



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/CNPq/INPE)

PROCESSO N° 112293/2008-5

Marcio Ceconi – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT
Laboratório de Recursos de Energias Renováveis
LRER/CRS/INPE – MCT
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
CRS/INPE – MCT
E-mail: ceconi@lacsme.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.martins@cptec.inpe.br

Santa Maria, Julho de 2009



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

PROJETO

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL SOLAR DO SUL DO BRASIL III

PROCESSO: 112293/2008-5

**Relatório elaborado por Marcio Ceconi relativo ao período
Agosto de 2008 a Julho de 2009 de execução das atividades:**

**Marcio Ceconi – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT
E-mail: ceconi@lacesm.ufsm.br**

**Dr. Nelson Jorge Schuch – Co-Orientador
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/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°: 112293/2008-5

Bolsista no período de Agosto/08 a Julho/09:

Marcio Ceconi

Curso de Física Bacharelado

Centro de Ciências Naturais e Exatas – CCNE/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/INPE – MCT

Dr. Enio Bueno Pereira

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

Colaboradores:

Daniel Vinícius Fiorin – Engenheiro Químico e antigo membro do LRER/CRS/INPE – MCT

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

Eduardo Weide Luiz – Bolsista I.C. e Graduando do curso de Meteorologia da UFSM



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

Locais de Trabalho/Execução do Projeto:

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

Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/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**

| <u>Identificação</u> | <u>Recursos Humanos</u> | <u>Linhas de Pesquisa</u> | <u>Indicadores do Grupo</u> |
|----------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|
|----------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|

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: 04/06/2009 15:13

Líder(es) do grupo: Nelson Jorge Schuch -
nelson.schuch@pq.cnpq.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

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/INPE - MCT, em Santa Maria, e Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/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 físicos-químicos, dinâmicos, eletricidade atmosférica e(TLEs), 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/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 (NO₂ / SO₂ / CO₂); 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 fontes solar e eólica. Vice-Líderes: Damaris K. Pinheiro, Marcelo B. da Rosa, Enio B. Pereira.

Recursos humanos**Pesquisadores****Total: 21**[André Passaglia Schuch](#)[Fernando Ramos Martins](#)[Augusta Maria Passaglia Schuch](#)[Lucymara Fassarella Agnez Lima](#)

Relatório Final de Atividades, 2009[Barclay Robert Clemesha](#)[Caitano Luiz da Silva](#)[Carlos Frederico Martins Menck](#)[Damaris Kirsch Pinheiro](#)[Daniel Vinicius Fiorin](#)[Enio Bueno Pereira](#)[Ezequiel Echer](#)[Fernanda de São Sabbas Tavares](#)[Fernando Luís Guarnieri](#)[Marcelo Barcellos da Rosa](#)[Marcelo Pizzuti Pes](#)[Nelson Jesus Ferreira](#)[Nelson Jorge Schuch](#)[Neusa Maria Paes Leme](#)[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)[Plínio Carlos Alvalá](#)[Ricardo André Guarnieri](#)**Estudantes**[Ana Marcelli Soares](#)[Carlos Pinto da Silva Neto](#)[Eduardo Weide Luiz](#)[Elenice Kall](#)[Gustavo Pereira Guerra](#)[Marcio Ceconi](#)[Nadiara Pereira](#)[Naiara Tatiane Hupfer](#)[Pabulo Henrique Rampelotto](#)[Rodrigo Brackmann](#)[Rodrigo da Rosa Azambuja](#)**Técnicos**

Eduardo Ceretta Dalla Favera - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Computação

Vinicius Ceregati Costa - Graduação - \Outra Função

Linhas de pesquisa

- [Ciências Atmosféricas: Ozônio x Radiação](#)
- [Energias Renováveis](#)

Relações com o setor produtivo**Indicadores de recursos humanos do grupo****Integrantes do grupo**

Pesquisador(es)

Estudante(s)

Técnico(s)

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:

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

Estudantes:



Relatório Final de Atividades, 2009

[Eduardo Weide Luiz](#)

[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

Meus sinceros agradecimentos: (i) aos funcionários, servidores do CRS/INPE - MCT e do LACESM/CT – UFSM pelo apoio e pela infra-estrutura disponibilizada; (ii) ao Programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT pela aprovação do Projeto de Pesquisa, que me permitiu dar os primeiros passos na Iniciação Científica e Tecnológica, propiciando grande crescimento profissional; (iii) ao Coordenador Dr. José Carlos Becceneri e a Secretária do Programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT, Sra. Egidia Inácio da Rosa, pelo constante apoio, alertas e sua incansável preocupação com toda a burocracia e datas limites do Programa para com os bolsistas de I. C. & T do CRS/INPE - MCT.

Um obrigado especial ao meu orientador, Dr. Fernando Ramos Martins, Pesquisador da Divisão de Clima e Meio Ambiente – DMA/CPTEC/INPE – MCT, por suas inúmeras sugestões e aconselhamentos durante a realização das atividades de pesquisa.

Agradeço ao Dr. Nelson Jorge Schuch, Pesquisador Titular Sênior III do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/INPE-MCT, em Santa Maria – RS, criador do Laboratório de Recursos de Energia Renováveis, por acreditar em meu potencial e dedicar muito de seu tempo em orientação e aconselhamento, contribuindo de maneira significativa para meu desenvolvimento pessoal e profissional. Agradeço sinceramente pelos seus ensinamentos sobre Mentoreamento e Inteligência Emocional, que têm sido fundamentais para minha vida.

Obrigado aos colegas e ex-colegas do Laboratório de Recursos de Energia Renováveis do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais pelo seu companheirismo e cooperação. Em especial a Daniel Vinicius Fiorin, Rodrigo Brackmann, Alexandre Ceretta Dalla Favera e Eduardo Weide Luiz.

Por fim, gostaria de agradecer meus pais, Luiz Ceconi e Leila Maria Ceconi, e meu irmão, Marcelo Ceconi, que sempre estiveram presentes em minha vida, apoiando-me e me dando forças para que eu sempre seguisse em frente. Agradeço profundamente pelo apoio e carinho incondicionais que sempre recebi.

RESUMO

O trabalho, desenvolvido no Laboratório de Recursos de Energia Renováveis do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – LRER/CRS/INPE – MCT, representa a continuidade do projeto de Iniciação Científica em andamento desde 2007, que objetiva estudar o potencial de energia solar do Sul do Brasil e analisar a sazonalidade e a influência de variáveis climáticas sobre a incidência de radiação solar em superfície. Na primeira etapa do projeto de pesquisa, as medidas de irradiância solar global e difusa foram integradas ao longo do período de um dia, resultando em valores de irradiação, utilizados para o cálculo dos parâmetros K e Kt, definidos respectivamente como a razão entre a irradiação solar difusa e a irradiação solar global e entre a irradiação solar global e a irradiação solar incidente no topo da atmosfera. Com dados coletados pelas estações do Projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) instaladas em Brasília – DF, Campo Grande – MS, Florianópolis – SC, Natal – RN, Ourinhos – SP, Palmas – TO, Petrolina – PE e São Martinho da Serra – RS, foram desenvolvidos modelos matemáticos locais, com validade restrita a cada estação, e um modelo matemático nacional, utilizando 70% dos dados disponíveis. Os 30% restantes dos dados coletados foram utilizados na validação dos modelos, realizada através do cálculo dos desvios estatísticos MBE e RMSE. Concomitantemente, calcularam-se os desvios estatísticos entre o modelo de validade local para São Martinho da Serra, referenciado por SMS, e as medidas das outras estações, visto a importância do modelo na etapa anterior do projeto. Notou-se que o modelo SMS não apresenta boa confiabilidade para todo o Território Brasileiro, subestimando as medidas ($MBE < 0$) para as estações de Florianópolis e Natal, ambas localizadas em regiões litorâneas, e superestimando para as outras. O modelo nacional, referenciado por ALL, apresentou baixos desvios estatísticos para todas as estações, porém demonstrou uma confiabilidade mais reduzida para Natal (MBE de -16,33% e RMSE de 24,2%) e Palmas (MBE de 11,42% e RMSE de 23,48%). De modo geral, em virtude dos baixos desvios estatísticos, o modelo ALL pode ser considerado bem adaptado ao Território Brasileiro. No entanto, em estudos de amplitude regional, é adequado que se utilizem os modelos específicos para cada região.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| AVALIAÇÃO DO POTENCIAL SOLAR DO SUL DO BRASIL III | 1 |
| RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA | 1 |
| (PIBIC/CNPQ/INPE)..... | 1 |
| DIRETÓRIO DOS GRUPOS DE PESQUISA | 5 |
| AGRADECIMENTOS | 8 |
| RESUMO | 9 |
| SUMÁRIO | 10 |
| LISTA DE FIGURAS | 12 |
| LISTA DE TABELAS | 15 |
| SIGLAS E ABREVIATURAS | 16 |
| CAPÍTULO 1 | 18 |
| INTRODUÇÃO..... | 18 |
| CAPÍTULO 2 | 20 |
| INFRA-ESTRUTURA UTILIZADA | 20 |
| 2.1 – <i>O Projeto SONDA</i> | 20 |
| 2.2 – <i>Estação de Referência do Projeto SONDA instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCT, em São Matinho da Serra – RS</i> | 22 |
| 2.3 – <i>O Laboratório de Recursos de Energia Renováveis do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – LRER/CRS/INPE – MCT</i> | 24 |
| CAPÍTULO 3 | 26 |
| A RADIAÇÃO SOLAR E A ATMOSFERA TERRESTRE | 26 |
| 3.1 – <i>O Sol e a Radiação Eletromagnética</i> | 26 |
| 3.2 – <i>Considerações Geométricas Básicas</i> | 30 |
| 3.3 – <i>Leis da Radiação para Corpos Negros</i> | 34 |
| 3.4 – <i>A Atmosfera Terrestre</i> | 36 |
| 3.5 – <i>Interações da Radiação com a Atmosfera Terrestre</i> | 37 |
| 3.5 – <i>Efeito das Nuvens sobre a Radiação Solar</i> | 41 |
| 3.6 – <i>Efeito dos Aerossóis na Atmosfera</i> | 42 |
| 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/M² NO SENTIDO DE FAVORECER O RESFRIAMENTO. ESSE EFEITO É DIRETAMENTE COMPARÁVEL AO EFEITO DOS CHAMADOS GASES ESTUFA ANTROPOGÊNICOS, TAIS COMO CO₂, CH₄, N₂O, 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) | 43 |
| CAPÍTULO 4 | 45 |
| METODOLOGIA | 45 |
| 4.1 – <i>Estações Coletoras de Dados do Projeto SONDA</i> | 45 |
| 4.2 – <i>Descrição dos Equipamentos SONDA</i> | 47 |
| 4.3 – <i>Qualificação dos Dados do Projeto SONDA</i> | 56 |

*Relatório Final de Atividades, 2009*

| | |
|--|-----------|
| 4.4 – O Método dos Mínimos Quadrados para Ajuste Polinomial | 59 |
| 4.5 – Análise de Dados de Irradiação Solar..... | 63 |
| CAPÍTULO 5..... | 69 |
| ATIVIDADES OPERACIONAIS DESENVOLVIDAS | 69 |
| 5.1 – Revisão Bibliográfica..... | 69 |
| 5.2 – Manutenção dos Equipamentos da Estação SONDA – SMS..... | 69 |
| 5.3 – Coleta, Qualificação e Análise dos Dados Coletados na Estação SONDA – SMS..... | 70 |
| 5.4 – Acompanhamento da Visita Técnica de Engenheiros do Projeto SONDA ao Observatório Espacial do Sul | 70 |
| CAPÍTULO 6..... | 72 |
| RESULTADOS | 72 |
| 6.1 – Primeira Etapa..... | 72 |
| 6.2 – Segunda Etapa | 76 |
| CONCLUSÕES | 88 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 90 |
| APÊNDICE A | 95 |
| TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS APRESENTADOS EM EVENTOS | 95 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 2.1 – LOGOTIPO DO PROJETO SONDA. | 20 |
| FIGURA 2.2 – REDE DE ESTAÇÕES COLETORAS DE DADOS DO PROJETO SONDA..... | 21 |
| FIGURA 2.3 – PLATAFORMA COM OS EQUIPAMENTOS DA ESTAÇÃO SONDA – SMS JUNTO AO PRÉDIO 1 DO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL OES/CRS/ INPE – MCT. ... | 23 |
| FIGURA 2.4 – TORRE ANEMOMÉTRICA INSTALADA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL OES/CRS/INPE – MCT, COM DESTAQUE PARA OS ANEMÔMETROS INSTALADOS A 10, 25 E 50 METROS DE ALTURA..... | 24 |
| FIGURA 3.1 – FOTO DO SOL OBTIDA PELO OBSERVATÓRIO HELIOSFÉRICO E SOLAR. | 26 |
| FIGURA 3.2 – REGIÕES A CARACTERÍSTICAS DO SOL. | 27 |
| FIGURA 3.3 – O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO..... | 28 |
| FIGURA 3.4 – O MOVIMENTO DE TRANSLAÇÃO DA TERRA EM TORNO DO SOL E AS ESTAÇÕES DO ANO..... | 31 |
| FIGURA 3.5 – VARIAÇÃO DA ALTURA SOLAR COM A LATITUDE. | 32 |
| FIGURA 3.6 – CARACTERÍSTICAS DOS SOLSTÍCIOS E EQUINÓCIOS DA TERRA..... | 33 |
| FIGURA 3.7 – RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA. | 35 |
| FIGURA 3.8 – INTERAÇÕES DA RADIAÇÃO SOLAR COM OS CONSTITUINTES ATMOSFÉRICOS..... | 38 |
| FIGURA 3.8 – 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. | 39 |
| FIGURA 3.10 – (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. | 40 |
| FIGURA 4.1 – PIRANÔMETRO CM 21 (KIPP&ZONEN) E SEU INTERVALO ESPECTRAL. . | 47 |
| FIGURA 4.2 – PIRANÔMETRO CM 22 (KIPP&ZONEN) E SEU INTERVALO ESPECTRAL. . | 48 |
| FIGURA 4.3 – LUX LITE (KIPP&ZONEN)..... | 49 |
| FIGURA 4.4 – PAR LITE E SEU INTERVALO ESPECTRAL. | 49 |
| FIGURA 4.5 – TWO AXIS POSITIONER – 2AP (KIPP&ZONEN). | 50 |
| FIGURA 4.6 – PIRELIÔMETRO NIP (EPPLEY LAB., INC.)..... | 51 |
| FIGURA 4.7 – PIRGEÔMETRO PIR (EPPLEY LAB., INC.)..... | 52 |
| FIGURA 4.8 – SENSOR TEMPERATURA/UMIDADE DO AR MODEL 41372 (R. M. YOUNG, CO.)..... | 53 |
| FIGURA 4.9 – SENSOR TEMPERATURA DO AR MODEL 41342 (R. M. YOUNG, CO.)..... | 54 |
| FIGURA 4.10 – SENSOR DE PRESSÃO BAROMÉTRICA VAISALA PTB101. | 55 |
| FIGURA 4.11 – ANEMÔMETRO MODELO 05106 (R. M. YOUNG, CO.)..... | 56 |

| | |
|--|-----------|
| FIGURA 4.12 – CÓDIGOS DE QUALIFICAÇÃO DOS DADOS DO PROJETO SONDA PARA TRÊS DIFERENTES SITUAÇÕES. | 58 |
| FIGURA 4.13 – GRÁFICOS CONTENDO INFORMAÇÕES SOBRE A QUALIFICAÇÃO DE DADOS DA ESTAÇÃO SONDA – SMS NO MÊS DE MAIO DE 2006. | 59 |
| FIGURA 4.12 – GRÁFICO COMPARANDO AS MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL E DIFUSA HORIZONTAIS COM AS MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR DIRETA NORMAL COLETADAS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL, SÃO MARTINHO DA SERRA – RS, NO DIA 28/08/2007. | 64 |
| FIGURA 4.13 – COMPARAÇÃO ENTRE AS IRRADIÂNCIAS MEDIDAS EM SÃO MARTINHO DA SERRA – RS, EM 28/08/2007, COM A IRRADIÂNCIA SOLAR DIRETA CORRIGIDA. | 65 |
| FIGURA 4.14 – IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL PARA UM DIA COM CÉU LIMPO (SMS – 01/08/2007). | 66 |
| FIGURA 4.15 – IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL PARA UM DIA COM CÉU PARCIALMENTE NUBLADO (SMS – 07/08/2007). | 67 |
| FIGURA 4.16 – IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL PARA UM DIA COMPLETAMENTE NUBLADO (SMS – 03/08/2007). | 67 |
| FIGURA 6.1 – DISPERSÃO DOS VALORES DE \bar{K} MEDIDOS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL EM COMPARAÇÃO COM OS MODELOS EMPÍRICOS CPR E RC. | 73 |
| 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. | 73 |
| 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. | 74 |
| FIGURA 6.4 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NA ESTAÇÃO SONDA DE BRASÍLIA, JUNTAMENTE COM AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS. | 78 |
| FIGURA 6.5 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NA ESTAÇÃO SONDA DE CAMPO GRANDE, JUNTAMENTE COM AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS. | 78 |
| FIGURA 6.6 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NA ESTAÇÃO SONDA DE FLORIANÓPOLIS, JUNTAMENTE COM AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS. | 79 |
| FIGURA 6.7 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NA ESTAÇÃO SONDA DE NATAL, JUNTAMENTE COM AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS. | 79 |
| FIGURA 6.8 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NA ESTAÇÃO SONDA DE OURINHOS, JUNTAMENTE COM AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS. | 80 |
| FIGURA 6.9 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NA ESTAÇÃO SONDA DE PALMAS, JUNTAMENTE COM AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS. | 80 |
| FIGURA 6.10 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NA ESTAÇÃO SONDA DE PALMAS, JUNTAMENTE COM AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS. | 81 |
| FIGURA 6.11 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS EMPREGADAS NO DESENVOLVIMENTO DO MODELO EMPÍRICO ALL, JUNTAMENTE COM O MODELO SMS. | 83 |
| FIGURA 6.12 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS DE BRASÍLIA RESERVADAS PARA VALIDAÇÃO, JUNTAMENTE COM OS MODELOS BRA, SMS E ALL. | 84 |
| FIGURA 6.13 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS DE CAMPO GRANDE RESERVADAS PARA VALIDAÇÃO, JUNTAMENTE COM OS MODELOS CPG, SMS E ALL. | 84 |
| FIGURA 6.14 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS DE FLORIANÓPOLIS RESERVADAS PARA VALIDAÇÃO, JUNTAMENTE COM OS MODELOS FLP, SMS E ALL. | 85 |



FIGURA 6.15 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS DE NATAL RESERVADAS PARA VALIDAÇÃO, JUNTAMENTE COM OS MODELOS NAT, SMS E ALL.85

FIGURA 6.16 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS DE OURINHOS RESERVADAS PARA VALIDAÇÃO, JUNTAMENTE COM OS MODELOS ORN, SMS E ALL.....86

FIGURA 6.17 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS DE PALMAS RESERVADAS PARA VALIDAÇÃO, JUNTAMENTE COM OS MODELOS PLM, SMS E ALL.....86

FIGURA 6.18 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS DE PETROLINA RESERVADAS PARA VALIDAÇÃO, JUNTAMENTE COM OS MODELOS PTR, SMS E ALL.87

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----------|
| TABELA 3.1 – SUBDIVISÕES DAS REGIÕES DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO CORRESPONDENTES AO ULTRAVIOLETA, AO VÍSEL E AO INFRAVERMELHO..... | 30 |
| TABELA 4.1 – CLASSIFICAÇÃO DA BASE DE DADOS DO PROJETO SONDA..... | 46 |
| TABELA 4.2 – ESTAÇÕES DO PROJETO SONDA SELECIONADAS PARA O PROJETO..... | 47 |
| TABELA 4.3 – SIGNIFICADO DOS CÓDIGOS DE QUALIFICAÇÃO EMPREGADOS NA BASE DE DADOS DO PROJETO SONDA..... | 57 |
| TABELA 6.1 – DESVIOS ESTATÍSTICOS CALCULADOS PARA OS MODELOS EMPÍRICOS CPR, RC E SMS NAS DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO..... | 74 |
| TABELA 6.2 – DESVIOS ESTATÍSTICOS CALCULADOS PARA OS MODELOS CPR, RC E SMS EM DIAS DE CÉU CLARO..... | 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..... | 76 |
| TABELA 6.4 – PERÍODO DE DADOS UTILIZADO DE CADA ESTAÇÃO DO PROJETO SONDA..... | 76 |
| TABELA 6.5 – DESVIOS ESTATÍSTICOS ENTRE AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS E OS DADOS COLETADOS EM CADA UMA DAS ESTAÇÕES DO PROJETO SONDA SELECIONADAS..... | 77 |
| TABELA 6.6 – MODELOS EMPÍRICOS LOCAIS DESENVOLVIDOS PARA AS ESTAÇÕES SELECIONADAS..... | 81 |
| TABELA 6.7 – DESVIOS ESTATÍSTICOS CALCULADOS ENTRE AS MEDIDAS DE CADA ESTAÇÃO SONDA SELECIONADA E AS ESTIMATIVAS DOS MODELOS LOCAIS..... | 82 |
| TABELA 6.8 – DESVIOS ESTATÍSTICOS APRESENTADOS ENTRE AS ESTIMATIVAS DO MODELO ALL E AS MEDIDAS COLETADAS EM CADA ESTAÇÃO. | 83 |

SIGLAS E ABREVIATURAS

BRA - Brasília (DF)

BSRN - Baseline Surface Radiation Network

CPG - Campo Grande (MS)

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CT – ENERG - Fundo Setorial de Energia

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

DF - Distrito Federal

DMA - Divisão de Meio-Ambiente

DU - Unidades Dobson

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos

FLP - Florianópolis (SC)

H - Integral diária da radiação solar global

H_d - Integral diária da radiação solar difusa

I_{sc} - Constante Solar

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

Jm^{-2} ou J/m^2 - Joules por metro quadrado

K - Escala de temperatura Kelvin

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

K_d - Razão entre a irradiação solar difusa e a irradiação incidente no TOA

K_t - Razão entre a irradiação solar global e a irradiação incidente no TOA

L - Radiância

LACESM - Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria

LRER - Laboratório de Recursos de Energia Renováveis

MBE - Mean Bias Error

MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia

MS - Mato Grosso do Sul

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NAT - Natal (RN)

NIP - Normal Incidence Pyrheliometer

NIR - Near Infra Red

OES - Observatório Espacial do Sul

ORN - Ourinhos (SP)

PAR - Photosynthetically Active Radiation

PE - Pernambuco

PIR - Precision Infrared Radiometer

PLM - Palmas (TO)

PMOA - Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico

PTR - Petrolina (PE)

RMSE - Root Mean Square Error

RN - Rondônia

RS - Rio Grande do Sul

SC - Santa Catarina

SMS - São Martinho da Serra

SP - São Paulo

SONDA - Sistema de Organização de Dados Ambientais

TO - Tocantins

TOA - Top Of Atmosphere (Topo da Atmosfera)

TSI - Total Sky Imager

UFMS - Universidade Federal de Santa Maria

UV – Radiação Ultravioleta

W - Watt

Wm^{-2} - Watts por metro quadrado

WMO - World Meteorological Organization (Organização Meteorológica Mundial)

$Wm^{-2}sr^{-1}$ - Watts por metro quadrado por esterradiano

μm - 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 radiação 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. O custo de conversão da energia solar para outras formas que viabilizam seu aproveitamento pela sociedade é que determina o custo da energia solar.

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 Ciência do Sistema Terrestre (CCST/INPE) em conjunto com o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), 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 irradiação solar na mesma região. Para isso, desenvolveram-se modelos empíricos para estimativa da irradiação solar difusa a partir do índice de nebulosidade da atmosfera para cada uma das estações do Projeto SONDA selecionadas, sendo os modelos desenvolvidos com dados especificamente de cada estação (modelos locais) e com dados de todas as estações (modelo nacional). Modelos para estimativas de radiação solar são estudados visando uma maior confiabilidade aos bancos de dados, porém observa-se a 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 irradiação 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), Figura 2.1, é coordenado e executado pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) em conjunto com Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC) e financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), e pela PETROBRAS.



Figura 2.1 – Logotipo do Projeto SONDA.

Fonte: SONDA (2009).

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 2.2, 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.

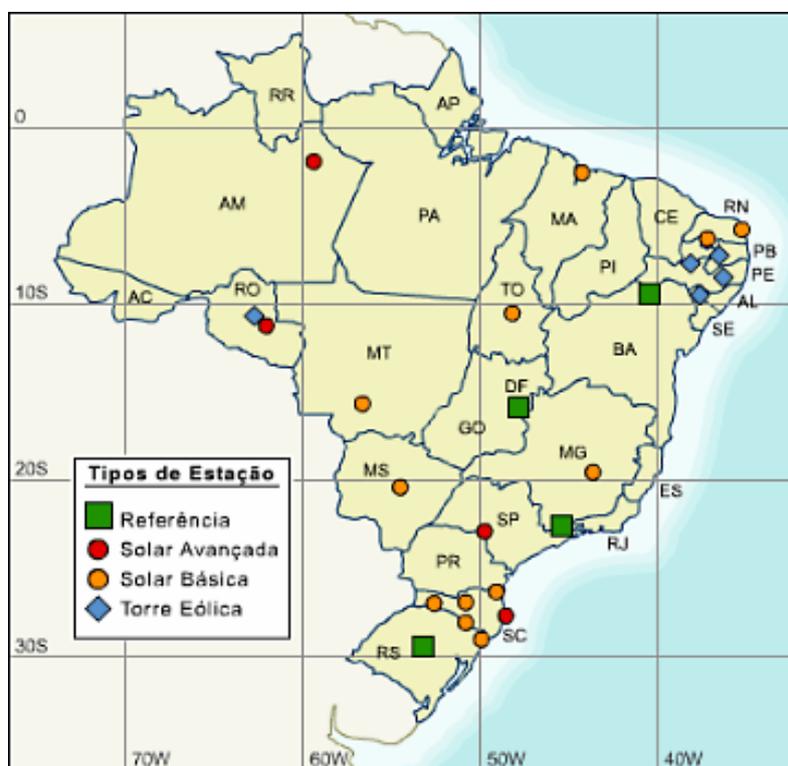


Figura 2.2 – Rede de estações coletoras de dados do Projeto SONDA.

Fonte: SONDA (2009)

A instalação dos equipamentos e organização dos dados segue normas internacionais, tornando o Observatório Espacial do Sul qualificado a integrar a Rede de Estações de Superfície para Medição de Radiação – “Baseline Surface Radiation Network” – BSRN. A BSRN é um Projeto da Organização Meteorológica Mundial - WMO, que visa avaliar globalmente a interação da radiação solar com outras variáveis

climáticas e sua influência sobre mudanças percebidas no clima do planeta. (Fiorin, 2009).

Maiores informações sobre o Projeto SONDA podem ser obtidas através do endereço eletrônico <http://www.sonda.cptec.inpe.br/>.

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

A estação de referência SONDA – SMS está instalada no Observatório Espacial do Sul (Latitude: 29°26'34"S, Longitude: 53°49'23"O), subunidade do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – OES/CRS/INPE – MCT, em São Martinho da Serra – RS. O Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais está localizado no Campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Bairro Camobi, Santa Maria – 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 μm a 2,8 μm .
- Piranômetro CM 22 (*Kipp & Zonen*) – efetua medidas de radiação solar difusa horizontal na faixa espectral de 0,2 μm a 3,6 μm .
- 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 μm a 50 μm .
- 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 2.3 – Plataforma com os equipamentos da Estação SONDA – SMS junto ao Prédio 1 do Observatório Espacial do Sul OES/CRS/ INPE – MCT.

Esses equipamentos, juntamente com os equipamentos do Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico (PMOA), estão instalados em uma plataforma de 3 m de altura ao lado do Prédio Um do Observatório Espacial do Sul (Figura 2.3) e numa torre eólica (Figura 2.4), onde estão instalados três anemômetros a 10, 25 e 50 metros e medidores da temperatura do ar a 1 e 50 metros de altura.

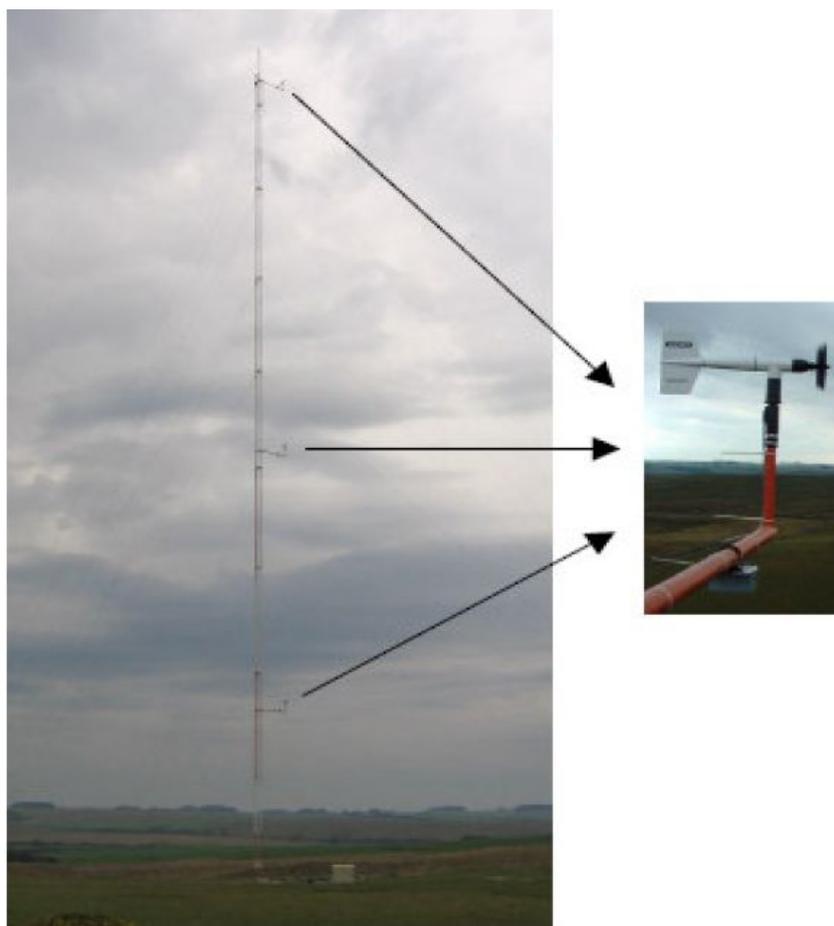


Figura 2.4 – Torre anemométrica instalada no Observatório Espacial do Sul OES/CRS/INPE – MCT, com destaque para os anemômetros instalados a 10, 25 e 50 metros de altura.

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 – O Laboratório de Recursos de Energia Renováveis do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – LRER/CRS/INPE – MCT

O Laboratório de Recursos de Energia Renováveis (LRER), pertencente ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE – MCT, foi criado no ano de 2003 pelo Dr. Nelson Jorge Schuch, e está localizado no Campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em Santa Maria – RS.

O LRER, por iniciativa do Dr. Nelson Jorge Schuch, possui uma parceria com o Projeto SONDA, desenvolvendo pesquisas na área de energias renováveis com o objetivo de obter o perfil da Região Central do Rio Grande do Sul quanto ao potencial solar e eólico. Os alunos selecionados para a realização de atividades de Iniciação Científica e Tecnológica, I. C. & T., são responsáveis pela manutenção dos equipamentos do Projeto SONDA instalados em São Martinho da Serra – RS.

Os resultados das pesquisas desenvolvidas no Laboratório têm sido apresentados em eventos científicos com amplitude nacional e internacional.

CAPÍTULO 3

A RADIAÇÃO SOLAR E A ATMOSFERA TERRESTRE

3.1 – O Sol e a Radiação Eletromagnética

O Sol é a estrela mais próxima da Terra, Figura 3.1. 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).

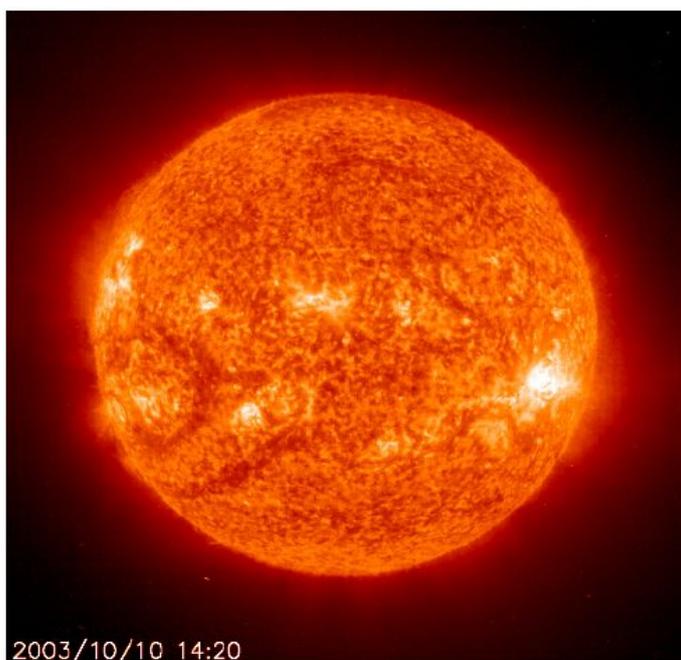


Figura 3.1 – Foto do Sol obtida pelo Observatório Heliosférico e Solar.

Fonte: SOHO/NASA (2003).

O Sol é um corpo de gás incandescente composto principalmente de hidrogênio. Sua estrutura física é complexa, Figura 3.2, 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.

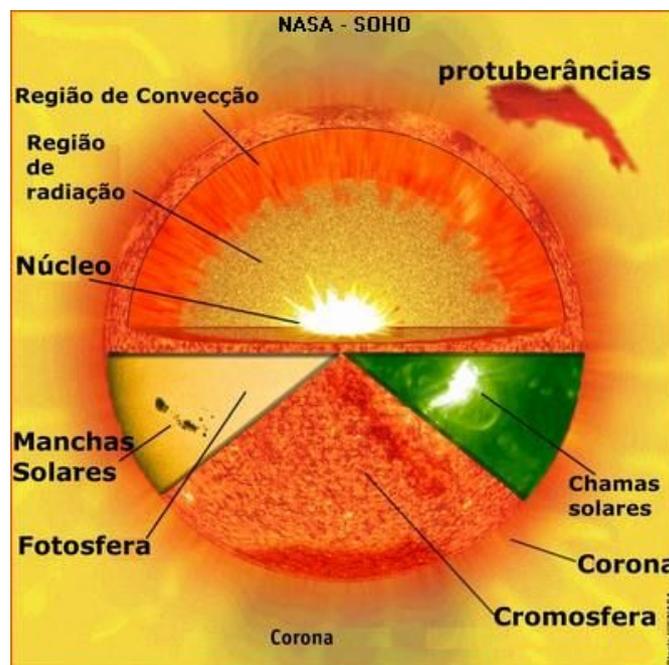


Figura 3.2 – Regiões a características do Sol.

Fonte: SOHO/NASA.

O Sol emite um espectro contínuo de radiação eletromagnética, Figura 3.3 e Tabela 3.1, com uma distribuição espectral similar a da radiação de um de 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 μm (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 μm . Assim, costuma-se dividir o espectro eletromagnético em aproximadamente 4 μm (Coulson, 1975). A radiação menor que 4 μm é chamada radiação de onda curta e a radiação maior que 4 μm 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.

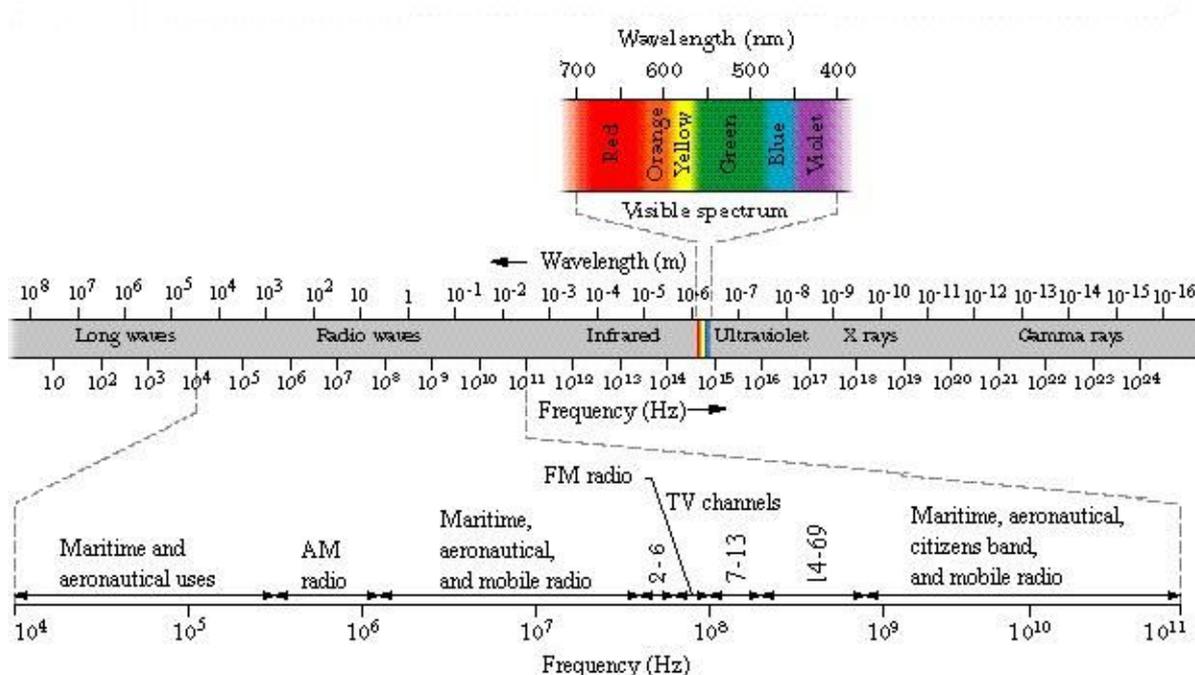


Figura 3.3 – O espectro eletromagnético.

Fonte: Halliday et al (1997).

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 ($Wm^{-2}sr^{-1}$) (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.

| Região | Comprimento de Onda | Subdivisão | Comprimento de Onda |
|-------------------|---------------------|------------|---------------------|
| Ultravioleta (UV) | 10 – 400 nm | UV-C | 10 – 280 nm |
| | | UV-B | 280 – 320 nm |
| | | UV-A | 320 – 400 nm |
| Visível (VIS) | 400 – 700 nm | Violeta | 400 – 430 nm |
| | | Índigo | 430 – 450 nm |

| | | | |
|--------------------|----------------------|------------------|-------------------|
| | | Azul | 450 – 500 nm |
| | | Verde | 500 – 570 nm |
| | | Amarelo | 570 – 590 nm |
| | | Alaranjado | 590 – 610 nm |
| | | Vermelho | 610 – 700 nm |
| Infravermelho (IV) | 700nm – 1000 μ m | IV Próximo (NIR) | 0,7 – 1,5 μ m |
| | | IV de Onda Curta | 1,5 – 3,0 μ m |
| | | IV Médio | 3,0 – 8,0 μ m |
| | | IV de Onda Longa | 8,0 – 15 μ m |
| | | IV Distante | > 15 μ m |

Tabela 3.1 – Subdivisões das regiões do espectro eletromagnético correspondentes ao ultravioleta, ao visível e ao infravermelho.

Fonte: <http://www.geotec-rs.com.br/espectro.html>.

3.2 – Considerações Geométricas Básicas

De acordo com as leis clássicas da dinâmica e da gravidade Newtoniana pode-se afirmar que a Terra se move em um plano fixo ao redor do Sol e que a órbita da Terra é uma elipse onde o Sol está situado em um ponto conhecido como foco. O plano fixo que contém a órbita da Terra é denominado plano *eclíptico* e embora seja elíptica a órbita, ela se apresenta muito próxima da geometria circular devido ao valor da excentricidade (medida do desvio da elipse em relação ao círculo) estimado em 0,0167. (Kreider e Kreith, 1979).

As estações do ano existem devido não só ao movimento de translação da Terra, Figura 3.4, como também devido à inclinação do eixo de rotação da Terra em relação à linha perpendicular do plano eclíptico, Figura 3.5. (Guimaraens, 2003). Esta inclinação de aproximadamente $23,5^\circ$ faz com que a orientação da Terra em relação ao Sol mude continuamente enquanto a Terra gira em torno do Sol. Assim, ao longo do ano, as trajetórias aparentes do Sol no céu, observadas de um determinado ponto da Superfície Terrestre, alteram-se em maior ou menor grau, dependendo da latitude do local em questão. (Grimm, *Meteorologia Básica – Notas de Aula*).

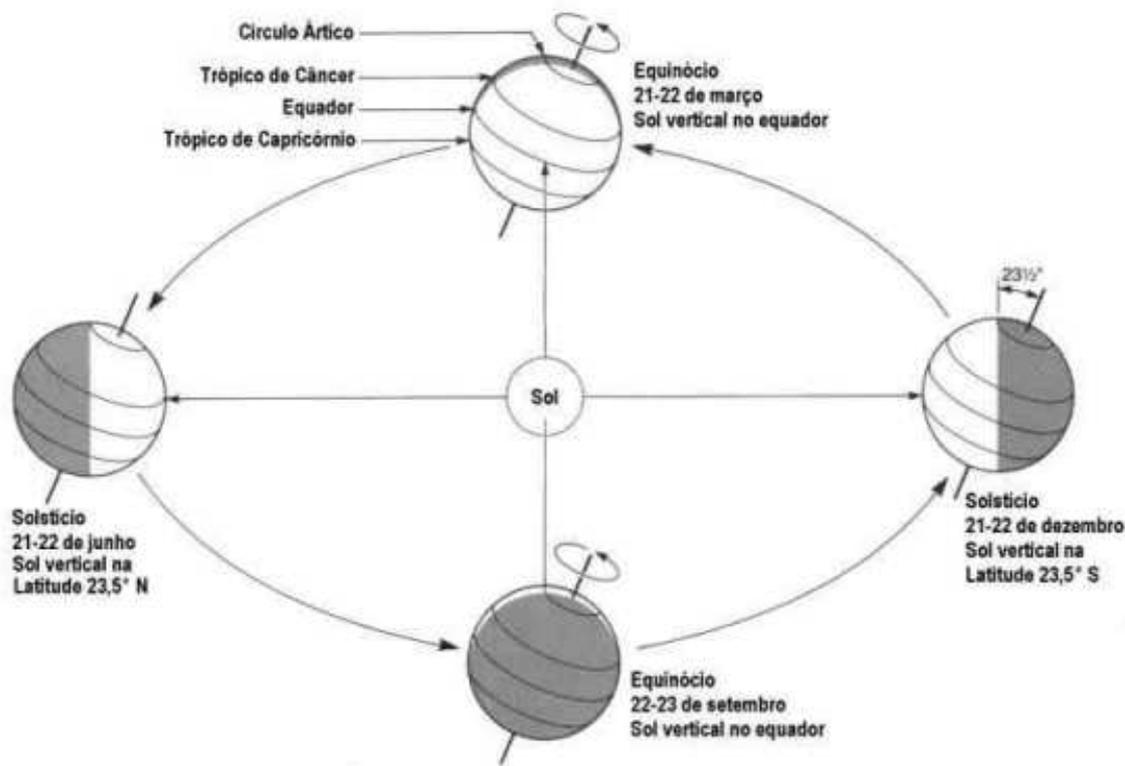


Figura 3.4 – O movimento de translação da Terra em torno do Sol e as estações do ano.

Fonte: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>.

Para referenciar a posição do Sol, juntamente com o azimute, pode-se utilizar o ângulo zenital solar, que é o ângulo entre o ponto mais alto do céu - o zênite - e o Sol, ao invés de utilizar a altura solar – o ângulo de elevação do Sol acima do horizonte. Assim, o ângulo zenital solar corresponde a 90° menos a altura solar.

Há quatro dias com especial significado na variação anual dos raios solares em relação à Terra, Figura 3.6:

- No dia 21 (ou 22) de Dezembro, os raios solares incidem verticalmente – altura solar de 90° ou ângulo zenital solar de 0° – no Trópico de Capricórnio, latitude $23^\circ 27' S$. Este é o solstício de verão para o Hemisfério Sul ou solstício de inverno para o Hemisfério Norte.
- Em 21 (ou 22) de Junho, eles incidem verticalmente no Trópico de Câncer, latitude $23^\circ 27' N$. Este é o solstício de inverno para o Hemisfério Sul ou solstício de verão para o Hemisfério Norte.
- A meio caminho entre os solstícios ocorrem os equinócios, com dias e noites de igual duração. Nestas datas os raios verticais do Sol atingem o Equador, latitude 0° .

Os equinócios de primavera e outono para Hemisfério Sul, ou outono e primavera para o Hemisfério Norte, ocorrem respectivamente em 22 (ou 23) de Setembro e 21 (ou 22) de Março. (Grimm, *Meteorologia Básica – Notas de Aula*).

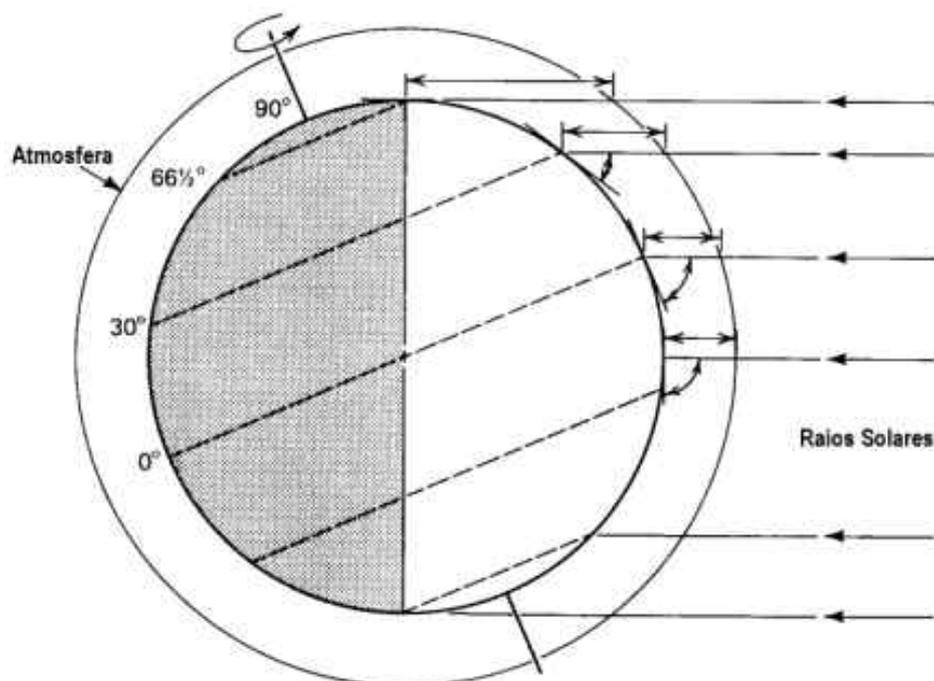


Figura 3.5 – Variação da altura solar com a latitude.

Fonte: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>.

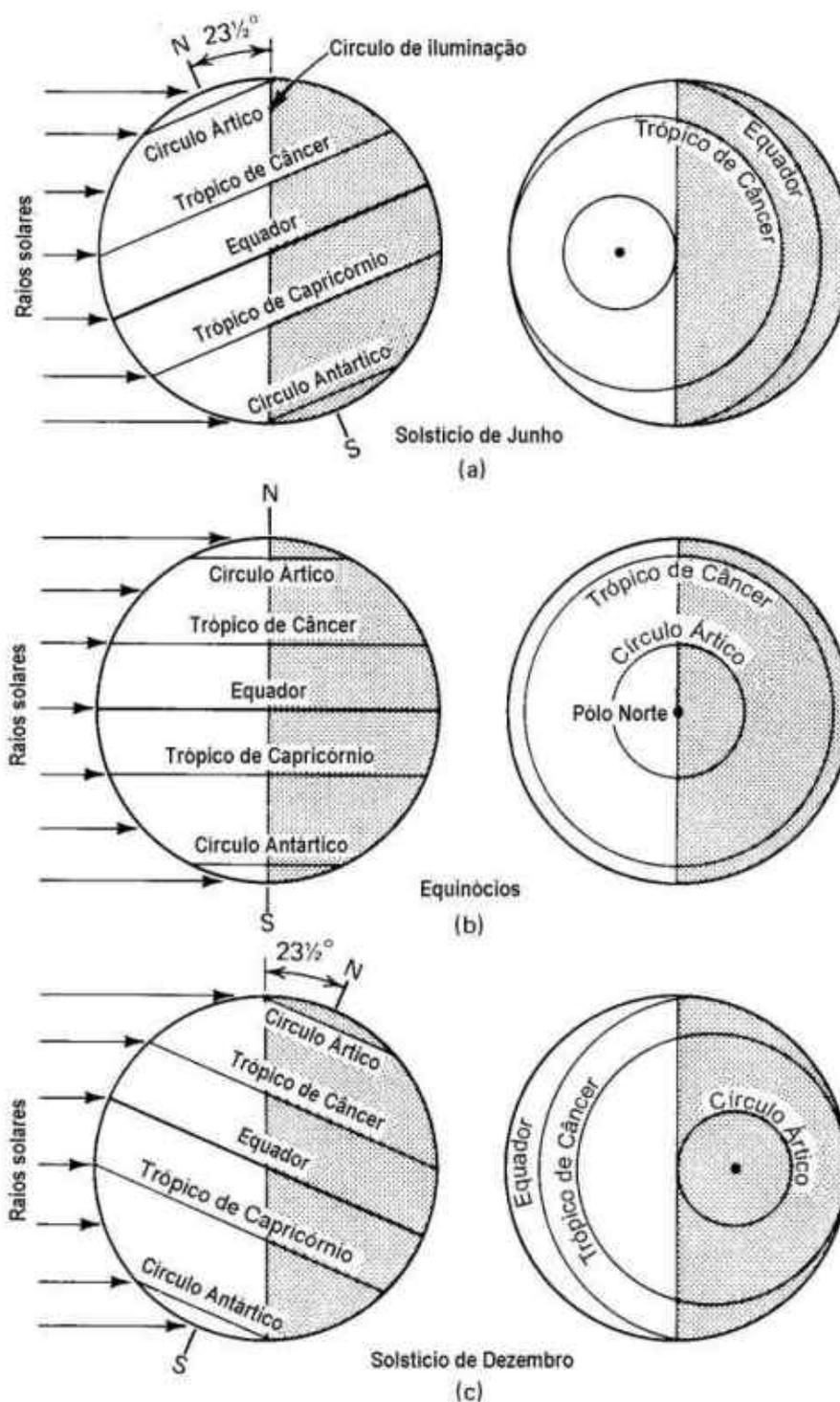


Figura 3.6 – Características dos solstícios e equinócios da Terra.

Fonte: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>.

A distância entre a Terra e o Sol, referenciada por d , pode ser determinada com considerável precisão através da relação de Spencer, apresentada na equação 3.1.

$$\left(\frac{d_m}{d}\right)^2 = 1,000110 + 0,34221 \cos \Gamma + 0,001280 \sin \Gamma + \\ + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma \quad \text{Eq. (3.1)}$$

Onde d_m é a distância média entre a Terra e o Sol e Γ é o ângulo diário (*day angle*), dado pela equação 3.2, sendo d_j o dia juliano.

$$\Gamma = \frac{2\pi(d_j - 1)}{365} \quad \text{Eq. (3.2)}$$

Outras definições geométricas que se fazem necessárias são a declinação solar δ , que representa o ângulo entre o plano da órbita da Terra em torno do Sol e o plano definido pela linha do Equador, o ângulo zenital solar θ_s , que é o ângulo entre o zênite e a posição do Sol em um dado momento, e o ângulo horário do nascer e pôr do Sol h_0 . Essas três quantidades estão expressas nas equações 3.3, 3.4 e 3.5, respectivamente.

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cos \Gamma + 0,001280 \sin \Gamma + \\ + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma \quad \text{Eq. (3.3)}$$

$$\cos \theta_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin(h_0) \quad \text{Eq. (3.4)}$$

$$\cos(h_0) = -\tan \varphi \tan \delta = -\frac{\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} \quad \text{Eq. (3.5)}$$

3.3 – Leis da Radiação para Corpos Negros

Conforme mencionado anteriormente (Seção 3.1), o Sol emite um espectro contínuo de radiação semelhante a da radiação de um corpo negro a 6000 K (5777 K, segundo alguns autores). 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, Figura 3.8, 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 a uma temperatura absoluta T é expressa pela equação 3.6.

$$E_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{(e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad \text{Eq. (3.6)}$$

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 ($k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$); λ é o comprimento de onda da radiação e T é a temperatura do corpo.

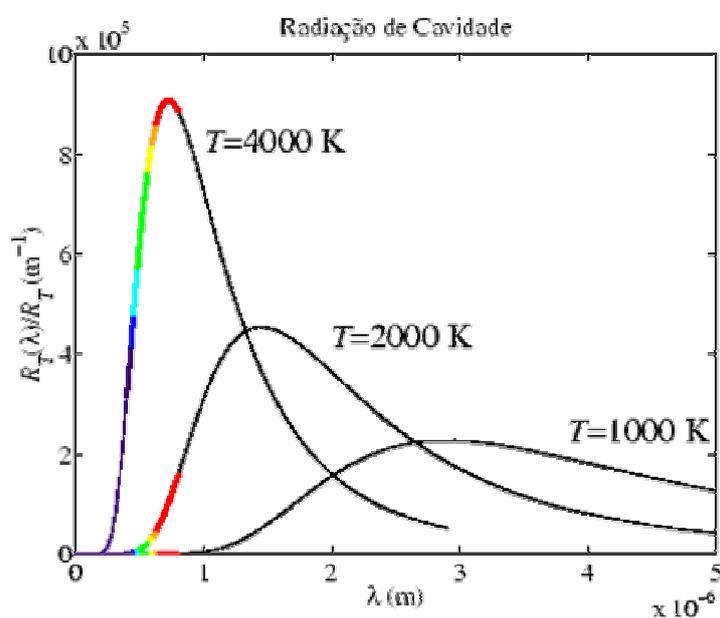


Figura 3.7 – Radiação de corpo negro em função do comprimento de onda.

Fonte: <http://www.plato.if.usp.br/2-2003/fnc0375n/aula1/node1.html>.

Integrando a equação 3.6 sobre todos os comprimentos de onda, obtém-se a Lei de Stefan-Boltzmann, dada pela equação 3.7.

$$R = \sigma T^4 \quad \text{Eq. (3.7)}$$

A partir do gráfico da Figura 3.6, é possível notar que o comprimento de onda da máxima emissividade de um corpo negro aumenta de forma linear com a frequência da radiação. Esta é conhecida como lei do Deslocamento de Wien, expressa na equação 3.8.

$$\lambda_m = \frac{2897}{T} \quad \text{Eq. (3.8)}$$

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 concluir que a temperatura de corpo negro do Sol é aproximadamente 5777 K .

3.4 – A Atmosfera Terrestre

A atmosfera terrestre é constituída por um grupo de gases com concentração praticamente constante e outro grupo com concentração variável. A fração seca da atmosfera (sem vapor d'água) é formada por 99% de Nitrogênio (N_2) e Oxigênio (O_2) e de 1% de Argônio e outros gases. Os demais constituintes gasosos da atmosfera são os chamados gases-traço, que apesar de sua baixa concentração são importantes nos processos radiativos. (Wallace & Hobbs, 2006).

O dióxido de carbono (CO_2), embora constitua apenas 0,03% da atmosfera da Terra, é essencial para a fotossíntese, além de participar do efeito estufa, propiciando a estabilidade da temperatura média da superfície terrestre. Isto se deve à propriedade do dióxido de carbono absorver radiação no infravermelho e reter parte desta energia, que seria perdida para o espaço, dentro do sistema Terra-Atmosfera. O percentual de dióxido de carbono vem crescente principalmente devido à ação antropogênica com a queima de biomassa e combustíveis fósseis como o carvão, o petróleo e o gás natural, intensificando o seu papel no efeito estufa, o que vem causando um desequilíbrio no sistema. (IPCC, 2007).

O vapor d'água é um dos constituintes mais variáveis na atmosfera. Nos trópicos pode representar mais do que 4% do volume da baixa atmosfera, enquanto que sobre os

desertos e regiões polares pode representar apenas 1%. O vapor d'água também tem grande capacidade de absorver a radiação disponível, tanto a de onda longa quanto algumas faixas do espectro solar. (Sokolik, 2008).

Outro importante gás na atmosfera é o ozônio (O_3), mesmo que apresente baixa concentração em relação a outros gases e de sua distribuição espacial e temporal não uniforme. O ozônio concentra-se majoritariamente entre 10 km e 50 km e é encontrado em quantidades em menores na baixa atmosfera entre o ar poluído das cidades onde é gerado principalmente por processos fotoquímicos entre a radiação solar e gases precursores como os óxidos de nitrogênio e os compostos orgânicos voláteis. (Andrade, 2006). Ele apresenta um pico de concentração em torno de 30 km na região da estratosfera, e sua distribuição também varia com a latitude, estação do ano, horário, padrões de tempo e variabilidade da atividade solar. A formação do ozônio na camada entre 10 km e 50 km é resultado de uma série de processos que envolvem a absorção da radiação solar e dissociação do oxigênio molecular em atômico após interação com a radiação solar na faixa do ultravioleta. (Sayao, 2008).

A atmosfera também mantém em suspensão partículas de aerossóis emitidas por fontes naturais e antropogênicas. Uma vez na atmosfera, elas podem participar de vários processos, de acordo com suas características físicas e morfológicas, como a formação de gotas de nuvens e nas interações com a radiação solar e terrestre. Com exceção do aerossol inserido na estratosfera, principalmente pela erupção de vulcões, os demais ficam confinados nas primeiras camadas mais densas da atmosfera, principalmente a troposfera. (IPCC, 2007).

3.5 – Interações da Radiação com a Atmosfera Terrestre

A radiação solar, após atingir o topo da atmosfera e penetrá-la, Figuras 3.8 e 3.10, sofre processos de absorção e o espalhamento (Liou, 1980). A Figura 3.9 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 H_2O , CO_2 , O_3 e O_2 (Robinson, 1966; Wallace e Hobbs, 1977;

Liou, 1980). Para comparação é apresentada uma curva de emissão de um corpo negro a 6000 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.

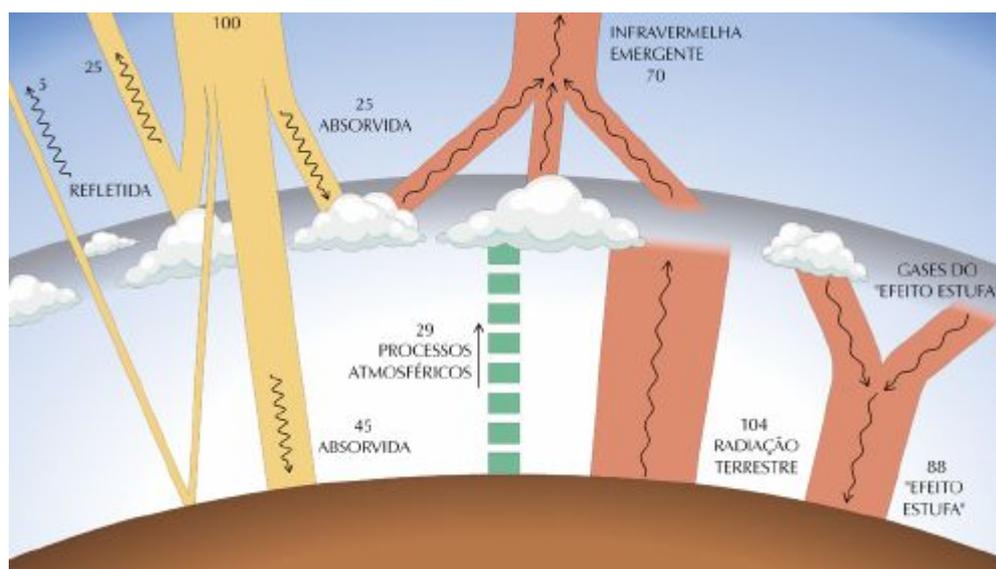


Figura 3.8 – Interações da radiação solar com os constituintes atmosféricos.

Fonte: Adaptado de (Gambi, 1998).

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 3.10.

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).

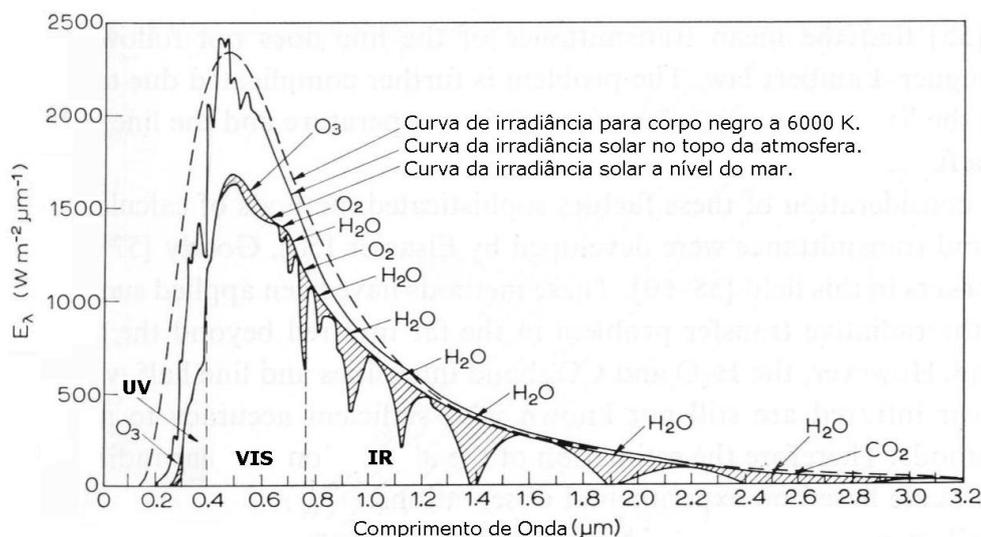


Figura 3.9 – Espectro solar no topo da atmosfera, comparado com o espectro de um corpo negro a 6000 K e com o espectro solar a nível do mar.

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).

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.

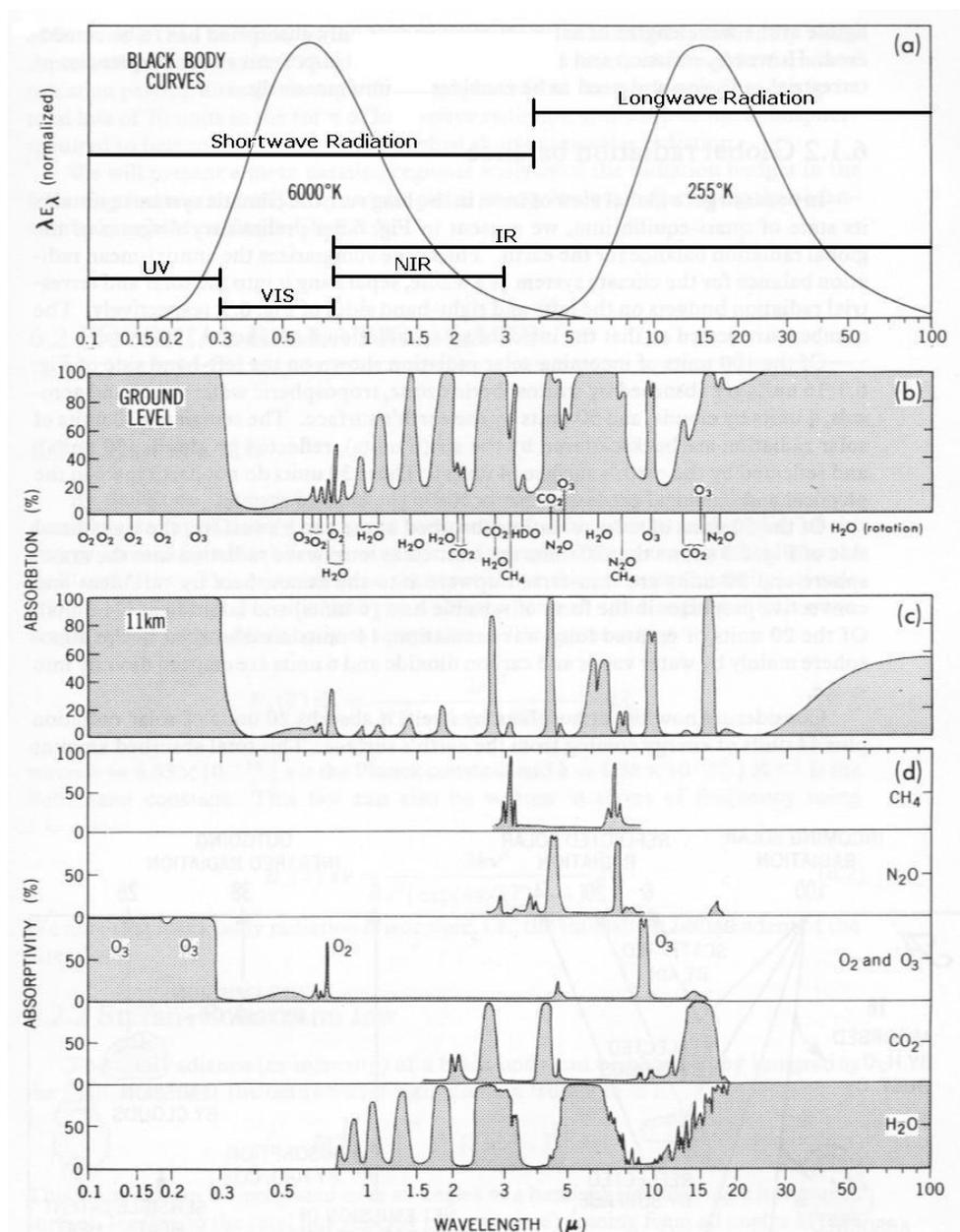


Figura 3.10 – (a) Curvas de corpo negro para a radiação solar (6000 K) e radiação terrestre (255 K). (b) Espectro de absorção para toda a extensão vertical da atmosfera. (c) Espectro de absorção para a atmosfera acima de 11 km. (d) Espectros de absorção para vários gases atmosféricos entre o topo da atmosfera e a superfície da Terra.

Fonte: Modificado de Peixoto e Oort (1992).

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 Planafattori 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.

3.5 – 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).

3.6 – 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/m² no sentido de favorecer o resfriamento. Esse efeito é diretamente comparável ao efeito dos chamados gases estufa antropogênicos, tais como CO₂, CH₄, N₂O, 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. (Guarnieri, 2006).

4.1 – Estações Coletoras de Dados do Projeto SONDA

O Projeto SONDA mantém em operação diversas estações coletoras de dados no território brasileiro. De um total de 25 estações planejadas, 15 já possuem seus dados disponíveis no endereço eletrônico <http://sonda.cptec.inpe.br/>.

O banco de dados da rede SONDA está dividido em dois grupos: dados ambientais, subdivididos em dados meteorológicos e dados solarimétricos, e dados eólicos.

De acordo com os sensores instalados em cada uma das estações, elas são classificadas em: estação de referência, dotada de um conjunto completo de sensores para medidas ambientais e eólicas, estação solar básica, estação solar avançada e estação eólica, conforme apresentado na Tabela 4.1.

| Dados Ambientais | Dados Eólicos |
|--------------------------------------|---|
| Periodicidade: de um em um minuto | Periodicidade: de dez em dez minutos |

| | |
|---|--|
| <p><i>Solarimétricos:</i></p> <p>Radiação Global Horizontal Radiação Difusa Radiação Direta Normal Radiação de Onda Longa Descendente Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) Iluminância (Lux)</p> | <p><i>Eólicos:</i></p> <p>Velocidade do Vento a 25 m Direção do Vento a 25 m</p> <p>Velocidade do Vento a 50 m Direção do Vento a 50 m</p> |
| <p><i>Meteorológicos:</i></p> <p>Temperatura do Ar (superfície) Umidade Relativa do Ar Pressão do Ar Precipitação de Chuva Velocidade do Vento a 10 m Direção do Vento a 10 m</p> | |

Tabela 4.1 – Classificação da base de dados do Projeto SONDA.

Para a execução das atividades relacionadas ao presente projeto de pesquisa, foram selecionadas oito estações coletoras de dados ambientais da rede SONDA, listadas na Tabela 4.2, juntamente com o período de dados utilizado. Apesar dos períodos de dados serem diferentes, foram realizadas parametrizações das medidas para que fosse eliminada a sazonalidade das mesmas, restando apenas as flutuações características dos dados, conforme melhor esclarecido adiante.

| <i>Estação SONDA</i> | <i>Período de dados</i> |
|--|-------------------------|
| Brasília (DF) 15°36' S, 47°43' O, 1023m | 08/2004 a 12/2006 |
| Campo Grande (MS) 20°26' S, 54°32' O, 677m | 01/2007 a 04/2008 |
| Florianópolis (SC) 27°36' S, 48°30' O, 12m | 08/2004 a 04/2005 |
| Natal (RN) 5°50' S, 35°12' O, 58m | 01/2007 a 04/2008 |
| Ourinhos (SP) 22°57' S, 49°54' O, 446m | 02/2006 a 05/2008 |
| Palmas (TO) 10°11' S, 48°22' O, 48m | 01/2006 a 08/2008 |
| Petrolina (PE) 09°04' S, 40°19', 387m | 07/2004 a 08/2007 |
| São Martinho da Serra (RS) 29°44' S, 53°48' O, 489m | 04/2006 a 11/2007 |

Tabela 4.2 – Estações do Projeto SONDA selecionadas para o projeto.

4.2 – Descrição dos Equipamentos SONDA

Nas seções subsequentes, são descritos os equipamentos instalados nas estações de referência do Projeto SONDA.

4.2.1 – Piranômetro CM 21 (Kipp&Zonen)

O Piranômetro CM 21 – “*CM 21 Pyranometer*” –, Figura 4.1, foi desenvolvido pela “*Kipp & Zonen*” para medida de radiação solar global, na faixa espectral de 0,3 a 2,8 μm , ou 300 a 2800 nm. Pode ser utilizado para medida de irradiância difusa – utilizando um ocultador do disco solar – ou para medida de radiação solar refletida pela Superfície Terrestre – quando instalado com o domo voltado para o chão. Este equipamento é empregado nas estações SONDA para medição da radiação solar global.



Figura 4.1 – Piranômetro CM 21 (Kipp&Zonen) e seu intervalo espectral.

Fonte: <http://www.kippzonen.com/>.

4.2.2 – Piranômetro CM 22 (Kipp&Zonen)

O Piranômetro CM 22, Figura 4.2, – “*CM 22 Pyranometer*” – foi especialmente desenvolvido pela “*Kipp & Zonen*” para medição de radiação solar difusa com alta precisão. Foi desenvolvido para servir como um instrumento de referência em calibrações. O CM 22 é considerado satisfatório para medidas de radiação global ou

refletida pela superfície – quando instalado com o domo voltado para o chão. Emprega domo interno e externo em quartzo tipo Infrasil, oferecendo transmissão espectral aumentada, em relação aos piranômetros com domos de vidro. Desta forma, mede radiação solar na faixa de 0,2 a 3,6 μm , ou 200 a 3600 nm. Apresenta reduzido efeito de infravermelho térmico sobre seu “*offset*” – “*thermal infrared offset effect*” – quando em condições de céu limpo. Este equipamento é empregado nas estações SONDA para medição da radiação solar difusa, fazendo uso de um ocultador do disco solar.



Figura 4.2 – Piranômetro CM 22 (Kipp&Zonen) e seu intervalo espectral.

Fonte: <http://www.kippzonen.com/>.

4.2.3 – LUX Lite (Kipp&Zonen)

O LUX Lite, Figura 4.3, foi especificamente projetado para medir luz visível, expressando o resultado em *lux*, isto é, iluminância. O filtro óptico e o foto-diodo reunidos no LUX Lite foram desenvolvidos para imitar a resposta espectral do olho humano dentro da região da luz visível, sob as condições naturais de ocorrência da luz do dia. O sensor gera um sinal, ou dado de saída, em milivolts, que é transmitido por um cabo de dados. Sua construção compacta e selada abriga um resistor embutido que auxilia no equilíbrio térmico do sensor.



Figura 4.3 – LUX Lite (Kipp&Zonen).

Fonte: <http://www.kippzonen.com/>.

4.2.4 – PAR Lite (Kipp&Zonen)

O PAR Lite, Figura 4.4, – “*PAR Lite Quantum Sensor*” – foi especificamente projetado para medir radiação PAR – “*Photosynthetically Active Radiation*” ou Radiação Fotossinteticamente Ativa – sob a ocorrência natural da luz do dia. O filtro óptico do sensor foi projetado para apresentar uma resposta na faixa de 400 a 700 nm, que é a mesma região espectral da radiação responsável por estimular a fotossíntese das plantas. O sensor gera um sinal de saída, em milivolts, transmitido por um cabo de dados. Sua construção compacta e selada abriga um resistor embutido que auxilia no equilíbrio térmico do sensor.



Figura 4.4 – PAR Lite e seu intervalo espectral.

Fonte: <http://www.kippzonen.com/>.

4.2.5 – Two Axis Positioner – tracker 2AP (Kipp&Zonen)

O 2AP – “*Two Axis Positioner*” ou Posicionador de Dois Eixos, Figura 4.5, – é um rastreador, ou “*tracker*”, como é comumente chamado. É um equipamento para posicionamento de sensores, usado para apontá-los com precisão para objetos celestes, como o Sol, a Lua, estrelas e satélites. O 2AP é um aparelho confiável e robusto, capaz de operar longos períodos em qualquer condição climática e ampla faixa de temperatura, rastreando a trajetória aparente do Sol com precisão. É capaz de apontar equipamentos de pequeno e médio tamanho.

A operação contínua é suportada por um microcomputador embutido no 2AP, que controla o mecanismo de dois eixos, para posicionamento azimutal e zenital. Uma interface serial permite comunicação com um computador externo. Possui comandos para uma ampla variedade de movimentos, incluindo opções para apontamento e rastreamento absoluto e relativo, e comandos para controle da velocidade e aceleração.



Figura 4.5 – Two Axis Positioner – 2AP (Kipp&Zonen).

Fonte: <http://www.kippzonen.com/>.

O 2AP opera conjuntamente com dois equipamentos de medida de radiação do Projeto SONDA: o Piranômetro CM22, que mede radiação solar difusa e o Pireliômetro NIP que mede a componente direta da radiação solar. O CM 22 faz uso de um braço com ocultador que é movido pelo 2AP, obstruindo o disco solar ao longo do dia. O Pireliômetro NIP move-se junto com o 2AP apontando o colimador diretamente para o Sol ao longo do dia.

4.2.6 – Pireliômetro NIP (Eppley Laboratory, Inc.)

O NIP – “*Normal Incidence Pyrheliometer*” ou Pireliômetro de Incidência Normal, Figura 4.6, – é um pireliômetro de primeira classe segundo as normas da WMO – “*World Meteorological Organization*” ou Organização Mundial de Meteorologia – projetado para medir a radiação solar direta em um plano normal à incidência da radiação. Trata-se portanto, da medida da irradiância direcional.

O pireliômetro NIP incorpora uma termopilha como elemento sensor na base de um tubo. O interior do tubo de metal é preto e o mesmo é preenchido com ar seco à pressão atmosférica em seu interior, sendo lacrado na extremidade de visualização por uma janela de 1 mm de espessura de quartzo tipo Infrasil II. Assim, a luz do Sol entra pela janela e atravessa o tubo, que atua como um colimador de luz, atingindo a termopilha na extremidade oposta do tubo. O equipamento é acompanhado por um círculo que pode ser girado manualmente, selecionando alguma das três aberturas que permitem instalação de filtros ou a abertura livre. O sinal de saída do sensor é dado em voltagem, convertida para a unidade de W/m^2 . O equipamento será acoplado ao “*Tracker 2AP*” para apontar para o Sol ao longo do dia.



Figura 4.6 – Pireliômetro NIP (Eppley Lab., Inc.).

Fonte: <http://www.eppleylab.com/>.

4.2.7 – Pirgeômetro PIR (Eppley Laboratory, Inc.)

O PIR – “*Precision Infrared Radiometer*” ou Radiômetro de Infravermelho de Precisão, Figura 4.7, – é um pirgeômetro, isto é, mede radiação de onda longa, ou

radiação terrestre. É projetado para operação unidirecional na medida, separadamente, de radiação terrestre que atinge ou que é emitida pela Superfície Terrestre. Para a medida de ambas - a radiação emitida e que atinge a superfície - seriam necessários dois equipamentos, um com o domo voltado para baixo e outro com o domo voltado para cima. É empregado nas estações SONDA para medida de radiação de onda longa descendente.

O pirgeômetro PIR compreende uma *termopilha* – elemento sensor – capaz de resistir fortes vibrações mecânicas e impactos.



Figura 4.7 – Pirgeômetro PIR (Eppley Lab., Inc.).

Fonte: <http://www.eppleylab.com/>.

A separação da radiação de onda longa da radiação de onda curta no período de dia é realizada pelo uso de um domo de silicone. A superfície interna do domo possui um filtro de interferência, depositado à vácuo, com uma faixa de transmissão de aproximadamente 3,5 a 50 μm . O sinal de saída do sensor é dado em voltagem, convertida para a unidade de W/m^2 .

4.2.8 – Sensor de Temperatura/Umidade do Ar Model 41372 (R. M. Young, Co.)

O sensor modelo 41372 da “R. M. Young Company”, Figura 4.8, – “*Model 41372VC/VF Relative Humidity/Temperature Probe*” – combina um sensor de umidade de alta precisão e um sensor de temperatura em um único aparelho. O sinal de saída é em voltagem na faixa de 0-1 VDC para ambos os dados: umidade relativa e temperatura.



Model 41372 (c) 2001 R.M. Young Company

Figura 4.8 – Sensor temperatura/umidade do ar Model 41372 (R. M. Young, Co.).

Fonte: <http://www.campbellsci.ca/CampbellScientific/Catalogue/41372.html>

Para que haja precisão na medida de informações do ar, é sempre necessário instalar os sensores de temperatura e umidade com um acessório que os protege da radiação incidente - “*radiation shield*”. A não utilização de proteção contra radiação pode levar a consideráveis erros de medida, pois ao invés de se medir as propriedades do ar ambiente, se estará medindo as propriedades do ar próximo ao sensor, aquecido pelo próprio equipamento exposto à radiação incidente. Adicionalmente, estes protetores protegem os sensores de erros produzidos por precipitação. O sensor de temperatura e umidade relativa do ar Modelo 41372, assim como os sensores simples de temperatura – Modelo 41342, são facilmente instaláveis em protetores ventilados naturalmente, “*Gill Multi-Plate Radiation Shield Model 41002*”, ou com passagem forçada de ar, “*Gill Aspirated Radiation Shield Model 43408*”, produzidos pela mesma fabricante.

4.2.9 – Sensor da Temperatura do Ar Model 41342 (R. M. Young, Co.)

O sensor Modelo 41342 da “*R. M. Young Company*”, Figura 4.9, – “*Model 41342LC/LF Platinum Temperature Probe*”, constitui-se num sensor de temperatura de platina. O sinal de saída é em amperagem na faixa de 4-20 mA. Para que haja precisão

na medida da temperatura do ar, é necessária a instalação com acessório de proteção contra a radiação incidente – “*radiation shield*”. A não utilização de proteção contra radiação pode levar a consideráveis erros de medida.



Model 41342 (c) 2001 R.M. Young Company

Figura 4.9 – Sensor Temperatura do Ar Model 41342 (R. M. Young, Co.).

Fonte: <http://www.campbellsci.ca/CampbellScientific/Catalogue/41372.html>

O sensor de temperatura do ar Modelo 41342 é facilmente instalável em protetores ventilados naturalmente, “*Gill Multi-Plate Radiation Shield Model 41002*”, ou com passagem forçada de ar, “*Gill Aspirated Radiation Shield Model 43408*”, produzidos pela mesma fabricante.

4.2.10 – Sensor de Pressão Barométrica Vaisala PTB101

O sensor de pressão barométrica Vaisala PTB101, Figura 4.10, – “*Barometric Pressure Sensor*” mede pressão na faixa de 600 a 1060 mb, utilizando um sensor capacitivo. O sinal de saída é linear com a pressão, e varia de 0 a 2,5 VDC.



Model CS105 (c) 2001 Campbell Scientific (Canada) Corp.

Figura 4.10 – Sensor de Pressão Barométrica Vaisala PTB101.

Fonte: <http://www.campbellsci.ca/CampbellScientific/Catalogue/CS105.html>

4.2.11 – Anemômetro Modelo 05106 (R. M. Young, Co.)

O Anemômetro Modelo 05106, Figura 4.11, – “*Wind Monitor-MA Model 05106*” – da “*R. M. Young Company*”, mede a velocidade horizontal e a direção do vento. Foi originalmente desenvolvido para utilização em bóias marítimas, sendo robusto e resistente à corrosão, porém leve e preciso. O corpo do sensor, a hélice e outras partes, são moldados por injeção com plástico estabilizado, resistente à radiação ultravioleta.

O sensor mede velocidade de vento de 0 a 60 m/s, resistindo a rajadas de 100 m/s. O sinal de saída é uma corrente elétrica alternada senóide com frequência proporcional à velocidade do vento. Este sinal AC é induzido por seis pólos magnéticos montados na haste da hélice. A cada revolução da hélice são produzidas três ondas senoidais completas.

O anemômetro é instalado sobre uma haste vertical e move-se apontando sempre de frente para o vento. A direção do vento é determinada por um potenciômetro. Para uma voltagem constante de excitação aplicada ao potenciômetro, o sinal de saída é uma voltagem analógica diretamente proporcional ao ângulo azimutal.



Figura 4.11 – Anemômetro Modelo 05106 (R. M. Young, Co.).

Fonte: http://www.geneq.com/catalog/en/wind_mon_05103.html

4.3 – Qualificação dos Dados do Projeto SONDA

Antes de serem disponibilizados ao público em geral através do endereço eletrônico do Projeto SONDA (<http://www.sonda.cptec.inpe.br/>), os dados passam por um processo de qualificação com o objetivo de identificar dados suspeitos para reforçar sua confiabilidade ou até mesmo para servir de alerta para a manutenção dos equipamentos, muitas vezes instalados em áreas remotas.

Durante o processo de qualificação, os dados são sinalizados como suspeitos ou não, ficando a critério do pesquisador sua utilização. A sinalização é feita através de um código numérico de quatro dígitos armazenados em arquivos próprios (disponibilizados junto com os dados). Cada dado possui seu código sinalizador e cada arquivo de dados possui seu correspondente arquivo de qualificação.

O processo de qualificação dos dados de radiação solar baseia-se na estratégia de controle de qualidade de dados adotada pela BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*), enquanto para dados meteorológicos e eólicos são adotados os critérios de análise estabelecidos pela Webmet.com.

O processo de controle de qualidade é composto de 4 etapas sequenciais iniciadas com filtros mais grosseiros e concluídas com filtros mais refinados. Os algoritmos executados em cada uma das etapas adotam os seguintes critérios:

- 1 - Sinaliza o valor como suspeito quando fisicamente impossível;
- 2 - Sinaliza o valor como suspeito quando o evento é extremamente raro;

- 3 - Sinaliza o valor como suspeito quando inconsistente com medidas apresentadas por outras variáveis da mesma estação;
- 4 - Sinaliza o valor como suspeito caso a medida esteja inconsistente quando comparada com estimativas de modelos computacionais.

O procedimento 4 ainda não está sendo aplicado à base de dados SONDA.

O resultado de cada uma das etapas aplicadas no controle de qualidade é dado na forma de códigos numéricos, lidos da direita para a esquerda, que classificam os valores medidos de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 4.3.

| Código | Significado |
|--------|---------------------------------------|
| 0 | Nenhum procedimento foi executado |
| 2 | Dado suspeito de ser incorreto |
| 5 | Procedimento não pode ser executado |
| 9 | Dado de boa qualidade ou não suspeito |

Tabela 4.3 – Significado dos códigos de qualificação empregados na base de dados do Projeto SONDA.

Os códigos apresentados na Figura 4.12 representam três situações diferentes. No primeiro exemplo, o dado foi “aprovado” em todos os algoritmos. Nos outros dois exemplos, os dados foram sinalizados “suspeitos”, respectivamente, nos algoritmos 3 e 1.

Com o objetivo de facilitar a avaliação da qualidade de cada arquivo de dados, o Projeto SONDA disponibiliza, junto com cada arquivo de códigos de qualificação, gráficos do resultado da qualificação para cada mês, que permitem a visualização dos percentuais de aprovação em cada uma das etapas. Os gráficos relativos aos dados solares e meteorológicos da estação SONDA-SMS para o mês de maio de 2006 são apresentados como um exemplo na Figura 4.13.

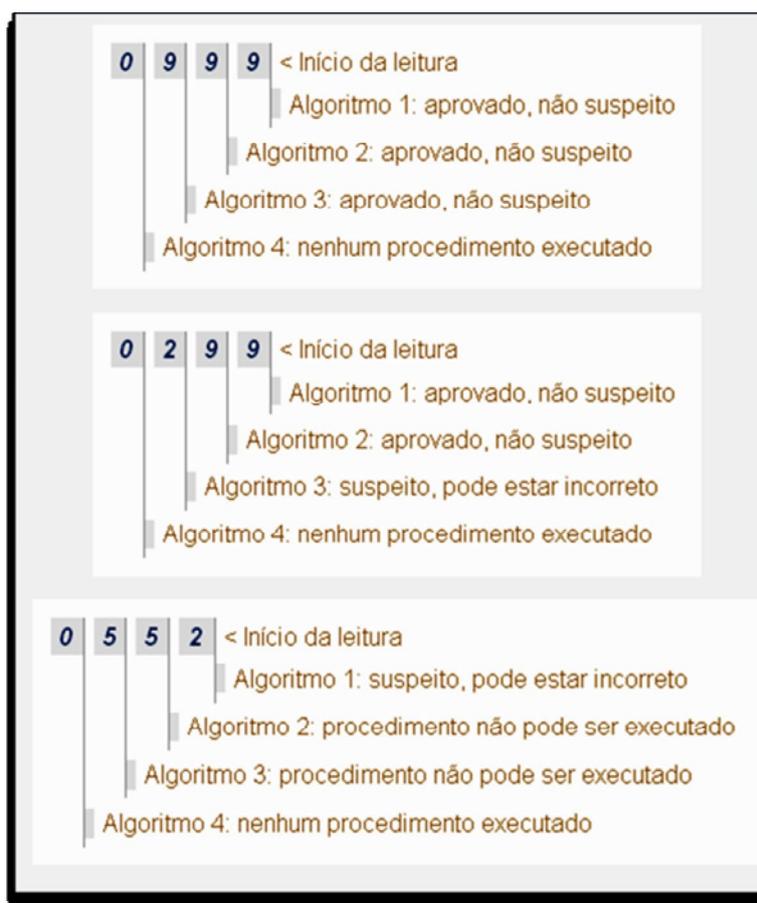


Figura 4.12 – Códigos de qualificação dos dados do Projeto SONDA para três diferentes situações.

Fonte: <http://www.cptec.inpe.br/sonda/infos/qualificacao.html#ddsolar>



Figura 4.13 – Gráficos contendo informações sobre a qualificação de dados da Estação SONDA – SMS no mês de maio de 2006.

Fonte: <http://www.cptec.inpe.br/sonda/basedados/dados/ambientais/SMS/2006/>.

4.4 – O Método dos Mínimos Quadrados para Ajuste Polinomial

Os modelos matemáticos apresentados no presente Relatório de Projeto de Iniciação Científica foram desenvolvidos através do emprego do Método dos Mínimos Quadrados para Ajuste Polinomial. A idéia básica do método é minimizar o quadrado da diferença entre as medidas e as estimativas de um modelo, ou seja, o quadrado da distância euclidiana entre essas duas quantidades tomando as mesmas como dois vetores de dados.

Partindo da equação 4.1 para ajuste polinomial, eleva-se ao quadrado a distância euclidiana mencionada e obtém-se a função F definida de acordo com a equação 4.2.

$$\phi = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n \quad \text{Eq. (4.1)}$$

onde ϕ é a função de ajuste, x é o vetor que contém todas as medidas do termo independente e a_0, a_1, \dots, a_n são os coeficientes do ajuste polinomial a serem determinados.

$$F(a_0, a_1, \dots, a_n) = \sum_{k=1}^m (\phi_k - y_k)^2 = \sum_{k=1}^m (a_0 + a_1x_k + a_2x_k^2 + \dots + a_nx_k^n - y_k)^2 \quad \text{Eq. (4.2)}$$

onde y_k e x_k representam um único valor para a ordenada e para a abscissa, respectivamente, e m é o número total de medidas que serão utilizadas no método.

Uma vez que a idéia é minimizar a função F , basta que se derive a mesma em relação aos coeficientes a_0, a_1, \dots, a_n , e separadamente se iguale as derivadas a zero.

$$\frac{\partial F}{\partial a_0} = 2 \cdot \sum_{k=1}^m (a_0 + a_1x_k + \dots + a_nx_k^n - y_k) \cdot (1) = 0 \quad \text{Eq. (4.3)}$$

$$\frac{\partial F}{\partial a_1} = 2 \cdot \sum_{k=1}^m (a_0 + a_1x_k + \dots + a_nx_k^n - y_k) \cdot (x_k) = 0 \quad \text{Eq. (4.4)}$$

$$\frac{\partial F}{\partial a_2} = 2 \cdot \sum_{k=1}^m (a_0 + a_1x_k + \dots + a_nx_k^n - y_k) \cdot (x_k^2) = 0 \quad \text{Eq. (4.5)}$$

⋮

$$\frac{\partial F}{\partial a_n} = 2 \cdot \sum_{k=1}^m (a_0 + a_1x_k + \dots + a_nx_k^n - y_k) \cdot (x_k^n) = 0 \quad \text{Eq. (4.6)}$$

Diante do que se tem nas equações de 4.3 a 4.6, obtém-se facilmente um sistema de equações para solução do problema.

$$a_0 \cdot m + a_1 \cdot \sum_{k=1}^m (x_k) + a_2 \cdot \sum_{k=1}^m (x_k^2) + \dots + \sum_{k=1}^m (x_k^n) = \sum_{k=1}^m (y_k) \quad \text{Eq. (4.7)}$$

$$a_0 \cdot \sum_{k=1}^m (x_k) + a_1 \cdot \sum_{k=1}^m (x_k^2) + a_2 \cdot \sum_{k=1}^m (x_k^3) + \dots + \sum_{k=1}^m (x_k^{n+1}) = \sum_{k=1}^m (x_k y_k) \quad \text{Eq. (4.8)}$$

⋮

$$a_0 \cdot \sum_{k=1}^m (x_k^n) + a_1 \cdot \sum_{k=1}^m (x_k^{n+1}) + a_2 \cdot \sum_{k=1}^m (x_k^{n+2}) + \dots + \sum_{k=1}^m (x_k^{n+n}) = \sum_{k=1}^m (x_k^n y_k) \quad \text{Eq. (4.9)}$$

A solução do sistema apresentado nas equações de 4.7 até 4.8 resulta nos coeficientes a_0, a_1, \dots, a_n do ajuste polinomial. O método de solução do sistema de equações utilizado foi o de Gauss com Pivoteamento.

Abaixo é apresentado o código computacional, escrito em linguagem FORTRAN 77, implementado para ajuste polinomial.

```
* -----
*      PROGRAMA PARA AJUSTE POLINOMIAL
* -----
* -----
*  DECLARAÇÃO DAS VARIÁVEIS E ENTRADA DOS DADOS:
* -----
CHARACTER(LEN=30)ARQ,MANTER
REAL A(11,12),X(1000000),Y(1000000),SOLN(11)
INTEGER DROWS,DCOLS,PIVOT
PRINT*,"ESCREVA O ARQUIVO PARA LEITURA DOS DADOS"
READ*,ARQ
OPEN(1,FILE=ARQ,STATUS="OLD")
PRINT*
PRINT*,"ESCREVA O NÚMERO DE DADOS PRESENTES NO ARQUIVO"
READ*,M
DO I=1,M
  READ(1,*),X(I),Y(I)
END DO
PRINT*
PRINT*,"ESCREVA A ORDEM DO POLINÔMIO DE APROXIMAÇÃO POR
MMQ (MAX 11)"
READ*,N
* -----
*  DEFINIÇÃO DA MATRIZ DE COEFICIENTES PARA GAUSS:
* -----
DO I=1,N+1
  DO J=1,N+1
    A(I,J)=0.
    DO K=1,M
      A(I,J)=A(I,J)+X(K)**(J-1)*X(K)**(I-1)
```

```
END DO
END DO
END DO
DO I=1,N+1
A(I,N+2)=0.
DO K=1,M
A(I,N+2)=A(I,N+2)+Y(K)*X(K)**(I-1)
END DO
END DO
* -----
* IMPRESSÃO DA MATRIZ DE COEFICIENTES PARA GAUSS:
* -----
PRINT*
PRINT*, "MATRIZ RESULTANTE:"
DO I=1,N+1
PRINT*,(A(I,J),J=1,N+2)
END DO
* -----
* RESOLUÇÃO DO SISTEMA EMPREGANDO GAUSS COM PIVOTEAMENTO:
* -----
NG=N+1
PIVOT=1
DROWS=11
DCOLS=12
DO IJ=1,NG-1
CALL ORDER(A,DROWS,DCOLS,NG,PIVOT)
CALL ELIM(A,DROWS,DCOLS,NG,PIVOT)
PIVOT=PIVOT+1
END DO
CALL BACKSB(A,DROWS,DCOLS,NG,SOLN)
PRINT*
PRINT*, 'SOLUÇÃO DO SISTEMA:'
PRINT*
DO I=1,NG
PRINT 15,I,SOLN(I)
15  FORMAT(1X,'VARIÁVEL ',I2,' = ',F7.3)
END DO
READ*,MANTER
END
* -----
* SUBROTINA ELIM:
* -----
SUBROUTINE ELIM(A,DROWS,DCOLS,NG,PIVOT)
INTEGER DROWS,DCOLS,PIVOT,ROW,COL
REAL A(DROWS,DCOLS),FACTOR
DO ROW=PIVOT+1,NG
FACTOR=A(ROW,PIVOT)/A(PIVOT,PIVOT)
A(ROW,PIVOT)=0.0
DO COL=PIVOT+1,NG+1
```

```
A(ROW, COL)=A(ROW, COL)-A(PIVOT, COL)*FACTOR
END DO
END DO
RETURN
END
* -----
* SUBROTINA BACKSB:
* -----
SUBROUTINE BACKSB(A,DROWS,DCOLS,NG,SOLN)
INTEGER DROWS,DCOLS,NG,ROW,COL
REAL A(DROWS,DCOLS),SOLN(DROWS)
DO ROW=NG,1,-1
DO COL=NG,ROW+1,-1
A(ROW,NG+1)=A(ROW,NG+1)-SOLN(COL)*A(ROW,COL)
END DO
SOLN(ROW)=A(ROW,NG+1)/A(ROW,ROW)
END DO
RETURN
END
* -----
* SUBROTINA ORDER:
* -----
SUBROUTINE ORDER(A,DROWS,DCOLS,NG,PIVOT)
INTEGER DROWS,DCOLS,ROW,RMAX,PIVOT
REAL A(DROWS,DCOLS),TEMP
RMAX=PIVOT
DO ROW=PIVOT+1,NG
IF(ABS(A(ROW,PIVOT)).GT.ABS(A(RMAX,PIVOT)))RMAX=ROW
END DO
IF(RMAX.NE.PIVOT)THEN
DO K=1,N+1
TEMP=A(RMAX,K)
A(RMAX,K)=A(PIVOT,K)
A(PIVOT,K)=TEMP
END DO
END IF
RETURN
END
```

4.5 – Análise de Dados de Irradiação Solar

Os sensores para medida de irradiância solar global e suas componentes direta e difusa, assim como os sensores de radiação PAR e iluminância, coletam dados a cada segundo, armazenando a média para o minuto, o que totaliza 1440 medidas diárias. Essas medidas, integradas ao longo do período de um dia, fornecem a quantidade de

energia que atinge a superfície, a irradiação, expressa em Jm^{-2} (Joules por metro quadrado). As integrais das irradiâncias solar global e difusa serão representadas apenas por H e H_d , respectivamente.

No entanto, o Pireliômetro NIP mede a irradiância solar direta em um plano normal à direção de incidência da radiação, enquanto que os piranômetros medem a irradiância solar em um plano horizontal, independente da direção de incidência. Desta forma, faz-se necessária uma correção para a irradiância solar direta normal, o que é feito multiplicando-se os seus valores instantâneos (a média para os minutos) pelo cosseno do ângulo zenital, definido de acordo com a equação 3.4. As Figuras 4.12 e 4.13 representam gráficos com ambas as situações: o primeiro apresenta a irradiância solar direta normal e o segundo a irradiância solar direta corrigida, isto é, horizontal.

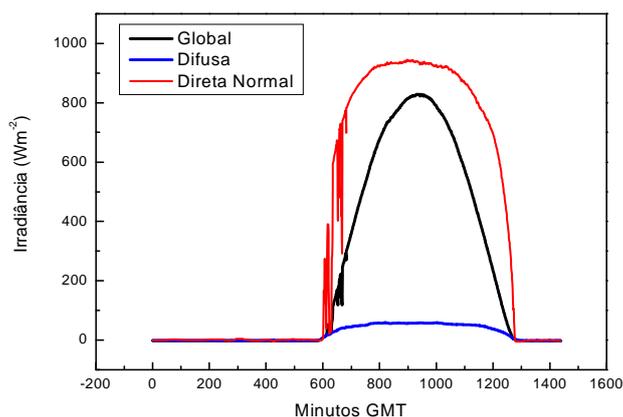


Figura 4.12 – Gráfico comparando as medidas de irradiância solar global e difusa horizontais com as medidas de irradiância solar direta normal coletadas no Observatório Espacial do Sul, São Martinho da Serra – RS, no dia 28/08/2007.

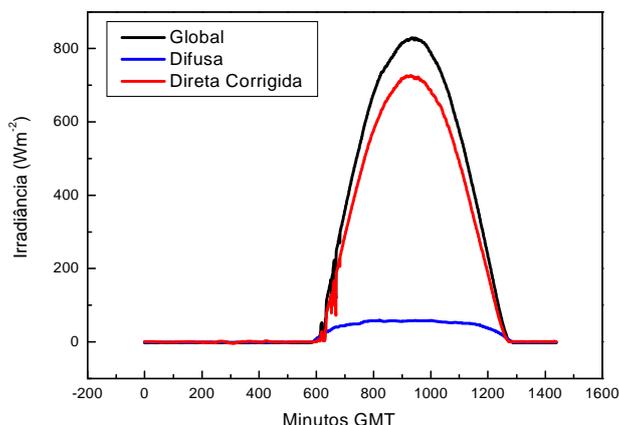


Figura 4.13 – Comparação entre as irradiâncias medidas em São Martinho da Serra – RS, em 28/08/2007, com a irradiância solar direta corrigida.

A irradiação solar total que atinge o topo da atmosfera (TOA) durante o período de um dia, aqui referenciada por H_0 , pode ser calculada através da equação 4.1.

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

Onde I_{sc} é a constante solar, cujo valor é de aproximadamente 1368 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; φ representa a latitude do sítio em questão; e δ 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).

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

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, conforme apresentado nas Figuras de 4.14 a 4.16.

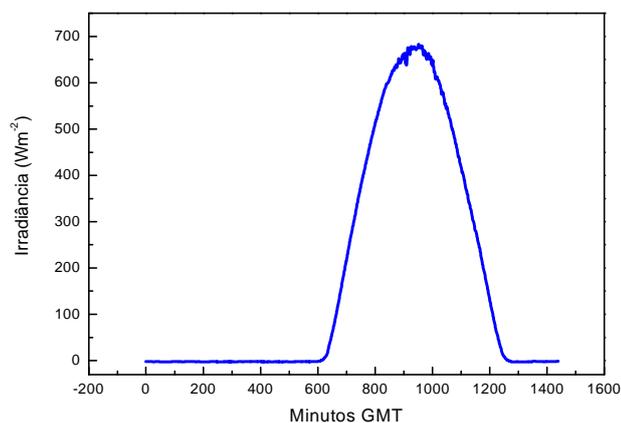


Figura 4.14 – Irradiância solar global para um dia com céu limpo (SMS – 01/08/2007).

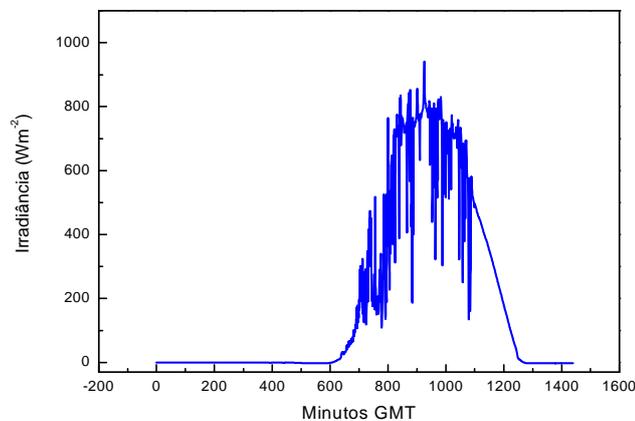


Figura 4.15 – Irradiância solar global para um dia com céu parcialmente nublado (SMS – 07/08/2007).

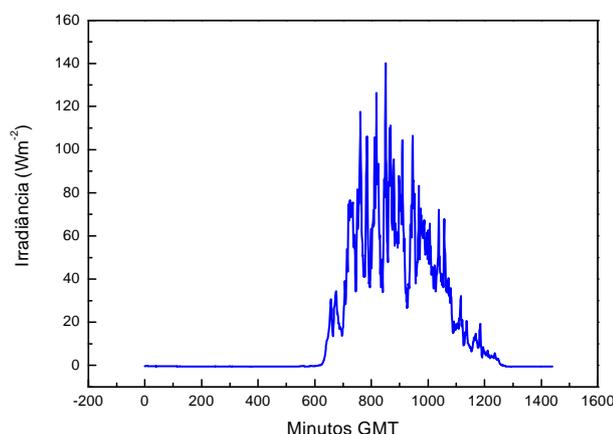


Figura 4.16 – Irradiância solar global para um dia completamente nublado (SMS – 03/08/2007).

Além do índice de nebulosidade K_t , são definidos os parâmetros K e K_d , 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).

$$K = \frac{H_d}{H} \qquad K_d = \frac{H_d}{H_0} \qquad \text{Eq. (4.3)}$$

Utilizando as equações (4.2) e (4.3), Ruth e Chant (1976), desenvolveram um modelo empírico para estimativa de K a partir de K_t , aqui denotado por RC e apresentado na equação (4.4), analisando dados coletados em estações solarimétricas do Canadá. Collares – 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).

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

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

Para a validação dos modelos matemáticos, 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. O desvio estatístico MBE, também conhecido como desvio médio (ou bias), fornece informações principalmente sobre a generalidade das estimativas de um modelo quanto à superestimativa ($MBE > 0$) ou subestimativa ($MBE < 0$) das medidas. Para obter informações sobre a real confiabilidade das estimativas de um modelo, o desvio estatístico RMSE é mais adequado.

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 radiativa, conforme o que é apresentado 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/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, 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 um papel, visto que os mesmos são feitos de cristal. A presença de sujeira sobre os medidores pode ocasionar medições inferiores às reais, já que a sujeira absorve e espalha parte da radiação incidente.

O espelho convexo do Imageador necessita de um tratamento adicional, limpa-se o espelho com flâmula embebida em líquido específico para limpeza de vidros, e cera automotiva para polimento, uma vez que sujeiras podem ser confundidas com nuvens.

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/INPE – MCT. Os dados ambientais são coletados a cada segundo, sendo a saída dos dados armazenada por valores médios, máximos, mínimos e desvio padrão do minuto. 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), localizado no Prédio Sede do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/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 Observatório Espacial do Sul, e devem ser copiadas para dispositivos USB de memória Flash ou CDs para sua transferência para o banco de dados do LRER.

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.

5.4 – Acompanhamento da Visita Técnica de Engenheiros do Projeto SONDA ao Observatório Espacial do Sul

Durante o período de 11 a 14 de fevereiro de 2009, o acadêmico, juntamente com os seus colegas do Laboratório de Recursos de Energia Renováveis – LRER/CRS/INPE – MCT – Rodrigo Brackmann (acadêmico do curso de Engenharia Química) e Daniel Vinicius Fiorin (formando do curso de Engenharia Química e estagiário do CRS/INPE – MCT naquele período), acompanhou a visita técnica dos engenheiros Msc. Sylvio Mantelli Neto (LEPTEN/UFSC) e Jorge Luiz Nogueira (LIM/CPTEC/INPE – MCT) ao Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCT com o objetivo de realizar substituição e instalação de equipamentos na Estação SONDA – SMS.

Os visitantes promoveram a substituição dos 3 anemômetros modelo 05106 (R. M. Young Company) instalados na torre anemométrica, bem como a substituição de seus cabos elétricos. O sensor de temperatura e umidade modelo 41372 (R. M. Young Company) foi substituído pelo sensor modelo 41382 da mesma fabricante.

Na ocasião, foi instalado um Pluviômetro (*Sutron modelo 5600-040-L*) no solo, com o topo do equipamento a 1,50 m do chão (segundo normas de instalação), no caminho entre a plataforma com os sensores solares e meteorológicos e a torre anemométrica.

Os alunos receberam treinamento dos visitantes, debatendo detalhes técnicos sobre a instalação dos sensores, as formas de medição dos sensores, tópicos de radiação solar e ventos, condições para operação das estações SONDA, e sobre a rotina de operação e manutenção da estação SONDA – SMS.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

O presente Capítulo encontra-se dividido em duas partes: uma referente à primeira etapa do Projeto de Pesquisa, elaborada no período de Agosto de 2007 a Julho de 2008, e a outra referente à segunda etapa, elaborada no período de Agosto de 2008 a Julho de 2009.

6.1 – Primeira Etapa

Utilizando medidas de irradiação solar compreendidas no período de Agosto de 2004 (início de operação da Estação SONDA – SMS) a dezembro de 2007, foram calculados os valores dos parâmetros K_t , K e K_d 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 K_t são apresentados no gráfico da Figura 6.1. Conjuntamente, são apresentadas as curvas dos modelos empíricos RC e CPR para comparação.

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 K_t é superior a 0,7. Nesse intervalo ($K_t > 0,7$), ambos os modelos superestimam as medidas.

Utilizando dados coletados na Estação SONDA do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/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.

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

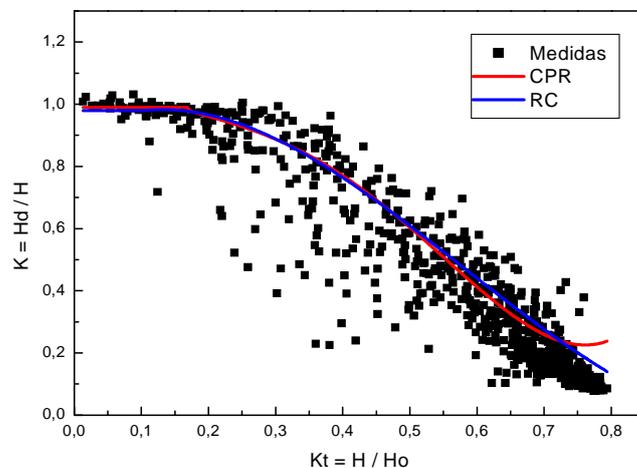


Figura 6.1 – Dispersão dos valores de K medidos no Observatório Espacial do Sul em comparação com os modelos empíricos CPR e RC.

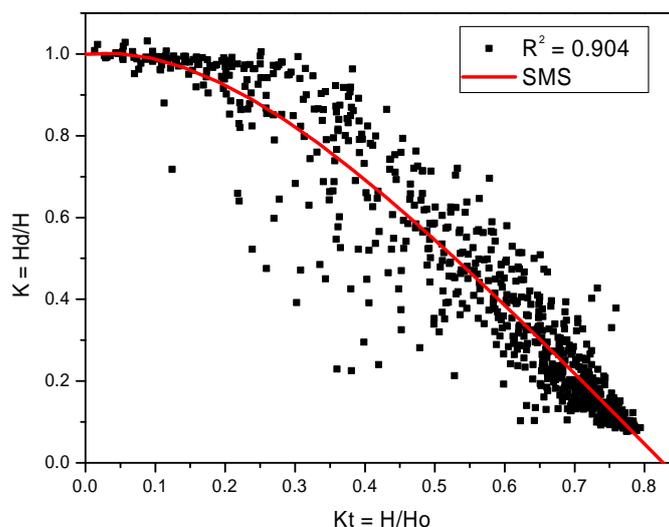


Figura 6.2 – Modelo SMS desenvolvido no Laboratório de Recursos de Energias Renováveis do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, em Santa Maria – RS, a partir de medidas realizadas no Observatório Espacial do Sul.

O modelo empírico SMS desenvolvido a partir dos parâmetros de radiação solar K_t 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 $K_t > 0,7$ o modelo SMS diferencia-se por ser o único a conseguir prever o comportamento do parâmetro K .

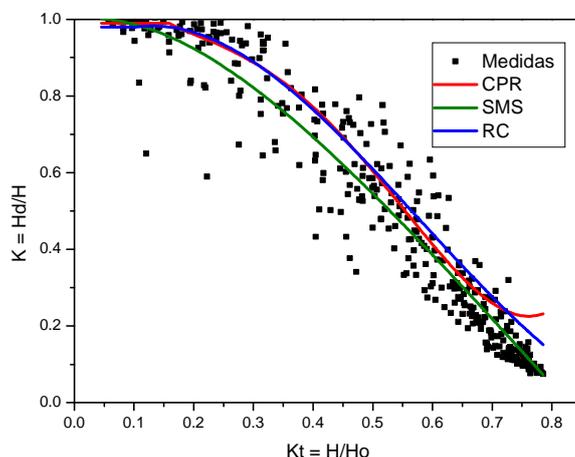


Figura 6.3 – Dispersão dos parâmetros de radiação solar durante o cálculo dos desvios estatísticos MBE e RMSE para os modelos empíricos CPR, RC e SMS.

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 porcentagem. 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 | BEM% | 14,06 | 11,20 | 11,69 | 3,30 |
| | RMSE% | 23,88 | 23,24 | 19,26 | 13,26 |
| RC | BEM% | 13,14 | 12,72 | 13,18 | 3,25 |
| | RMSE% | 21,94 | 23,15 | 20,34 | 12,55 |
| SMS | BEM% | 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 K_t são superiores a 0.7, principalmente o modelo CPR. Provavelmente ambos os modelos foram desenvolvidos em regiões onde os valores de K_t 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 $K_t > 0.7$, 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 % |
| 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.

6.2 – Segunda Etapa

Com a totalidade dos dados de irradiação solar coletados pelas estações do Projeto SONDA listadas na Tabela 6.4, foram calculados os desvios estatísticos MBE e RMSE com relação às estimativas fornecidas pelo modelo SMS. Os resultados são apresentados na Tabela 6.5.

| <i>Estação SONDA</i> | <i>Período de dados</i> |
|---|-------------------------|
| Brasília (DF) 15°36' S, 47°43' O, 1023m | 08/2004 a 12/2006 |
| Campo Grande (MS) 20°26' S, 54°32' O, 677m | 01/2007 a 04/2008 |
| Florianópolis (SC) 27°36' S, 48°30' O, 12m | 08/2004 a 04/2005 |
| Natal (RN) 5°50' S, 35°12' O, 58m | 01/2007 a 04/2008 |
| Ourinhos (SP) 22°57' S, 49°54' O, 446m | 02/2006 a 05/2008 |
| Palmas (TO) 10°11' S, 48°22' O, 48m | 01/2006 a 08/2008 |
| Petrolina (PE) 09°04' S, 40°19', 387m | 07/2004 a 08/2007 |

Tabela 6.4 – Período de dados utilizado de cada estação do Projeto SONDA.

| | <i>MBE [%]</i> | <i>RMSE [%]</i> |
|----------------------------|----------------|-----------------|
| <i>Brasília (BRA)</i> | 1,58 | 21,99 |
| <i>Campo Grande (CPG)</i> | 15,02 | 24,63 |
| <i>Florianópolis (FLP)</i> | -2,05 | 18,25 |
| <i>Natal (NAT)</i> | -1,36 | 17,06 |
| <i>Ourinhos (ORN)</i> | 19,98 | 30,02 |
| <i>Palmas (PLM)</i> | 23,85 | 32,23 |
| <i>Petrolina (PTR)</i> | 13,69 | 23,23 |

Tabela 6.5 – Desvios estatísticos entre as estimativas do modelo SMS e os dados coletados em cada uma das estações do Projeto SONDA selecionadas.

As estimativas do modelo SMS aplicadas aos dados das estações do rede SONDA são apresentadas nas Figuras de 6.4 até 6.10.

Uma análise geral dos desvios estatísticos permite a percepção de que o modelo SMS subestima as medidas para as estações de Florianópolis e Natal ($MBE < 0$), ambas localizadas em regiões litorâneas. Os menores desvios MBE são apresentados para as estações de Brasília, Florianópolis e Natal, fato que pode ser observado nas Figuras 6.4, 6.6 e 6.7, onde se vê uma distribuição quase simétrica das medidas entre as regiões superior e inferior à curva do modelo SMS.

Os menores desvios RMSE são apresentados pelas estações de Natal, Florianópolis e Brasília, para as quais o modelo SMS pode ser considerado bom em suas estimativas. O modelo SMS superestima as medidas em praticamente todos os intervalos de K_t para as estações de Campo Grande, Ourinhos e Palmas, tornando-se inviável sua aplicação a estas estações, conforme se percebe pelos altos desvios estatísticos calculados. Para a estação de Petrolina o modelo SMS apresenta bom comportamento no intervalo de $K_t < 0.4$, que representa dias completamente encobertos a parcialmente nublados, porém passa a superestimar as medidas para $K_t > 0.4$.

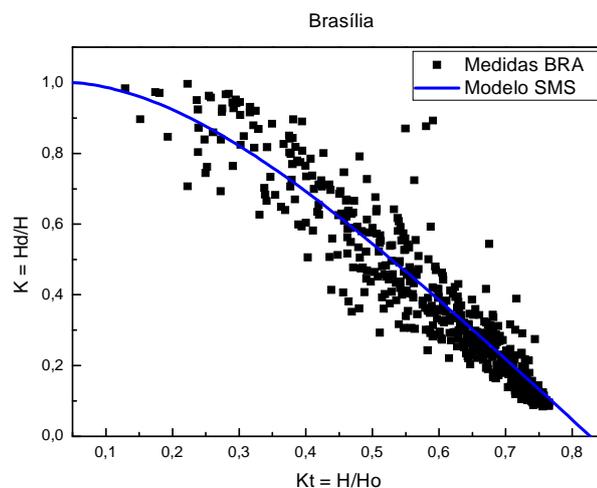


Figura 6.4 – Dispersão das medidas coletadas na estação SONDA de Brasília, juntamente com as estimativas do modelo SMS.

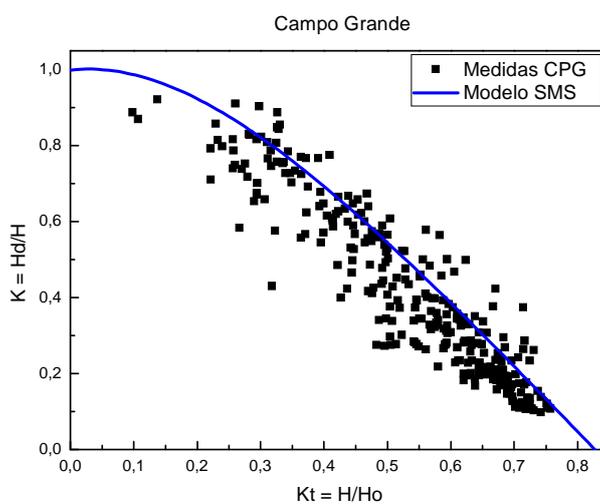


Figura 6.5 – Dispersão das medidas coletadas na estação SONDA de Campo Grande, juntamente com as estimativas do modelo SMS.

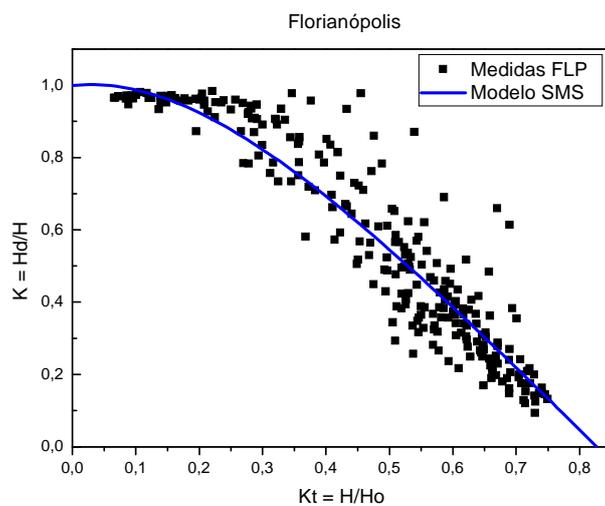


Figura 6.6 – Dispersão das medidas coletadas na estação SONDA de Florianópolis, juntamente com as estimativas do modelo SMS.

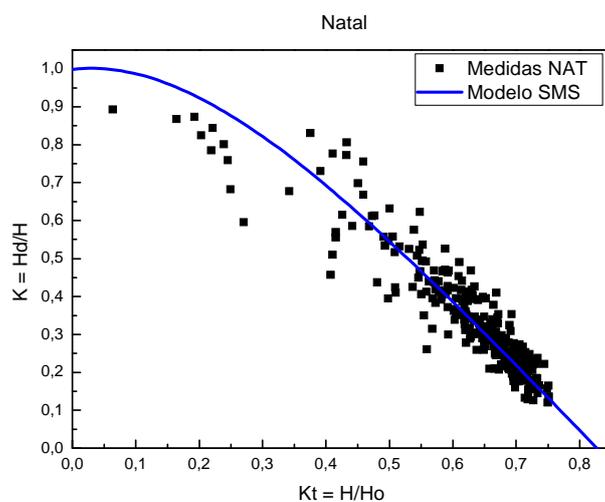


Figura 6.7 – Dispersão das medidas coletadas na estação SONDA de Natal, juntamente com as estimativas do modelo SMS.

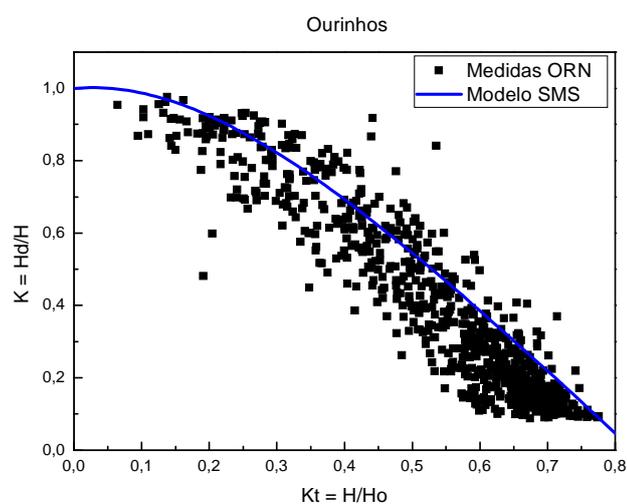


Figura 6.8 – Dispersão das medidas coletadas na estação SONDA de Ourinhos, juntamente com as estimativas do modelo SMS.

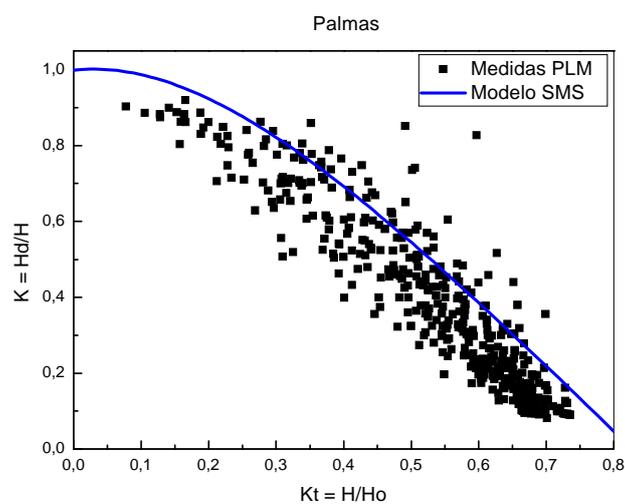


Figura 6.9 – Dispersão das medidas coletadas na estação SONDA de Palmas, juntamente com as estimativas do modelo SMS.

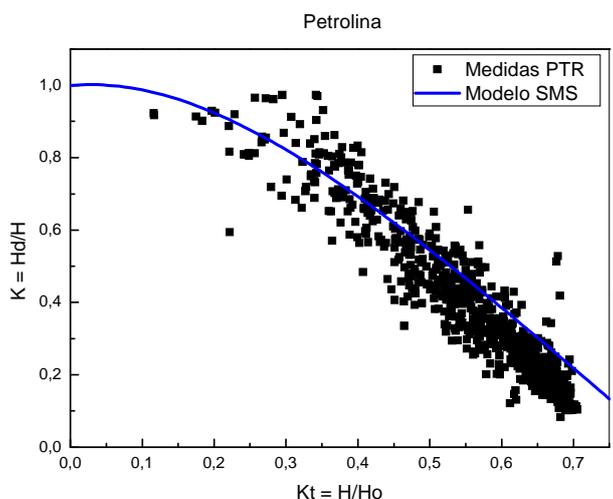


Figura 6.10 – Dispersão das medidas coletadas na estação SONDA de Palmas, juntamente com as estimativas do modelo SMS.

Utilizando 70% das medidas de cada estação do Projeto SONDA selecionada, foram desenvolvidos modelos empíricos para estimativa do parâmetro de radiação difusa K a partir do índice de nebulosidade da atmosfera Kt com validade restrita a cada estação a qual correspondem os dados. Os modelos desenvolvidos são apresentados na Tabela 6.6.

| | <i>Modelo Empírico</i> |
|-----|---|
| BRA | $1,684 - 3,457 * Kt + 3,683 * Kt^2 - 2,936 * Kt^3 + 0,589 * Kt^4$ |
| CPG | $0,775 + 1,629 * Kt - 6,637 * Kt^2 + 4,415 * Kt^3$ |
| FLP | $0,863 + 1,648 * Kt - 6,369 * Kt^2 + 3,192 * Kt^3 + 0,925 * Kt^4$ |
| NAT | $0,445 + 3,835 * Kt - 10,178 * Kt^2 + 6,100 * Kt^3$ |
| ORN | $0,773 + 1,670 * Kt - 6,741 * Kt^2 + 4,403 * Kt^3$ |
| PLM | $0,937 - 0,364 * Kt - 1,107 * Kt^2 - 0,064 * Kt^3$ |
| PTR | $0,640 + 2,937 * Kt - 9,863 * Kt^2 + 6,701 * Kt^3$ |

Tabela 6.6 – Modelos empíricos locais desenvolvidos para as estações selecionadas.

Com os 30% restantes dos dados de cada estação, foram calculados os desvios estatísticos MBE e RMSE em relação às estimativas fornecidas pelos modelos empíricos da Tabela 6.6. Os desvios calculados são apresentados na Tabela 6.7.

| <i>Modelos Empíricos:</i> | <i>MBE [%]</i> | <i>RMSE [%]</i> |
|---------------------------|----------------|-----------------|
| <i>BRA</i> | 4,49 | 21,26 |
| <i>CPG</i> | 5,46 | 17,72 |
| <i>FLP</i> | 2,69 | 16,95 |
| <i>NAT</i> | 9,60 | 22,29 |
| <i>ORN</i> | 7,44 | 21,36 |
| <i>PLM</i> | 8,84 | 26,31 |
| <i>PTR</i> | -7,24 | 17,78 |
| <i>SMS</i> | -0,73 | 15,83 |

Tabela 6.7 – Desvios estatísticos calculados entre as medidas de cada estação SONDA selecionada e as estimativas dos modelos locais.

A etapa de análise seguinte consistiu no desenvolvimento de um modelo empírico utilizando a totalidade dos dados disponíveis (conforme períodos citados na Tabela 6.4 e tomando-se o cuidado de reservar 30% das medidas para validação do modelo) na tentativa de conceber um modelo com validade em todo o Território Brasileiro, uma vez que a distribuição espacial das estações garantiria grande amplitude de fatores climatológicos e antropogênicos característicos de cada região. O modelo desenvolvido, denominado ALL, é apresentado na equação 6.1. O gráfico com as medidas empregadas em seu desenvolvimento é apresentado na Figura 6.11, juntamente com o modelo SMS para comparação.

$$\frac{H_d}{H} = 0,995 - 0,812Kt + 2,992Kt^2 - 10,995Kt^3 + 8,544Kt^4 \quad \text{Eq. (6.1)}$$

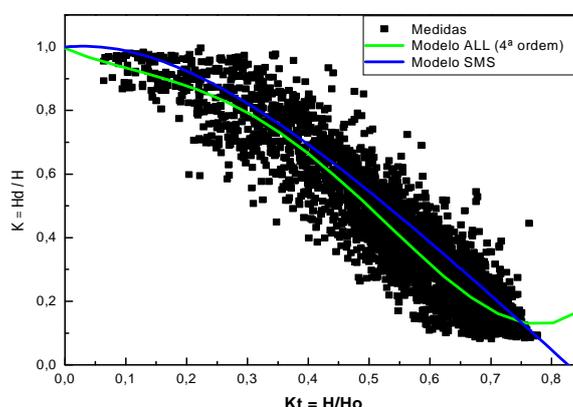


Figura 6.11 – Dispersão das medidas empregadas no desenvolvimento do modelo empírico ALL, juntamente com o modelo SMS.

Os desvios estatísticos MBE e RMSE calculados entre as estimativas do modelo ALL e as medidas coletadas em cada uma das estações do Projeto SONDA são apresentados na Tabela 6.8.

| <i>Estações SONDA</i> | <i>MBE [%]</i> | <i>RMSE [%]</i> |
|------------------------------|----------------|-----------------|
| <i>Brasília</i> | -8,47 | 21,40 |
| <i>Campo Grande</i> | 3,15 | 19,38 |
| <i>Florianópolis</i> | -9,33 | 17,50 |
| <i>Natal</i> | -16,33 | 24,20 |
| <i>Ourinhos</i> | 7,46 | 22,33 |
| <i>Palmas</i> | 11,02 | 23,48 |
| <i>Petrolina</i> | 0,58 | 17,31 |
| <i>São Martinho da Serra</i> | -8,35 | 21,98 |

Tabela 6.8 – Desvios estatísticos apresentados entre as estimativas do modelo ALL e as medidas coletadas em cada estação.

Os desvios estatísticos apresentados entre as estimativas do modelo ALL e as medidas das estações do Projeto SONDA podem ser considerados baixos, o que garante a confiabilidade do modelo no território brasileiro. Especificamente, o modelo ALL adaptou-se melhor para as estações de Petrolina, Florianópolis e Campo Grande, e apresentou confiabilidade mais reduzida para as estações de Natal, para a qual

subestimou os dados, e Palmas, onde superestimou os dados. Para as outras estações o modelo pode ser considerado melhor adequado.

A dispersão das medidas de cada estação, juntamente com as estimativas do modelo SMS e dos modelos locais e ALL são apresentados nas Figuras de 6.12 até 6.18.

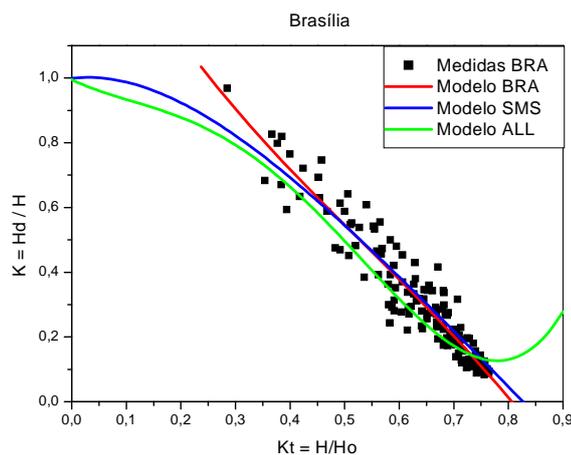


Figura 6.12 – Dispersão das medidas de Brasília reservadas para validação, juntamente com os modelos BRA, SMS e ALL.

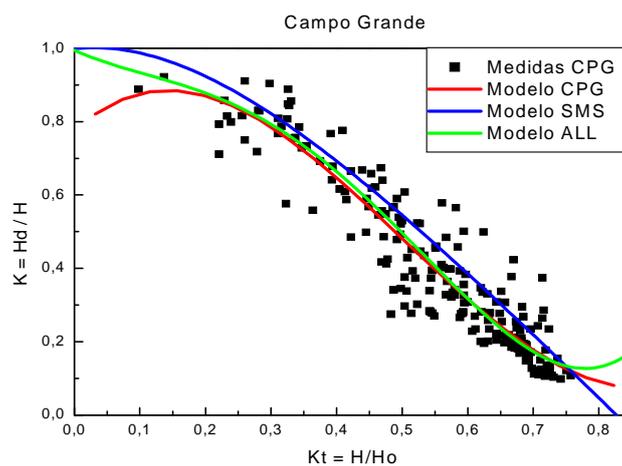


Figura 6.13 – Dispersão das medidas de Campo Grande reservadas para validação, juntamente com os modelos CPG, SMS e ALL.

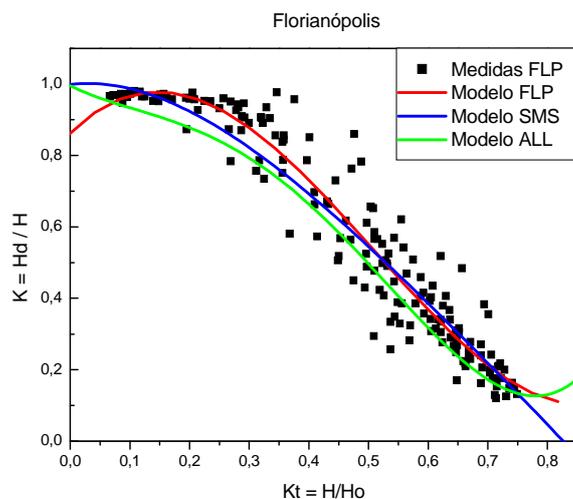


Figura 6.14 – Dispersão das medidas de Florianópolis reservadas para validação, juntamente com os modelos FLP, SMS e ALL.

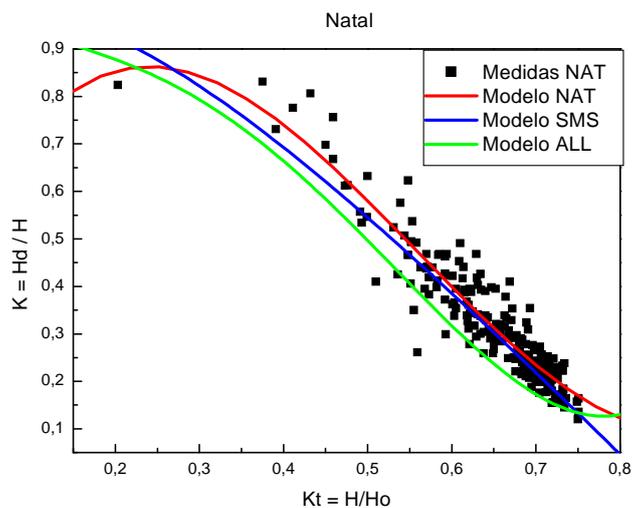


Figura 6.15 – Dispersão das medidas de Natal reservadas para validação, juntamente com os modelos NAT, SMS e ALL.

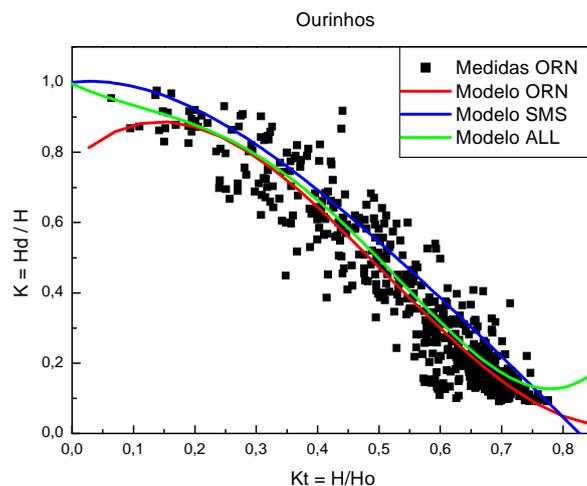


Figura 6.16 – Dispersão das medidas de Ourinhos reservadas para validação, juntamente com os modelos ORN, SMS e ALL.

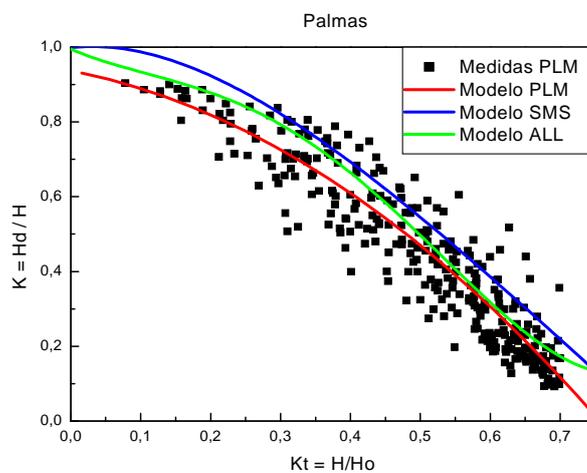


Figura 6.17 – Dispersão das medidas de Palmas reservadas para validação, juntamente com os modelos PLM, SMS e ALL.

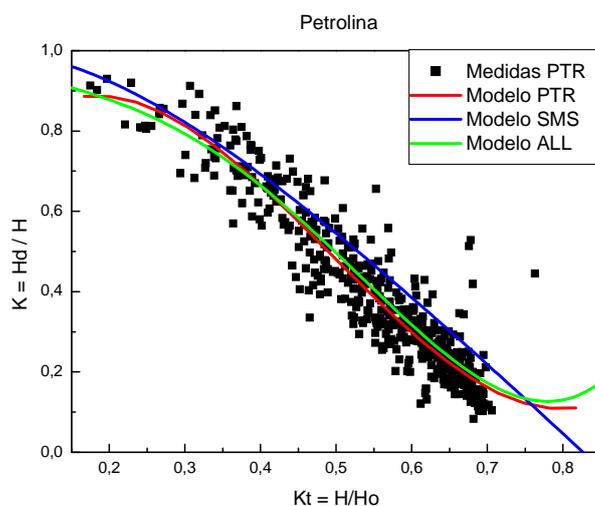


Figura 6.18 – Dispersão das medidas de Petrolina reservadas para validação, juntamente com os modelos PTR, SMS e ALL.

De modo geral, considerando os baixos desvios estatísticos MBE e RMSE apresentados entre as estimativas do modelo nacional ALL e as medidas selecionadas para sua validação, o modelo ALL pode ser considerado bem adaptado para o Território Brasileiro. No entanto, sua confiabilidade mostrou-se reduzida para as estações de Natal e Palmas, para as quais subestimou e superestimou as medidas, respectivamente. Diante disso, em estudos específicos para cada estação, é mais adequado que se utilizem os modelos locais.

CONCLUSÕES

Durante o período correspondente ao Projeto de Iniciação Científica, o acadêmico realizou revisão bibliográfica de diversas literaturas acerca da temática proposta para o Projeto Avaliação do Potencial Solar do Sul do Brasil III.

Na primeira etapa do Projeto, desenvolveu-se um modelo empírico para estimativa do parâmetro de radiação difusa K a partir do índice de nebulosidade da atmosfera Kt com dados coletados na estação do Projeto SONDA instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCT, em São Martinho da Serra – RS. O modelo foi referenciado como SMS e validado em função das estações do ano.

Na etapa seguinte, utilizando dados de mais outras sete estações do Projeto SONDA, foram calculados os desvios estatísticos MBE e RMSE entre as estimativas do modelo SMS e as medidas dessas estações. Uma análise geral dos desvios estatísticos permitiu a percepção de que o modelo SMS subestima as medidas para as estações de Florianópolis e Natal ($MBE < 0$), ambas localizadas em regiões litorâneas. Os menores desvios MBE foram apresentados para as estações de Brasília, Florianópolis e Natal. Os menores desvios RMSE ocorreram para as estações de Natal, Florianópolis e Brasília, para as quais o modelo SMS pode ser considerado bom em suas estimativas. O modelo SMS superestima as medidas em praticamente todos os intervalos de Kt para as estações de Campo Grande, Ourinhos e Palmas, tornando-se inviável sua aplicação a estas estações, conforme se percebe pelos altos desvios estatísticos calculados. Para a estação de Petrolina, o modelo SMS apresenta bom comportamento no intervalo de $Kt < 0.4$, que representa dias completamente encobertos a parcialmente nublados, porém passa a superestimar as medidas para $Kt > 0.4$.

Com 70% dos dados disponíveis de cada uma das estações do Projeto SONDA selecionadas, foram desenvolvidos modelos empíricos locais, com validade restrita a cada estação. Adicionalmente, com 70% da totalidade dos dados, incluindo todas as estações, foi desenvolvido um modelo nacional, denominado ALL, para estimativa do parâmetro K a partir de Kt . O modelo ALL foi validado através do cálculo dos desvios estatísticos entre as estimativas do modelo e os 30% dos dados reservados durante o seu desenvolvimento, e separando-se esses dados de acordo com as suas estações

provenientes. Os desvios estatísticos apresentados entre as estimativas do modelo ALL e as medidas das estações do Projeto SONDA podem ser considerados baixos, o que garante a confiabilidade do modelo no Território Brasileiro. Especificamente, o modelo ALL adaptou-se melhor para as estações de Petrolina, Florianópolis e Campo Grande, e apresentou confiabilidade mais reduzida para as estações de Natal, para a qual subestimou os dados, e Palmas, onde superestimou os dados. Para as outras estações o modelo pode ser considerado mais adaptado.

Diante do mencionado, o modelo ALL pode ser considerado confiável para o Território Brasileiro. No entanto, em estudos específicos para uma região em particular, é mais adequado que se utilizem os modelos locais.

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

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.

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.

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

Goldenberg, J.; Villanueva, L. D. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**, 2^a 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., Liousse, 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.

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

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.

APÊNDICE A

TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS APRESENTADOS EM EVENTOS

Neste Apêndice, estão enumerados os trabalhos de autoria e co-autoria do bolsista, apresentados em eventos científicos durante o período de vigência da bolsa PIBIC/INPE – CNPq/MCT no CRS/INPE – MCT.

EVENTO: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia – CBMET 2008, 24 a 29 de agosto de 2008 – São Paulo – SP.

1 – ESTIMATIVAS DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E DA RADIAÇÃO PARA PARTIR DE DADOS DE ILUMINÂNCIA OBTIDOS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL.

Autores: Rodrigo Brackmann; Daniel V. Fiorin; Fernando Ramos Martins; Nelson Jorge Schuch; Márcio Ceconi; Enio Bueno Pereira; Ricardo A. Guarnieri.

2 – A IRRADIAÇÃO SOLAR NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL ANALISADA PARA DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO.

Autores: Márcio Ceconi; Daniel V. Fiorin; Fernando Ramos Martins; Nelson J. Schuch; Rodrigo Brackmann; Enio B. Pereira; Ricardo A. Guarnieri.

3 – COMPORTAMENTO ESTATÍSTICO SAZONAL DOS VENTOS NA REGIÃO DO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL.

Autores: Daniel Vinícius Fiorin; Nelson J. Schuch; Fernando Ramos Martins; Márcio Ceconi; Rodrigo Brackmann; Enio B. Pereira; Ricardo A. Guarnieri.

EVENTO: XXIII Jornada Acadêmica Integrada da Universidade Federal de Santa Maria – JAI, 03 a 06 de novembro de 2008 – Santa Maria – RS.

1 – INFLUÊNCIA DE QUEIMADAS NA REDUÇÃO DA INCIDÊNCIA DE RADIAÇÃO SOLAR OBSERVADA POR ESTAÇÕES DO PROJETO SONDA NO TERRITÓRIO BRASILEIRO – SICINPE 2008.

Autores: Rodrigo Brackmann; Daniel Vinícius Fiorin; Fernando Ramos Martins; Nelson J. Schuch; Márcio Ceconi; Enio Bueno Pereira; Ricardo A. Guarnieri.

2 – AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO SUL DO BRASIL III – SICINPE 2008

Autores: Márcio Ceconi; Daniel Vinícius Fiorin; Fernando Ramos Martins; Nelson J. Schuch; Rodrigo Brackmann; Enio Bueno Pereira; Ricardo A. Guarnieri.

EVENTO: XVI Jornadas de Jovens Pesquisadores da AUGM, 27 a 29 de outubro de 2008 – Montevideu – Uruguai.

1 – AVALIAÇÃO DO POTENCIAL SOLAR E EÓLICO DA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL.

Autores: Márcio Ceconi; Daniel Vinícius Fiorin; Nelson J. Schuch; Fernando Ramos Martins; Rodrigo Brackmann; Enio Bueno Pereira.

EVENTO: XVIII Congresso Nacional dos Estudantes de Engenharia Química – XVIII CONEEQ, 25 a 31 de janeiro de 2009 – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Florianópolis – SC.

1 – O ENGENHEIRO QUÍMICO INSERIDO NO CONTEXTO DA PESQUISA EM RECURSOS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS.

Autores: Rodrigo Brackmann; Daniel Vinícius Fiorin; Fernando Ramos Martins; Nelson J. Schuch; Márcio Ceconi; Enio Bueno Pereira; Ricardo A. Guarnieri.

EVENTO: International Radiation Symposium 2008 – IRS 2008, 03 a 08 de agosto de 2008 – Foz do Iguaçu – Paraná.

1 – STATISTICAL CORRELATIONS BETWEEN SOLAR RADIATION PARAMETERS AND CLOUDINESS FRACTIONS AT THE BRAZILIAN SOUTHERN SPACE OBSERVATORY.

Autores: Daniel Vinícius Fiorin; Nelson J. Schuch; Fernando Ramos Martins; Enio Bueno Pereira; Rodrigo Brackmann; Márcio Ceconi; Ricardo André Guarnieri.