



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 Energia Renováveis
LRER/CRS/CCR/INPE – MCT
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
CRS/CCR/INPE – MCT
E-mail: ceconi@lacesm.ufsm.br

Dr. Fernando Ramos Martins
Orientador
Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CCST/INPE – MCT
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INPE – MCT
E-mail: fernando.martins@inpe.br

Santa Maria, Junho de 2010



**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 2009 a Julho de 2010 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/CCR/INPE – MCT
E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br**

**Dr. Enio Bueno Pereira – Co-Orientador
Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CCST/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/09 a Julho/10:

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

Centro de Ciência do Sistema Terrestre – CCST/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/CCR/INPE – MCT.

Dr. Enio Bueno Pereira

Centro de Ciência do Sistema Terrestre – CCST/INPE – MCT.

Colaboradores:

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

Eng. Rodrigo Brackmann – Engenheiro Químico e antigo membro do LRER/CRS/CCR/INPE – MCT.

Alexandre Ceretta Dalla Favera – Bolsista I.C. e Graduando do Curso de Engenharia Química da UFSM.



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

Eng. Sylvio Luiz Mantelli Neto – Engenheiro responsável pela implementação das estações do Projeto SONDA.

Eng. Jorge Luiz Nogueira – Engenheiro responsável pelas estações do Projeto SONDA.

Locais de Trabalho/Execução do Projeto:

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

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

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

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos: (i) aos funcionários, servidores do CRS/CCR/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 atenção com toda a burocracia e datas limites do Programa para com os bolsistas de I. C. & T do CRS/CCR/INPE - MCT.

Um obrigado especial ao meu orientador, Dr. Fernando Ramos Martins, Pesquisador do Centro de Ciência do Sistema Terrestre – CCST/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/CCR/INPE-MCT, em Santa Maria – RS, criador do Laboratório de Recursos de Energia Renováveis, onde realizei minhas atividades de Iniciação Científica, 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 aos colegas do Laboratório de Recursos de Energia Renováveis do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais por todo o companheirismo e atenção prestados ao acadêmico, 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 Projeto de Pesquisa, desenvolvido no Laboratório de Recursos de Energia Renováveis do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – LRER/CRS/CCR/INPE – MCT, objetiva analisar a disponibilidade espacial e temporal da irradiação solar em superfície e contribuir de maneira significativa para a determinação do perfil de energia solar da Região Central do Rio Grande do Sul. Na primeira etapa do Projeto de Pesquisa, foram feitas as estimativas dos parâmetros relativos aos constituintes atmosféricos influentes em processos de transferência radiativa, adaptando os cálculos à base de dados do Projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais). Como método alternativo à solução rigorosa da equação de transferência radiativa (ETR), são apresentados na literatura científica modelos mais simples para o cálculo da irradiância solar a partir das transmitâncias dos constituintes atmosféricos individuais. No Projeto, estudou-se a adaptabilidade do modelo C (Iqbal, 1983), baseado em comparações individuais de vários modelos com o modelo numérico SOLTRAN, para a base de dados da Estação de Referência do Projeto SONDA instalada no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra – RS. O modelo C leva em conta a atenuação e absorção da radiação solar devido às transmitâncias por espalhamento Rayleigh, ozônio, mistura de gases atmosféricos, vapor d'água e aerossóis. Modelos adicionais são apresentados visando a necessidade do emprego da menor quantidade de dados possível para o cálculo das transmitâncias, o que torna o Modelo C mais adaptável em grande escala. O desempenho do modelo foi avaliado a partir do cálculo dos desvios estatísticos MBE (Mean Bias Error) e RMSE (Root Mean Square Error). O modelo C apresentou boa confiabilidade para estimativas de irradiância direta, com desvio MBE de 3,15 %, o que indica que o modelo sobre-estima a irradiação solar na superfície, e RMSE de 6,35%. Com isso, o modelo pode ser considerado bem adaptado à região do Observatório Espacial do Sul, podendo ser utilizado para estudos de avaliação do potencial de energia solar disponível. Como prosseguimento ao Projeto de Pesquisa, faz-se necessário investigar as causas do desvio sistemático a fim de desenvolver uma metodologia a ser empregada para a obtenção de estimativas com maior confiabilidade. Além disso, a continuidade do Projeto deve contemplar o desenvolvimento de modelos que permitam estimar as componentes global e difusa da radiação solar na superfície.



SUMÁRIO

SIGLAS E ABREVIATURAS.....	11
CAPÍTULO 1	13
INTRODUÇÃO.....	13
CAPÍTULO 2.....	15
INFRA-ESTRUTURA UTILIZADA	15
2.1 – O Projeto SONDA.....	15
2.2 – Estação de Referência do Projeto SONDA instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT, em São Matinho da Serra – RS.....	17
2.3 – O Laboratório de Recursos de Energia Renováveis do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – LRER/CRS/CCR/INPE – MCT	19
CAPÍTULO 3.....	20
A RADIAÇÃO SOLAR E A ATMOSFERA TERRESTRE.....	20
3.1 – O Sol e a Radiação Eletromagnética.....	20
3.2 – Considerações Geométricas Básicas	24
3.3 – Leis da Radiação para Corpos Negros.....	28
3.4 – A Atmosfera Terrestre.....	30
3.5 – Interações da Radiação com a Atmosfera Terrestre.....	31
3.5 – Efeito das Nuvens sobre a Radiação Solar.....	35
3.6 – Efeito dos Aerossóis na Atmosfera.....	36
METODOLOGIA.....	38
4.1 – Estações Coletoras de Dados do Projeto SONDA.....	38
4.2 – Qualificação dos Dados do Projeto SONDA	39
4.4 – O Método dos Mínimos Quadrados para Ajuste Polinomial	42
4.5 – Análise de Dados de Irradiação Solar.....	44
CAPÍTULO 5.....	50
ATIVIDADES OPERACIONAIS DESENVOLVIDAS	50
5.1 – Revisão Bibliográfica.....	50
5.2 – Manutenção dos Equipamentos da Estação SONDA – SMS.....	50
5.3 – Coleta, Qualificação e Análise dos Dados Coletados na Estação SONDA – SMS.....	51
CAPÍTULO 6.....	52
RESULTADOS	52
6.1 – Primeira Etapa.....	52
6.2 – Segunda Etapa	56
6.3 – Terceira Etapa	66
CONCLUSÕES	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – LOGOTIPO DO PROJETO SONDA. FONTE: SONDA (2009).....	15
FIGURA 2.2 – REDE DE ESTAÇÕES COLETORAS DE DADOS DO PROJETO SONDA. FONTE: SONDA.....	16
FIGURA 2.3 – PLATAFORMA COM OS EQUIPAMENTOS DA ESTAÇÃO SONDA – SMS JUNTO AO PRÉDIO 1 DO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL OES/CRS/CCR/ INPE – MCT.....	18
FIGURA 2.4 – TORRE ANEMOMÉTRICA INSTALADA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL OES/CRS/CCR/INPE – MCT, COM DESTAQUE PARA OS ANEMÔMETROS INSTALADOS A 10, 25 E 50 METROS DE ALTURA.	19
FIGURA 3.1 – FOTO DO SOL OBTIDA PELO OBSERVATÓRIO HELIOSFÉRICO E SOLAR.	20
FONTE: SOHO/NASA (2003).	20
FIGURA 3.2 – REGIÕES A CARACTERÍSTICAS DO SOL.	21
FONTE: SOHO/NASA.....	21
FIGURA 3.3 – O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.	22
FONTE: HALLIDAY ET AL (1997).	22
FIGURA 3.4 – O MOVIMENTO DE TRANSLAÇÃO DA TERRA EM TORNO DO SOL E AS ESTAÇÕES DO ANO. .	25
FONTE: HTTP://FISICA.UFPR.BR/GRIMM/AOSMETEO/	25
FIGURA 3.5 – VARIAÇÃO DA ALTURA SOLAR COM A LATITUDE.	25
FONTE: HTTP://FISICA.UFPR.BR/GRIMM/AOSMETEO/	25
FIGURA 3.6 – CARACTERÍSTICAS DOS SOLSTÍCIOS E EQUINÓCIOS DA TERRA.	27
FONTE: HTTP://FISICA.UFPR.BR/GRIMM/AOSMETEO/	27
FIGURA 3.7 – RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA.	29
FONTE: HTTP://WWW.PLATO.IF.USP.BR/2-2003/FNC0375N/AULA1/NODE1.HTML	29
FIGURA 3.8 – INTERAÇÕES DA RADIAÇÃO SOLAR COM OS CONSTITUINTES ATMOSFÉRICOS.	32
FONTE: ADAPTADO DE (GAMBI, 1998).	32
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.	32
FONTE: MODIFICADO DE ROBINSON (1966).....	32
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.	33
FONTE: MODIFICADO DE PEIXOTO E OORT (1992).....	33
FIGURA 4.12 – CÓDIGOS DE QUALIFICAÇÃO DOS DADOS DO PROJETO SONDA PARA TRÊS DIFERENTES SITUAÇÕES.....	41
FIGURA 4.13 – GRÁFICOS CONTENDO INFORMAÇÕES SOBRE A QUALIFICAÇÃO DE DADOS DA ESTAÇÃO SONDA – SMS NO MÊS DE MAIO DE 2006.	42
FIGURA 4.14 – 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.....	45
FIGURA 4.15 – COMPARAÇÃO ENTRE AS IRRADIÂNCIAS MEDIDAS EM SÃO MARTINHO DA SERRA – RS, EM 28/08/2007, COM A IRRADIÂNCIA SOLAR DIRETA CORRIGIDA.	45
FIGURA 4.16 – IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL PARA UM DIA COM CÉU LIMPO (SMS – 01/08/2007).....	46
FIGURA 4.17 – IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL PARA UM DIA COM CÉU PARCIALMENTE NUBLADO (SMS – 07/08/2007).....	47
FIGURA 4.18 – IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL PARA UM DIA COMPLETAMENTE NUBLADO (SMS – 03/08/2007).....	47
FIGURA 6.1 – DISPERSÃO DOS VALORES DE K MEDIDOS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL EM COMPARAÇÃO COM OS MODELOS EMPÍRICOS CPR E RC.....	53
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.	53
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.....	54
FIGURA 6.4 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NA ESTAÇÃO SONDA DE BRASÍLIA, JUNTAMENTE COM AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS.	57

FIGURA 6.5 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NA ESTAÇÃO SONDA DE CAMPO GRANDE, JUNTAMENTE COM AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS.....	58
FIGURA 6.6 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NA ESTAÇÃO SONDA DE FLORIANÓPOLIS, JUNTAMENTE COM AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS.....	58
FIGURA 6.7 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NA ESTAÇÃO SONDA DE NATAL, JUNTAMENTE COM AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS.	59
FIGURA 6.8 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NA ESTAÇÃO SONDA DE OURINHOS, JUNTAMENTE COM AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS.	59
FIGURA 6.9 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NA ESTAÇÃO SONDA DE PALMAS, JUNTAMENTE COM AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS.	60
FIGURA 6.10 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NA ESTAÇÃO SONDA DE PALMAS, JUNTAMENTE COM AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS.	60
FIGURA 6.11 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS EMPREGADAS NO DESENVOLVIMENTO DO MODELO EMPÍRICO ALL, JUNTAMENTE COM O MODELO SMS, APLICADOS A BASE DE DADOS DE TODAS AS ESTAÇÕES SONDA SELECIONADAS.....	62
FIGURA 6.12 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS DE BRASÍLIA RESERVADAS PARA VALIDAÇÃO, JUNTAMENTE COM OS MODELOS BRA, SMS E ALL.....	63
FIGURA 6.13 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS DE CAMPO GRANDE RESERVADAS PARA VALIDAÇÃO, JUNTAMENTE COM OS MODELOS CPG, SMS E ALL.....	63
FIGURA 6.14 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS DE FLORIANÓPOLIS RESERVADAS PARA VALIDAÇÃO, JUNTAMENTE COM OS MODELOS FLP, SMS E ALL.	64
FIGURA 6.15 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS DE NATAL RESERVADAS PARA VALIDAÇÃO, JUNTAMENTE COM OS MODELOS NAT, SMS E ALL.....	64
FIGURA 6.16 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS DE OURINHOS RESERVADAS PARA VALIDAÇÃO, JUNTAMENTE COM OS MODELOS ORN, SMS E ALL.....	65
FIGURA 6.17 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS DE PALMAS RESERVADAS PARA VALIDAÇÃO, JUNTAMENTE COM OS MODELOS PLM, SMS E ALL.....	65
FIGURA 6.18 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS DE PETROLINA RESERVADAS PARA VALIDAÇÃO, JUNTAMENTE COM OS MODELOS PTR, SMS E ALL.....	66
FIGURA 6.19 – MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL E SUAS COMPONENTES DIFUSA E DIRETA HORIZONTAL PARA O DIA 15/09/2009.....	69
FIGURA 6.20 – MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL E SUAS COMPONENTES DIFUSA E DIRETA HORIZONTAL PARA O DIA 25/09/2009.....	69
FIGURA 6.21 – MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL E SUAS COMPONENTES DIFUSA E DIRETA HORIZONTAL PARA O DIA 03/10/2009.....	70
FIGURA 6.22 – MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL E SUAS COMPONENTES DIFUSA E DIRETA HORIZONTAL PARA O DIA 12/10/2009.....	70
FIGURA 6.23 – MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL E SUAS COMPONENTES DIFUSA E DIRETA HORIZONTAL PARA O DIA 13/10/2009.....	71
FIGURA 6.24 – MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL E SUAS COMPONENTES DIFUSA E DIRETA HORIZONTAL PARA O DIA 18/10/2009.....	71
FIGURA 6.25 – MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL E SUAS COMPONENTES DIFUSA E DIRETA HORIZONTAL PARA O DIA 19/10/2009.....	72
FIGURA 6.26 – MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL E SUAS COMPONENTES DIFUSA E DIRETA HORIZONTAL PARA O DIA 20/10/2009.....	72
FIGURA 6.27 – MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL E SUAS COMPONENTES DIFUSA E DIRETA HORIZONTAL PARA O DIA 27/10/2009.....	73
FIGURA 6.28 – TRANSMITÂNCIAS ESTIMADAS PARA O DIA 15/09/2009.....	73
FIGURA 6.29 – TRANSMITÂNCIAS ESTIMADAS PARA O DIA 25/09/2009.....	74
FIGURA 6.30 – TRANSMITÂNCIAS ESTIMADAS PARA O DIA 03/10/2009.....	74
FIGURA 6.31 – TRANSMITÂNCIAS ESTIMADAS PARA O DIA 12/10/2009.....	75
FIGURA 6.32 – TRANSMITÂNCIAS ESTIMADAS PARA O DIA 13/10/2009.....	75
FIGURA 6.33 – TRANSMITÂNCIAS ESTIMADAS PARA O DIA 18/10/2009.....	76
FIGURA 6.34 – TRANSMITÂNCIAS ESTIMADAS PARA O DIA 19/10/2009.....	76
FIGURA 6.35 – TRANSMITÂNCIAS ESTIMADAS PARA O DIA 20/10/2009.....	77
FIGURA 6.36 – TRANSMITÂNCIAS ESTIMADAS PARA O DIA 27/10/2009.....	77
FIGURA 6.37 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL PARA O DIA 15/09/2009, JUNTAMENTE COM A CURVA DOS VALORES ESTIMADOS PELO MODELO C.....	78

FIGURA 6.38 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL PARA O DIA 25/09/2009, JUNTAMENTE COM A CURVA DOS VALORES ESTIMADOS PELO MODELO C.	78
FIGURA 6.38 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL PARA O DIA 03/10/2009, JUNTAMENTE COM A CURVA DOS VALORES ESTIMADOS PELO MODELO C.	79
FIGURA 6.39 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL PARA O DIA 12/10/2009, JUNTAMENTE COM A CURVA DOS VALORES ESTIMADOS PELO MODELO C.	79
FIGURA 6.40 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL PARA O DIA 13/10/2009, JUNTAMENTE COM A CURVA DOS VALORES ESTIMADOS PELO MODELO C.	80
FIGURA 6.41 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL PARA O DIA 18/10/2009, JUNTAMENTE COM A CURVA DOS VALORES ESTIMADOS PELO MODELO C.	80
FIGURA 6.42 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL PARA O DIA 19/10/2009, JUNTAMENTE COM A CURVA DOS VALORES ESTIMADOS PELO MODELO C.	81
FIGURA 6.43 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL PARA O DIA 20/10/2009, JUNTAMENTE COM A CURVA DOS VALORES ESTIMADOS PELO MODELO C.	81
FIGURA 6.44 – DISPERSÃO DAS MEDIDAS COLETADAS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL PARA O DIA 27/10/2009, JUNTAMENTE COM A CURVA DOS VALORES ESTIMADOS PELO MODELO C.	82
FIGURA 6.45 – VALORES ESTIMADOS E MEDIDOS PELO MODELO C PARA O PERÍODO DE DADOS SELECIONADO PARA ANÁLISE.	82

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – SUBDIVISÕES DAS REGIÕES DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO CORRESPONDENTES AO ULTRAVIOLETA, AO VÍSEL E AO INFRAVERMELHO.	24
TABELA 4.1 – ESTAÇÕES DO PROJETO SONDA SELECIONADAS PARA O PROJETO.	39
TABELA 6.1 – DESVIOS ESTATÍSTICOS CALCULADOS PARA OS MODELOS EMPÍRICOS CPR, RC E SMS NAS DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO.	54
TABELA 6.2 – DESVIOS ESTATÍSTICOS CALCULADOS PARA OS MODELOS CPR, RC E SMS EM DIAS DE CÉU CLARO.	55
TABELA 6.3 – DESVIOS ESTATÍSTICOS ENTRE AS ESTIMATIVAS DO MODELO SMS E OS DADOS COLETADOS EM CADA UMA DAS ESTAÇÕES DO PROJETO SONDA SELECIONADAS.	56
TABELA 6.4 – MODELOS EMPÍRICOS LOCAIS DESENVOLVIDOS PARA AS ESTAÇÕES SELECIONADAS.	61
TABELA 6.5 – DESVIOS ESTATÍSTICOS CALCULADOS ENTRE AS MEDIDAS DE CADA ESTAÇÃO SONDA SELECIONADA E AS ESTIMATIVAS DOS MODELOS LOCAIS.	61
TABELA 6.6 – DESVIOS ESTATÍSTICOS APRESENTADOS ENTRE AS ESTIMATIVAS DO MODELO ALL E AS MEDIDAS COLETADAS EM CADA ESTAÇÃO.	62
TABELA 6.9 – DESVIOS ESTATÍSTICOS CALCULADOS ENTRE AS ESTIMATIVAS DO MODELO C E AS MEDIDAS COLETADAS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL.	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/m²* - 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



Relatório Final de Atividades, 2010

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

UFSM - 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 fonte de energia 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 aproveitamento térmico da energia solar é realizado principalmente em sistemas de aquecimento de água. A conversão química é realizada em células de Hidrogênio. 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), coordenado 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 objetivo deste Projeto é a avaliação do potencial de energia solar disponível para o Sul do Brasil, com ênfase na Região Central do Rio Grande do Sul, valendo-se da modelagem numérica dos processos radiativos que ocorrem na atmosfera entre a radiação solar e os constituintes atmosféricos. Com esse intuito, foram desenvolvidos e adaptados modelos para estimativa de irradiação solar em superfície. Em primeira etapa, foram desenvolvidos modelos empíricos para estimativa do parâmetro K , definido como a razão entre a irradiação solar difusa e a irradiação solar global, a partir do índice de nebulosidade da atmosfera Kt , definido como a razão entre a irradiação solar global e a incidente no topo da atmosfera, para oito estações do Projeto SONDA selecionadas, em especial a estação instalada no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra – RS. Adicionalmente, desenvolveu-se um modelo nacional, referenciado por ALL, com todos os dados disponíveis. Em seguida, estudaram-se métodos de adaptação do modelo C de Iqbal (1983) para a base de dados do Projeto SONDA, o que foi realizado através da parametrização dos processos de interação da radiação solar direta com os constituintes atmosféricos, em especial devido ao espalhamento Rayleigh, à absorção pela camada de ozônio, aos aerossóis, vapor d'água e gases atmosféricos.

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 superfície para a aquisição 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/CCR/INPE – MCT, em São Matinho 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/CCR/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/CCR/ 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.

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

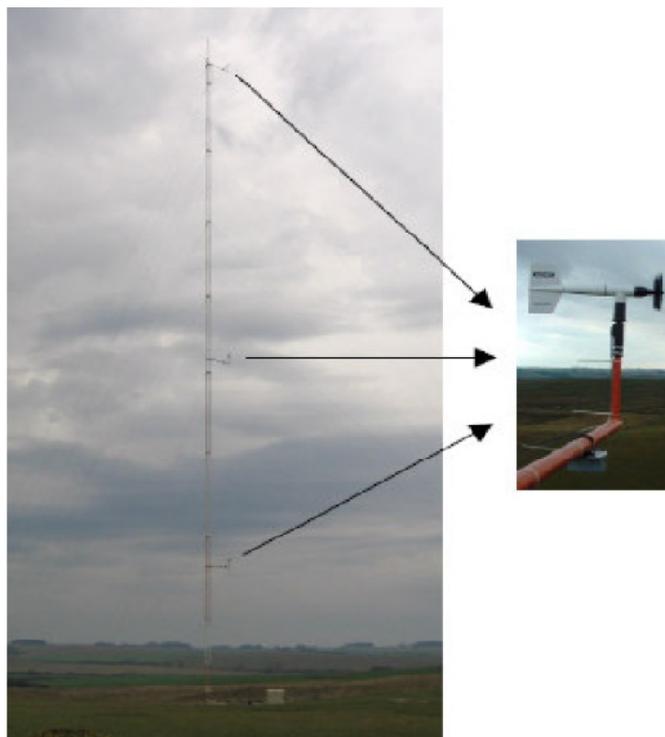


Figura 2.4 – Torre anemométrica instalada no Observatório Espacial do Sul OES/CRS/CCR/INPE – MCT, com destaque para os anemômetros instalados a 10, 25 e 50 metros de altura.

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

O Laboratório de Recursos de Energia Renováveis (LRER), pertencente ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/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.

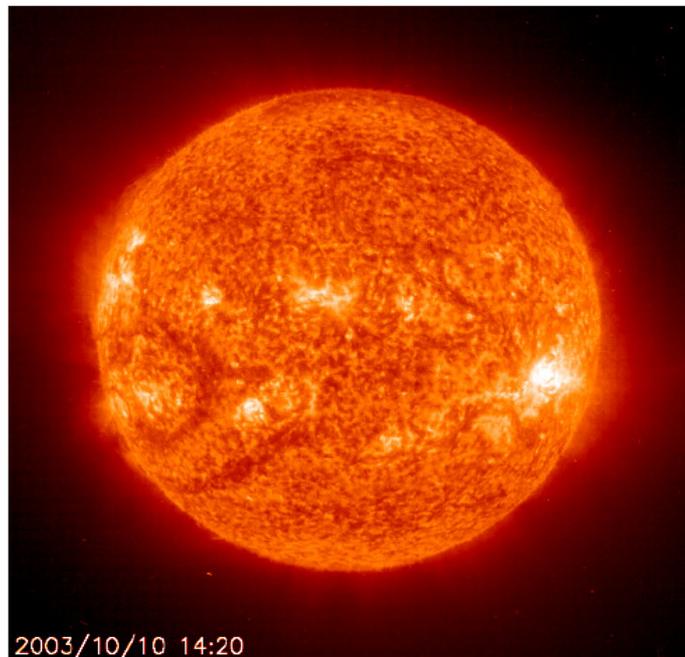


Figura 3.1 – Foto do Sol obtida pelo Observatório Heliosférico e Solar.

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.

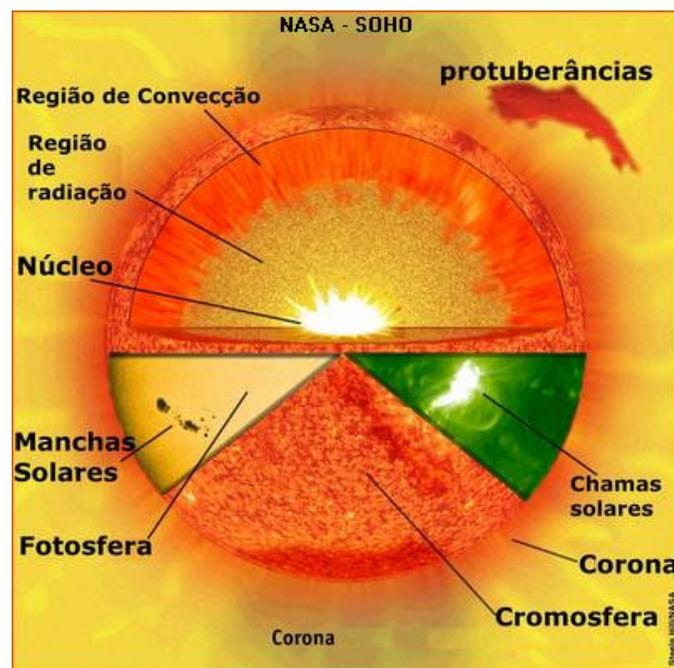


Figura 3.2 – Regiões a características do Sol.

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.

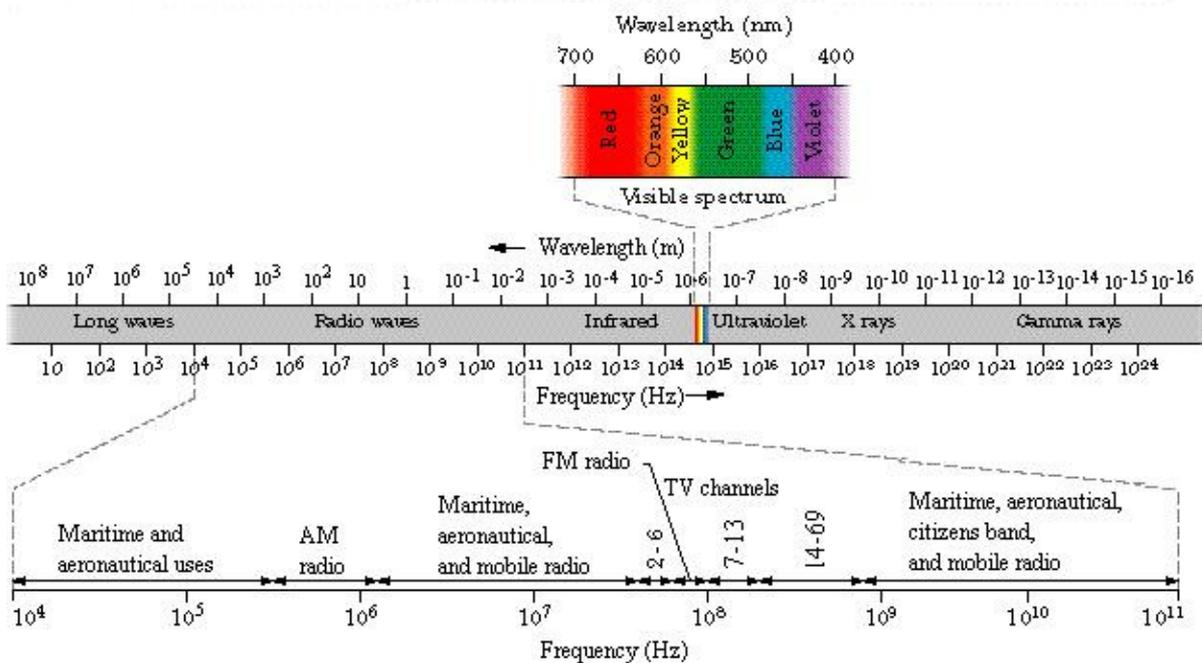


Figura 3.3 – O espectro eletromagnético.

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 em função da distância Terra-Sol durante o ano e com o ciclo solar, cuja período é de aproximadamente 11 anos para alternância entre os períodos de máximo e mínimo número de manchas solares em sua superfície.

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

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

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*).

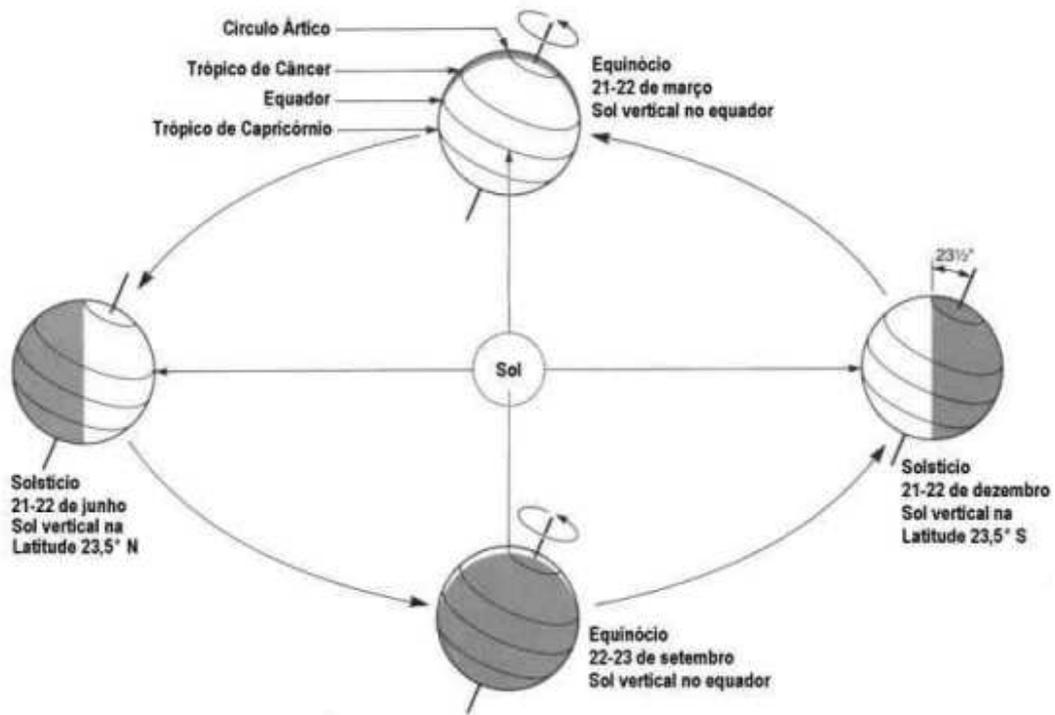


Figura 3.4 – O movimento de translação da Terra em torno do Sol e as estações do ano.

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

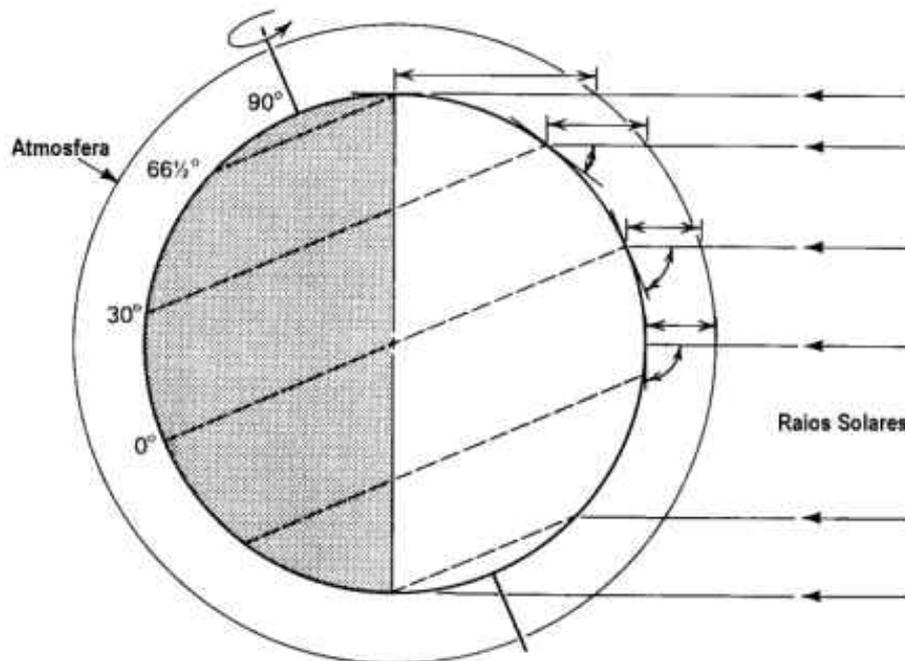


Figura 3.5 – Variação da altura solar com a latitude.

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*).

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.

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

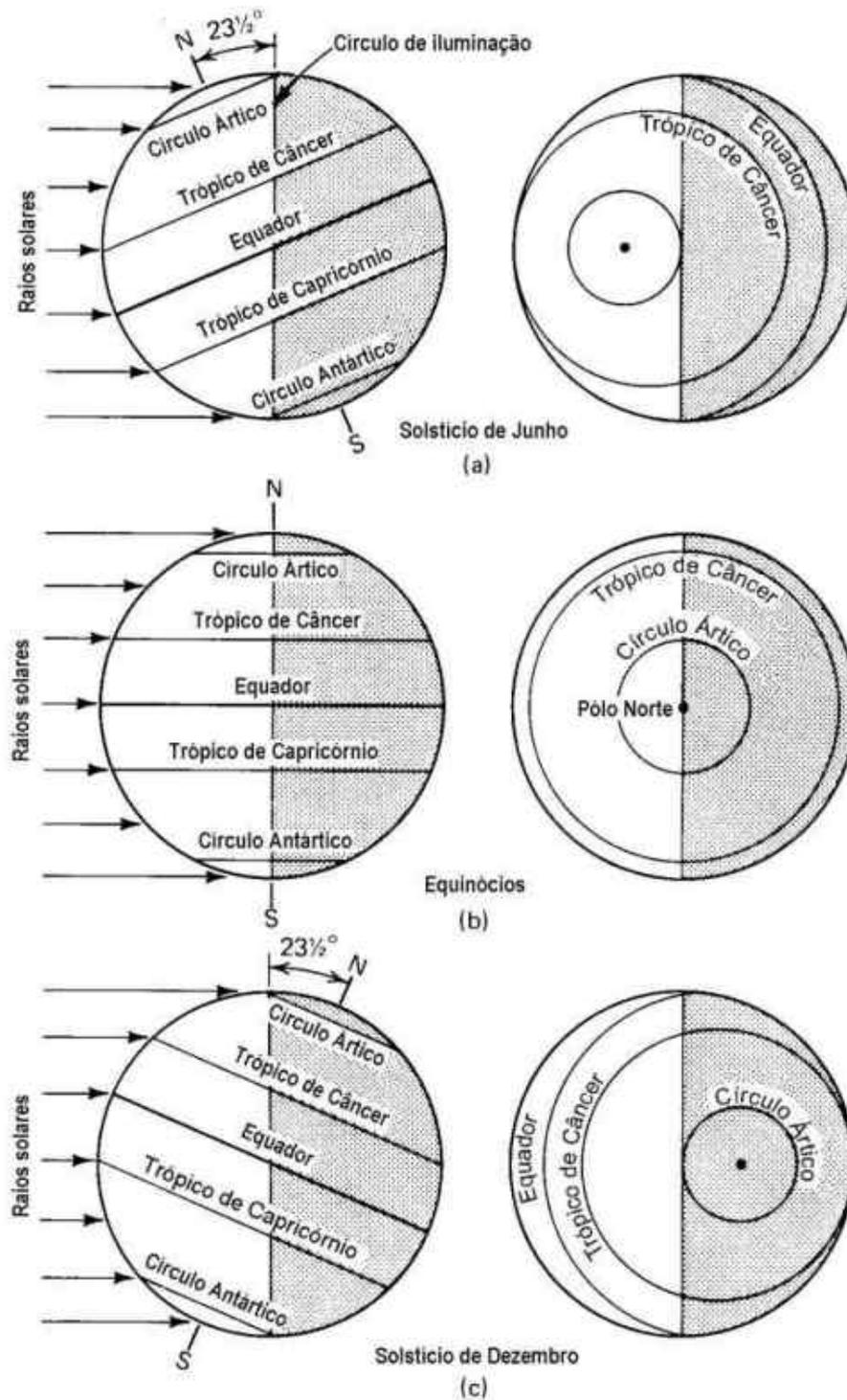


Figura 3.6 – Características dos solstícios e equinócios da Terra.

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

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 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.

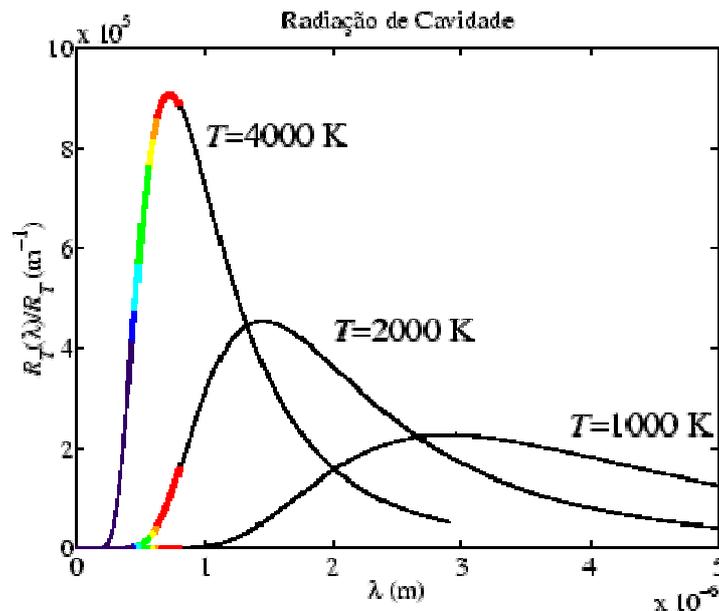


Figura 3.7 – Radiação de corpo negro em função do comprimento de onda.

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, Figura 3.8, sofre processos de absorção e o espalhamento (Liou, 1980). As Figuras 3.9 e 3.10 mostram o espectro de radiação solar que atinge o TOA e diversas altitudes em relação à superfície. 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 H₂O, CO₂, O₃ e O₂ (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.

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.

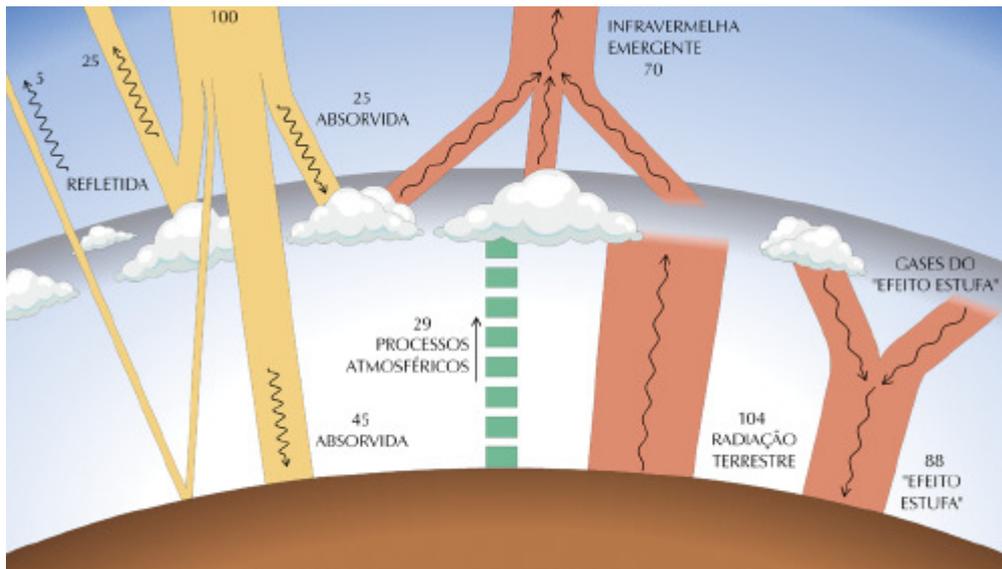


Figura 3.8 – Interações da radiação solar com os constituintes atmosféricos.

Fonte: Adaptado de (Gambi, 1998).

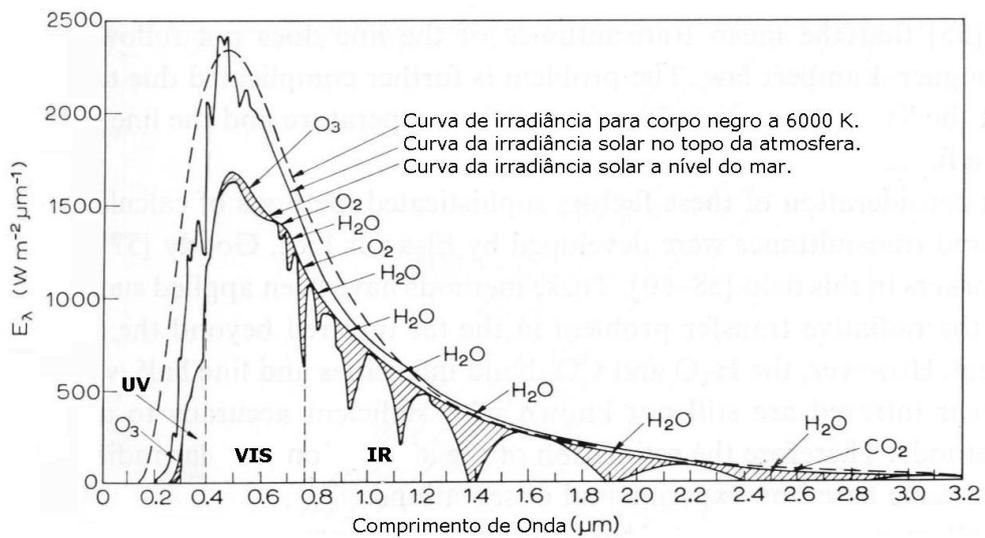


Figura 3.9 – Espectro solar no topo da atmosfera, comparado com o espectro de um corpo negro a 6000 K e com o espectro solar a nível do mar.

Fonte: Modificado de Robinson (1966).

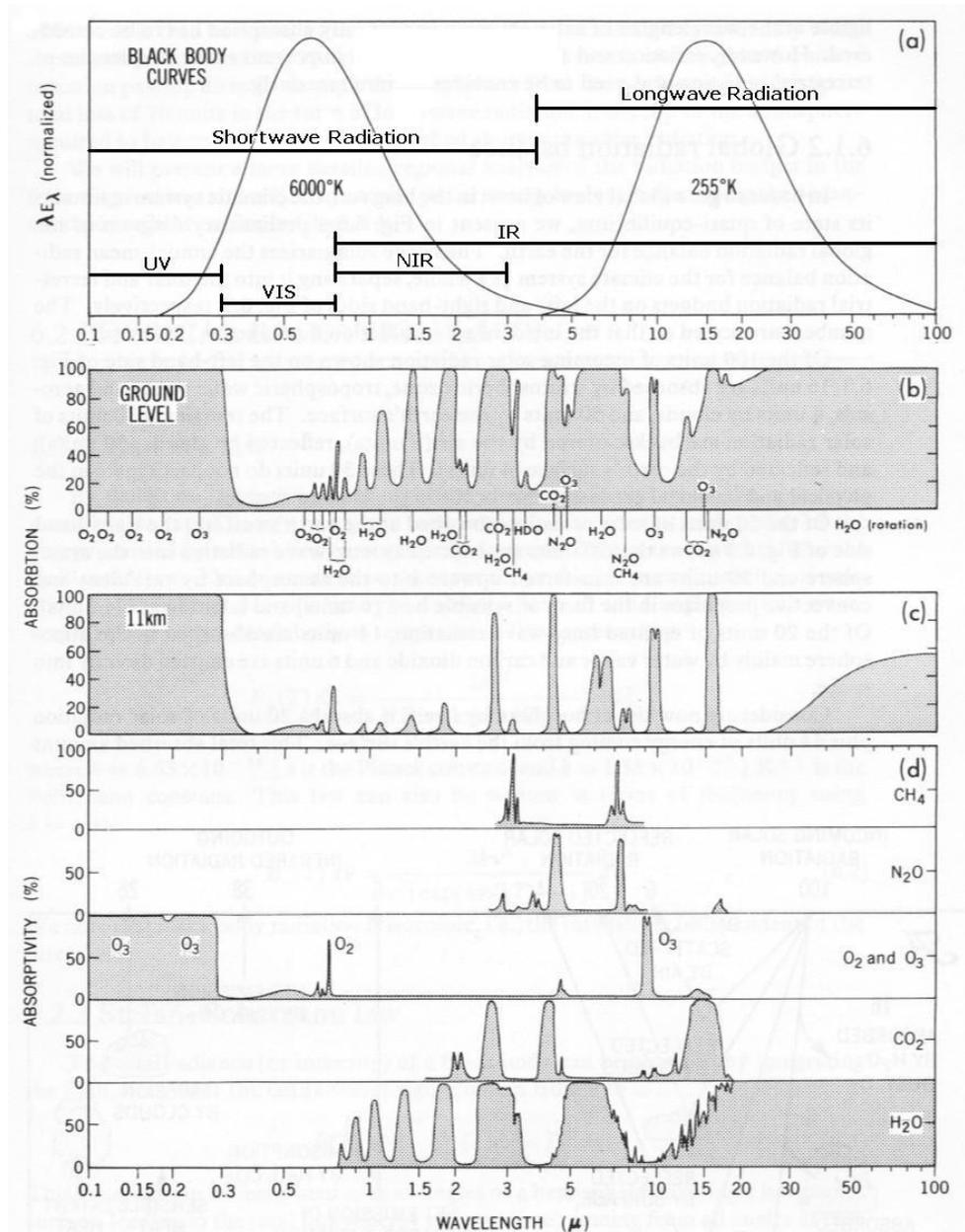


Figura 3.10 – (a) Curvas de corpo negro para a radiação solar (6000 K) e radiação terrestre (255 K). (b) Espectro de absorção para toda a extensão vertical da atmosfera. (c) Espectro de absorção para a atmosfera acima de 11 km. (d) Espectros de absorção para vários gases atmosféricos entre o topo da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

Fonte: Modificado de Peixoto e Oort (1992).

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).

O processo de espalhamento da radiação solar depende, basicamente, do tamanho das partículas espalhadoras. No caso de um comprimento de onda muito maior que o diâmetro da partícula espalhadora, tem-se um regime de espalhamento denominado Espalhamento Rayleigh. Quando o raio das partículas espalhadoras é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação ocorre o Espalhamento Mie.

No regime de Espalhamento Rayleigh, a irradiância monocromática espalhada é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda da radiação incidente. Esse regime ocorre no 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. Este regime de espalhamento ocorre na interação da radiação solar com 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.

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

- (a) Irradiância difusa: Consiste na irradiância descendente numa superfície horizontal, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens, etc.).
- (b) Irradiância direta 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 das 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 (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 de aquisição de dados no território brasileiro. O banco de dados da rede SONDA está dividido em dois grupos: dados ambientais, subdivididos em dados meteorológicos e dados solarimétricos, e dados eólicos. 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 4.1, 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.

Tabela 4.1 – Estações do Projeto SONDA selecionadas para o projeto.

<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' O, 387m	07/2004 a 08/2007
São Martinho da Serra (RS) 29°44' S, 53°48' O, 489m	04/2006 a 11/2007

4.2 – 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 4.2.

Tabela 4.2 – Significado dos códigos de qualificação empregados na base de dados do Projeto SONDA.

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

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.

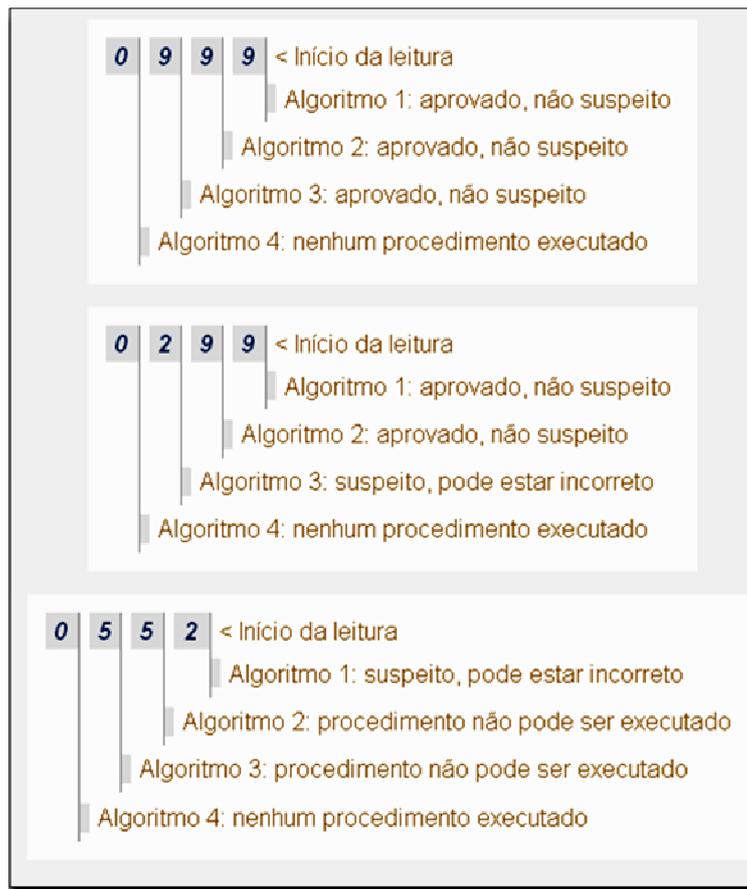


Figura 4.12 – Códigos de qualificação dos dados do Projeto SONDA.

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

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.

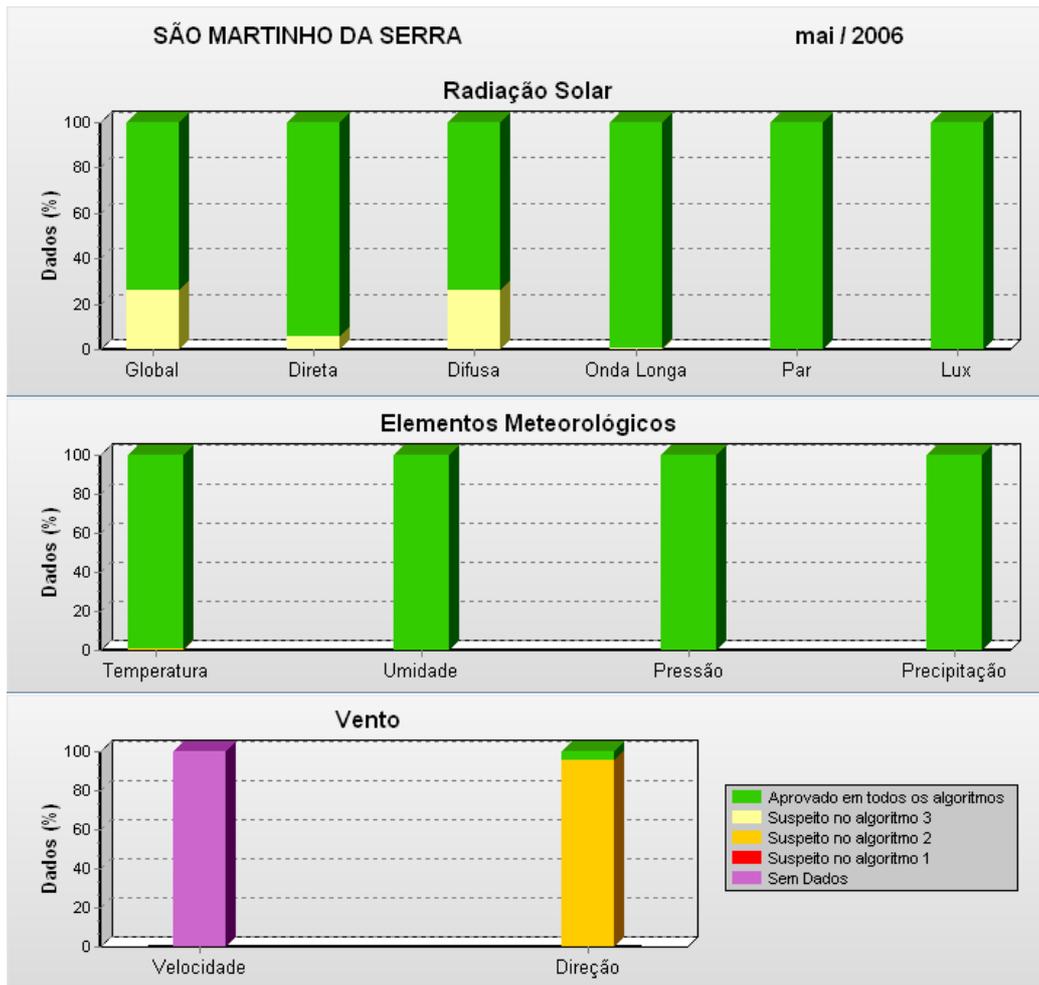


Figura 4.13 – Exemplo de qualificação de dados da Estação SONDA – SMS.

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.

Partindo da equação 4.1 para ajuste polinomial, 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.

$$F(a_0, a_1, \dots, a_n) = \sum_{k=1}^m (\phi_k - y_k)^2 = \sum_{k=1}^m (a_0 + a_1 x_k + a_2 x_k^2 + \dots + a_n x_k^n - y_k)^2 \quad \text{Eq. (4.2)}$$

onde y_k e x_k representam o k -ésimo valor da abcissa e da ordenada dos dados, respectivamente, e m é o número total de medidas que 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.

$$\frac{\partial F}{\partial a_0} = 2 \cdot \sum_{k=1}^m (a_0 + a_1 x_k + \dots + a_n x_k^n - y_k) \cdot (1) = 0 \quad \text{Eq. (4.3)}$$

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

$$\frac{\partial F}{\partial a_2} = 2 \cdot \sum_{k=1}^m (a_0 + a_1 x_k + \dots + a_n x_k^n - y_k) \cdot (x_k^2) = 0 \quad \text{Eq. (4.5)}$$

⋮

$$\frac{\partial F}{\partial a_n} = 2 \cdot \sum_{k=1}^m (a_0 + a_1 x_k + \dots + a_n x_k^n - y_k) \cdot (x_k^n) = 0 \quad \text{Eq. (4.6)}$$

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.

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 4.14 e 4.15 representam gráficos com ambas as situações: o primeiro apresenta a irradiância solar direta normal e o segundo a irradiância solar direta horizontal.

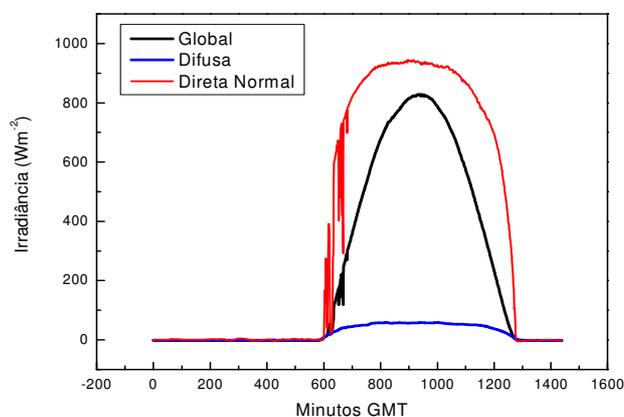


Figura 4.14 – Gráfico comparando as medidas de irradiância solar global e difusa horizontais com as medidas de irradiância solar direta normal coletadas no Observatório Espacial do Sul, São Martinho da Serra – RS, no dia 28/08/2007.

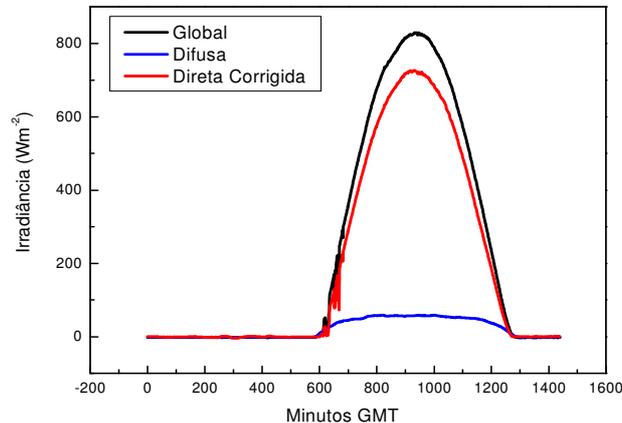


Figura 4.15 – Comparação entre as irradiâncias medidas em São Martinho da Serra – RS, em 28/08/2007, com a irradiância solar direta corrigida.

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.

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

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 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 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 4.16 a 4.18.

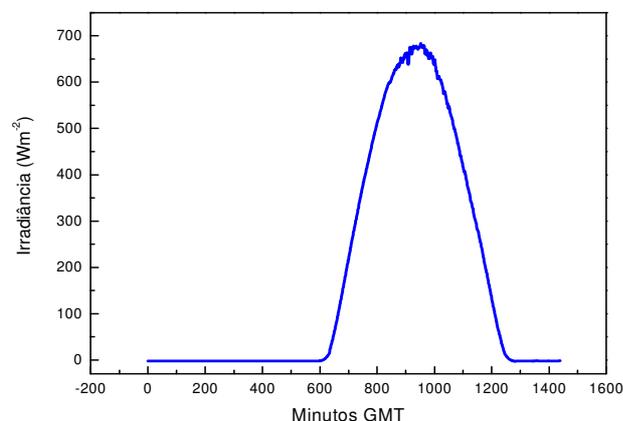


Figura 4.16 – Irradiância solar global para um dia com céu limpo (SMS – 01/08/2007).

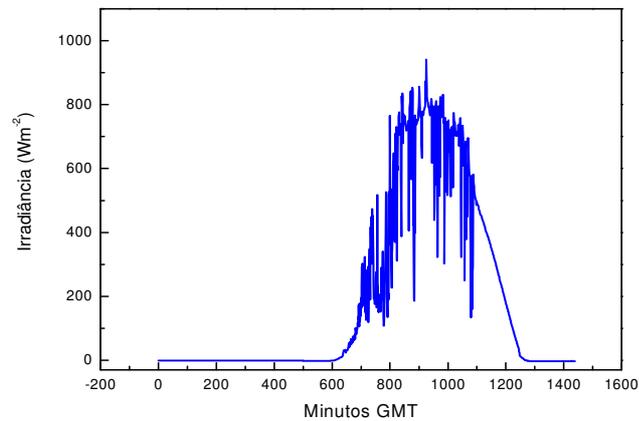


Figura 4.17 – Irradiância solar global para um dia com céu parcialmente nublado (SMS – 07/08/2007).

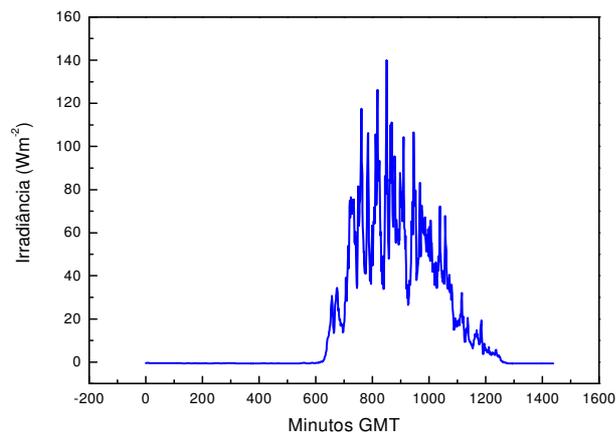


Figura 4.18 – Irradiância solar global para um dia completamente nublado (SMS – 03/08/2007).

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

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

Utilizando as equações (4.2) e (4.3), Ruth e Chant (1976), desenvolveram um modelo empírico para estimativa de K a partir de Kt , 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).

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

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 porcentagem. 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. O valor do RMSE está relacionado com a dispersão entre os valores estimados e observados nas estações de superfície decorrentes de erros não sistemáticos. Os valores dos dois desvios fornecem informações relevantes para avaliar a real confiabilidade das estimativas de um modelo.

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/CCR/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 dessecador 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/CCR/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/CCR/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.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

O presente Capítulo encontra-se dividido em três partes: uma referente à primeira etapa do Projeto de Pesquisa, elaborada no período de Agosto de 2007 a Julho de 2008, outra referente à segunda etapa, elaborada no período de Agosto de 2008 a Julho de 2009, e outra referente à terceira etapa, elaborada no período de Agosto de 2009 a Julho de 2010.

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 Kt , K e Kd para cada dia, excetuando-se alguns períodos que apresentaram falhas nos dados. Em seguida, esses valores calculados foram comparados com os modelos empíricos RC e CPR.

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

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 Kt é superior a 0,7. Nesta condição, ambos os modelos superestimam as medidas.

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

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

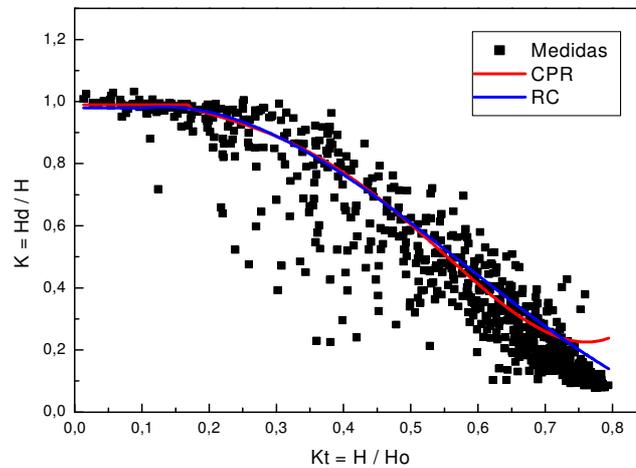


Figura 6.1 – Dispersão dos valores de K medidos no Observatório Espacial do Sul em comparação com os modelos empíricos CPR e RC.

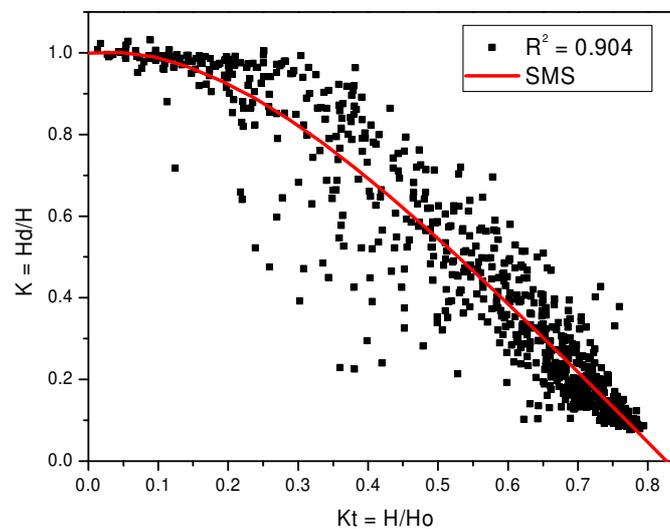


Figura 6.2 – Modelo SMS desenvolvido no Laboratório de Recursos de Energias Renováveis do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, em Santa Maria – RS, a partir de medidas realizadas no Observatório Espacial do Sul.

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

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

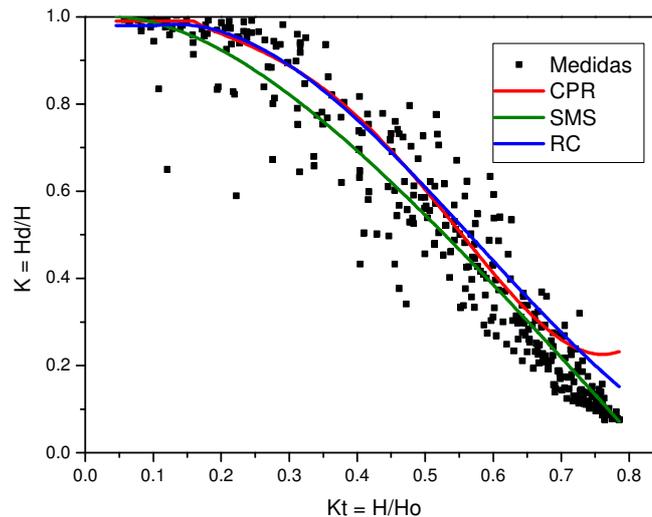


Figura 6.3 – Dispersão dos parâmetros de radiação solar durante o cálculo dos desvios estatísticos MBE e RMSE para os modelos empíricos CPR, RC e SMS.

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

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

Modelo	Desvios	Primavera	Verão	Outono	Inverno
--------	---------	-----------	-------	--------	---------

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

Verificou-se a concordância entre os valores previstos pelos modelos empíricos e as medidas de superfície, porém o modelo SMS apresentou os menores desvios MBE para todos os períodos. Em geral os modelos estatísticos superestimaram a irradiação na superfície. O modelo SMS mostrou pequenos desvios MBE% durante a Primavera e o Verão, mas apresentou maior super-estimativa no outono e subestimou a irradiação solar no inverno quando o clima é mais seco e a quantidade de aerossóis na atmosfera é superior.

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 do ano. Adicionalmente, nota-se que os desvios RMSE são maiores durante a Primavera e Verão. As causas desses desvios maiores devem ser investigadas mas, a hipótese inicial é que estejam relacionados a maior variabilidade da nebulosidade ao longo do dia nestas estações do ano.

De qualquer forma os modelos CPR e RC não apresentam bom desempenho na região quando os valores de Kt são superiores a 0,7. Provavelmente ambos foram desenvolvidos em regiões onde os valores de Kt são inferiores aos observados em São Martinho da Serra em razão de maior presença de constituintes atmosféricos com elevados coeficientes de espalhamento da radiação solar. A Tabela 6.2 apresenta os desvios estatísticos apenas para dias de céu claro, com $Kt > 0.7$. No entanto, não foi possível o estudo do caráter sazonal dos desvios em dias de céu claro uma vez que a ocorrência desta condição acontece principalmente nos meses de inverno.

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

Modelo	Desvios	
	CPR	MBE %
RMSE %		83,55
RC	MBE %	61,51

	RMSE %	66,82
SMS	MBE %	11,03
	RMSE %	28,72

Em resumo, os desvios estatísticos apresentados na Tabela 6.2 indicam 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 os modelos RC e CPR apresentam desempenho inferior em dias de céu claro.

6.2 – Segunda Etapa

Com a totalidade dos dados de irradiação solar coletados nas demais estações da rede SONDA listadas na Tabela 4.1, foram calculados os desvios estatísticos MBE e RMSE com relação às estimativas fornecidas pelo modelo SMS. Os resultados são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Desvios estatísticos entre as estimativas do modelo SMS e os dados coletados em cada uma das estações do Projeto SONDA selecionadas.

	<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

As estimativas do modelo SMS para as localidades das demais estações da 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 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 $Kt > 0.4$.

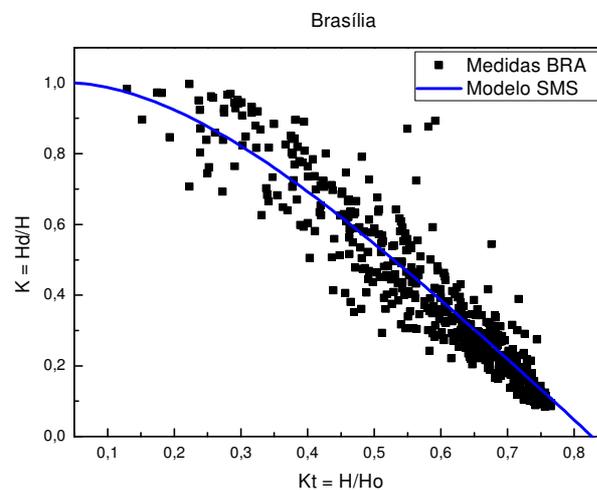


Figura 6.4 – Dispersão das medidas coletadas na estação SONDA de Brasília, juntamente com as estimativas do modelo SMS.

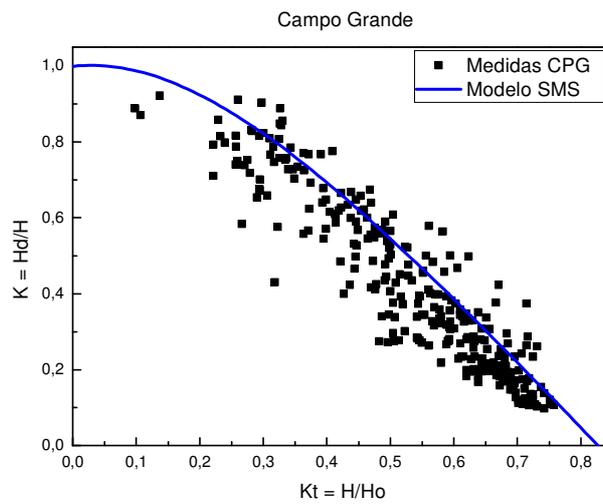


Figura 6.5 – Dispersão das medidas coletadas na estação SONDA de Campo Grande, juntamente com as estimativas do modelo SMS.

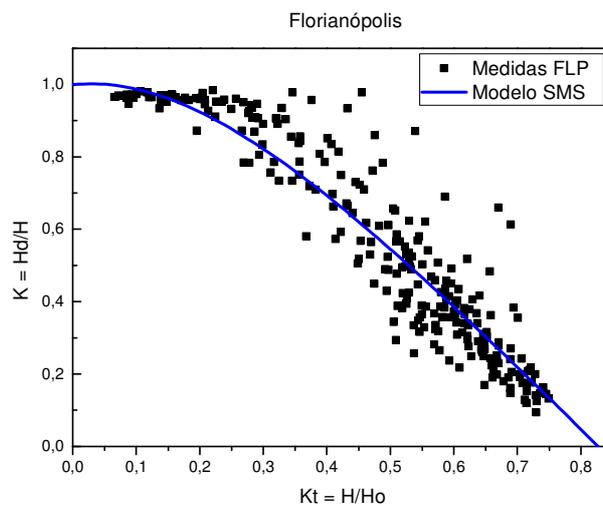


Figura 6.6 – Dispersão das medidas coletadas na estação SONDA de Florianópolis, juntamente com as estimativas do modelo SMS.

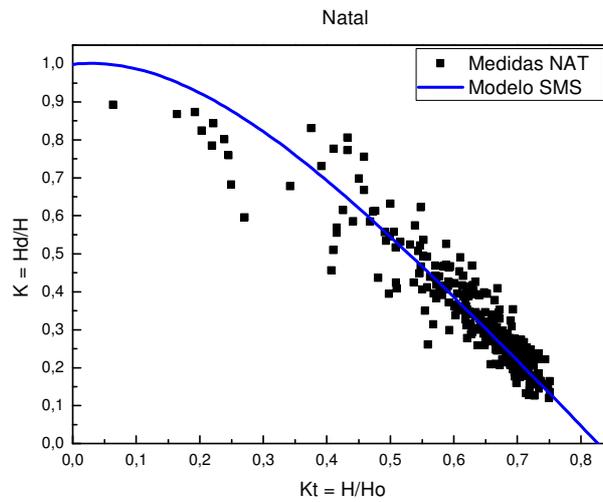


Figura 6.7 – Dispersão das medidas coletadas na estação SONDA de Natal, juntamente com as estimativas do modelo SMS.

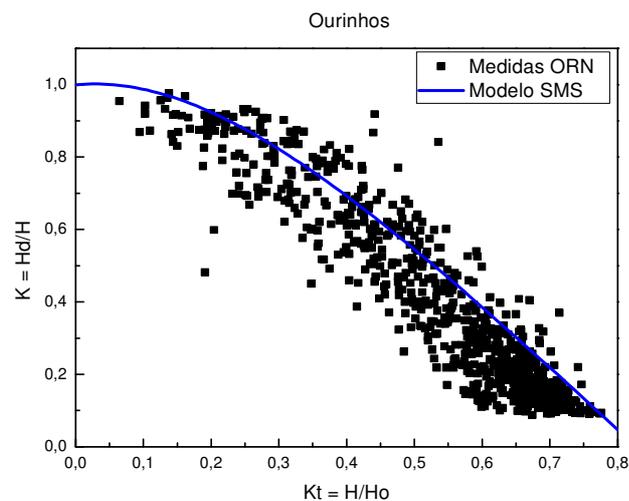


Figura 6.8 – Dispersão das medidas coletadas na estação SONDA de Ourinhos, juntamente com as estimativas do modelo SMS.

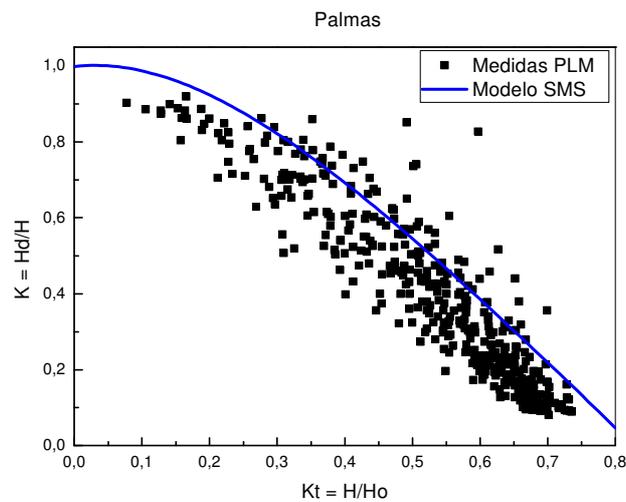


Figura 6.9 – Dispersão das medidas coletadas na estação SONDA de Palmas, juntamente com as estimativas do modelo SMS.

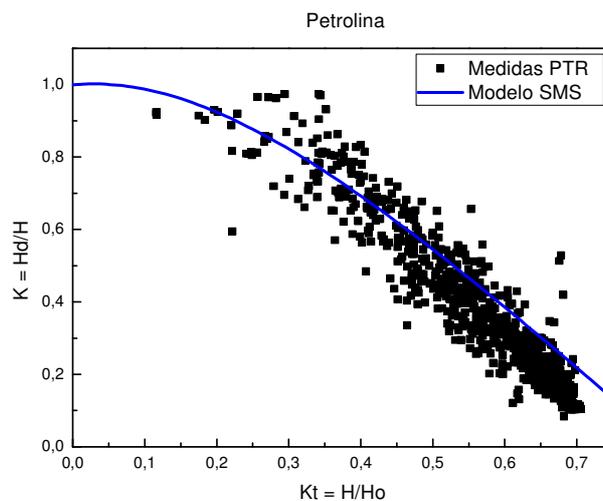


Figura 6.10 – Dispersão das medidas coletadas na estação SONDA de Palmas, juntamente com as estimativas do modelo SMS.

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 Kt com validade restrita a cada estação a qual correspondem os dados. Os modelos desenvolvidos são apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Modelos empíricos locais desenvolvidos para as estações selecionadas.

	<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	$0,640 + 2,937 * Kt - 9,863 * Kt^2 + 6,701 * Kt^3$

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 6.4. Os desvios calculados são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Desvios estatísticos calculados entre as medidas de cada estação SONDA selecionada e as estimativas dos modelos locais.

<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

A etapa de análise seguinte consistiu no desenvolvimento de um modelo empírico utilizando 70% dos dados disponíveis de todas as estações listadas na Tabela 4.1 com o intuito 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.

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

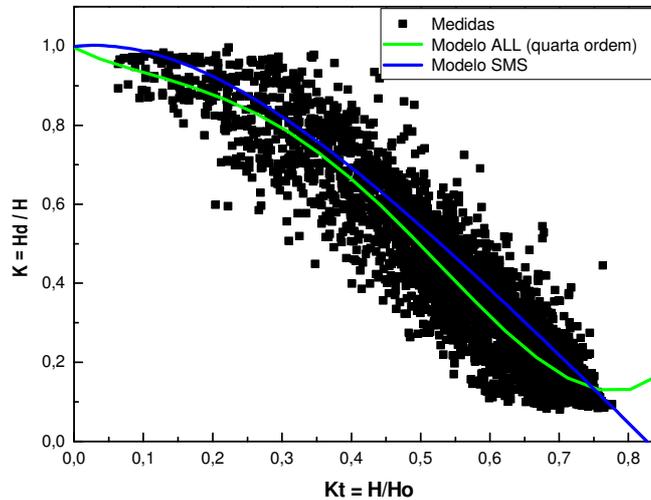


Figura 6.11 – Dispersão das medidas empregadas no desenvolvimento do modelo empírico ALL, juntamente com o modelo SMS, aplicados a base de dados de todas as estações SONDA selecionadas.

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 6.6.

Tabela 6.6 – Desvios estatísticos apresentados entre as estimativas do modelo ALL e as medidas coletadas em cada estação.

<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

Os desvios estatísticos apresentados entre as estimativas do modelo ALL e as medidas realizadas nas estações da rede SONDA apresentaram comportamentos distintos nas diversas localidades. 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.

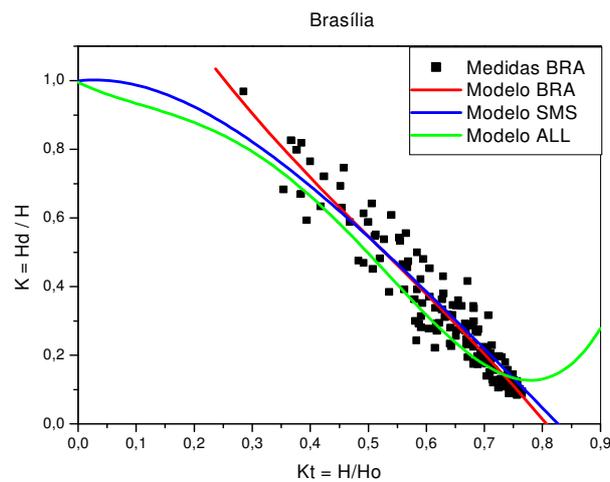


Figura 6.12 – Dispersão das medidas de Brasília reservadas para validação, juntamente com os modelos BRA, SMS e ALL.

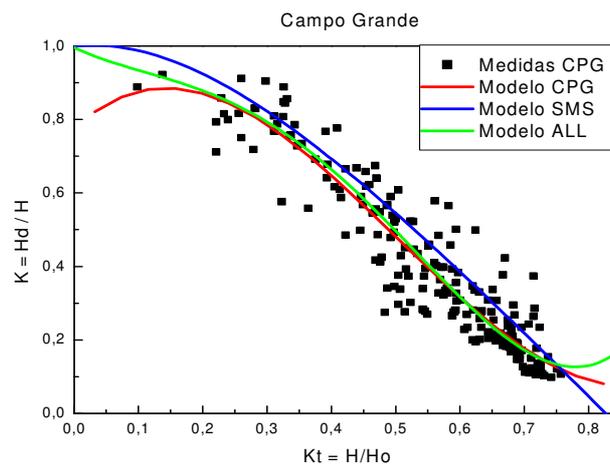


Figura 6.13 – Dispersão das medidas de Campo Grande reservadas para validação, juntamente com os modelos CPG, SMS e ALL.

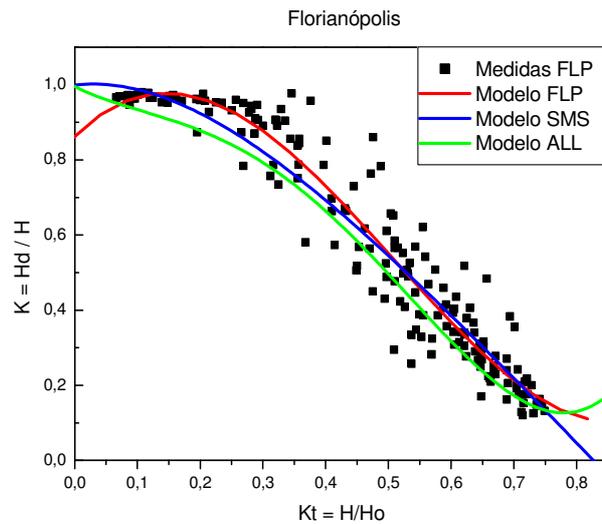


Figura 6.14 – Dispersão das medidas de Florianópolis reservadas para validação, juntamente com os modelos FLP, SMS e ALL.

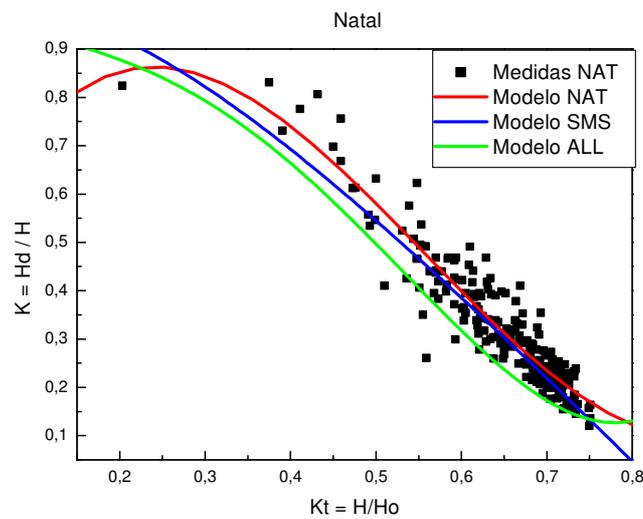


Figura 6.15 – Dispersão das medidas de Natal reservadas para validação, juntamente com os modelos NAT, SMS e ALL.

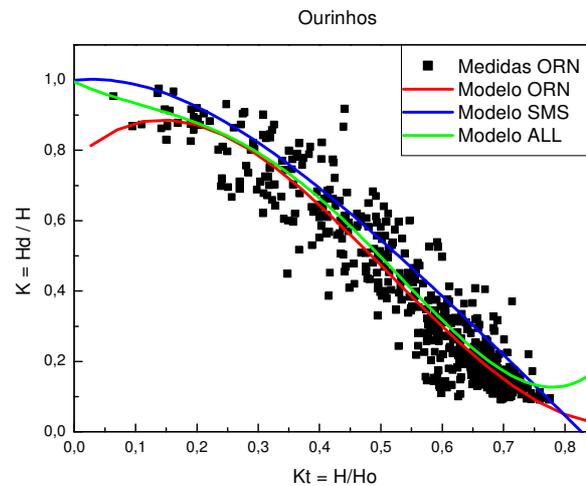


Figura 6.16 – Dispersão das medidas de Ourinhos reservadas para validação, juntamente com os modelos ORN, SMS e ALL.

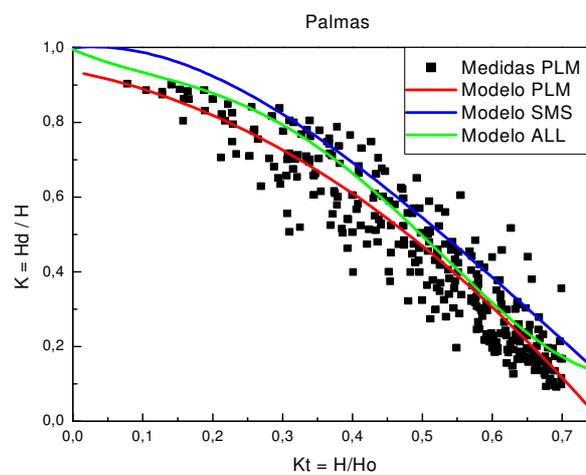


Figura 6.17 – Dispersão das medidas de Palmas reservadas para validação, juntamente com os modelos PLM, SMS e ALL.

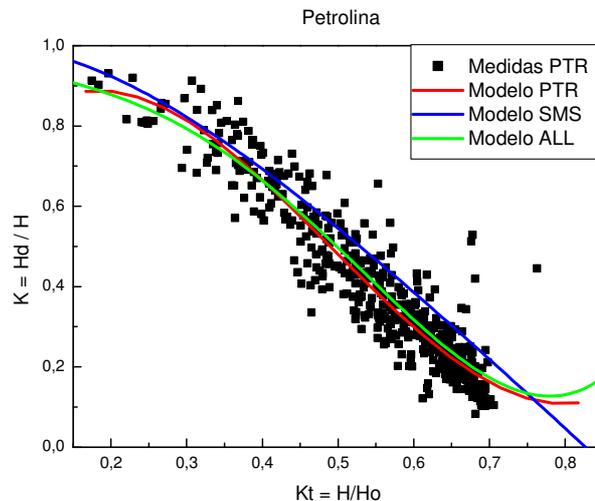


Figura 6.18 – Dispersão das medidas de Petrolina reservadas para validação, juntamente com os modelos PTR, SMS e ALL.

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.

6.3 – Terceira Etapa

Como método alternativo à solução rigorosa da equação de transferência radiativa (ETR), são apresentados na literatura técnico-científica modelos de estimativa de radiação solar com base na parametrização dos processos de transferência radiativa que ocorrem na atmosfera, entre seus constituintes e a radiação solar, como é o caso dos modelos denominados A, B e C propostos por Iqbal (1983) para estimativa da radiação horária em superfície.

O modelo C de Iqbal (1983), apresentado na equação (6.2), foi desenvolvido a partir de contribuições realizadas por vários pesquisadores, em especial Bird e Hulstron

(1980), e surgiu de análises comparativas do modelo matemático SOLTRAN, construído a partir do modelo LOWTRAN, de Selby & McClatchey (1975) e Selby et al. (1978). O modelo utiliza a parametrização da transmitância da radiação solar direta normal a partir da influência exercida pelo espalhamento por moléculas de ar, denominado espalhamento Rayleigh, do espalhamento e absorção por aerossóis e da absorção pela camada de ozônio, gases atmosféricos e vapor d'água, abrangendo o intervalo espectral de 300 a 3000 nm.

$$I = 0,9751 E_o I_{sc} \tau_R \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a \quad \text{Eq. (6.2)}$$

onde τ_R , τ_o , τ_g , τ_w e τ_a representam, respectivamente, as transmitâncias associadas ao espalhamento Rayleigh, à absorção e espalhamento pelo ozônio, gases atmosféricos, vapor d'água e aerossóis, parametrizados conforme as definições dadas a seguir, I_{sc} representa a constante solar, cujo valor é de 1368 W/m², e E_o é o fator de correção de excentricidade da órbita da Terra.

A transmitância τ_R devido ao espalhamento Rayleigh foi parametrizada a partir da equação (6.3), sendo m_a a massa ótica relativa de ar, definida de acordo com a equação (6.5) e corrigida de acordo com a equação (6.4), onde θ_z é o ângulo zenital solar e p a pressão atmosférica em mbars (milibars) (Iqbal, 1983).

$$\tau_R = \exp[-0,0903 m_a^{0,84} (1 + m_a - m_a^{1,01})] \quad \text{Eq. (6.3)}$$

$$m_a = m_r \left(\frac{p}{1013,25} \right) \quad \text{Eq. (6.4)}$$

$$m_r = [\cos(\theta_z) + 0,15(93,885 - \theta_z)^{-1,253}]^{-1} \quad \text{Eq. (6.5)}$$

Quanto à interação com a camada de ozônio atmosférico, a transmitância τ_o é definida de acordo com a equação (6.6), sendo $U_o = lm_r$, em que l é a espessura da camada vertical de ozônio, expressa em centímetros.

$$\tau_o = 1 - [0,1611 U_o (1 + 139,48 U_o)^{-0,3035} - 0,002715 U_o (1 + 0,044 U_o)^{-1}] \quad \text{Eq. (6.6)}$$

As transmitâncias devido aos gases atmosféricos, ao vapor d'água e aos aerossóis atmosféricos são expressas pelas equações (6.7), (6.8) e (6.9), respectivamente, em que $U_w = wm_r$, sendo w a água precipitável em centímetros.

$$\tau_a = \exp[-0,0127m_a^{0,26}] \quad \text{Eq. (6.7)}$$

$$\tau_w = 1 - 2,4959U_w[(1 + 79,034U_w)^{0,6828} + 6,385U_w]^{-1} \quad \text{Eq. (6.8)}$$

$$\tau_a = [0,97 - 1,265(Vis)^{-0,66}]m_a^{0,9} \quad \text{Eq. (6.9)}$$

onde Vis é a visibilidade horizontal (em km), determinada a partir da equação (6.10), (Mächler & Iqbal, 1985), sendo α e β os parâmetros de Angstrom, associados à espessura ótica de aerossóis (AOT) k de acordo com as equações (6.11) e (6.12), em que $x = 0,55^{-\alpha}$.

$$Vis = 147,994 - 1740,523[\beta x - (\beta^2 x^2 - 0,17\beta x + 0,011758)^{0,5}] \quad \text{Eq. (6.10)}$$

$$\alpha = \ln(k_1/k_2)/\ln(\lambda_2/\lambda_1) \quad \text{Eq. (6.11)}$$

$$\beta = k_1(\lambda_1)^\alpha \quad \text{Eq. (6.12)}$$

Foram selecionados os dias julianos 258, 268, 276, 285, 286, 291, 292, 293 e 300 do ano de 2009, que apresentaram menor nebulosidade, para estudos de aplicação do modelo C para a região da Estação SONDA instalada no Observatório Espacial do Sul. Esses dias julianos correspondem às dias de 2009 de 15 e 25 de Setembro, e de 3, 12, 13, 18, 19, 20 e 27 de Outubro.

Partindo dessas datas definidas, os dados necessários ao cálculo das transmitâncias do modelo C foram reduzidos e qualificados de acordo com os padrões estabelecidos para a rede SONDA. A dispersão das medidas de irradiância solar global

e de suas componentes direta horizontal e difusa para as datas selecionadas são apresentadas nas Figuras de 6.19 a 6.27.

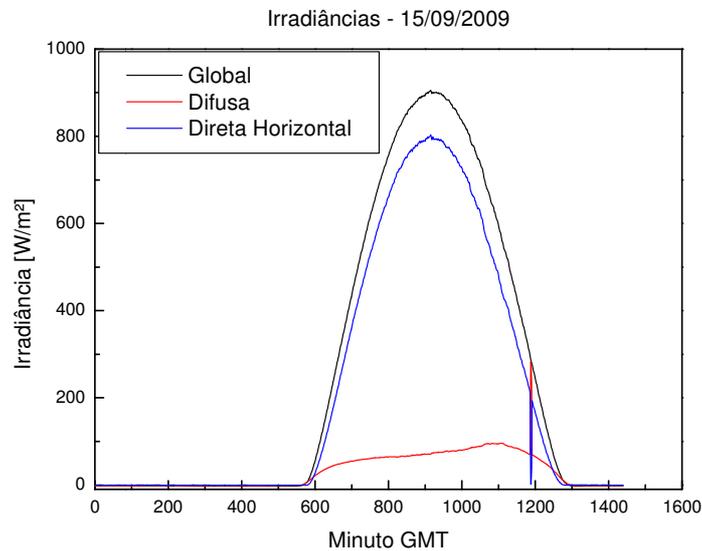


Figura 6.19 – Medidas de irradiância solar global e suas componentes difusa e direta horizontal para o dia 15/09/2009.

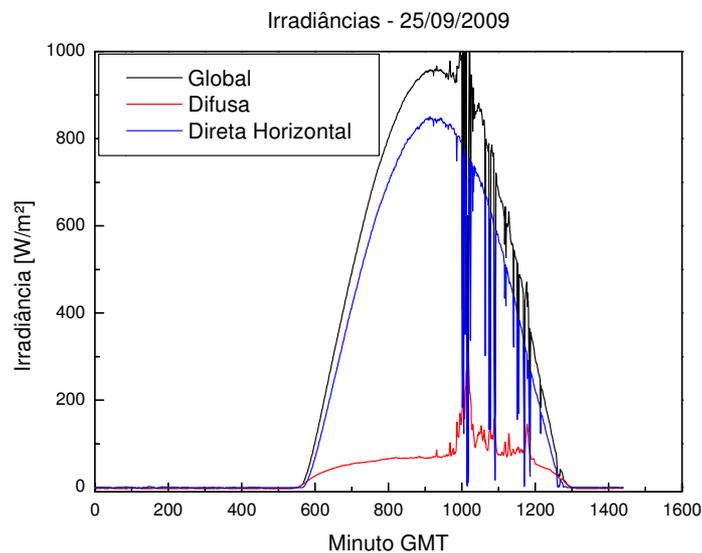


Figura 6.20 – Medidas de irradiância solar global e suas componentes difusa e direta horizontal para o dia 25/09/2009.

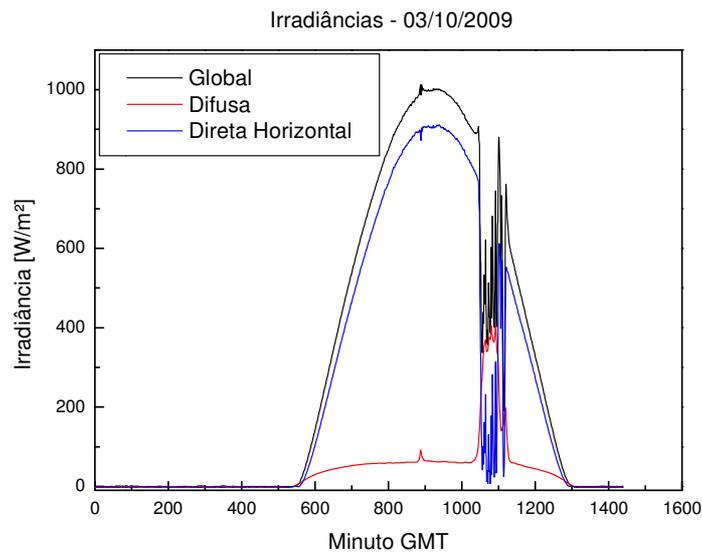


Figura 6.21 – Medidas de irradiância solar global e suas componentes difusa e direta horizontal para o dia 03/10/2009.

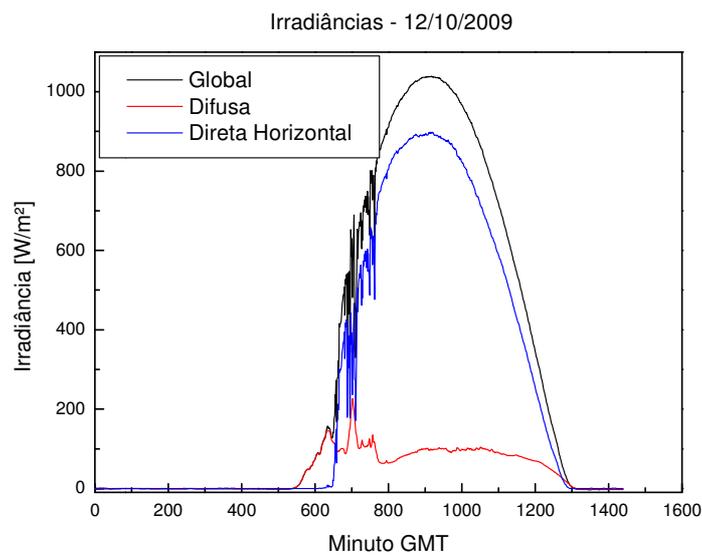


Figura 6.22 – Medidas de irradiância solar global e suas componentes difusa e direta horizontal para o dia 12/10/2009.

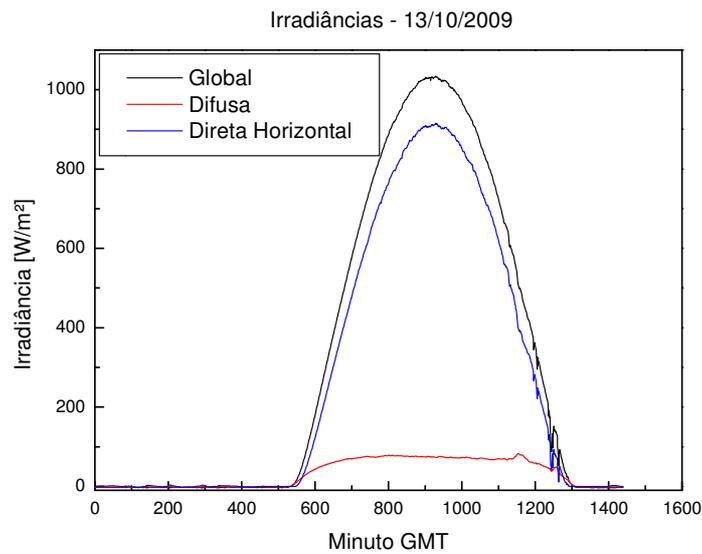


Figura 6.23 – Medidas de irradiância solar global e suas componentes difusa e direta horizontal para o dia 13/10/2009.

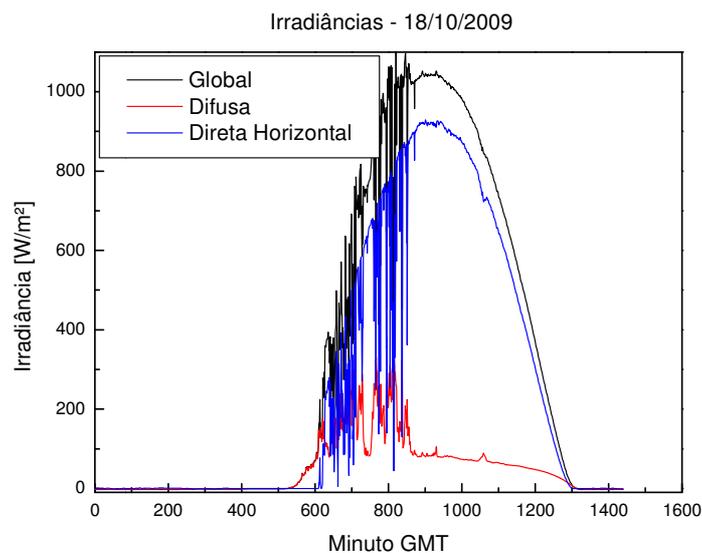


Figura 6.24 – Medidas de irradiância solar global e suas componentes difusa e direta horizontal para o dia 18/10/2009.

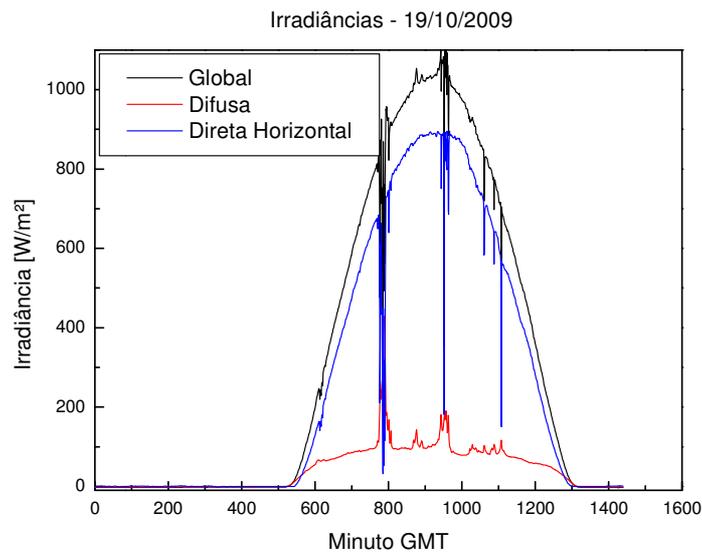


Figura 6.25 – Medidas de irradiância solar global e suas componentes difusa e direta horizontal para o dia 19/10/2009.

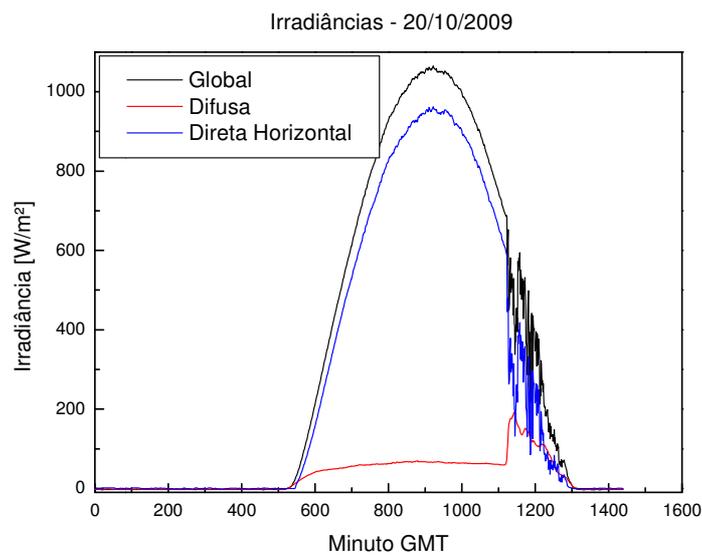


Figura 6.26 – Medidas de irradiância solar global e suas componentes difusa e direta horizontal para o dia 20/10/2009.

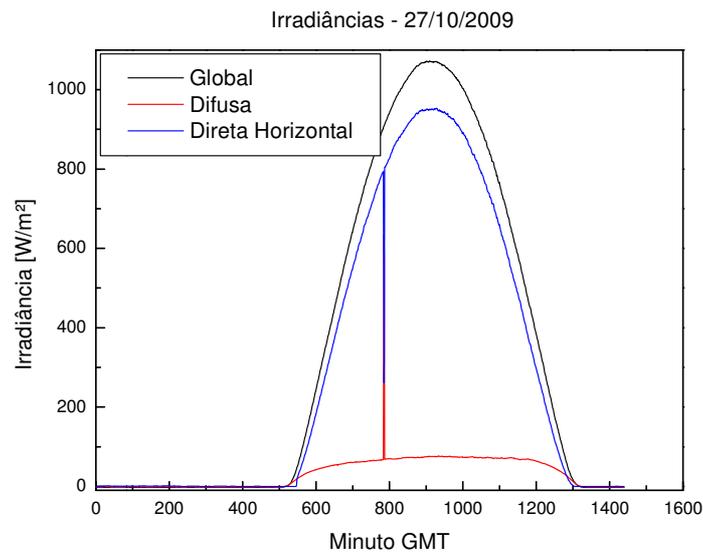


Figura 6.27 – Medidas de irradiância solar global e suas componentes difusa e direta horizontal para o dia 27/10/2009.

A dispersão dos valores das transmitâncias calculados para as datas selecionadas é apresentada nas Figuras de 6.28 a 6.37.

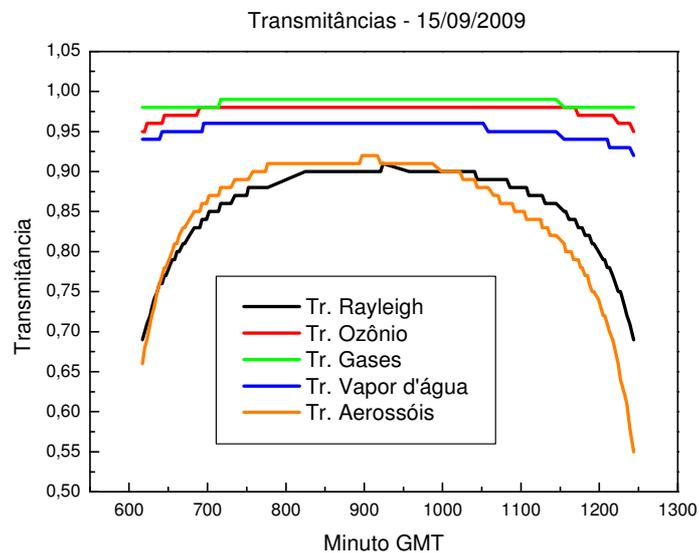


Figura 6.28 – Transmitâncias estimadas para o dia 15/09/2009.

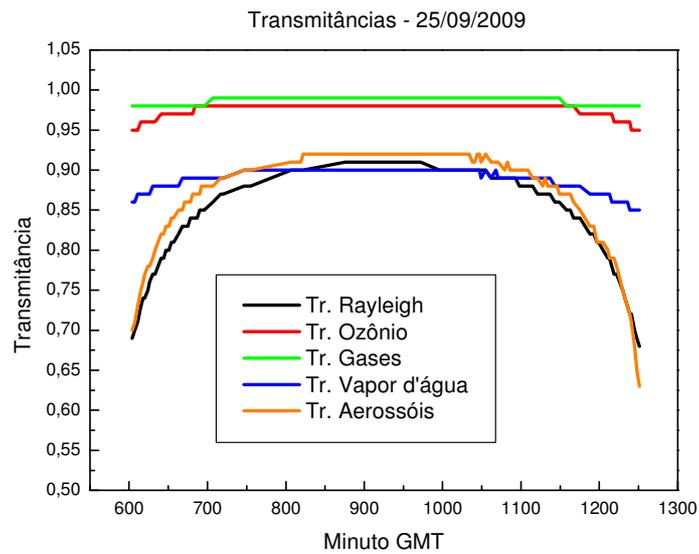


Figura 6.29 – Transmitâncias estimadas para o dia 25/09/2009.

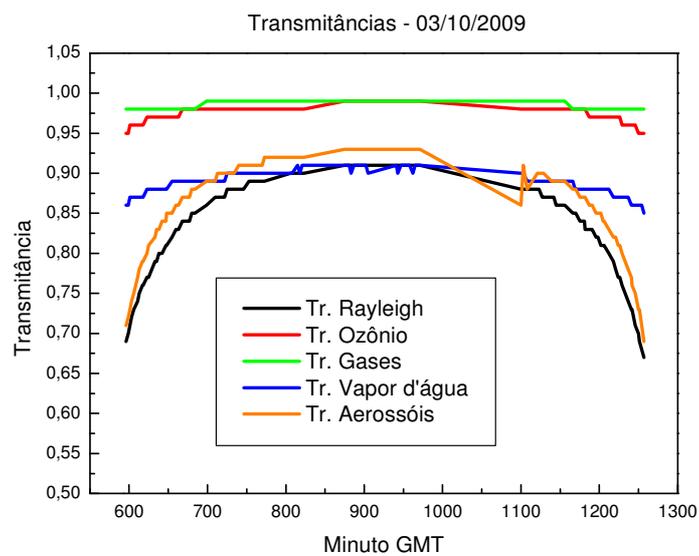


Figura 6.30 – Transmitâncias estimadas para o dia 03/10/2009.

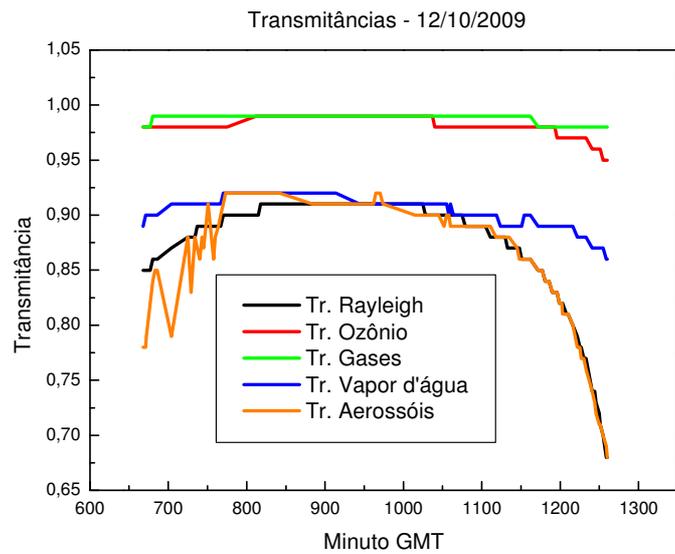


Figura 6.31 – Transmitâncias estimadas para o dia 12/10/2009.

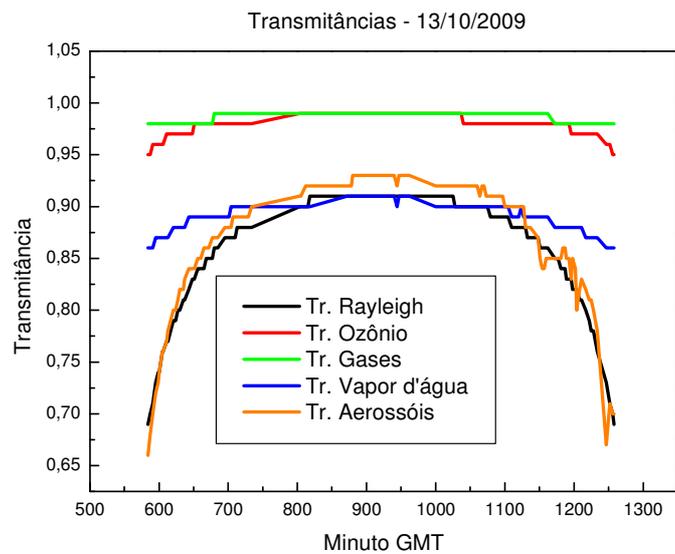


Figura 6.32 – Transmitâncias estimadas para o dia 13/10/2009.

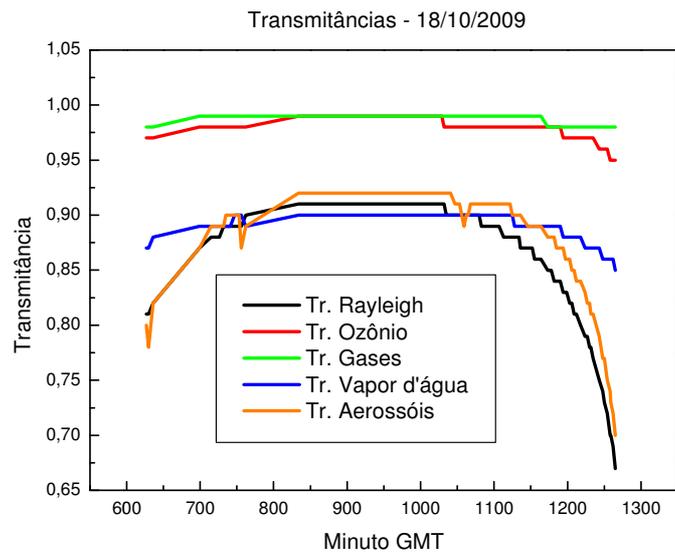


Figura 6.33 – Transmitâncias estimadas para o dia 18/10/2009.

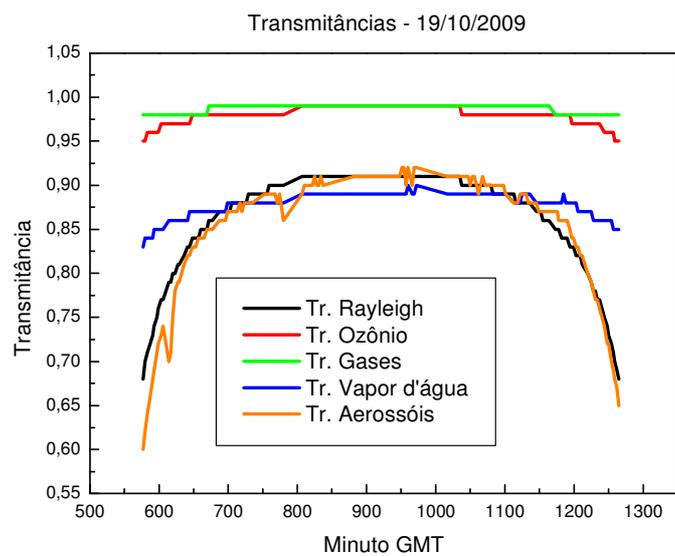


Figura 6.34 – Transmitâncias estimadas para o dia 19/10/2009.

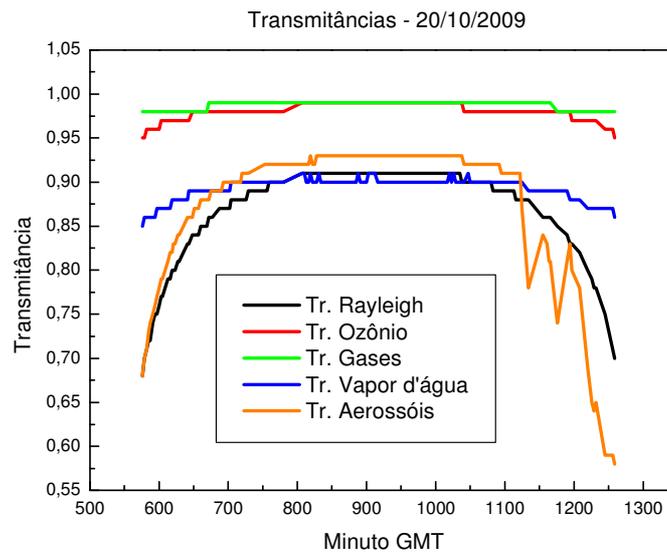


Figura 6.35 – Transmitâncias estimadas para o dia 20/10/2009.

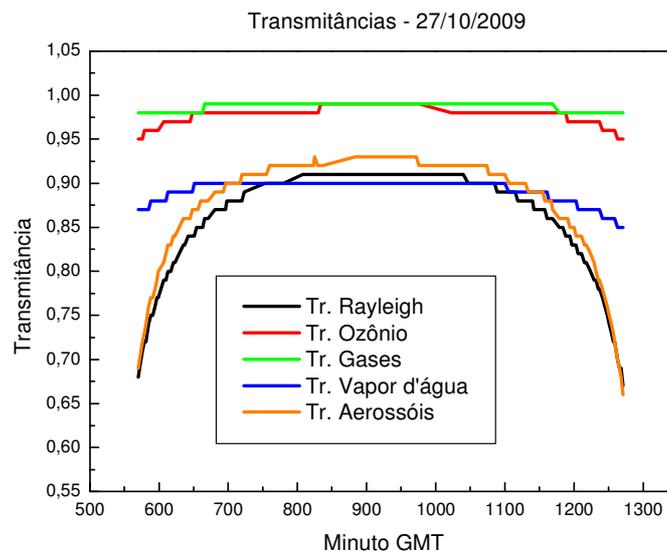


Figura 6.36 – Transmitâncias estimadas para o dia 27/10/2009.

Uma vez calculadas as transmitâncias dos constituintes atmosféricos para os dias selecionados, utilizou-se a equação (6.2) para estimar a irradiância solar direta horizontal em superfície. As curvas dos valores estimados pelo modelo C de Iqbal (1983), juntamente com a dispersão das medidas coletadas na estação instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT, são apresentadas nas Figuras de 6.37 a 6.46.

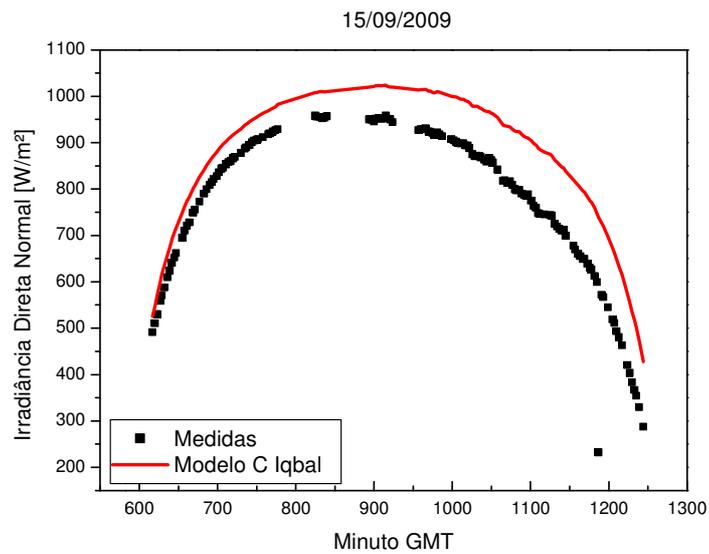


Figura 6.37 – Dispersão das medidas coletadas no Observatório Espacial do Sul para o dia 15/09/2009, juntamente com a curva dos valores estimados pelo modelo C.

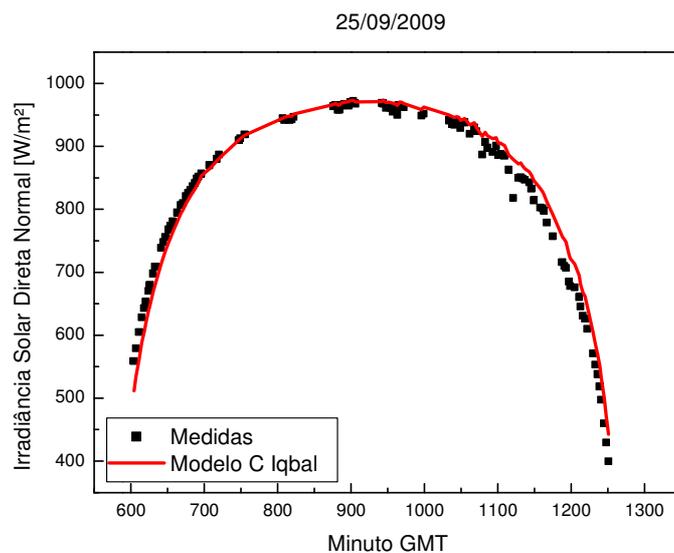


Figura 6.38 – Dispersão das medidas coletadas no Observatório Espacial do Sul para o dia 25/09/2009, juntamente com a curva dos valores estimados pelo modelo C.

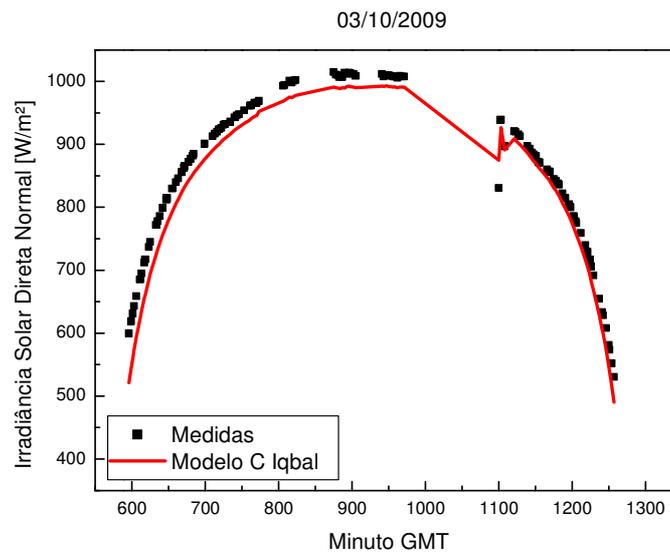


Figura 6.38 – Dispersão das medidas coletadas no Observatório Espacial do Sul para o dia 03/10/2009, juntamente com a curva dos valores estimados pelo modelo C.

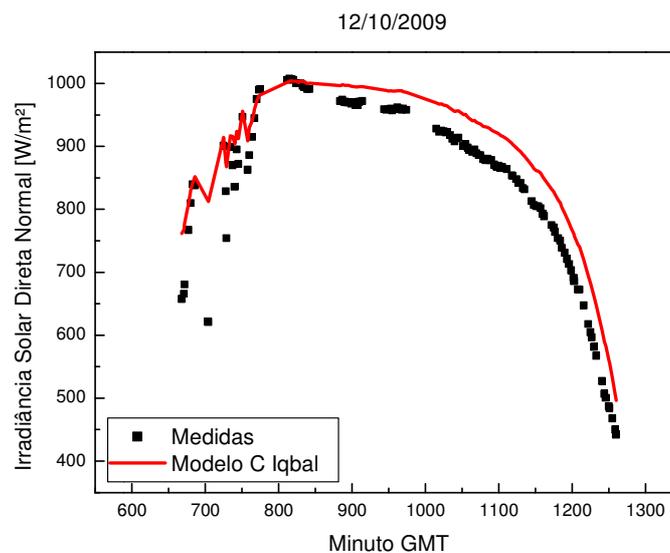


Figura 6.39 – Dispersão das medidas coletadas no Observatório Espacial do Sul para o dia 12/10/2009, juntamente com a curva dos valores estimados pelo modelo C.

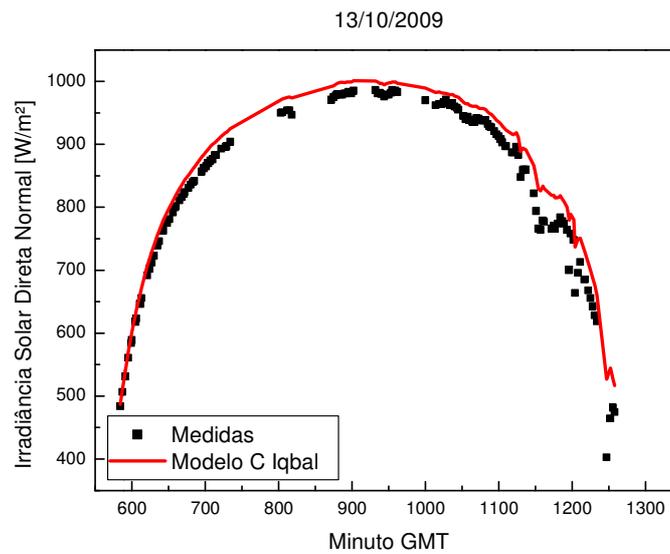


Figura 6.40 – Dispersão das medidas coletadas no Observatório Espacial do Sul para o dia 13/10/2009, juntamente com a curva dos valores estimados pelo modelo C.

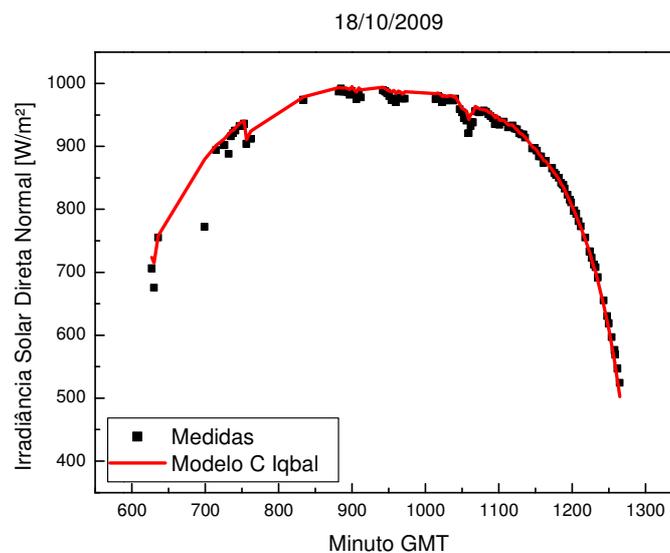


Figura 6.41 – Dispersão das medidas coletadas no Observatório Espacial do Sul para o dia 18/10/2009, juntamente com a curva dos valores estimados pelo modelo C.

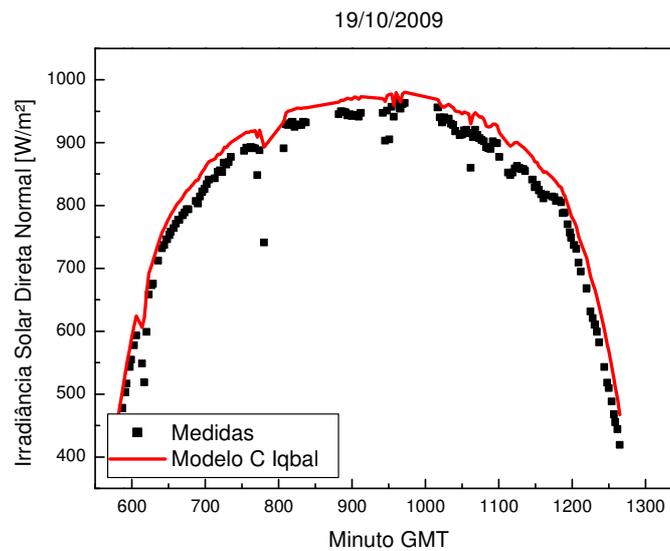


Figura 6.42 – Dispersão das medidas coletadas no Observatório Espacial do Sul para o dia 19/10/2009, juntamente com a curva dos valores estimados pelo modelo C.

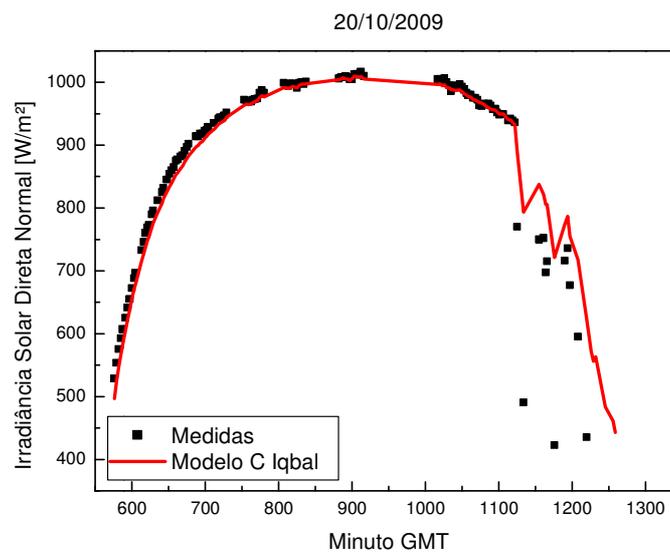


Figura 6.43 – Dispersão das medidas coletadas no Observatório Espacial do Sul para o dia 20/10/2009, juntamente com a curva dos valores estimados pelo modelo C.

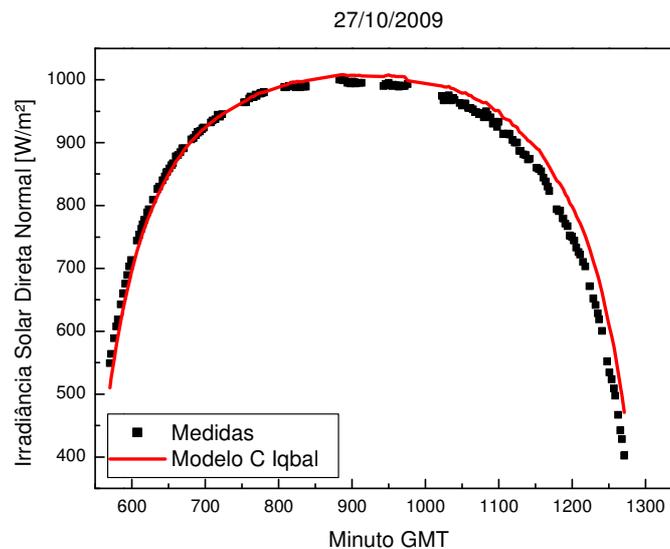


Figura 6.44 – Dispersão das medidas coletadas no Observatório Espacial do Sul para o dia 27/10/2009, juntamente com a curva dos valores estimados pelo modelo C.

Adicionalmente, o desempenho do modelo C de Iqbal (1983) na estimativa de irradiância solar direta normal para o Observatório Espacial do Sul pode ser analisado através da Figura 6.45, que apresenta um gráfico dos valores estimados e medidos para todos os dias selecionados.

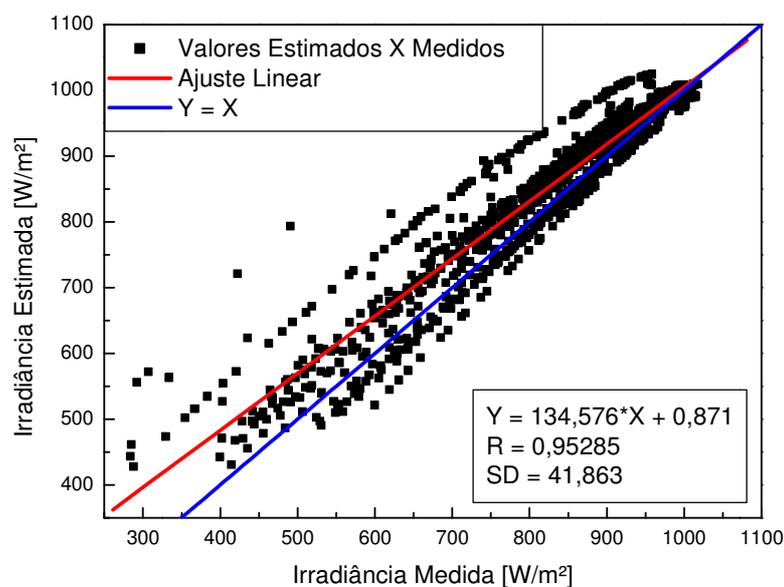


Figura 6.45 – Valores estimados e medidos pelo modelo C para o período de dados selecionado para análise.

A avaliação da adaptação do modelo C aos dados coletados pela estação do Observatório Espacial do Sul foi realizada através do cálculo dos desvios estatísticos MBE (*Mean Bias Error*) e RMSE (*Root Mean Square Error*), definidos de acordo com (4.6). Os valores dos desvios calculados para cada um dos dias selecionados são apresentados na Tabela 6.9.

Dia Juliano	MBE [W/m ²]	MBE [%]	RMSE [W/m ²]	RMSE [%]
258	96,14	12,42	108,99	14,08
268	7,95	0,97	23,56	2,87
276	-25,70	-2,98	30,23	3,51
285	45,00	5,35	52,77	6,27
286	26,06	3,11	30,71	3,67
291	4,58	0,52	29,77	3,36
292	34,11	4,23	37,67	4,68
293	14,55	1,69	69,40	8,08
300	15,57	1,81	28,87	3,36

Tabela 6.9 – Desvios estatísticos calculados entre as estimativas do modelo C e as medidas coletadas no Observatório Espacial do Sul

O desvio estatístico MBE entre as estimativas fornecidas pelo modelo C e os dados de todos os dias selecionados foi de 26,35 W/m² (3,15 %), e o desvio RMSE foi de 53,15 W/m² (6,35 %).

De modo geral, os resultados mostram um bom desempenho do modelo C quando empregado para as medidas coletadas no Observatório Espacial do Sul, com predominância de sobre-estimativa em relação aos valores reais. Os desvios RMSE prevaleceram entre 2 % a 8 % da média, com exceção do dia Juliano 258, que apresentou desvio RMSE de 14,08 %, o que já era esperado da análise do gráfico da Figura 6.37, onde é possível notar claramente que os valores estimados pelo modelo são superiores aos valores medidos.

CONCLUSÕES

Durante o período correspondente ao Projeto de Iniciação Científica, o acadêmico teve a oportunidade de realizar revisão bibliográfica de diversas literaturas acerca da temática proposta para o Projeto de Avaliação do Potencial Solar do Sul do Brasil, em especial sobre assuntos referentes à parametrização dos processos de transferência radiativa que ocorrem entre a radiação solar e os constituintes atmosféricos.

Na primeira etapa do Projeto, realizada no período de Agosto de 2007 a Julho de 2008, desenvolveu-se um modelo matemático 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/CCR/INPE – MCT, em São Martinho da Serra – RS. O modelo foi referenciado como SMS e validado em função das estações do ano. Os resultados mostraram boa adaptação do modelo SMS às medidas de superfície.

Na segunda etapa, foram utilizadas medidas coletadas por outras sete estações do Projeto SONDA para avaliar o desempenho do modelo SMS quando aplicado no restante do país. Adicionalmente, foram desenvolvidos modelos matemáticos locais para cada uma das estações SONDA utilizadas, utilizando metodologia semelhante à empregada para o modelo SMS, e um modelo nacional, denominado modelo ALL. A análise do desempenho de cada um dos modelos foi realizada a partir do cálculo dos desvios estatísticos MBE e RMSE. 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 inadequada sua aplicação para essas localidades. 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 $Kt > 0.4$. Os desvios estatísticos

apresentados entre as estimativas do modelo ALL, desenvolvido utilizando dados coletados em 8 estações da rede SONDA indicou desempenho diferenciado em cada localidade. Um estudo mais aprofundado é necessário para identificar as causas do desempenho dispare quando aplicado às diversas localidades. As hipóteses iniciais estão relacionadas às condições climáticas ambientais diferenciadas e a diferença na proporção de dados utilizados de cada estação para o desenvolvimento do modelo ALL. Especificamente, o modelo ALL apresentou melhor desempenho 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.

Na etapa seguinte do Projeto de Pesquisa, estudou-se a adaptabilidade de um modelo numérico para estimativa de irradiância solar direta normal ao plano de incidência do feixe, denominado modelo C de Iqbal (1983) e desenvolvido como simplificação de modelos de transferência radiativa mais rigorosos, como os modelos SOLTRAN e LOWTRAN. Os parâmetros relativos aos constituintes atmosféricos necessários como variáveis de entrada do modelo C foram estimados por métodos que empíricos adaptados à base de dados do Projeto SONDA. O modelo leva em conta a influência dos aerossóis e gases atmosféricos, da camada de ozônio, de vapor d'água e da variação da pressão atmosférica.

O desempenho do modelo C foi analisado através do cálculo dos desvios estatísticos MBE e RMSE de suas estimativas para a estação SONDA do Observatório Espacial do Sul em alguns dias selecionados de céu claro ou com pouca nebulosidade. Os desvios RMSE permaneceram entre 2% a 14% da média dos valores medidos, o que demonstra boa confiabilidade nas estimativas do modelo. Os desvios MBE positivos indicaram a predominância de super-estimativa da irradiação solar, porém com valores MBE consideravelmente baixos. Os desvios MBE e RMSE calculados com os dados de todos os dias selecionados foram de 3,15% e 6,35%, o que indica que a aplicação do modelo C à estação SONDA considerada resulta em boas estimativas da irradiância solar direta em superfície.

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.

Chaiwiwatworakul, P., Chirarattananon, S. An Investigation of atmospheric turbidity of Thai Sky. **Energy and Buildings**, 36, 650-659, 2004.

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.

Mächler, M.A. **Parametrization of solar irradiation under clear skies**. M.A. Sc. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1985.

Mächler, M.A., Iqbal, M. A Modification of ASHRAE clear sky irradiation model. **Trans. ASHRAE A 91**, 106-115, 1985.

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.

Rubio, M.A., López, G., Tovar, J., Pozo, D., Battles, F.J. The use of satellite measurements to estimate photosynthetically active radiation. **Physics and Chemistry of the Earth**, Vol. 30, 159-164, 2005.

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.