos domos dos radiômetros e da câmera do Imageador e o polimento do espelho convexo do Imageador, e a troca da sílica gel dos equipamentos.

A verificação do nível do *tracker* é realizada observando-se a localização de um feixe de radiação solar incidente em uma marca no equipamento. Isso é necessário uma vez que o *tracker* é responsável pelo posicionamento do Pireliômetro na direção do Sol e pelo posicionamento dos ocultadores do disco solar sobre os domos do Piranômetro CM22 e do Pirgeômetro.

A limpeza dos domos dos radiômetros e da lente da câmera do Imageador é realizada com uma flâmula embebida em álcool isopropílico. A presença de sujeira sobre os medidores pode ocasionar medições inferiores às reais, já que a sujeira absorve parte da radiação incidente.

O espelho convexo do Imageador necessita de um tratamento adicional, limpa-se o espelho com flâmula, líquido específico para limpeza de vidros e cera automotiva para polimento, uma vez que uma sujeira pode ser confundida com uma nuvem.

Os medidores de radiação são sensíveis à umidade, o que faz com que seja necessária a conservação da baixa umidade no seu interior, que é feito pela presença de um dissecador com sílica gel, devendo ser trocada semanalmente.

### **5.3 – Coleta, Qualificação e Análise dos Dados Coletados na Estação SONDA – SMS**

Os dados coletados pelos equipamentos são armazenados em um Datalogger CR23X Micrologger (*Campbell Sci.*), instalado no interior do Prédio Um do Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CIE/INPE – MCT. Os dados solares são armazenados a cada segundo, sendo a saída dos dados formada por valores médios, máximo, mínimo e desvio padrão. Os dados eólicos são armazenados com uma resolução temporal de 10 minutos.

Os dados armazenados no Datalogger são acessados via internet e baixados para o computador “*Solar*” do Laboratório de Recursos de Energias Renováveis - LRER/CRS/CIE/INPE – MCT, localizado no Prédio Sede do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE – MCT, no campus José Mariano da Rocha Filho da UFSM. As imagens captadas pelo Imageador são armazenadas no computador existente no interior do Prédio Um do OES/CRS/CIE/INPE – MCT, e devem ser copiadas para dispositivos USB de memória Flash ou CDs para sua transferência para o banco de dados do LRER/CRS/CIE/INPE – MCT.

Os valores médios das medidas de radiação solar são separados por dia, mês e ano em planilhas eletrônicas. Para cada dia, as medidas são plotadas em softwares gráficos e integradas, gerando os valores integrais diários, que são salvos em planilhas mensais.



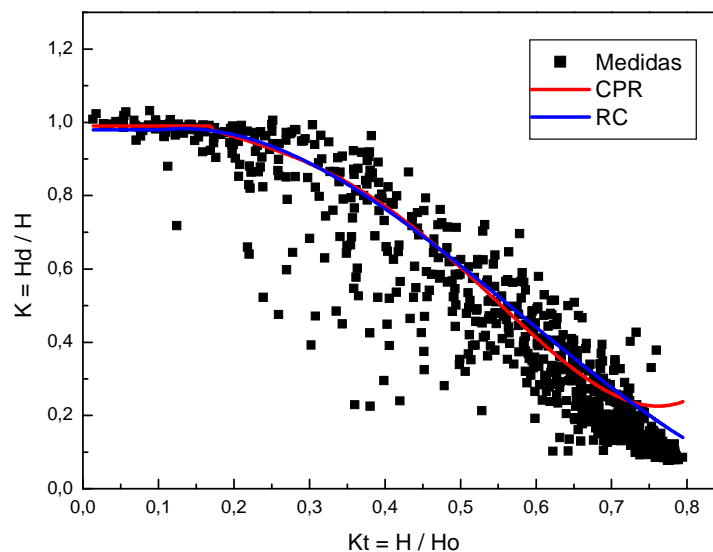
Um pré-controle dos dados é realizado pela comparação das medidas realizadas por cada equipamento verificando se apresentam valores condizentes entre si para que se tenha maior confiabilidade nas medidas.

## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS

Utilizando medidas de irradiação compreendidas no período de Agosto de 2004 (início de operação da Estação SONDA – SMS) a dezembro de 2007, foram calculados os valores dos parâmetros  $Kt$ ,  $K$  e  $Kd$  para cada dia, excetuando-se alguns períodos que apresentaram falhas nos dados. Em seguida, esses valores calculados foram comparados com os modelos empíricos RC e CPR.

Os valores calculados para o parâmetro  $K$  em função de  $Kt$  são apresentados no gráfico da Figura 6.1. Conjuntamente, são apresentadas as curvas dos modelos empíricos RC e CPR para comparação.



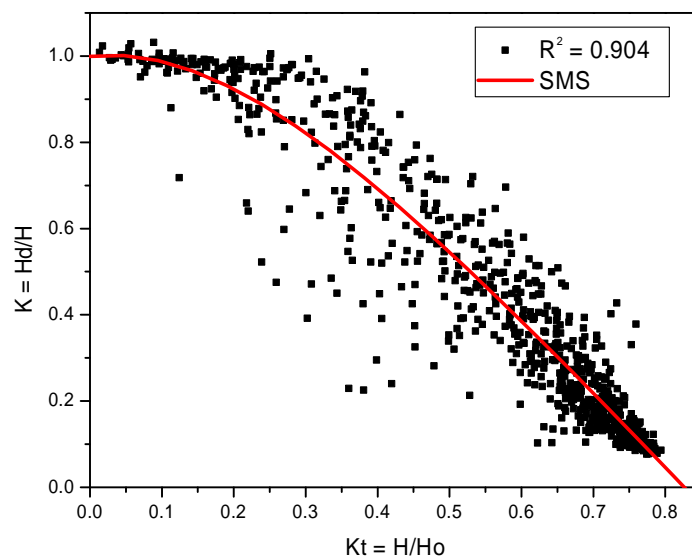
**Figura 6.1** – Dispersão dos valores de  $K$  medidos no Observatório Espacial do Sul em comparação com os modelos empíricos CPR e RC.

De modo geral, verifica-se boa confiabilidade entre os modelos empíricos RC e CPR e as medidas de superfície realizadas na Estação SONDA – SMS do Observatório

Espacial do Sul. No entanto, esses modelos são falhos para medidas em que o índice de nebulosidade  $Kt$  é superior a 0,7. Nesse intervalo ( $Kt > 0,7$ ), ambos os modelos superestimam as medidas.

Utilizando dados coletados na Estação SONDA do Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CIE/INPE – MCT, compreendidos entre o intervalo de Agosto de 2004 a Dezembro de 2006, desenvolveu-se um modelo empírico local, referenciado como SMS e apresentado na equação (6.1), adotando metodologia semelhante à empregada no desenvolvimento dos modelos empíricos RC e CPR.

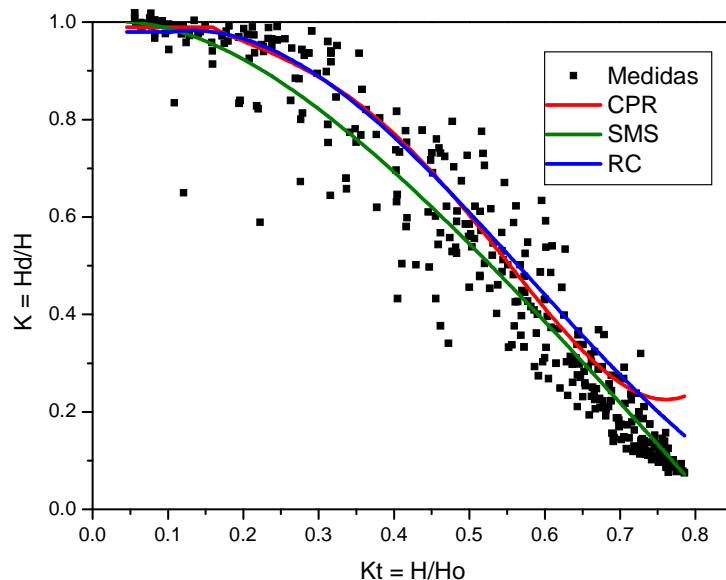
$$\frac{H_d}{H} = 0.999 + 0.189K_T - 3.342K_T^2 + 2.750K_T^3 - 0.910K_T^4 \quad (6.1)$$



**Figura 6.2** – Modelo SMS desenvolvido no Laboratório de Recursos de Energias Renováveis do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, em Santa Maria – RS, a partir de medidas realizadas no Observatório Espacial do Sul.

O modelo empírico SMS desenvolvido a partir dos parâmetros de radiação solar  $Kt$  e  $K$  é apresentado na Figura 6.2, juntamente com as medidas utilizadas no seu desenvolvimento.

Para efeitos de comparação, são apresentados os modelos empíricos CPR, RC e SMS juntos na Figura 6.3, assim como a dispersão dos dados utilizados para o cálculo dos desvios estatísticos MBE e RMSE. Pode-se notar que para valores de  $Kt > 0,7$  o modelo SMS diferencia-se por ser o único a conseguir prever o comportamento do parâmetro  $K$ .



**Figura 6.3** – Dispersão dos parâmetros de radiação solar durante o cálculo dos desvios estatísticos MBE e RMSE para os modelos empíricos CPR, RC e SMS.

Para a validação do modelo empírico SMS, dados coletados no ano de 2007 foram separados por estações do ano para o cálculo dos desvios estatísticos MBE (*Mean Bias Error*) e RMSE (*Root Mean Square Error*), definidos em (4.6). Os valores dos desvios são divididos pelos valores médios das medidas, expressando o resultado em percentagem. Foram empregadas 130 medidas na Primavera, 77 no Verão, 53 no Outono e 69 no Inverno.

O cálculo dos desvios entre os modelos e as medidas realizadas na Estação SONDA – SMS, apresentados na Tabela 6.1, permitem a verificação de variações significativas na concordância dos modelos com as medidas ao longo do ano.

| Modelo | Desvios | Primavera | Verão | Outono | Inverno |
|--------|---------|-----------|-------|--------|---------|
| CPR    | MBE%    | 14,06     | 11,20 | 11,69  | 3,30    |
|        | RMSE%   | 23,88     | 23,24 | 19,26  | 13,26   |
| RC     | MBE%    | 13,14     | 12,72 | 13,18  | 3,25    |
|        | RMSE%   | 21,94     | 23,15 | 20,34  | 12,55   |
| SMS    | MBE%    | 0,86      | 0,17  | 2,18   | -4,90   |
|        | RMSE%   | 17,01     | 19,44 | 15,07  | 12,80   |

**Tabela 6.1** – Desvios estatísticos calculados para os modelos empíricos CPR, RC e SMS nas diferentes estações do ano.

Verificou-se boa concordância entre os valores previstos pelos modelos empíricos e as medidas de superfície, porém o modelo SMS apresentou os menores desvios estatísticos para todos os períodos.

Analisando os desvios estatísticos para as diferentes estações do ano, observa-se que durante o Inverno os modelos apresentaram desvios RMSE de até 10,62% menores do que nas outras Estações. Ao mesmo tempo em que o modelo SMS subestima as medidas neste período (MBE = -4,90%) e possui pequenos desvios MBE durante a Primavera e o Verão.

Adicionalmente, nota-se que os desvios RMSE são maiores durante a primavera e principalmente no verão. As causas desses desvios maiores devem ser investigadas, mas de qualquer forma os dois modelos testados não apresentam bom desempenho na região quando os valores de  $Kt$  são superiores a 0,7, principalmente o modelo CPR. Provavelmente ambos os modelos foram desenvolvidos em regiões onde os valores de  $Kt$  são inferiores aos observados em São Martinho da Serra em razão de maior presença de constituintes atmosféricos com elevados coeficientes de espalhamento da radiação solar.

Calculou-se, posteriormente, os desvios estatísticos apenas para dias de céu claro, com  $Kt > 0,7$ , já que se verificou que os modelos CPR e RC superestimam as medidas neste intervalo, conforme apresentado na Tabela 6.2. No entanto, para a verificação do

caráter sazonal dos desvios em dias de céu claro, utilizou-se a totalidade dos dados disponíveis, o que fez necessário que se excluísse o modelo SMS desta análise, uma vez que parte desses dados foi empregada no desenvolvimento do modelo (Tabela 6.3).

| Modelo | Desvios |       |
|--------|---------|-------|
| CPR    | MBE %   | 77,52 |
|        | RMSE %  | 83,55 |
| RC     | MBE %   | 61,51 |
|        | RMSE %  | 66,82 |
| SMS    | MBE %   | 11,03 |
|        | RMSE %  | 28,72 |

**Tabela 6.2** – Desvios estatísticos calculados para os modelos CPR, RC e SMS em dias de céu claro.

| Modelo | Desvios | Primavera | Verão | Outono | Inverno |
|--------|---------|-----------|-------|--------|---------|
| CPR    | MBE%    | 68,74     | 49,14 | 71,65  | 55,14   |
|        | RMSE%   | 78,05     | 58,67 | 78,88  | 68,50   |
| RC     | MBE%    | 47,94     | 42,06 | 65,89  | 41,00   |
|        | RMSE%   | 56,01     | 49,46 | 72,85  | 54,75   |

**Tabela 6.3** – Desvios estatísticos calculados para os modelos CPR e RC em dias de céu claro com os dados separados em estações do ano.

Os desvios estatísticos apresentados nas Tabelas 6.2 e 6.3 mostram que o modelo SMS destaca-se pela sua significativa maior confiabilidade na previsão dos parâmetros de radiação solar em dias de céu claro. Pode-se observar ainda que em dias de céu claro os desvios comportaram-se diferentemente da totalidade dos dados apresentando maiores desvios durante o Outono, e os menores desvios durante o Verão.



## CONCLUSÃO

Durante o período de atividade desta Bolsa de Iniciação Científica, o bolsista realizou a revisão bibliográfica de diversas literaturas acerca da temática do Projeto Avaliação do Potencial Solar do Sul do Brasil III.

As análises dos dados de irradiação solar da Estação SONDA – SMS permitiram o desenvolvimento de um modelo empírico para previsão do parâmetro de radiação difusa  $K$  a partir do índice de nebulosidade  $Kt$ , denominado modelo SMS.

Com a intenção de verificar a sazonalidade dos desvios estatísticos MBE e RMSE apresentados pelo modelo SMS em comparação com os desvios apresentados pelos modelos CPR e RC, foram separados os dados em estações do ano para o cálculo dos desvios e, posteriormente, diante da verificação de má confiabilidade dos modelos CPR e RC para dias com céu claro (com  $Kt > 0,7$ ), foram calculados os desvios apenas para esse intervalo.

Verificou-se que o modelo empírico SMS apresentou os menores desvios em todas as estações do ano, em especial em dias de céu claro, mostrando ser o que melhor representa as condições climatológicas da região central do Estado do Rio Grande do Sul.

A verificação de um caráter sazonal dos desvios estatísticos entre as medidas da Estação SONDA – SMS e as estimativas obtidas com os modelos da literatura e a posterior discordância dos resultados ao analisar-se somente dias de céu claro sugere que a influência da nebulosidade é o principal fator climatológico na ocorrência dos desvios entre os resultados obtidos com os modelos da literatura e com os do modelo SMS, necessitando maior investigação observacional.

A análise de uma série maior de dados faz-se importante para futuros trabalhos com o intuito de aumentar a confiabilidade do modelo SMS, assim como realizar a comparação do modelo SMS com medidas de irradiação solar coletadas em outros sítios com Estações do Projeto SONDA, e com as estimativas publicadas no Atlas Brasileiro de Energia Solar.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abel, S.J., Highwood, E.J., Haywood, J.M., Stringer, M.A., 2005. The direct radiative effect of biomass burning aerosols over southern Africa. **Atmospheric Chemistry and Physics** 5, 1999–2018

Anderson, B.E., Grant, W.B., Gregory, G.L., Browell, E.V., Collins Jr., J.E., Sachse, W.G., Bagwell, D.R., Hudgins, C.H., Blake, D.R., Blake, N.J., 1996. Aerosols from burning over the tropical South Atlantic region: distributions and impacts. **J. Geophys. Res.**101(D19) (24), 117–137.

Andreae, M. O.; Crutzen, P. J. Atmospheric aerosols: biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. **Science**, v. 276, p.1.052-1.058, 1997.

Artaxo, P., Fernandes, E.T., Martins, J.V., Yamasoe, M.A., Hobbs, P.V., Maenhaut, W., Longo, K.M., Castanho, A., 1998. Large-scale aerosol source apportionment in Amazonia. **J. Geophys. Res.** 103 (D24), 31837–31847.

Artaxo, P., Oliveira, P. H., Lara, L.H., Pauliquevis, T.M., Rizzo, L.V., Junior, C.P., Paixão, M.A., Longo K.M., Freitas, S. e Correia, A.L. 2006. Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3a, 168-22, 2006.

Badarinath, K.V.S., Kharol, S.K., Kaskaoutis, D.G., Kambezidis, H.D., 2006. Influence of atmospheric aerosols on solar spectral irradiance in an urban area. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics** 69 (2007) 589–599.

Balis, D.S., Zerefos, C.S., Kourtidis, K., Bais, A.F., Hofzumahaus, A., Kraus, A., Schmitt, R., Blumthaler, M., Gobbi, G.P., 2002. Measurements and modeling of photolysis rates during the PAUR II campaign. **Journal of Geophysical Research** 107.

Bentley, R.W., Global Oil and Gas Depletion: An Overview, **Energy Policy**. v. 30, p.189-205, 2002.

Brasseur, G. and Solomon, S. **Aeronomy of the Middle Atmosphere**, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 452p. 1986.

Ceconi, M., Fiorin, D. V., Schuch, N. J., Martins, F. R., Brackmann, R., Pereira, E. B., Guarnieri, R. A. **A irradiação solar no Observatório Espacial do Sul analisada para**

**diferentes estações do ano.** Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo, 2008.

Christopher, S.A., Kliche, D.V., Chou, J., Welch, R.M., 1996. First estimates of the radiative forcing of aerosols generated from biomass burning using satellite data. **J. Geophys. Res.** 101, 21256–21273.

Colle, S.; Pereira, E. B. **Atlas de irradiação solar do Brasil** (primeira versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície). Brasília: INMET, Outubro, 1998.

Coulson, K. L. **Solar and Terrestrial Radiation: Methods and Measurements**, New York, Academic Press, 1975, 322 p.

Ferek, R.J., Reid, J.S., Hobbs, P.V., 1998. Emission factors of hydrocarbons, halocarbons, trace gases and particles from biomass burning in Brazil. **J. Geophys. Res.** 103 (D24), 32107–32118.

Fiorin, D.V., Guedes, M., Bertagnolli, R.F., Pes, M.P., Guarnieri, R.A., Martins, F. R., Pereira, E. B., Schuch N. J. 2006a. **Análise de Dados da Iluminância Natural em Dias de Céu Claro e sua Relação com o Ângulo Zenital Solar.** Anais do XVI Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica, Ijuí, 2006.

Fiorin, D.V., Pes, M.P., Guedes, M., Bertagnolli, R.F., Guarnieri, R.A., Martins, F. R., Pereira, E. B., Schuch N. J. 2006b. **Estudo da Iluminância Natural em Dias de Céu Claro em Estações da Rede SONDA.** Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis, 2006

Geller, H. S. **Revolução Energética: políticas para um futuro sustentável**, Rio de Janeiro, Relume Dumará, 299p., 2003.

Goldenberg, J.; Villanueva, L. D. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**, 2ª Edição, São Paulo: Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, 232p., 2003.

Guarnieri, Ricardo A., 2004, **Relatório de Estágio Supervisionado em Engenharia Química: Planejamento e Instalação de Estação de Referência SONDA no Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE – MCT)**, Santa Maria – RS, Brasil.

Guedes, M. **Relatório Final de Atividades de Iniciação Científica PIBIC/INPE – CNPq/MCT: Avaliação do Potencial Solar do Sul do Brasil II.** Santa Maria RS, 2007.



IPCC2001 – Intergovernmental Panel on Climate Change. A plan for a Research Program on Aerosol Radiative forcing and climate change. **National Academy Press**, Washington, D.C., 2001.

Iqbal, M. **An Introduction to Solar Radiation**, Toronto, Academic Press Canada, 390p., 1983.

Kidder, S. Q.; Vonder Haar, T. H. **Satellite Meteorology: an introduction**, San Diego, Academic Press, 466p. 1995.

Liou, K. N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**, New York, Academic Press Inc., 392p., 1980.

Martinazzo, C.A. **Modelos de Estimativa de Radiação Solar para Elaboração de Mapas Solarimétricos**. Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS, 2004.

Martins, F.R., 2001. Influência do processo de determinação da cobertura de nuvens e dos aerossóis de queimada no modelo físico de radiação BRASIL-SR. **PhD thesis**. Brazilian Institute for Space Research. São José dos Campos, Brazil.

Martins, F.R., Bueno, E.B., 2005. Parameterization of aerosols from burning biomass in the Brazil-SR radiative transfer model. **Solar Energy** 80, 231-239.

Martins, F.R., Pereira, E.P., Longo, K. **Níveis de Iluminância do céu no alvorecer e no ocaso**. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza, 2004.

Paltridge, G. W.; Platt, C. M. R. Radiative processes in meteorology and climatology. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.

Peixoto J. P.; Oort, A. H. **Physics of Climate**, American Institute of Physics, AIP Press, 520p., 1992.

Pereira, E.B., Martins, F.R., Abreu, S.L., Couto, P., Stuhlmann, R., Colle, S., 2000. Effects of burning of biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil. **Solar Energy** 68 (1), 91–107.

Pereira, E.B., Setzer, A.W., Gerab, F., Artaxo, P.E., Pereira, M.C., Monroe, G., 1996. Airborne measurements of burning of biomass aerosols in Brazil related to “TRACE-A” experiment. **J. Geophys. Res.** 101 (D19), 23983–23999.

Pereira, E.B., Martins, F.R., Abreu, S.L., Ruther, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: UNEP, 2006.

Reid, J.S., Hobbs, P.V., Ferek, R.J., Blake, D.R., Martins, J.V., Dunlap, M.R., Liou, S.C., 1998. **Physical, chemical and optical properties of regional hazes dominated by smoke in Brazil.** *J. Geophys. Res.* 103 (D24), 32059–32080.

Remer, L.A.; Kaufman, Y.J.; Tanré, D.; Matoo, S.; Chu, D.A.; Martins, J.V.; Li, R.R.; Ichoku, C.; Levy, R.C.; Kleidman, R.G., Eck, T.F.; Vermote, E.; Holben, B.N. The MODIS aerosol algorithm, products and validation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.62, (CLAMS Special Section), p. 947-973, 2005.

Robinson, N. (Ed.) **Solar Radiation**, Amsterdam, Elsevier Publishing Company, 347p., 1966.

Ryer, A., 1998. **Light measurement handbook**. ISBN 0-9658356-9-3, International Light Inc. Newburyport, USA, 64p.

Schafer, J. S.; Holben, B. N.; Eck, T. F.; Yamasoe, M. A.; Artaxo, P. Atmospheric effects on insolation in the Brazilian Amazon: Observed modification of solar radiation by clouds and smoke and derived single scattering albedo of fire aerosols. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n.D20, p.8074, 2002. doi:10.1029/2001JD000428.

Setzer, A.W., Pereira, M.C., Pereira, A.C., 1994. Satellite studies of biomass burning in Amazonia—some practical aspects. **Remote Sensing Rev.** 10, 91–103.

SONDA, Sistema Nacional de Organização Nacional de Dados Ambientais. Estações do Projeto SONDA. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/sonda/>>. Acessado em fevereiro de 2008.

Wallace, J. M.; Hobbs, P. V. **Atmospheric Science: an introductory survey**, San Diego, Academic Press, 467p. 1977.

Whitlock, C.H., Tarpley, D. 1996. Satellite-Based solar radiation data archives and new data. In: **Proceedings of the workshop: Satellites for Solar Energy Resource Information**, Washington, DC, April 10–11.

Yamasoe, M. A.; Kaufman, Y. J.; Dubovik, O.; Remer, L. A.; Holben, B. N.; Artaxo, P. Retrieval of the real part of the refractive index of aerosols from sun/sky radiometers during SCAR-B. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n.D24, p.31893-31902, 1998.

Yamasoe, M. A.; Artaxo, P.; Miguel, A. H.; Allen, A. G. Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of biomass burning in the Amazon Basin: water-soluble species and trace elements. **Atmospheric Environment**, v.34, p.1.641-1.653, 2000.



## **ANEXO**

Neste anexo, encontra-se a **carta de aceite** do trabalho “A IRRADIAÇÃO SOLAR NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL ANALISADA PARA DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO”, de autoria do Bolsista Marcio Ceconi e co-autoria de Fiorin, D.V., Schuch, N.J., Martins, F.R., Brackmann, R., Pereira, E.B., Guarnieri, R.A., que será apresentado no XV Congresso Brasileiro de Meteorologia CBMET, a ser realizado na cidade de São Paulo, entre os dias 24 e 29 de Agosto de 2008.



São Paulo 5 de junho de 2008

Prezados Senhores

*Ref. XV Congresso Brasileiro de Meteorologia - CBMET  
“A Meteorologia e as Cidades”*

O Trabalho:

**“A IRRADIAÇÃO SOLAR NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL ANALISADA PARA DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO”**

de autoria de:

**Marcio Ceconi, Daniel Vinicius Fiorin, Rodrigo Brackmann,  
Nelson Jorge Schuch**

foi aceito para apresentação em formato Pôster no XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, que será realizado entre os dias 24 e 29 de agosto de 2008, no Centro de Convenções Frei Caneca, São Paulo, SP.

Atenciosamente,

Comitê Científico do XV CBMET