

# **Dissertação de Mestrado**

T530  
A81c

C 549266

FC-00005277-4

R 1136640

## **Caracterização da Irradiância Solar em Fortaleza No Ano de 1996**

por

**José Sidou Albuquerque**

**Universidade Federal do Ceará – UFC  
Departamento de Física  
Fortaleza, fevereiro de 1999**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- A31c Albuquerque, José Sidou.  
Caracterização da irradiância solar em Fortaleza no ano de 1996 / José Sidou Albuquerque. – 1999.  
85 f. : il.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Física, Fortaleza, 1999.  
Orientação: Prof. Dr. José Carlos Parente de Oliveira.
1. Pesquisa meteorológica - Fortaleza (CE). 2. Radiação solar. I. Título.

CDD 530

---

**Dissertação de Mestrado**

**Caracterização da Irradiância Solar em Fortaleza  
No Ano de 1996**

por

**José Sidou Albuquerque**

**Dissertação submetida ao Departamento de Física da UFC  
Como requisito para a obtenção do grau  
De Mestre em Física**

Banca Examinadora:

**Prof. Dr. José Carlos Parente de Oliveira - UFC  
Orientador**

**Prof. Dr. Juan Carlos Ceballos - INPE  
Membro**

**Prof. Dr. Carlos Jacinto de Oliveira - UECE  
Membro**

**Profa. Dra. Maria Marlúcia Freitas Santiago - UFC  
Membro**

**Dissertação aprovada em 26 de fevereiro de 1999**

Aos meus pais,  
Manoel Albuquerque e Maria  
Célia Sidou Albuquerque,  
já falecidos e também à  
memória de  
Francisco Ferreira Costa,  
(tio Costinha)  
dedico este trabalho.



# Agradecimentos

À Fátima, Andressa e Karla pelo companheirismo, e por todas histórias compartilhadas.

À minha família, por ser o meu melhor referencial em todos os momentos.

Ao professor José Carlos Parente de Oliveira cuja orientação e perseverança foram o alicerce deste trabalho.

À Manuel Pereira da Costa pela amizade e contribuição inestimável em todas as fases do projeto de monitoração da radiação solar em Fortaleza.

Ao professor Juan Carlos Ceballos pelas sugestões sempre acatadas.

Aos professores Carlos Jacinto de Oliveira e Carlos Alberto Santos de Almeida pelo apoio habitual, sobretudo nos momentos mais difíceis.

À Alexandre Costa, pelo envio de artigos pertinentes ao tema deste trabalho, bem como pela sua disposição de ajudar a todos, incondicionalmente.

À equipe técnica da Estação Meteorológica do Departamento de Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias pelo apoio e também pelo fornecimento dos dados meteorológicos utilizados neste trabalho.

À Glenn Wilfred Munroe, pela utilização do programa Perl, que permite a criação de arquivos mensais de dados de irradiância.

Aos bolsistas Leonaldo S. Gomes, Arnaldo G. Pinheiro e Antônio Carlos Santana dos Santos pela elaboração e aperfeiçoamento do programa Pgirradia.

Aos professores Marcony Cunha e Renan Landin pela orientação no uso do processador de texto SWP-2.5.

Aos amigos em geral, particularmente a Deusdedit e Sales, que de muitas formas contribuíram para amenizar as dificuldades da hora presente.

Ao curso de Mestrado em Física, na pessoa de seu coordenador Prof. Gil de Aquino Farias, e em especial ao Prof. Josué Mendes Filho, pelas condições de trabalho oferecidas.

Ao corpo de professores do Departamento de Física da UFC, em particular aos professores Antônio Fernandes Siqueira e José Evangelista Moreira, pelo apoio e estímulo.

Aos funcionários Ana Celide, Rejane, Valéria, Creuza, Elias, Regina, Vera, Benício, Monica e Almiran por seu trabalho dedicado e por todos esses anos de boa convivência. E a dona Luiza pelo cafezinho.

À Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), pela cessão de parte dos equipamentos necessários a esta pesquisa.

À Fundação Cearense de Amparo à Pesquisa (FUNCAP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

À Universidade Estadual do Ceará (UECE), através da Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, pelo incentivo dado à qualificação docente.

À Faculdade de Educação Ciências e Letras do Sertão Central (FECLESC), na pessoa de sua Diretora Profa. Fátima Leitão, ao Chefe do Departamento de Ciências da Natureza Prof. Salim Pissa Neto, ao Coordenador do Curso de Ciências Prof. Rinaldo e Silva de Oliveira, aos colegas, alunos e funcionários pela concretização desta dissertação, pois foram de fato, o *princípio de tudo*.

## Resumo

Uma Estação Solarimétrica Automática Digital foi implementada e operacionalizada no Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará, em 1996 com o objetivo de obter dados de irradiância solar global, visível e infravermelha na superfície terrestre ao longo do dia. Dados meteorológicos convencionais de temperatura do ar, umidade relativa, nebulosidade, precipitação e insolação foram utilizados para caracterizar o ambiente físico em Fortaleza. Os dados solarimétricos foram obtidos diariamente, no intervalo de 6 às 18 h (Hora Local), minuto a minuto, por cinco radiômetros e um pirgeômetro dotados com filtros de diferentes janelas ópticas, cobrindo a faixa de comprimento de onda entre 0,28  $\mu\text{m}$  e 2,50  $\mu\text{m}$ , permitindo, desta forma, a discretização da irradiância solar em global, visível e infravermelha a partir dos dados observados na Estação Solarimétrica. A irradiância solar no topo da atmosfera foi calculada para todos os dias do ano de 1996 e, a partir destes resultados, foi estimada a fração desta irradiância que atingia a superfície terrestre, depois de sofrer, ao longo do trajeto na atmosfera, o espalhamento molecular, a absorção pelo ozônio, a absorção e o espalhamento pelo dióxido de carbono e vapor de água. A análise considerou somente dias em que a nebulosidade era mínima e que não houve precipitação, ou seja, somente foram considerados dias claros. A comparação entre os valores da irradiância solar global e infravermelho observados na Estação Solarimétrica e estimados na superfície da Terra, após atenuação pela atmosférica, mostrou uma boa concordância, principalmente no intervalo entre 9 e 15 h (Hora Local), que é o intervalo de maior incidência de radiação solar. Por outro lado, observou-se que os valores da irradiância solar visível medida na Estação são maiores que os correspondentes valores da irradiância solar visível estimada. Os efeitos da absorção e espalhamento devido os aerossóis e as nuvens não foram considerados nas análises realizadas.

## Abstract

A Station Digital Automatic Solarimetric was implemented and became operational in the Campus of Pici of the Federal University of Ceará, in 1996. The objective was obtain the data of global, visible and infrared solar irradiance in the terrestrial surface along the day. In addition, conventional meteorological data of temperature of the air, relative humidity, cloudiness, precipitation and heatstroke were used to characterize the atmosphere in Fortaleza. The solarimetric data were obtained daily, in the interval of 6 to 18 h (local time), minute to minute, for five radiometers and one pirgeometer endowed with filters of different optical windows, which cover the interval of wavelength between 0,28 mm and 2,50 mm. With this disposition, the global, visible and infrared solar irradiance were discretized easily starting from the data observed in the Station Solarimetric. The solar irradiance in the top of the atmosphere was calculated for everyday during 1996 and, starting from these results, it was obtained the fraction of irradiance which reached the terrestrial surface, after its depletion by molecular scattering, absorption for the ozone, absorption and the scattering for carbon dioxide and water vapor. The values of the global and infrared solar irradiance observed at solarimetric station of Pici were compared with solar irradiance estimated in the Earth surface and they showed good agreement, particularly in the time interval between 9 and 15 h (local time), which is the interval of larger incidence of solar radiation. However, it was observed that the values of visible solar irradiance measured at Pici Solarimetric Station are larger that corresponding estimated values. The analysis considered only clear days, that is, days were the cloudiness was minimum and there was not any precipitation. The effects of absorption and scattering by aerosols and clouds were not considered.

# Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	iv
Índice	v
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xi
<b>Capítulo 1 - Introdução</b>	
1 Introdução	1
1.1 Motivações Estratégicas	1
1.2 Motivações Científicas	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo Geral	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
<b>Capítulo 2 - Revisão Teórica</b>	
2.1 Conceitos, Definições e Unidades	4
2.1.1 Espectro Eletromagnético	4
2.1.2 Ângulo Sólido	4
2.1.3 Quantidades Radiométricas Básicas	5
2.2 Aspectos Básicos da Transferência Radiativa	7
2.2.1 A equação de Transferência	7
2.2.2 Lei de Berr-Bouguer-Lambert	9
2.3 Radiação Solar no Topo da Atmosfera	10
2.3.1 A órbita da Terra em torno do Sol e suas conseqüências para o Clima	10
2.4 O Espectro e a Constante solar	12
2.4.1 Determinação da Constante Solar	14
2.5 Composição e Estrutura da Atmosfera Terrestre	18
2.6 Absorção no Visível e no Infravermelho	20
<b>Capítulo 3 - Materiais e Dados</b>	
3.1 Materiais	23
3.1.1 Estação de Coleta de Dados Meteorológicos	23
3.1.2 Descrição dos Instrumentos da Estação Automática de Aquisição de Dados Solarimétricos	25
3.2 Dados Utilizados	30
3.2.1 Dados de Irradiância Solar Global Medida na Superfície	30
3.2.2 Dados de Irradiância Solar no Visível e Infravermelho Medidos na Superfície	31
3.2.3 Processamento dos Dados de Irradiância Solar	31
3.2.4 Cálculo da Irradiância Solar no Topo da Atmosfera	31

3.3 Parametrizações Utilizadas na Estimativa da Irradiância Solar Global Incidente na Superfície Terrestre	34
3.3.1 Água Precipitável (w)	34
3.3.2 Atenuação Atmosférica da Energia Solar	34
<b>Capítulo 4 - Resultados e Discussões</b>	
4.1 Características Climáticas de Fortaleza	39
4.1.1 Temperatura do Ar	39
4.1.2 Umidade Relativa	40
4.1.3 Nebulosidade	42
4.1.4 Insolação	43
4.2 Características Gerais da Irradiância Global em Fortaleza	44
4.3 Estimativas Parametrizadas da Irradiância Solar Global, Visível e Infravermelha e Comparações com as Observações na Superfície	52
4.3.1 Irradiância Solar Global	52
4.3.2 Irradiância Solar Visível	67
4.3.3 Irradiância Solar Infravermelha	74
<b>Capítulo 5 - Conclusões e Sugestões</b>	
5.1 Conclusões	80
5.2 Sugestões	82
<b>Apêndice</b>	83
<b>Bibliografia</b>	84



## Lista de Figuras

2.1 Órbita da Terra em torno do Sol e suas conseqüências para o clima	11
2.2 Irradiância espectral em função do comprimento de onda	13
3.1 Fachada da Estação Agrometeorológica da UFC, onde na parte superior observa-se o conjunto de radiômetros e o anemômetro	23
3.2 Foto dos cinco radiômetros e o pirgeômetro montados em suporte de alumínio, neste mesmo suporte são colocados a caixa de junções elétricas entre os sensores e o MUX	24
3.3 Valores da transmitância em função do comprimento de onda para cada tipo de filtro	30
3.4 Gráfico da irradiância solar no topo da atmosfera, para o dia 08/04/96	33
4.1 Variação diurna da temperatura do ar em Fortaleza no dia 23/11/1996	40
4.2 Gráfico da temperatura do ar às 9 e 15 h (Hora Local)	41
4.3 Gráfico da umidade relativa às 9 e 15 h (Hora Local)	42
4.4 Gráfico da variação anual da nebulosidade em Fortaleza, às 9 e 15 h (Hora Local)	43
4.5 Gráfico da variação anual da Insolação em Fortaleza no semestres e no ano. A média do segundo semestre é cerca de 80 % maior que a média anual	44
4.6 Gráfico da Irradiância Global às 9:00 h	45
4.7 Gráfico da Irradiância Global às 12:00 h	46
4.8 Gráfico da Irradiância Global às 15:00 h	47
4.9 Gráfico das irradiâncias no topo da atmosfera (curva superior) e na superfície terrestre, conforme registrada na Estação Solarimétrica do Pici	49
4.10 Gráfico das irradiâncias no topo da atmosfera (curva superior) e na superfície terrestre, conforme registrada na Estação Solarimétrica do Pici	49
4.11 Gráfico da irradiância solar global diária média observada na Estação Solarimétrica do Pici	50

4.12 Gráfico da irradiância solar global nos dias de maior (20/03/96) e menor (20/03/96) irradiância na superfície terrestre, conforme medido na Estação Solarimétrica do Pici	51
4.13 Gráfico da irradiância global observada e estimada para o dia 13/05/96 (Dia Juliano 133 - 4ª feira)	57
4.14 Gráfico da irradiância global observada e estimada para o dia 01/08/96 (Dia Juliano 213 - 5ª feira)	58
4.15 Gráfico da irradiância global observada e estimada para o dia 21/08/96 (Dia Juliano 233 - 5ª feira)	59
4.16 Gráfico da irradiância global observada e estimada para o dia 31/08/96 (Dia Juliano 243 - Sábado)	60
4.17 Gráfico da irradiância global observada e estimada para o dia 01/09/96 (Dia Juliano 244 Domingo)	61
4.18 Gráfico da irradiância global observada e estimada para o dia 06/09/96 (Dia Juliano 249 - 6ª feira)	62
4.19 Gráfico da irradiância global observada e estimada para o dia 11/10/96 (Dia Juliano 248 - 6ª feira)	63
4.20 Gráfico da irradiância global observada e estimada para o dia 22/11/96 (Dia Juliano 326 - 3ª feira)	64
4.21 Gráfico das irradiâncias máximas observadas no ano de 1996 em Fortaleza. Para comparação estão a irradiância no topo da atmosfera em 26/09/96 e as irradiâncias estimadas na superfície em 26/09/96, com $w = 1$ cm, $w = 2$ cm e $w = 3$ cm	65
4.22 Gráfico da irradiância visível observada e estimada para o dia 13/05/96 (Dia Juliano 233 - 5ª feira)	70
4.23 Gráfico da irradiância visível observada e estimada para o dia 21/08/96 (Dia Juliano 233 - 5ª feira)	71
4.24 Gráfico da irradiância visível observada e estimada para o dia 01/09/96 (Dia Juliano 248 6ª feira)	72
4.25 Gráfico da irradiância visível observada e estimada para o dia 11/10/96 (Dia Juliano 248 - 6ª feira)	73
4.26 Comparação entre o total da irradiância solar visível observada e a irradiância solar visível estimada na superfície terrestre	74
4.27 Comparação entre a fração de 83,5% da irradiância solar visível observada e a irradiância solar visível estimada na superfície terrestre	74



4.28 Gráfico da irradiância infravermelha observada e estimada para o dia 13/05/96 (Dia Juliano 233 - 5ª feira)	76
4.29 Gráfico da irradiância infravermelha observada e estimada para o dia 21/08/96 (Dia Juliano 233 - 5ª feira)	77
4.30 Gráfico da irradiância infravermelha observada e estimada para o dia 01/09/96 (Dia Juliano 248 - 6ª feira)	78
4.31 Gráfico da irradiância infravermelha observada e estimada para o dia 11/10/96 (Dia Juliano 248 - 6ª feira)	79

## **Lista de Tabelas**

2.1 Símbolos, Dimensões e Unidades usados neste trabalho	7
2.2 Ângulo Horário	17
2.3 Constituintes da Atmosfera	20
2.4 Constantes Empíricas para as bandas do H <sub>2</sub> O e CO <sub>2</sub>	24
3.1 Coordenadas Geográficas da Estação Meteorológica do Dep <sup>to</sup> . de Eng., Agrícola, UFC	24
3.2 Principais dados Meteorológicos Utilizados	25
3.3 Relação dos Piranômetros e do Pirgeômetro	26
3.4 Características dos Piranômetros	27
3.5 Valores de transmitância da radiação solar com o comprimento de onda para os respectivos filtros	28
3.6 Características do Amplificador de Sinal marca Preston modelo 8300 XWB-A	29
3.7 Irradiância solar no topo da atmosfera, no dia 08/04/96	33
3.8 Coeficientes de Espalhamento Rayleigh e do Ozônio utilizados na equação (3.3)	35
3.9 Coeficientes de Absorção Molecular utilizados na equação (3.6)	37
4.1 Valores médios da insolação em Fortaleza	41
4.2 Dados meteorológicos no dia 21/09/96	42
4.3 Dados meteorológicos no dia 24/07/96	49
4.4 Valores médios das irradiâncias em Fortaleza	51
4.5 Dados meteorológicos para os dias 20/03/96 e 21/09/96	52
4.6 Dados meteorológicos dos dias de céu claro analisados	54
4.7 Relações entre as irradiâncias estimadas e observadas durante o dia e no período de significativa incidência de radiação solar global	55
4.8 Valores da irradiância global observada e estimada para o dia 13/05/96 (Dia Juliano 133 - 4 <sup>a</sup> feira)	57

4.9 Valores da irradiância global observada e estimada para o dia 01/08/96 (Dia Juliano 213 5ª feira)	58
4.10 Valores da irradiância global observada e estimada para o dia 21/08/96 (Dia Juliano 233 - 5ª feira)	59
4.11 Valores da irradiância global observada e estimada para o dia 31/08/96 (Dia Juliano 243 - Sábado)	60
4.12 Valores da irradiância global observada e estimada para o dia 01/09/96 (Dia Juliano 244 Domingo)	61
4.13 Valores da irradiância global observada e estimada para o dia 06/09/96 (Dia Juliano 249 - 6ª feira)	62
4.14 Valores da irradiância global observada e estimada para o dia 11/10/96 (Dia Juliano 248 - 6ª feira)	63
4.15 Valores da irradiância global observada e estimada para o dia 22/11/96 (Dia Juliano 326 - 3ª feira)	64
4.16 Irradiância máxima observada e irradiância máxima estimada na superfície terrestre em 1996. Entre 9 e 15 h o erro relativo é menor ou da ordem de 5%	66
4.17 Valores da irradiância visível observada e estimada para o dia 13/05/96 (Dia Juliano 233 - 5ª feira)	70
4.18 Valores da irradiância visível observada e estimada para o dia 21/08/96 (Dia Juliano 233 - 5ª feira)	71
4.19 Valores da irradiância visível observada e estimada para o dia 01/09/96 (Dia Juliano 248 6ª feira)	72
4.20 Valores da irradiância visível observada e estimada para o dia 11/10/96 (Dia Juliano 248 - 6ª feira)	73
4.21 Valores da irradiância infravermelha observada e estimada para o dia 13/05/96 (Dia Juliano 233 - 5ª feira)	76
4.22 Valores da irradiância infravermelha observada e estimada para o dia 21/08/96 (Dia Juliano 233 - 5ª feira)	77
4.23 Valores da irradiância infravermelha observada e estimada para o dia 01/09/96 (Dia Juliano 248 6ª feira)	78
4.24 Valores da irradiância infravermelha observada e estimada para o dia 11/10/96 (Dia Juliano 248 - 6ª feira)	79
Mapa de dados meteorológicos (MAPÃO), para o mês de novembro de 1996	83

# Capítulo 1

## 1. Introdução

### 1.1 Motivações Estratégicas

Como se conhece, o Sol é o motor das interações físicas que ocorrem na atmosfera, na superfície terrestre e também dos processos fotossintéticos nos vegetais. Motivados pôr este tema apontamos para a necessidade de um conhecimento quantitativo da radiação solar incidente na superfície terrestre. O monitoramento contínuo da radiação solar e o conhecimento detalhado da distribuição da irradiância solar global, em suas componentes direta e difusa, tanto do ponto de vista espacial como temporal, é especialmente importante para a obtenção de uma base de dados solarimétricos adequada para a compreensão do impacto provocado por atividades antropogênicas, do enriquecimento de gases minoritários e aerossóis e de como estes afetam o fluxo de radiação medido, em intensidade e distribuição espectral, na superfície terrestre (Sellers, 1965, Paltridge, and Platt, 1976, Duffie and Beckman, 1974).

Por outro lado, a demanda por energia também tem crescido, e com ela a emissão de  $N_xO_y$  e de outros gases minoritários, em sua maioria relacionados com a transformação do meio ambiente para fins de produção. Sabemos, contudo, que o uso da energia solar para fins de aproveitamento depende de elementos culturais próprios de um determinado grupo social. Sabemos que a tecnologia solar oscila entre períodos de aceitação e apatia, sendo que a aceitação coincide com a ameaça de declínio das fontes convencionais de energia. Seja como for, a construção de qualquer dispositivo economicamente viável que transforme a radiação solar em energia mecânica, térmica ou elétrica requer dados solarimétricos de boa precisão e com escala de tempo mensal, diária, horária e mesmo de minuto a minuto. Além dos dados de irradiância solar, devem ser utilizados parâmetros meteorológicos como pressão, temperatura do ambiente, umidade

relativa, direção e velocidade dos ventos, nebulosidade e precipitação pluviométrica, de acordo com a necessidade e a complexidade da pesquisa.

Constitui-se em visão estratégica o reconhecimento de que devemos compreender o mundo natural, a fim de que possamos avaliar a intensidade das transformações nele introduzidas, principalmente pela ação do homem e prever com que velocidade elas poderão ocorrer no futuro. Nesse sentido, o monitoramento contínuo da irradiância solar global é uma componente básica na motivação de uma pesquisa mais abrangente.

## **1.2 Motivação Científica**

Apesar da importância da radiação solar para a região Nordeste, especialmente o Ceará, o seu monitoramento é bastante deficiente. Este trabalho pretende descrever a implantação e operação de uma estação solarimétrica automática. Os sensores são acoplados a um sistema digital de aquisição de dados, gerando assim um banco de dados com formato digital. A área utilizada para o monitoramento da irradiância solar global é a cidade de Fortaleza.

O problema de caracterizar a irradiância solar global, consiste em avaliar o impacto nos mecanismos de atenuação da radiação solar na atmosfera, das fontes refletoras, absorveras e dispersantes (Flocas, 1979, Roach, 1961, Paltridge, 1973).

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Gerar um banco de dados de irradiância solar global sobre a cidade de Fortaleza.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Caracterizar espectralmente a irradiância solar global sobre a cidade de Fortaleza utilizando um conjunto de cinco piranômetros dotados de filtros espectrais em uma estação

solarimétrica de superfície. Os dados meteorológicos convencionais também foram utilizados. Os dados referem-se ao ano de 1996.

Comparar dados de irradiância na banda global, no visível e no infravermelho, com estimativas teóricas de atenuação da radiação solar utilizando parametrizações para o espalhamento Rayleigh, a absorção do dióxido de carbono, vapor d'água e ozônio, segundo proposta contida no texto de Fraidenraich e Lyra, (1995).

No capítulo 2 é feita uma revisão teórica dos princípios físicos envolvidos no processo da interação da radiação solar com os constituintes atmosféricos. A discussão dos conceitos, equações e princípios básicos no capítulo 2 baseiam-se, essencialmente, nos textos de Liou (1980) e Vianello e Alves (1991).

Os materiais utilizados e os dados obtidos, assim como a descrição da forma de análise dos resultados, constam do capítulo 3. As parametrizações utilizadas, coeficientes de absorção e espalhamento, estimativas teóricas da irradiância à superfície terrestre foram obtidos basicamente dos textos de Liou (1980) e Fraidenraich e Lyra, (1995). O cálculo da irradiância no topo da atmosfera baseia-se nos textos de Liou (1980) e de Vianello e Alves (1991). Os dados meteorológicos foram fornecidos pela Estação Agrometeorológica do Departamento de Ciências Agrárias da UFC. O valor do parâmetro água precipitável foi baseado na informação obtida junto à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME.

O capítulo 4 apresenta os resultados das análises realizadas e as discussões sobre as relações entre dados observados e estimados. Finalmente, as conclusões e sugestões são apresentadas no capítulo 5.



## Capítulo 2

### Revisão Teórica

#### 2.1 Conceitos, Definições e Unidades

##### 2.1.1 Espectro Eletromagnético

A radiação eletromagnética é um dos mais importantes processos físicos relacionados com a transferência de energia na atmosfera. Esta radiação viaja através do espaço, com a velocidade de  $(2,99793 \pm 1) \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ , a velocidade da luz no vácuo, que é próximo da velocidade da luz no ar. O conjunto composto por raios gama, raios X, luz ultravioleta, luz visível, radiação infravermelha, microondas, ondas de televisão e ondas de rádio forma o espectro eletromagnético.

A região espectral de maior significação, do ponto de vista da transferência de energia radiativa na atmosfera, situa-se entre a luz ultravioleta e as microondas.

As ondas eletromagnéticas, freqüentemente, são descritas em termos de seu comprimento de onda ( $\lambda$ ) e de sua frequência ( $\nu$ ). A equação (2.1) relaciona a frequência e o comprimento de onda,

$$\lambda = v / \nu \quad (2.1)$$

onde  $v$  é a velocidade da luz no meio.

##### 2.1.2 Ângulo Sólido

A análise da radiação, em geral, requer considerações sobre a quantidade de energia confinada a um ângulo sólido,  $\Omega$ , subentendido por uma área cônica com vértice num ponto dado e interceptando uma superfície esférica cortada no mesmo ponto, é definido como a razão entre a área  $\sigma$  da superfície esférica e o quadrado do raio dessa superfície, isto é,  $\Omega = \sigma / r^2$ . A unidade de

ângulo sólido é o estereoradiano (ster). Para uma esfera, cuja superfície é  $4\pi r^2$ , seu ângulo sólido é  $4\pi$ . O elemento diferencial de ângulo sólido,  $d\Omega$ , relativo ao centro da esfera é dado por,

$$d\Omega = \frac{d\sigma}{r^2} = \sin(\theta) d\theta d\phi, \quad (2.2)$$

onde  $d\sigma$ , em coordenadas polares, é expresso como,

$$d\Omega = (r d\theta)(r \sin \theta d\phi), \quad (2.3)$$

onde  $\theta$  e  $\phi$  são, respectivamente, os ângulos zenital e azimutal.

### 2.1.3 Quantidades Radiométricas Básicas

As quantidades radiométricas discutidas neste capítulo estão listadas na tabela 2.1 com seus símbolos, dimensões e unidades.

Exprimiremos a quantidade diferencial de energia radiante,  $dW_\lambda$ , num intervalo específico de comprimento de onda entre  $\lambda$  e  $\lambda+d\lambda$ , em um intervalo de tempo  $dt$ , através do elemento diferencial de área  $dA$  confinado segundo o ângulo sólido diferencial  $d\Omega$ , o qual é orientado pelo ângulo  $\theta$ , normal ao elemento de área  $dA$  em termos da intensidade específica  $I_\lambda$  como,

$$dW_\lambda = I_\lambda \cos(\theta) d\Omega dA d\lambda dt. \quad (2.4)$$

A equação (2.4) define a intensidade específica monocromática ou radiância, sendo  $I_\lambda$  escrita como,

$$I_\lambda = \frac{dW_\lambda}{\cos(\theta) d\Omega dA d\lambda dt}. \quad (2.5)$$



Assim, a intensidade específica é dada como energia por unidade de área normal, por tempo e por ângulo sólido, isto é, a intensidade possui uma direcionalidade do feixe de radiação.

A densidade de fluxo monocromático,  $E_\lambda$ , ou irradiância monocromática da energia radiante que atravessa uma superfície é definida pela componente normal de  $I_\lambda$ , integrada sobre o ângulo sólido semiesférico, sendo dada por,

$$E_\lambda = \int_{\Omega} I_\lambda \cos(\theta) d\Omega. \quad (2.6)$$

Em coordenadas polares  $E_\lambda$  é escrita como,

$$E_\lambda = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I_\lambda(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi. \quad (2.7)$$

Para uma radiação isotrópica, onde a intensidade de energia radiante é independente da direção, a densidade de fluxo vale,

$$E_\lambda = \pi I_\lambda. \quad (2.8)$$

A densidade de fluxo total de energia radiante, ou a irradiância para todos os comprimentos de onda, é obtida pela integração, sobre todo o espectro eletromagnético, da densidade de fluxo monocromático, isto é,

$$E = \int_0^{\infty} E_\lambda d\lambda \quad (2.9)$$

Por outro lado, o fluxo total  $F$ , ou potência radiante  $W$  (energia por unidade de tempo que atravessa uma superfície), é definida como,

$$F = \int_A E dA. \quad (2.10)$$

Quando a densidade de fluxo radiante, ou irradiância normal, é gerada por uma superfície emissora, essa quantidade é chamada de emitância. Quando expressa em termos de comprimento de onda, é chamada de emitância monocromática. A intensidade ou a radiância é também denominada de brilho ou luminância. O fluxo total de uma superfície emissora é frequentemente denominado de luminosidade.

Tabela 2.1 Símbolos, Dimensões e Unidades usados neste trabalho (Liou, 1980)

SÍMBOLO	GRANDEZA	DIMENSÃO	UNIDADES (SI)
W	Energia	$ML^2T^{-2}$	J
F	Fluxo	$ML^2T^{-3}$	$J s^{-1}$
	Luminosidade		
E	Irradiância		$W/m^2$
	Emitância	$MT^{-3}$	
L	Radiância		$W/m^2 ster^{-1}$
	Luminância		

## 2.2 Aspectos Básicos da Transferência Radiativa

### 2.2.1 A Equação de Transferência

Um feixe de radiação atravessando um meio será atenuado devido a sua interação com a matéria. Se a intensidade de radiação  $I_\lambda$ , torna-se  $I_{\lambda+d\lambda}$  após atravessar o meio de espessura  $ds$  situado na direção de propagação do feixe, podemos escrever,

$$dI_{\lambda} = -c_{\lambda} \rho I_{\lambda} ds, \quad (2.11)$$

onde  $\rho$  é a densidade do material e  $c_{\lambda}$  é o coeficiente mássico de extinção cuja unidade, no SI é dado por  $m^2 \text{ kg}^{-1}$  para uma radiação de comprimento de onda  $\lambda$ . O coeficiente mássico de extinção representa a soma das contribuições devidas a absorção e espalhamento da radiação pela matéria. Por outro lado, a intensidade do feixe pode ser reforçada através da emissão de radiação pela matéria e do mecanismo de espalhamento múltiplo atuando em todas as direções do feixe sob consideração.

Definiremos o coeficiente  $j_{\lambda}$  da função fonte, tal que o aumento de intensidade devido à emissão e ao espalhamento múltiplo seja dado por,

$$dI_{\lambda} = j_{\lambda} \rho ds, \quad (2.12)$$

Combinando as equações (2.11) e (2.12) obtemos,

$$dI_{\lambda} = -c_{\lambda} \rho I_{\lambda} ds + j_{\lambda} \rho ds. \quad (2.13)$$

Além disso, por conveniência, definiremos a função fonte  $J_{\lambda}$  de modo que,

$$J_{\lambda} \equiv \frac{j_{\lambda}}{c_{\lambda}}. \quad (2.14)$$

Desta forma, a função fonte pode ser expressa em unidades de intensidade de radiação. Substituindo a equação (2.14) na equação (2.13) obtemos,

$$\frac{dI_{\lambda}}{c_{\lambda}\rho ds} = -I_{\lambda} + J_{\lambda}. \quad (2.15)$$

Esta é a equação geral de transferência radiativa sem qualquer referência a um sistema particular de coordenadas.

### 2.2.2 Lei de Beer-Bouguer-Lambert

Considerando que as contribuições devidas a emissão e ao espalhamento possam ser desprezadas, a equação (2.15) se reduz a,

$$\frac{dI_{\lambda}}{c_{\lambda}\rho ds} = -I_{\lambda}, \quad (2.16)$$

onde  $c_{\lambda}$  representa somente o coeficiente mássico de absorção. Se a intensidade de radiação incidente em  $s=0$  é  $I_{\lambda}(0)$ , então a intensidade de radiação emergente a uma distância  $s$ , pode ser obtida pela integração da equação (2.33), dando como resultado,

$$I_{\lambda}(s_1) = I_{\lambda}(0) \exp\left(-\int_0^{s_1} c_{\lambda}\rho ds\right). \quad (2.17)$$

Supondo o meio homogêneo,  $c_{\lambda}$  é independente da distância  $s$ . Se definimos a caminho óptica como,

$$u = \int_0^{s_1} \rho ds, \quad (2.18)$$

a equação (2.17) torna-se,

$$I_{\lambda}(s_1) = I_{\lambda}(0) \exp^{-c_{\lambda}u}. \quad (2.19)$$

A equação (2.19) é conhecida como a lei de Beer-Bouguer-Lambert, e expressa que a atenuação da intensidade radiativa atravessando um meio homogêneo absorvente está de acordo com uma simples função exponencial, cujo argumento é o produto do coeficiente mássico de absorção pela equação (2.18) ou seja o caminho óptico. Esta lei não contém nenhuma dependência direcional e é aplicável não só ao fluxo, mas também à densidade de fluxo. Com base na equação (2.19) podemos definir a transmitância monocromática  $\mathfrak{T}$  como,

$$\mathfrak{T} = \frac{I_{\lambda}(s_1)}{I_{\lambda}(0)} = \exp^{-c_{\lambda}u}. \quad (2.20)$$

## 2.3 Radiação Solar no Topo da Atmosfera

### 2.3.1 A órbita da Terra em Torno do Sol e suas Consequências para o Clima

A órbita da Terra em torno do Sol com um período de 365,25 dias e a rotação da Terra em torno do seu eixo polar em direção ao leste, com período é de 23 horas 56 m 4s, são os fatores mais importantes na determinação da energia solar radiante que alcança o sistema Terra-Atmosfera, assim como as mudanças no clima terrestre. A Terra cuja forma é de um esferóide oblato, tem raios equatorial e polar, respectivamente, iguais a 6378,17 km e 6356,79 km.

Sua órbita em torno do Sol é uma elipse e seu eixo de rotação é inclinado em relação ao plano da eclíptica, conforme mostra a figura 2.1.

O eixo de rotação da Terra é inclinado de  $23,5^{\circ}$  do plano normal da eclíptica. Esse ângulo representa a obliquidade da eclíptica, e varia ciclicamente sobre uma extensão média de  $1,5^{\circ}$ , num período de aproximadamente 41.000 anos. Além desses fatores, existe um movimento muito



lento em direção ao oeste, ao longo da eclíptica, devida à atração sobre a Terra exercida pelos outros planetas, chamado de precessão dos equinócios. Em virtude do movimento cambaleante da Terra, o período em que ela permanece junto ao Sol aumenta cerca de 25 minutos a cada ano; e implica que o índice periódico de precessão, varie em torno de 21.000 anos. As variações orbitais mencionadas, afetam a distribuição da quantidade de energia solar sobre o sistema Terra-Atmosfera.

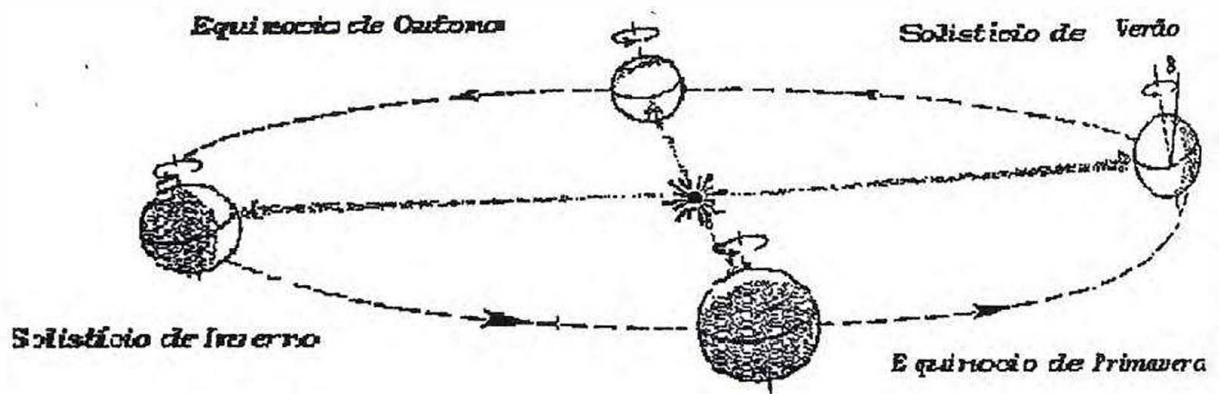


Figura 2.1 Órbita da Terra em torno do Sol e suas consequências para o clima (Liou, 1980)

A característica mais notável do clima são as estações. A translação da Terra em torno do Sol e a inclinação do eixo terrestre são as causas da mudança nas estações. Por ocasião do solstício de verão, que ocorre no dia 22 de junho, o Sol está sobre o zênite ao meio-dia, na latitude de  $23,5^{\circ}$  norte, conhecida como Trópico de Câncer. A elevação do Sol e a duração do dia, alcançam seus valores máximos no hemisfério norte, no solstício de verão, e em qualquer lugar ao norte do Círculo ártico (latitude  $66,5^{\circ}$  N), o Sol permanece abaixo do horizonte todo o dia. No hemisfério sul, a elevação do Sol está em um mínimo e os dias são mais curtos. No solstício de junho qualquer local ao sul do Círculo Antártico, (latitude de  $66,5^{\circ}$  S) o Sol não se ergue acima do

horizonte. Este é o começo do verão no hemisfério norte, enquanto que o verão no hemisfério sul se inicia, no solstício de inverno, por volta de 22 de dezembro.

Tendo alcançado o ponto mais meridional de sua migração anual, o Sol permanece diretamente sobre o zênite ao meio dia, na latitude  $23,5^{\circ}$  S, chamada de Trópico de Capricórnio. A elevação do Sol abaixo do horizonte e a duração do dia, estão então, com seus valores mínimos, no hemisfério norte, e o Sol não surge dentro do Círculo Ártico.

Nos equinócios de primavera e outono, os dias e as noites tem o mesmo comprimento (doze horas) e o Sol aparece diretamente sobre o zênite, no equador ao meio-dia. O Sol atravessa o equador do norte para o sul, no equinócio de outono, e do sul para o norte no equinócio de primavera. As distâncias entre os centros do Sol e da Terra variam entre os valores extremos de  $147 \times 10^6$  km no solstício de inverno e  $153 \times 10^6$  km no solstício de verão.

#### **2.4 O Espectro e a Constante Solar**

A distribuição da radiação eletromagnética emitida pelo Sol como uma função do comprimento de onda incidente no topo da atmosfera é chamada de espectro solar. A constante solar,  $S$ , é o fluxo de energia que atravessa uma superfície unitária normal ao feixe de radiação solar a uma distância média entre o Sol e a Terra.

O espectro solar padrão, em termos da irradiância espectral, é mostrado pela linha sólida no topo da curva sólida na figura 2.2, e logo abaixo, a curva da irradiância espectral ao nível do mar, numa atmosfera de céu claro. As áreas sombreadas representam a radiação absorvida pelos vários gases, principalmente  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ , e  $O_2$ . A maior parte da energia eletromagnética que alcança a Terra se origina na superfície do Sol (fotosfera).

O Sol emite energia a uma razão de  $6,2 \times 10^7$  W  $m^{-2}$  ou  $9,0 \times 10^3$  cal  $cm^2$   $min^{-1}$ . Com base no princípio de conservação da energia, o fluxo deve permanecer constante com a propagação através de camadas esféricas concêntricas com o Sol. Então,

$$E (4 \pi a_s^2) = S (4 \pi d_m^2), \quad (2.21)$$

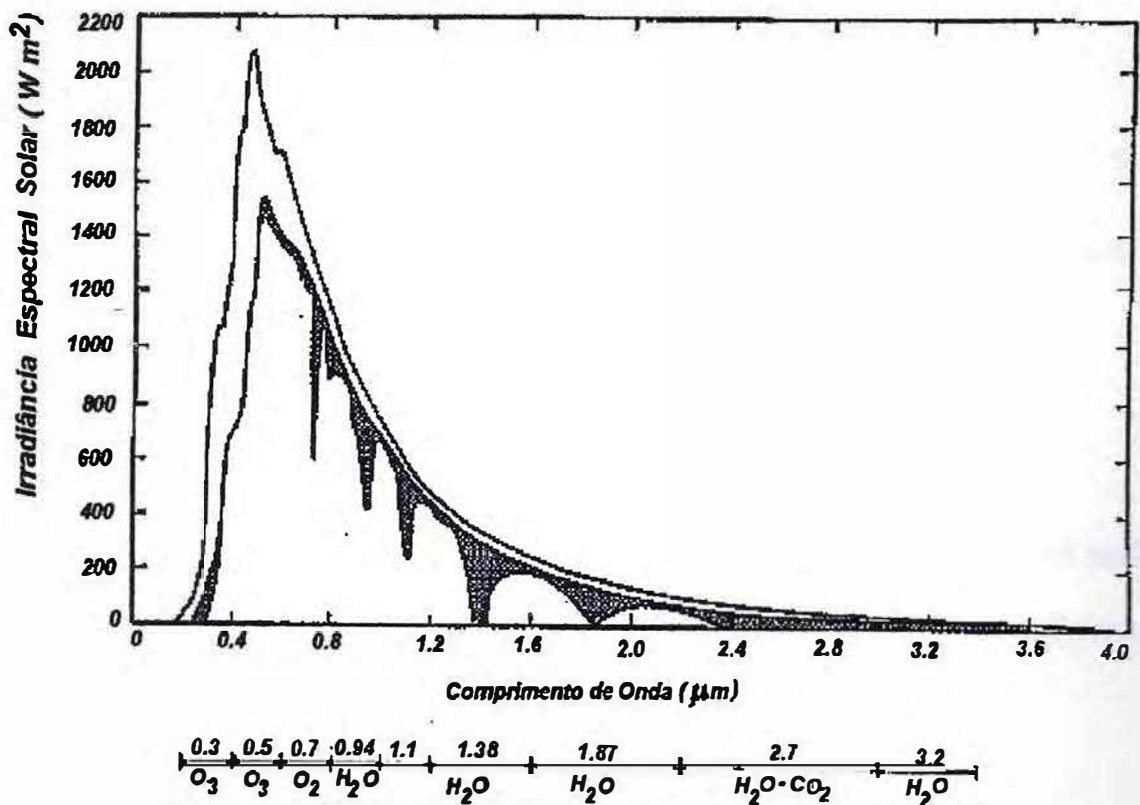
onde E representa a emitância solar,  $a_s$  o raio do Sol e  $d_m$  a distância média entre o Sol e a Terra.

Assim, a constante solar pode ser expressa na forma,

$$S = E \left( \frac{a_s}{d_m} \right)^2. \quad (2.22)$$

onde S exprime a quantidade de total de energia solar que chega ao topo da atmosfera e é definida como o fluxo de energia solar que atravessa uma superfície de área unitária normal a um raio solar

### ***Espectro e Constante Solar***



Curvas de distribuição da Irradiância Espectral com respeito ao Sol ; (1) Irradiância solar no topo da atmosfera, (2) Irradiância solar observada ao nível do mar. As áreas sombreadas representam a absorção devido a varios gases em uma atmosfera clara

Figura 2.2 Irradiância Espectral em função do Comprimento de Onda



na distância média entre a Terra e o Sol. A energia total interceptada pela Terra, cujo raio é  $a_e$ , é dada por,

$$S \pi a_e^2$$

Se esta energia for espalhada uniformemente sobre toda a Terra, então a energia recebida por unidade de área por unidade de tempo no topo da atmosfera é dada como,

$$\overline{E}_s = \frac{S \pi a_e^2}{(4 \pi a_e^2)} = \frac{S}{4}. \quad (2.23)$$

A estimativa da temperatura efetiva do Sol,  $T$ , pode ser obtida com base na hipótese de que o Sol é um corpo negro. Então, utilizando a lei de Stefan-Boltzmann, ( $F = \sigma T^4$ ), encontramos que,

$$T^4 = \left( \frac{d_m}{a_s} \right)^2 \left( \frac{S}{\sigma} \right). \quad (2.24)$$

Substituindo os valores apropriados de  $S$ ,  $\sigma$ ,  $d_m$  e  $a_s$  na equação (2.22), obtemos a temperatura efetiva para o Sol como sendo cerca de 5800 K.

#### 2.4.1 Determinação da Constante Solar

Através de várias observações, feitas em vários locais em todo o mundo, em um período superior a meio século, o melhor valor obtido para a constante solar,  $S$ , utilizado nesta dissertação é de  $1367 \text{ W m}^{-2}$  (Vianello e Alves, 1991)

#### 2.4.2 Distribuição da Irradiância no Topo da Atmosfera

Definimos a irradiância como o fluxo da radiação solar por unidade horizontal de área. A irradiância depende fortemente do ângulo zenital e em alguma medida da variação da distância entre a Terra e o Sol. A densidade de fluxo no topo da atmosfera pode ser expressa como,

$$F = F_0 \cos \theta_0, \quad (2.25)$$

onde  $F_0$  representa a densidade de fluxo solar no topo da atmosfera quando a distância instantânea entre a Terra e o Sol é  $d$ , e  $\theta_0$  denota o ângulo zenital. Sendo  $F_0$  dado por,

$$F_0 = S \left( \frac{d_m}{d} \right)^2,$$

Então temos,

$$F = S \left( \frac{d_m}{d} \right)^2 \cos \theta_0. \quad (2.26)$$

Definimos a energia solar recebida no topo da atmosfera por unidade de área como  $E_0$ .

Deste modo, a densidade de fluxo solar pode ser escrito como,

$$F = \frac{dE_0}{dt}. \quad (2.27)$$

A equação para a irradiância em um dado período de tempo é dada por,

$$E_0 = \int_t F(t) dt. \quad (2.28)$$

A energia total recebida do Sol por unidade de área por dia pode ser calculada integrando-se de  $t_n$  a  $t_p$  que representam, respectivamente, o nascer e o pôr do Sol. Substituindo-se a equação (2.24) na equação (2.26), determinamos a insolação diária com se segue,

$$E_0 = S \left( \frac{d_m}{d} \right)^2 \int_{t_n}^{t_p} \cos \theta_0(t) dt. \quad (2.29)$$

A quantidade entre parênteses representa a distância Terra-Sol ( $d$ ) para um determinado dia do ano e pode ser calculada em termos de uma distância média ( $d_m$ ) através de uma expressão desenvolvida por Spencer em 1971 (Vianello e Alves, 1991),

$$\left(\frac{d_m}{d}\right)^2 = 1,000110 + 0,034221 \cos(X) + 0,001280 \sin(X) + 0,000719 \cos(2X) + 0,000077 \sin(2X), \quad (2.30)$$

sendo  $X$ , expresso em radianos, dado por,

$$X = 2\pi(n-1)/365, \quad (2.31)$$

onde  $n$  é o número do dia do ano, variando de 1 a 365 para o período de 1<sup>o</sup> de janeiro a 31 de dezembro.

O coseno do ângulo zenital é determinado a partir de outros ângulos e sua expressão matemática é construída com base na trigonometria esférica,

$$\cos(\theta_0) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(h), \quad (2.32)$$

em que a declinação solar ( $\delta$ ), é função do dia do ano e é independente da latitude onde se encontra o observador ( $\phi$ ), no ângulo horário ( $h$ ). A declinação varia de 0<sup>o</sup> a 23<sup>o</sup>27' com o Sol no Hemisfério Norte Celeste e de 0<sup>o</sup> a 23<sup>o</sup>27' com o Sol no Hemisfério Sul Celeste. Utilizamos neste trabalho a expressão proposta por Spencer em 1971 (Vianello e Alves, 1991),

$$\begin{aligned} \delta = & 0,006918 - 0,399912 \cos(2X) + 0,070257 \sin(X) \\ & - 0,006758 \cos(2X) + 0,000907 \sin(2X) \\ & - 0,002697 \cos(3X) + 0,001480 \sin(3X). \end{aligned} \quad (2.33)$$

Por convenção o ângulo horário tem valor igual a zero ao meio dia solar, negativo no período matutino e positivo no vespertino. A rotação da Terra tem período de aproximadamente 24 horas, acarretando uma variação para o ângulo horário de aproximados  $15^{\circ}$  por hora. Estas observações e convenções encontram-se sumarizadas na tabela 2.2 abaixo.

Tabela 2.2 Ângulo Horário (Vianello e Alves, 1991)

HORA	7	8	9	10	11	12
Ângulo Horário	$-75^{\circ}$	$-60^{\circ}$	$-45^{\circ}$	$-30^{\circ}$	$-15^{\circ}$	$0^{\circ}$
Hora	12	13	14	15	16	17
Ângulo Horário	$0^{\circ}$	$15^{\circ}$	$30^{\circ}$	$45^{\circ}$	$60^{\circ}$	$75^{\circ}$

Adotaremos para o ângulo horário ( $h$ ) a convenção de sinais, proposta na tabela 2.2. Desta forma, poderemos relacioná-lo com a hora do dia (tempo solar verdadeiro) utilizando a seguinte equação,

$$h = (HORA - 12) \cdot 15, \quad (2.34)$$

sendo  $h$  dado em graus. A variável HORA corresponde ao tempo solar verdadeiro.

Substituindo a equação (2.32) na equação (2.29) e escrevendo a velocidade angular da Terra,  $\omega$  ( $2\pi$  rad / dia) como,

$$\omega = \frac{dh}{dt} \quad (2.35)$$

a equação (2.29) assume a forma seguinte,

$$E_0 = S \left( \frac{d_m}{d} \right)^2 \int_{-H}^H (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cosh) \frac{dh}{\omega}. \quad (2.36)$$

Os ângulos horários  $H$  e  $-H$  representam, respectivamente, o nascer ( $t_n$ ) e o por ( $t_p$ ) do Sol e são determinados fazendo-se  $\theta_0$  na equação (2.32) igual a  $90^\circ$ , isto é,

$$0 = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(H), \quad (2.37)$$

$$\cos(H) = -\tan(\phi) \tan(\delta), \quad (2.38)$$

$$H = \arccos[-\tan(\phi) \tan(\delta)]. \quad (2.39)$$

A integração da equação (2.36) nos dá como resultado,

$$E_0 = \frac{S}{\pi} \left( \frac{d_m}{d} \right)^2 (\sin \phi \sin \delta H + \cos \phi \cos \delta \sin H). \quad (2.40)$$

O ângulo horário  $H$  é expresso em radianos. O fator  $(d_m/d)^2$  não apresenta desvios superiores a 3,5% da unidade. A equação (2.40) permite o cálculo da distribuição diária da energia solar por unidade de área no topo da atmosfera como função da latitude ( $\phi$ ) e do dia do ano.

## 2.5. Composição e Estrutura da Atmosfera Terrestre

A atmosfera é composta por um grupo de gases chamados de constituintes permanentes e outro chamado de constituintes variáveis. Ela também contém um sistema de particulado, formado por gotas de água, aerossóis e cristais de gelo, cujas concentrações apresentam grande variabilidade espacial e temporal.

A tabela 2.3, apresenta a fórmula química e o percentual volumétrico, para as concentrações dos gases permanentes e variáveis. O índice  $b$  representa a concentração do gás



próxima à superfície terrestre e o índice a os valores adotados após a U.S. Standard Atmosphere, 1976. Também é possível inferir da tabela que o nitrogênio, oxigênio e argônio respondem por mais que 99,99% do total dos gases permanentes. Esses gases exibem razões volumétricas aproximadamente constantes para altitudes inferiores a 60 km. É apropriado observar que, embora o dióxido de carbono esteja listado no grupo de constituintes permanentes, sua concentração é função da queima de combustíveis fósseis, processos fotossintéticos e da interação Oceano-Atmosfera.

A concentração do vapor d'água apresenta grandes variações no espaço e no tempo, dependendo ainda das condições atmosféricas. Comportamento semelhante tem o ozônio, e sua presença ocorre sobretudo em altitudes entre 15 e 30 km, onde ele é produzido e destruído através de reações fotoquímicas. Todos os gases constituintes da atmosfera, mesmo aqueles em quantidade muito pequenas, ou traço, interagem dinamicamente entre si e com o particulado, participando de vários tipos de reações e dos mecanismos de espalhamento e absorção da radiação solar.

A atmosfera está estratificada em quatro camadas distintas. São elas, a troposfera, a estratosfera, a mesosfera, e a termosfera. Os topos de cada camada são respectivamente chamados de tropopausa, estratopausa, mesopausa e termopausa. A troposfera é caracterizada pelo decréscimo de temperatura em função da altura a uma taxa aproximada de  $6,5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ . A forma pela qual a temperatura se distribui nessa camada é uma consequência do balanço radiativo e do transporte convectivo de energia da superfície para a atmosfera. A estratosfera é caracterizada por uma camada isotérmica, que vai da tropausa até cerca de 20 km de onde a temperatura aumenta até a estratopausa. O ozônio ocorre principalmente nessa camada. Na estratosfera verifica-se a presença de finas camadas de aerossóis, cuja integridade é mantida por longos períodos de tempo, dentro de certas faixas de altitude.

Tabela 2.3 Constituintes da Atmosfera (Liou, 1980)

CONSTITUINTES PERMANENTES		CONSTITUINTES VARIÁVEIS	
Tipo	% por volume	Tipo	% por volume
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	78,084	Vapor d água (H <sub>2</sub> O)	0-0,04
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	20,948	Ozônio (O <sub>3</sub> )	0-12 X 10 <sup>-1</sup>
Argônio (Ar)	0,934	Dióxido Sulfúrico (SO <sub>2</sub> ) <sup>b</sup>	0,001 x 10 <sup>-4</sup>
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	0,033	Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> ) <sup>b</sup>	0,001 x 10 <sup>-4</sup>
Neônio (Ne)	18,185.24	Amônia (NH <sub>3</sub> ) <sup>b</sup>	0,004 x 10 <sup>-4</sup>
Hélio (He)	5,24 x 10 <sup>-4</sup>	Oxido Nítrico (NO) <sup>b</sup>	0,0005 x 10 <sup>-4</sup>
Kriptônio (Kr)	1,14 x 10 <sup>-4</sup>	Sulfido de Hidrogênio (H <sub>2</sub> S) <sup>b</sup>	0,00005 x 10 <sup>-4</sup>
Xenônio (Xe)	0,089 x 10 <sup>-4</sup>	Vapor de Acido Nítrico (HNO <sub>3</sub> )	Traço
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	0,5 x 10 <sup>-4</sup>		
Metano (CH <sub>4</sub> )	1,5 x 10 <sup>-4</sup>		
Oxido Nitroso (N <sub>2</sub> O) <sup>b</sup>	0,27 x 10 <sup>-4</sup>		
Monóxido de Carbono (CO) <sup>b</sup>	0,19 x 10 <sup>-4</sup>		

## 2.6. Absorção no Visível e no Infravermelho

A figura 2.2 mostra o espectro solar obtido com um espectrômetro de baixa resolução, no qual as áreas sombreadas representam a absorção do fluxo de radiação solar por vários gases minoritários na atmosfera. O oxigênio molecular absorve a radiação ultravioleta tendo bandas fracas de absorção na região do espectro correspondente ao vermelho. Particularmente bem conhecida, devido ao grande fluxo de radiação solar contida nessa região, é a banda A do oxigênio molecular centrada em 0,7  $\mu\text{m}$ .

As bandas de absorção do espectro solar próximas do infravermelho são devidas principalmente às transições vibracional e rotacional. O absorvedor mais importante nas vizinhanças do infravermelho é o vapor de água. O dióxido de carbono possui bandas fracas de absorção no espectro, contudo uma das bandas de absorção mais importantes é aquela onde o dióxido de carbono sobrepõe a do vapor de água em  $2,7 \mu\text{m}$ . Outros gases minoritários tais como o  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  absorvem radiação infravermelha. Não obstante, a absorção nesses gases é insignificante, na medida em que o balanço térmico do sistema Terra-Atmosfera é levado em consideração. Em referência à figura 2.2, notamos que somente em comprimentos de onda menores do que cerca de  $4\mu\text{m}$ , encontramos fluxo de radiação solar em quantidades apreciáveis. Embora as bandas em  $2,7\mu\text{m}$  sejam mais importantes, as bandas de combinação, overtone e bandas fracas em  $3,2 \mu\text{m}$  contribuem significativamente para a absorção. A banda forte em  $6,3 \mu\text{m}$  é muito importante na região térmica do infravermelho. Por outro lado, bandas de absorção no espectro solar que contenham pouca energia podem ser desprezadas.

O dióxido de carbono possui bandas fracas de absorção no espectro solar. As bandas do  $\text{CO}_2$  em  $2,0$ ,  $0,6$ , e  $1,4 \mu\text{m}$  são tão fracas que para todos os propósitos práticos podem ser ignoradas nos cálculos de absorção. A banda do  $\text{CO}_2$  em  $2,7 \mu\text{m}$ , que sobrepõe-se com a banda de  $2,7 \mu\text{m}$  do vapor d'água é forte e deve ser incluída nos cálculos de absorção. A banda de  $4,3 \mu\text{m}$  do  $\text{CO}_2$  é mais importante na região térmica do infravermelho do que na região visível, pois esta banda contém muito pouca energia solar. As bandas de absorção são constituídas de linhas, cuja intensidade varia enormemente com o número de onda de tal sorte que a transmitância não pode ser exatamente descrita pela lei de Beer-Bouguer-Lambert, empregando-se uma função exponencial do caminho óptico gasoso. Em virtude das incertezas acerca do conhecimento teórico sobre a posição e intensidade das linhas, as características de absorção dessas bandas, no espectro solar, tem sido determinadas em detalhes através de medidas de laboratório. Um trabalho



experimental importante na determinação das características de absorção para o vapor de água e o dióxido de carbono foi realizado por Howard et al. (1956 a,b,c,d).

Liou e Sasamori (1975) e Liou (1980) deduziram uma fórmula que permite aproximar o valor médio da absorptividade para as bandas de absorção do vapor de água e dióxido de carbono e concluíram que a única banda de absorção importante para o CO<sub>2</sub> está situada em 2,7 μm, onde ocorre a superposição com a banda de 2,7 μm do H<sub>2</sub>O. Por conseguinte, o aquecimento solar na troposfera é basicamente gerada (sem desprezar-se o papel das nuvens) pelo vapor d'água.

A atenuação da radiação pela atmosfera pode ser aproximadamente calculada pela lei de Beer-Bouguer-Lambert, sendo dada por (Fraidenraich e Lyra, 1995),

$$E_{\lambda} = E_{\lambda}^0 \exp(-c_{\lambda}m)\mathfrak{T}_{\lambda}, \quad (2.41)$$

onde  $E_{\lambda}^0$  e  $E_{\lambda}$  representam, respectivamente, a irradiância específica no topo da atmosfera e na superfície terrestre, após ser transmitido através de uma massa de ar igual a  $m$  e  $\mathfrak{T}_{\lambda}$  representa a transmitância, através da atmosfera, onde está presente o vapor de água e o dióxido de carbono. Os coeficiente  $c_{\lambda}$  representam a contribuição de termos devido aos constituintes atmosféricos:  $c_1$ , devido ao espalhamento Rayleigh;  $c_2$ , à absorção pelo ozônio,  $c_3$  o coeficiente de absorção do (H<sub>2</sub>O)<sub>v</sub> e  $c_4$  o coeficiente de absorção do CO<sub>2</sub>. Não são considerados os efeitos sobre a radiação pelas nuvens e aerossóis atmosféricos. Estes coeficientes foram determinados em 1968 por Elterman (Fraidenraich e Lyra, 1995), e eles são médias para um certo intervalo  $\Delta$  centrado em  $\lambda$ . O intervalo  $\Delta$  varia de acordo com a faixa de comprimentos de onda. No próximo capítulo explicitaremos a sistemática de cálculo da irradiância solar estimada na superfície terrestre utilizando o método proposto por Fraidenraich e Lyra (1995) e sua comparação com os valores de irradiância observados na Estação Solarimétrica do Pici.

## Capítulo 3

### Materiais e Dados

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Estação de Coleta de Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos na Estação Agrometeorológica do Departamento de Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará no Campus do Pici em Fortaleza, Estado do Ceará. A fachada da estação é exibida na figura 3.1, onde é visualizado o conjunto dos piranômetros e o anemômetro. Na figura 3.2 podemos ver os cinco piranômetros e o pirgeômetro montados em um suporte de alumínio. Observamos ainda que o local escolhido está livre de obstáculos naturais ou artificiais que possam interferir na leitura dos sensores.



Figura 3.1. Fachada da Estação Agrometeorológica da UFC, onde na parte superior observa-se o conjunto de radiômetros e o anemômetro.





Figura 3.2. Foto dos cinco radiômetros e o pirgeômetro montados em suporte de alumínio. Neste mesmo suporte são colocados a caixa de junções elétricas entre os sensores e o MUX.

As coordenadas da Estação Agrometeorológica são dados na tabela 3.1 abaixo.

Tabela 3.1 Coordenadas Geográficas da Estação Meteorológica do Depto. de Eng. Agrícola, UFC.

LATITUDE	03 <sup>o</sup> 44' 43"
LONGITUDE	38 <sup>o</sup> 34' 55"
ALTITUDE	19,5 m

A Estação Agrometeorológica do Pici possui o seguinte conjunto de instrumentos, cujas medidas foram utilizadas neste trabalho:

- Heliógrafo (i : heliograph, sunshine recorder) – instrumento concebido para medições de insolação. O modelo mais difundido é conhecido como heliógrafo Campbell-Stokes, que dispõe de uma esfera de quartzo desempenhando o papel de lente convergente para o feixe solar direto (Plana-Fattori e Ceballos,1996 );
- Actinógrafo ( i : actinometer, f : actinomètre) - designação freqüentemente aplicada a certos modelos de piranômetro ( e.g.: actinômetro Linke-Feussner}) (Plana-Fattori e Ceballos,1996);

- Anemômetro Elétrico de Painel (10m de altura) - instrumento que indica direção e velocidade do vento;
- Pluviômetro - instrumento utilizado para medir a quantidade de precipitação acumulada diretamente em um cilindro metálico;
- Pluviógrafo - instrumento que além de acumular a precipitação, registra graficamente a sua quantidade e o momento em que ela cai permitindo também, dedução de sua intensidade.

Os dados meteorológicos foram coletados diariamente às 9, 15 e 21h (Hora Local), sendo então gravados em um microcomputador tipo PC IBM 486 no formato de uma planilha eletrônica. Mensalmente foi elaborado um mapa de observações meteorológicas referente ao mês, e chamado MAPÃO, cujo conteúdo para o mês de novembro de 1996 é mostrado no apêndice. Na tabela 3.2 estão os dados utilizados na determinação das condições atmosféricas em que se realizaram as medidas de radiação solar.

Tabela 3.2 Principais Dados Meteorológicos Utilizados.

Temperatura do Ar (°C)	Umidade Relativa (%)
Nebulosidade (0/10)	Insolação (hora)

### **3.1.2 Descrição dos Instrumentos da Estação Automática de Aquisição de Dados Solarimétricos**

A Estação Automática de Aquisição de Dados Solarimétricos foi instalada na Estação Agrometeorológica do Departamento de Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará no Campus do Pici. A fase de testes da instrumentação realizou-se entre os meses de dezembro de 1995 e janeiro de 1996. A estação tornou-se operacional a partir de fevereiro de 1996, coletando dados de radiação solar de forma contínua até o mês de fevereiro de 1997.

O local escolhido para instalação, como é necessário, está livre de obstruções tanto naturais quanto artificiais. O posicionamento dos sensores foi escolhido de modo que: (a) se evitasse que sombras fossem projetadas no elemento sensor durante o tempo de observação; (b) os elementos sensores estivessem afastados de objetos que refletissem a luz solar sobre eles; (c) os sensores não estivessem expostos a fontes artificiais de radiação.

Os piranômetros foram montados sobre um suporte de alumínio, sendo firmemente parafusados de modo a evitar choques e vibrações. A prateleira de alumínio, juntamente com os piranômetros, foi montada em um suporte que eleva todo o sistema a 0,5 m acima do teto da estação Agrometeorológica. O cabo utilizado para efetuar as ligações elétricas, um condutor gêmeo nº 20 de aproximadamente 15 m de comprimento, à prova de água, foi encapsulado em um conduíte de PVC rígido.

A medida da radiação solar de onda curta, discretizada por comprimento de onda, foi realizada por cinco piranômetros espectrais de precisão da marca Eppley, modelo PSP (Precision Spectral Pyranometer), enquanto que a medida da radiação de onda longa foi efetuada por um radiômetro espectral infravermelho de precisão (pirgeômetro), também da marca Eppley, modelo PIR, conforme a tabela 3.3.

Tabela 3.3 Relação dos Piranômetros e do Pirgeômetro.

Nº de ordem	Equipamento	Modelo	Nº de série	Filtro	Canal
01	Piranômetro	PSP	28389F3	WG295	0
02	Piranômetro	PSP	28239F3	GG495	1
03	Piranômetro	PSP	28905F3	OG530	2
04	Piranômetro	PSP	28906F3	RG715	3
05	Piranômetro	PSP	28390F3	RG780	4
06	Pirgeômetro	PIR	28392F3		5



Cada piranômetro, cujas características são apresentadas na tabela 3.4, é equipado com um filtro hemisférico de vidro polido. Os filtros são transparentes para intervalos de comprimentos de onda específicos, sendo opacos para os demais, isto é, um filtro atua como uma janela seletiva fazendo com que cada piranômetro responda somente na faixa de comprimentos de onda que lhe corresponde.

Tabela 3.4 Características dos Piranômetros.

Característica	Piranômetro (PSP)
Sensibilidade	$\cong 9 \mu\text{V} / \text{W m}^{-2}$
Impedância	$\cong 650 \Omega$
Sensor	Circular com $1 \text{ cm}^2$ de área, cor preta
Dependência com a Temperatura	$\pm 1\%$ da temperatura ambiente Temperatura de Compensação no Intervalo (-20 a 40°C)
Linearidade	$\pm 0,5\%$ de [0 a 2800 $\text{W m}^{-2}$ ]
Tempo de Resposta	1 segundo
Resposta de cosseno	$\pm 1\%$ da normalização 0-70° do ângulo zenital
Orientação	Nenhum efeito observado
Vibração mecânica	Testado acima de 20g's sem danos

A tabela 3.5 apresenta as características dos filtros utilizados. O filtro WG295 é transparente à radiação com comprimentos de onda da ordem e superiores a  $0,28 \mu\text{m}$ . O radiômetro equipado com este filtro registra a irradiância solar global. Por outro lado, o filtro RG780 permite a transmissão de radiação com comprimentos de onda da ordem e superiores a  $0,78 \mu\text{m}$ . Este filtro é chamado de filtro infravermelho. Observa-se que todos os filtros possuem limite máximo de transmitância igual a  $2,50 \mu\text{m}$  o que não se constitui em uma limitação, pois o total de radiação solar com comprimentos de ondas superiores a esse valor representam cerca de 1% da radiação solar total. A figura 3.3 apresenta as transmitâncias dos filtros utilizados.

Tabela 3.5 Valores de transmitância da radiação solar com o comprimento de onda para os respectivos filtros.

Comprimento de onda $\mu\text{m}$	Filtros				
	WG295	GG495	OG530	RG715	RG780
0,27	0,22	0	0	0	0
0,28	0,41	0	0	0	0
0,29	0,60	0	0	0	0
0,30	0,74	0	0	0	0
0,32	0,83	0	0	0	0
0,34	0,90	0	0	0	0
0,36	0,91	0	0	0	0
0,38	0,91	0	0	0	0
0,40	0,91	0	0	0	0
0,42	0,91	0	0	0	0
0,44	0,91	0	0	0	0
0,46	0,92	0,01	0	0	0
0,48	0,92	0,27	0	0	0
0,50	0,92	0,80	0	0	0
0,52	0,92	0,88	0,05	0	0
0,54	0,92	0,90	0,76	0	0
0,56	0,92	0,90	0,88	0	0
0,58	0,92	0,91	0,90	0	0
0,60	0,92	0,91	0,91	0	0
0,62	0,92	0,91	0,91	0	0
0,64	0,92	0,91	0,91	0	0
0,66	0,92	0,91	0,91	0	0
0,68	0,92	0,91	0,91	0,01	0
0,70	0,92	0,91	0,91	0,25	0
0,72	0,92	0,91	0,91	0,74	0
0,74	0,92	0,91	0,91	0,89	0
0,76	0,92	0,91	0,92	0,91	0,10
0,78	0,92	0,91	0,92	0,92	0,48
0,80	0,92	0,91	0,92	0,92	0,81
0,82	0,92	0,91	0,92	0,92	0,89
0,84	0,92	0,91	0,92	0,92	0,90
0,86	0,92	0,91	0,92	0,92	0,91
0,88	0,92	0,91	0,92	0,92	0,91
0,90	0,92	0,91	0,92	0,92	0,91
1,00	0,92	0,91	0,92	0,92	0,91
1,20	0,92	0,91	0,92	0,92	0,91
1,50	0,92	0,91	0,92	0,92	0,91
2,00	0,91	0,90	0,90	0,91	0,90
2,50	0,85	0,85	0,87	0,87	0,89

Os piranômetros e o pirgeômetro são conectados a seis canais de um multiplexador (MUX), que é comandado via um programa computacional chamado Radiomet. O sistema é inicializado diariamente às 05:00 horas e a coleta de dados é concluída às 18:00 horas. Por ocasião da inicialização, o programa Radiomet instrui o MUX a ler cada sensor, via porta paralela de 8 bits, em um intervalo de tempo chamado de tempo de amostragem, igual a seis segundos; o número de pontos por medida é igual a dez, o que resulta num tempo total de sessenta segundos. Desta forma, o programa registra um dado por minuto por sensor.

O sinal de saída do MUX é pequeno o que requer uma etapa de amplificação, obtida pelo uso de um amplificador de alto ganho e baixo ruído, marca Preston (modelo 8300XWB-A). As especificações do amplificador são mostradas na tabela 3.6.

Finalmente, o sinal analógico de saída do amplificador alimenta um conversor analógico digital (Conversor A/D). O programa Radiomet lê o conversor A/D através da porta paralela e armazena a informação no disco rígido do microcomputador. No primeiro dia de cada mês, copia-se em disquete o arquivo de dados do mês anterior, segue-se então a etapa de análise e processamento dos dados de irradiância solar.

Tabela 3.6 Características do Amplificador de Sinal marca Preston modelo 8300 XWB-A

Ganho	Ganhos de 1,2,5,10,20,50,100,200,500 e 1000
Precisão	$\pm 0,01 \% \pm 3\mu$ volts RTI
Linearidade	$\pm 0,005 \%$
Coefficiente de Temperatura	Máximo 10 ppm por grau Celcius
Saída	0,13 $\mu$ volts por grau Celcius



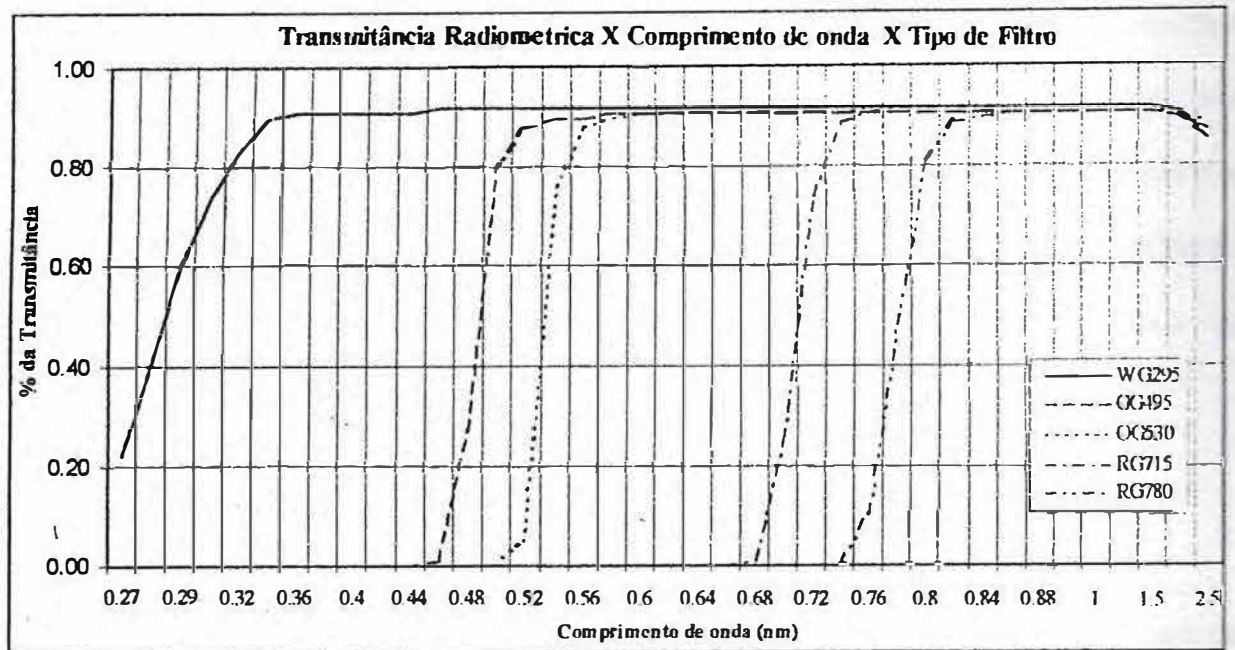


Figura 3.3. Valores da transmissão em função do comprimento de onda para cada tipo de filtro.

### 3.2 Dados Utilizados

#### 3.2.1 Dados de Irradiância Solar Global Medida na Superfície

A radiação solar de onda curta é composta pelas componentes direta e difusa da radiação solar. A integração dessas componentes é conhecida como radiação global. Utilizamos para medir a irradiância solar global na superfície o piranômetro com filtro WG295. Vale ressaltar que cerca de 48,5 % da energia solar que alcança o topo da atmosfera encontra-se na faixa do espectro que corresponde a radiação visível, 43,5% corresponde a radiação infravermelha e 8% a radiação ultravioleta (Liou, 1980 ). Os dados de irradiância solar global diários, mensais e anuais, de minuto a minuto e de 30 em 30 minutos, foram armazenados em um banco de dados na forma de planilha eletrônica.

### **3.2.2 Dados de Irradiância Solar no Visível e Infravermelho Medidos na Superfície**

Para a medida da irradiância no visível utilizamos as leituras do Radiômetro 1, com filtro WG295 e Radiômetro 5, com filtro RG780. Entretanto, observando a figura 3.3 vemos que uma fração da radiação transmitida através do filtro WG295 tem comprimentos de onda menores que aqueles da radiação visível, que está entre 0,36 e 0,78  $\mu\text{m}$  (Liou, 1980). A irradiância infravermelha é aquela registrada pelo Radiômetro 5. A base de tempo e forma de armazenamento é a mesma relatada na seção anterior.

### **3.2.3 Processamento dos Dados de Irradiância Solar**

Utilizamos nesta etapa o programa Perl, que transforma o arquivo original, da ordem de 1,2 Mb/mês, em sub-arquivos diários de minuto a minuto. Esses arquivos por sua vez são agrupados em um sub-diretório chamado mês e o conjunto desses sub-diretórios formam o diretório anual solar. Devido à grande quantidade de registros gerados, o subdiretório mês, também apresenta dados de irradiância global de 30 em 30 minutos. Uma vez que todos os dados são convertidos para o formato de uma tabela, calculamos alguns parâmetros estatísticos, tais como total diário, mensal, anual da irradiância global, máximos e mínimos de radiação atingida por dia durante o mês e valores da média de radiação diária de cada mês e média horária mensal. Também foi calculada a diferença da radiação medida entre os piranômetros que atuam em faixas adjacentes de comprimento de onda. À região do visível, representada pela diferença entre os radiômetros com filtros WG295 e RG780, foi dada atenção especial.

### **3.2.4 Cálculo da Irradiância Solar no Topo da Atmosfera**

A irradiância no topo da atmosfera, isto é, a irradiância para massa de ar nula constitui-se em um valor de referência para os dados de radiação solar quer sejam estimados, quer sejam medidos na superfície terrestre. Ela depende fortemente do ângulo zenital e fracamente da



variação da distância entre a Terra e o Sol. O cálculo detalhado da irradiância no topo da atmosfera foi apresentado no capítulo 2. A irradiância solar diária sobre uma superfície horizontal no topo da atmosfera é obtida pela integração ao longo do dia da irradiância instantânea sobre a mesma superfície, isto é,

$$E^0 = S \left( \frac{d_m}{d} \right)^2 \int_{-H}^H (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h) \frac{dh}{\omega} \quad (3.1)$$

Os ângulos horários  $H$  e  $-H$  representam, respectivamente, o nascer ( $t_n$ ) e o por ( $t_p$ ) do Sol. A integração da equação (3.1) nos dá como resultado,

$$E^0 = \frac{S}{\pi} \left( \frac{d_m}{d} \right)^2 (\sin \phi \sin \delta H + \cos \phi \cos \delta \sin H), \quad (3.2)$$

conforme o capítulo 2.

Os valores desta função foram calculados para todos os dias do ano de 1996, para a cidade de Fortaleza. O programa Pgirradia permite que os dados de saída sejam escolhidos entre as seguintes unidades:  $W/m^2$  ou  $cal/cm^2 \cdot min^{-1}$ . Após o cálculo, os dados são organizados sob a forma de uma tabela contendo a hora e o valor da irradiância no topo da atmosfera. A título de exemplo, exibiremos a tabela e o gráfico, que representam a curva teórica da irradiância solar no topo da atmosfera medida em  $W/m^2$  em função do tempo medido em horas e minutos a cada 30 minutos, correspondendo, respectivamente, a tabela 3.7 e a figura 3.4 para o dia 08 de abril de 1996.

Tabela 3.7 Irradiância solar no topo da atmosfera, no dia 08/04/96.

Hora (hh:mm)	Irradiância ( $Wm^{-2}$ )	Hora (hh:mm)	Irradiância ( $Wm^{-2}$ )
6:00	9,19	12:30	1351,88
6:30	168,71	13:00	1318,29
7:00	343,72	13:30	1262,15
7:30	512,85	14:00	1184,41
8:00	673,21	14:30	1086,40
8:30	822,05	15:00	969,81
9:00	956,82	15:30	836,62
9:30	1075,22	16:00	689,12
10:00	1175,22	16:30	529,83
10:30	1255,12	17:00	361,47
11:00	1313,53	17:30	186,93
11:30	1349,48	18:00	9,19
12:00	1326,33	Total = 19413,26	

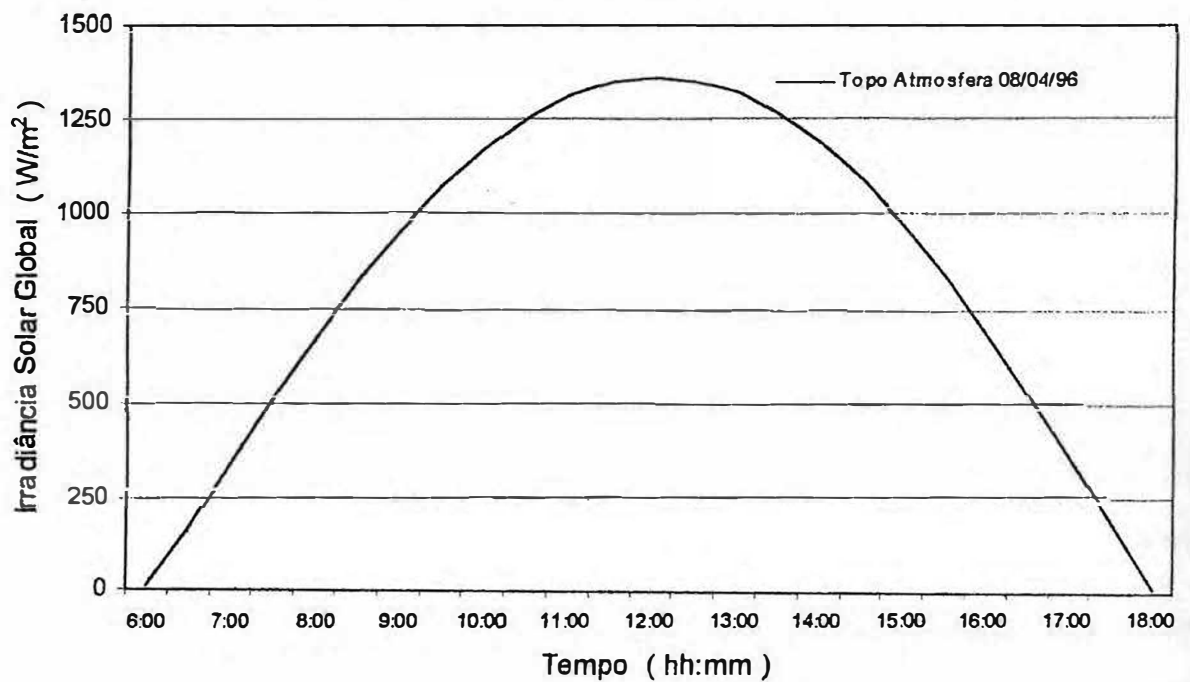


Figura 3.4 Gráfico da irradiância solar no topo da atmosfera no dia 08/04/96

### 3.3 Parametrizações Utilizadas na Estimativa da Irradiância Solar Global Incidente na Superfície Terrestre

#### 3.3.1 Água Precipitável ( $w$ )

Define-se água precipitável como a altura em centímetros da água líquida que seria depositada sobre uma base horizontal na coluna atmosférica vertical acima com área de seção transversal igual a  $1\text{cm}^2$ , se todo o vapor de água contida fosse condensado e precipitado. Adotamos em nossas estimativas da irradiância solar na superfície terrestre  $w=2,0$  cm que pode ser considerada uma média típica para a região Nordeste do Brasil. Este valor foi baseado na informação obtida junto à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), segundo a qual nos meses da estação chuvosa (fevereiro-maio) os valores de  $w$  variam entre 3,5 e 5,0 cm de água precipitável, enquanto que nos demais meses a variação para  $w$  ocorre entre 1,5 e 3,0 cm (correspondência pessoal). Estes valores são obtidos pela utilização de sondagem TOVS (TIROS Operational Vertical Sounding).

#### 3.3.2 Atenuação Atmosférica da Energia Solar

A absorção pela atmosfera de um feixe monocromático é governada pela lei de Beer-Bouguer-Lambert,

$$E_{\lambda} = E_{\lambda}^0 \exp(-c_{\lambda} m), \quad (3.3)$$

onde  $E_{\lambda}^0$  e  $E_{\lambda}$  representam, respectivamente, a irradiância específica no topo da atmosfera e na superfície terrestre, após ser transmitido através de uma massa de ar igual a  $m$ . O coeficiente  $c_{\lambda}$  representa a soma de três termos:  $c_1$ , devido ao espalhamento Rayleigh;  $c_2$ , à absorção pelo ozônio e  $c_3$ , à contribuição devido a aerossóis e turbidez atmosférica (Fraidenraich e Lyra, 1995).

A absorção e espalhamento devido aos aerossóis e turbidez atmosférica ( $c_3$ ) não serão consideradas. Igualmente, não serão considerados o espalhamento e a absorção devido às nuvens. A tabela 3.8 apresenta os valores de  $c_1$  e  $c_2$  no intervalo de comprimento de onda de 0,27 até 0,90  $\mu\text{m}$ .

Tabela 3.8 Coeficientes de espalhamento Rayleigh e absorção pelo Ozônio utilizados na equação (3.3) (Fraidenraich e Lyra, 1995).

$\lambda$ $\mu\text{m}$	$E_\lambda$ $\text{W/m}^2$	$C_1$ Rayleigh	$C_2$ Ozônio	$\lambda$ $\mu\text{m}$	$E_\lambda$ $\text{W/m}^2$	$C_1$ Rayleigh	$C_2$ Ozônio
0,27	232	1,928	70,956	0,45	2006	0,223	0,001
0,28	222	1,645	35,816	0,50	1942	0,145	0,012
0,3	514	1,222	3,413	0,55	1725	0,098	0,031
0,32	830	0,927	0,303	0,60	1666	0,069	0,045
0,34	1074	0,717	0,022	0,65	1511	0,050	0,021
0,36	1068	0,564	0,001	0,70	1369	0,037	0,008
0,38	1120	0,450	0,000	0,80	1109	0,021	0,003
0,40	1429	0,364	0,000	0,90	891	0,013	0,000

Estes coeficientes foram determinados em 1968 por Elterman (Fraidenraich e Lyra, 1995). Para uma coluna vertical de atmosfera ao nível do mar a quantidade de ozônio é admitida como sendo igual a 0,34 cm, semelhante a obtida em Natal (RN) (Bezerra, 1997), sob condições normais de temperatura e pressão.

Na região do infravermelho ( $\lambda > 0,69 \mu\text{m}$ ) ocorre uma absorção seletiva, isto é, a absorção depende de  $\lambda$ . Nesta faixa, a absorção é devido a moléculas poliatômicas que constituem a atmosfera, sobretudo o vapor de água e o dióxido de carbono. A absorção molecular no infravermelho deve levar em consideração a transmitância,  $\mathfrak{T}$ , através da atmosfera, onde está presente o vapor de água e o dióxido de carbono. Os valores da transmitância são dados por (Fraidenraich e Lyra, 1985),

$$\mathfrak{T}_3^m = \exp(-c_3 \sqrt{wm}) \quad (3.4)$$

$$\mathfrak{T}_4^m = \exp(-c_4 \sqrt{wm}), \quad (3.5)$$

onde  $w$  é a quantidade de água precipitável e  $m (= \sec\theta_0)$  é a massa de ar atmosférico atravessada,  $c_3$  o coeficiente de absorção do vapor de  $H_2O$  e  $c_4$  o coeficiente de absorção do  $CO_2$ .

Na faixa espectral correspondente ao infravermelho, com  $\lambda$  a partir de  $0,69 \mu m$  a equação que representa o processo de atenuação atmosférica, é dada por (Freidenraich e Lyra, 1985),

$$E_\lambda = E_\lambda^0 \exp(-c_\lambda m) \mathfrak{T}_\lambda, \quad (3.6)$$

onde  $\mathfrak{T}_\lambda$  representa a transmitância, dadas pelas equações (3.4) e (3.5).

As constantes  $c_3$  e  $c_4$  são apresentadas na tabela 3.9, em função do comprimento de onda da radiação solar. Nesta tabela também está incluída a irradiância solar espectral média no intervalo centrado em  $\lambda$  (Freidenraich e Lyra, 1995).

Os valores mostrados nas tabelas 3.8 e 3.9 são médias para um certo intervalo  $\Delta$  centrado em  $\lambda$ . O intervalo  $\Delta$  varia de acordo com a faixa de comprimentos de onda:  $\Delta = 0,005$  entre  $0,27$  e  $0,60 \mu m$ ,  $\Delta = 0,01 \mu m$ ; entre  $0,62$  e  $1 \mu m$ ,  $\Delta = 0,05 \mu m$ ; entre  $1,05$  e  $2,00 \mu m$ ,  $\Delta = 0,1 \mu m$ ; entre  $2,1$  e  $2,5 \mu m$ .

As tabelas 3.8 e 3.9 apresentam os valores médios dos comprimentos de onda obtidos (Freidenraich e Lyra, 1995). Estes valores médios são utilizados na equação de Beer-Bouguer-Lambert, para calcular aproximadamente o valor da atenuação atmosférica para os valores médios dos comprimentos de onda especificados.



Desta forma a estimativa da atenuação da irradiância solar global na superfície terrestre é dada de forma simplificada, sendo aproximada pelo seguinte algoritmo,

$$E_{\lambda} = E_{\lambda}^0 - \sum_{\lambda=1,2} E_{\lambda}^0 \exp^{-c_{\lambda}m} - \sum_{\lambda=3,4} E_{\lambda}^0 \exp^{-c_{\lambda}m} \mathfrak{T}_{\lambda}^m \quad (3.7)$$

onde  $\mathfrak{T}_{\lambda}^m$  representa a transmitância, dadas pelas equações (3.4) e (3.5),  $E_{\lambda}$  é a irradiância solar

Tabela 3.9. Coeficientes de Absorção Molecular utilizados na equação (3.6) (Fraidenraich e Lyra, 1995)

$\lambda$ $\mu\text{m}$	$E_{\lambda}$ $\text{W}/\text{m}^2$	$c_3$ $\text{H}_2\text{O}$	$c_4$ $\text{CO}_2$	$\lambda$ $\mu\text{m}$	$E_{\lambda}$ $\text{W}/\text{m}^2$	$c_3$ $\text{H}_2\text{O}$	$c_4$ $\text{CO}_2$
0,69	1369	0,034					
0,76	1211	0,247					
0,84	1013	0,140		1,23	443		0,004
0,85	990	0,120		1,28	405		0,004
				1,29	373		0,004
0,86	968	0,140		1,31	390		0,009
				1,33	375	0,132	
0,87	947	0,140		1,38	347	0,900	
0,90	891	0,130		1,43	323	0,420	
0,91	880	0,120		1,46	312	0,270	
0,92	869	0,230		1,47	299	0,280	
0,93	858	0,280		1,54	258		0,003
0,94	847	0,200		1,67	214		0,005
0,95	837	0,210		1,73	191		0,0046
0,96	820	0,190		1,78	167		0,007
0,97	803	0,170		1,86	142	0,780	
0,98	785	0,050					
0,99	767	0,060					
1,02	720		0,003				
1,08	602		0,005	1,95	126	0,210	
1,09	593		0,004	2,12	90		0,0085
1,12	593	0,300		2,15	85		0,010
1,13	563	0,270					
1,14	548	0,280		2,35	62	0,114	
1,15	535	0,230		2,40	59	0,13	
1,18	480		0,008	2,45	55	0,141	
1,19	460		0,007	2,50	51	0,214	
1,22	453		0,005	2,55	48	0,533	

global estimada na superfície,  $E_{\lambda}^0$  é a irradiância solar no topo da atmosfera e o termo dentro do somatório é a Lei de Beer-Bouguer-Lambert, para cada comprimento de onda médio especificado pelas tabelas 3.8 e 3.9.

## Capítulo 4

### Resultados e Discussões

#### 4.1 Características Climáticas de Fortaleza

Nesta seção apresentaremos as características climáticas de Fortaleza, de acordo com as observações das variáveis Temperatura do Ar Atmosférico, Umidade Relativa, Nebulosidade e Insolação para o ano de 1996. Estas variáveis foram medidas diariamente às 9, 15 e 21 h (Hora Local). Como faremos a relação destas variáveis com a radiação solar incidente na superfície terrestre, somente as medidas realizadas nos períodos da manhã e tarde serão consideradas em nossa análise.

##### 4.1.1 Temperatura do Ar

Durante o período da manhã a superfície da Terra recebe mais energia que emite e isso provoca um aumento em sua temperatura. Esta situação assim se mantém, até que um *máximo* de temperatura ocorra. Embora a Terra receba maior quantidade de energia solar por volta do meio-dia, a máxima temperatura é atingida, normalmente por volta das 15 h. A partir deste ponto a superfície da Terra emite mais energia que recebe e há uma gradativa diminuição da temperatura. O gráfico 4.1 mostra a variação de temperatura típica de um dia de verão em Fortaleza.

Na figura 4.2 é apresentado o comportamento da temperatura do ar atmosférico às 9 e 15 h, em graus Celsius, ao longo dos meses do ano. Cada ponto na curva representa um valor médio a cada cinco dias. Observamos que as temperaturas no período da tarde apresentam maiores valores que os correspondentes valores da temperatura no período da manhã. Tal comportamento se deve ao acúmulo de energia pela superfície terrestre, principalmente até o meio-dia. Também observamos que existe uma tendência de aumento da temperatura do ar no segundo semestre do

ano, muito provavelmente devido a maior presença de nuvens durante o período da manhã no primeiro semestre. Tal comportamento segue o ciclo anual das estações climáticas.

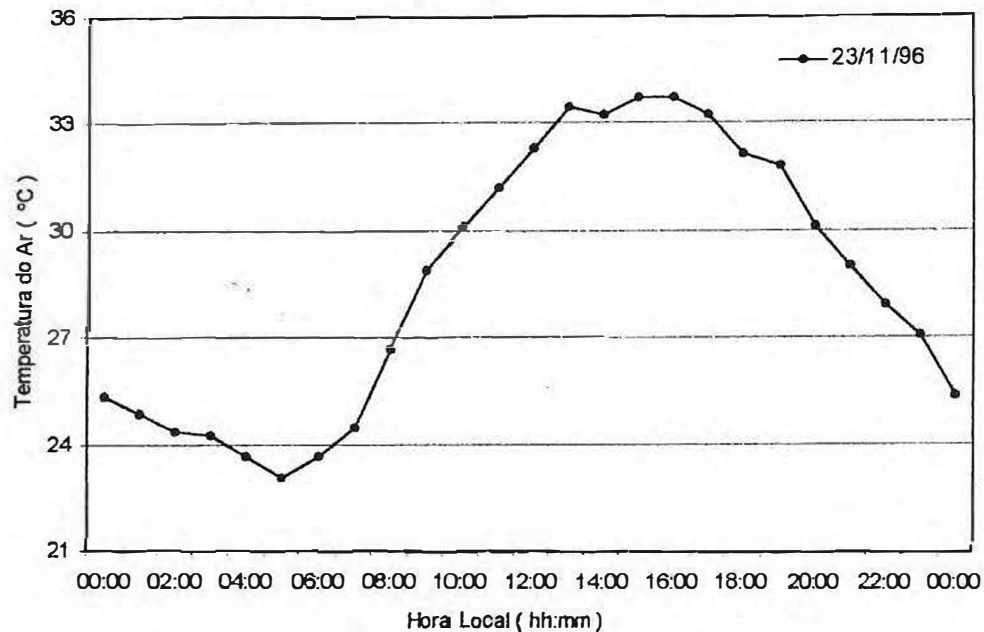


Figura 4-1 Variação diurna da temperatura do ar em Fortaleza no dia 23/11/1996

#### 4.1.2 Umidade Relativa

Inicialmente teceremos considerações a respeito da umidade relativa e após isso apresentaremos os resultados.

A concentração de vapor de água na atmosfera varia, em termos práticos, de zero até cerca de quatro porcentos, isto é, quando existem quatro gramas de água em cada cem gramas de ar. A quantidade de vapor de água que existe em um dado lugar e instante é uma informação muito importante para os meteorologistas, devido o papel fundamental desempenhado pela água nos processos atmosféricos. O primeiro deles é o de condensação, que é um importante aspecto daquilo que genericamente se chama de tempo. Em segundo lugar, o vapor de água

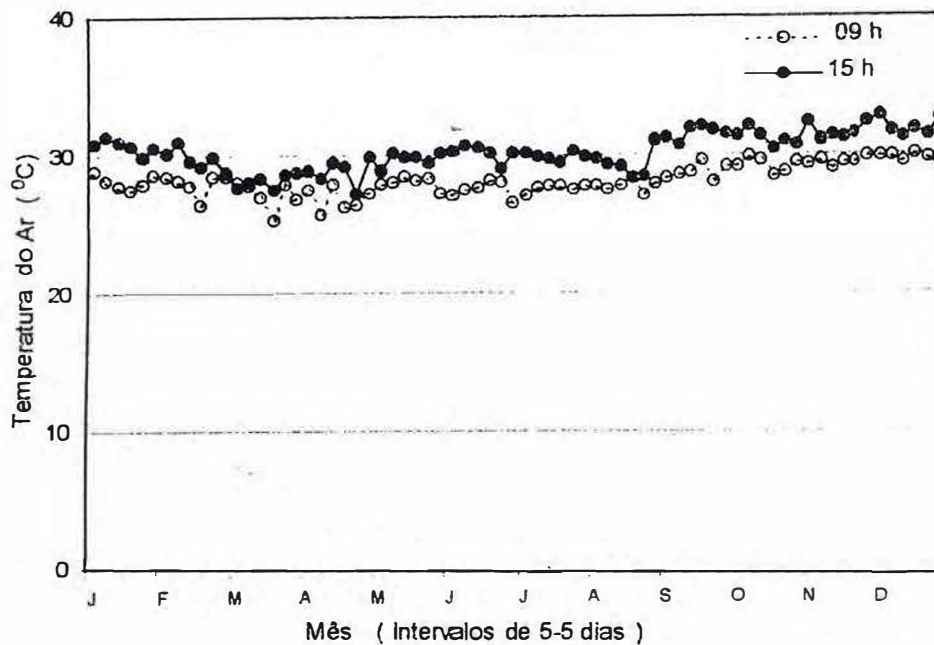


Figura 4-2 Gráfico da temperatura do ar às 9 e 15 h (Hora Local)

é o mais importante absorvedor de radiação solar na faixa do infravermelho e, portanto, ele afeta o balanço de energia na atmosfera. Finalmente, o calor latente liberado no processo de condensação é uma fonte importante de energia na manutenção dos processos atmosféricos.

A umidade relativa é definida como a razão entre a pressão de vapor e a pressão de vapor de saturação. Esta razão normalmente é multiplicada por cem e expressa em porcentos. A umidade relativa mede quão próximo o ar está da saturação - 100 % indica saturação completa. Há, normalmente, uma grande variação diurna da umidade relativa, mesmo quando a quantidade de vapor de água na atmosfera se mantém praticamente constante. Isto se deve, essencialmente, a variação de temperatura, pois a umidade relativa é sensível à mudança de temperatura.

Os valores da umidade relativa, às 9 e 15 h, horário local, no ano de 1996, são mostrados na figura 4.3. Cada ponto representa a média da umidade. Os valores da umidade relativa, às 9 e 15 h, horário local, no ano de 1996, são mostrados na figura 4.3. Cada ponto representa a média da umidade relativa a cada cinco dias. Observamos



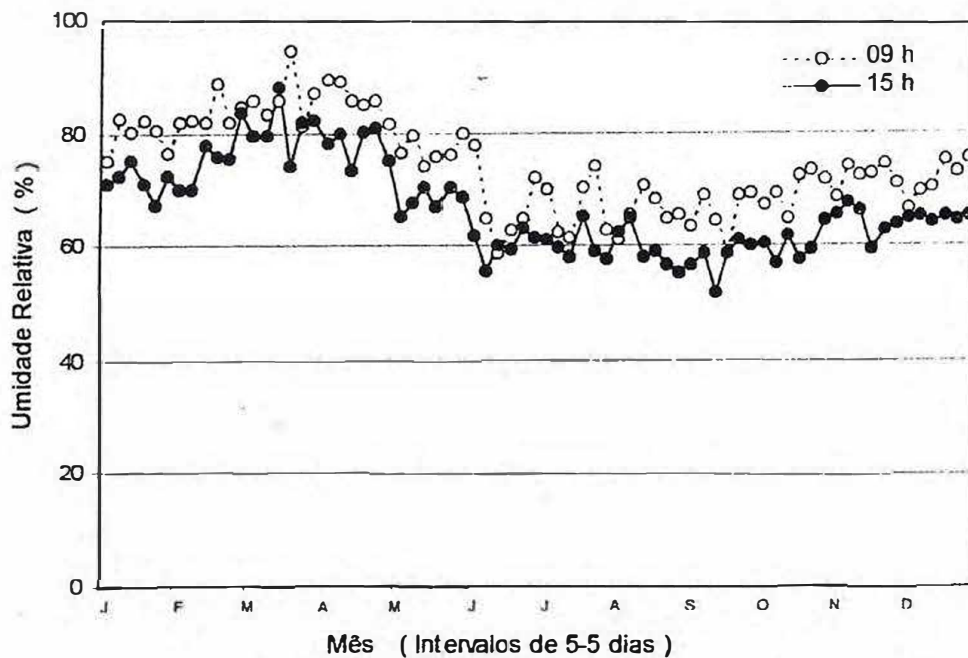


Figura 4-3 Gráfico da umidade relativa às 9 e 15 h (Hora Local)

que os valores da umidade relativa no período da manhã são maiores que os correspondentes no período da tarde. Valores máximos de umidade relativa são registrados durante a estação chuvosa daquele ano - entre os meses de fevereiro e maio. Há uma sensível diminuição na umidade relativa no segundo semestre de 1996, sendo os menores valores registrados nos meses de setembro e outubro.

#### 4.1.3 Nebulosidade

A figura 4.4 apresenta o gráfico de nebulosidade, às 9 e 15 h, para os meses do ano de 1996. Semelhantemente aos anteriores, cada ponto deste gráfico representa um valor médio a cada 5 dias. Observamos que os valores da nebulosidade se apresentam menores no período da tarde durante quase todo o ano, exceto entre os meses de março e maio, que são meses da estação chuvosa daquele ano. Neste período de chuvas, os valores da nebulosidade são praticamente iguais, quer pela manhã quer pela tarde.

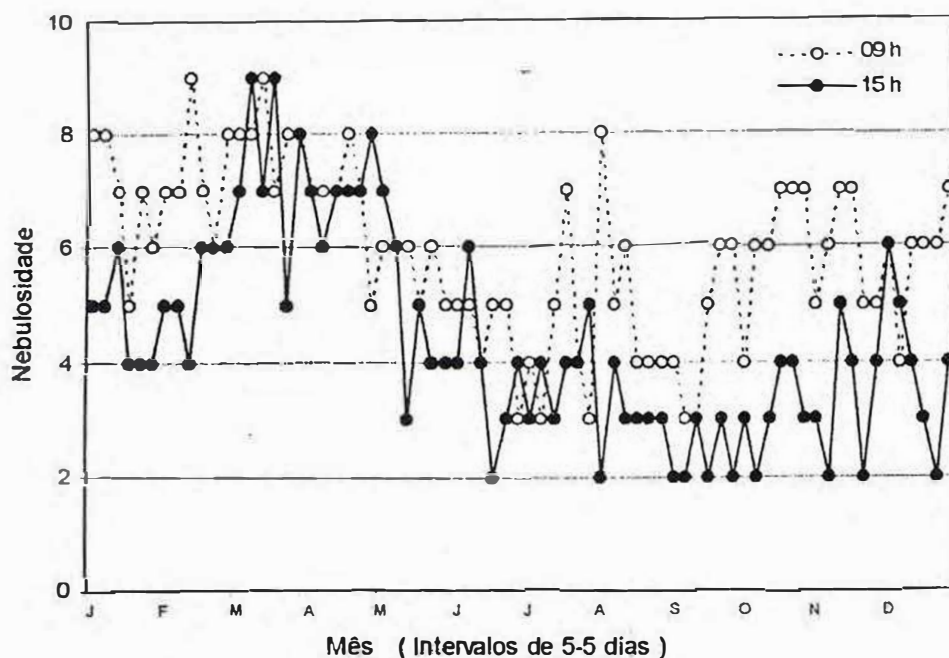


Figura 4.4 Gráfico da variação anual da nebulosidade em Fortaleza, às 9 e 15 h (Hora Local)

#### 4.1.4 Insolação

Uma medida da quantidade total da radiação solar incidente na superfície terrestre é a insolação, que é definida como a radiação solar que atinge a superfície da Terra, após os processos de *atenuação* seletiva pela atmosfera, que ocorrem pelos processos físicos de absorção, reflexão e espalhamento da radiação.

A figura 4.5 apresenta os valores médios da insolação, a cada cinco dias, medidos na Estação Agrometeorológica do Pici.

Na tabela 4.1 estão os valores médios da insolação durante a estação chuvosa, nos dois semestres e no ano. A média do segundo semestre é cerca de 80% maior que a média anual e cerca de duas vezes a média durante a estação chuvosa.

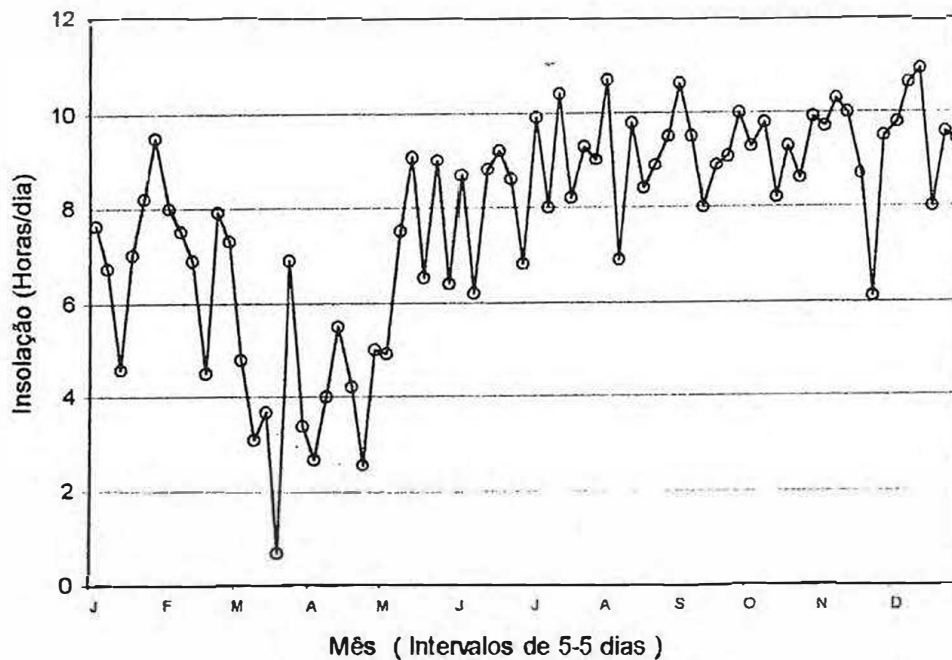


Figura 4-5 Gráfico da variação anual da insolação em Fortaleza.

Tabela 4.1 Valores médios da insolação em Fortaleza.

ÉPOCA	INSOLAÇÃO
Estação Chuvosa	5,05
Primeiro Semestre	6,22
Segundo Semestre	9,22
Anual	7,74

#### 4.2 Características Gerais da Irradiância Global em Fortaleza

Nesta seção analisaremos as características gerais da irradiância solar global em Fortaleza para todos os dias do ano de 1996, obtidas minuto a minuto, entre 6 e 18 h (Hora Local). Os gráficos das irradiâncias solar global no topo da atmosfera, irradiância estimada na superfície terrestre em um dia claro e observada na Estação Solarimétrica do Pici, são mostradas nas figuras 4.6, 4.7 e 4.8 para às 9, 12 e 15 h, respectivamente. Nos três gráficos, a curva oscilante superior representa o valor da irradiância solar incidente no topo da atmosfera, onde a

massa atmosférica é considerada nula. Estes valores são obtidos a partir de equações mostradas no Capítulo 2. Para esta curva a diferença entre os valores máximos (meados de março e setembro) e mínimos (meados de junho e dezembro) da irradiância solar no topo da atmosfera é da ordem de 7%. A irradiância solar global no topo da atmosfera ao meio dia, é cerca de 30% maior que aquelas às 9 e 15 horas. A curva oscilante intermediária representa o que convencionamos chamar de dia de céu claro. Para estimar o valor da irradiância solar no dia claro nós consideramos somente o espalhamento Rayleigh e absorção pelo ozônio. Foram considerados doze dias, o primeiro dia de cada mês, e do valor da irradiância solar global no topo da atmosfera foi subtraído os valores correspondentes ao espalhamento Rayleigh e a absorção pelo ozônio, conforme capítulo 3, o que resultou na irradiância estimada na superfície terrestre. Com os valores dos doze dias calculamos os valores médios às 9, 12 e 15 h e subtraímos em todos os dias do ano.

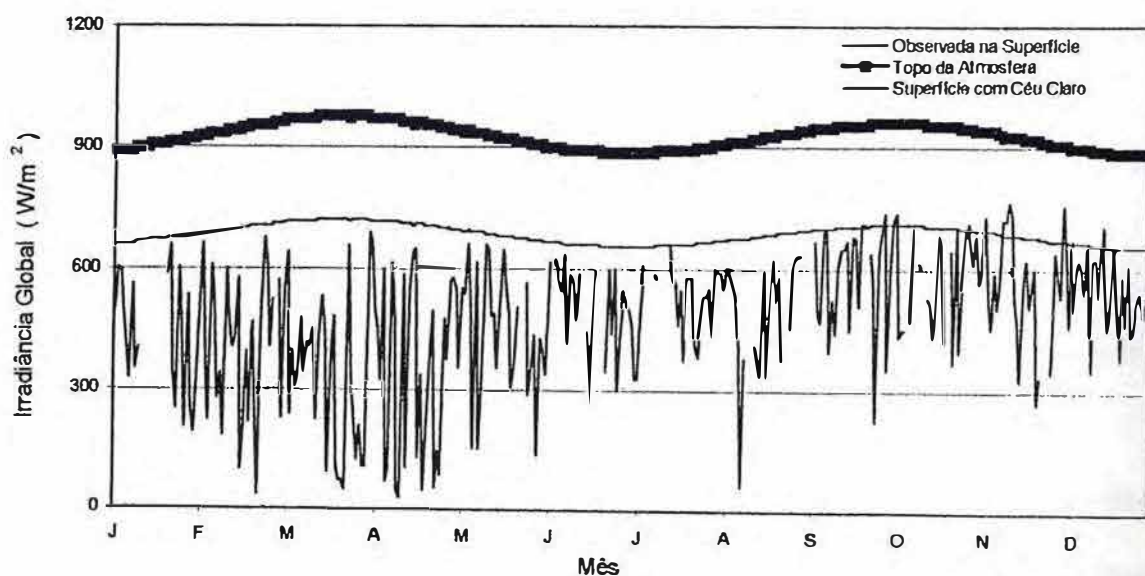


Figura 4-6 Gráfico da irradiância global às 9:00 h



A esta diferença chamamos irradiância em dia claro. Os valores das curvas correspondentes ao dia claro, para os instantes 9 e 15h, são iguais a 74% dos correspondentes valores da irradiância solar no topo da atmosfera. Para o meio dia os valores são iguais à 80% dos valores da irradiância solar no topo da atmosfera.

Os valores da irradiância solar global observados na Estação Solarimétrica do Pici são irregulares e variam até cerca de  $1000 \text{ W/m}^2$ , sendo mostrados abaixo da curva de dia claro.

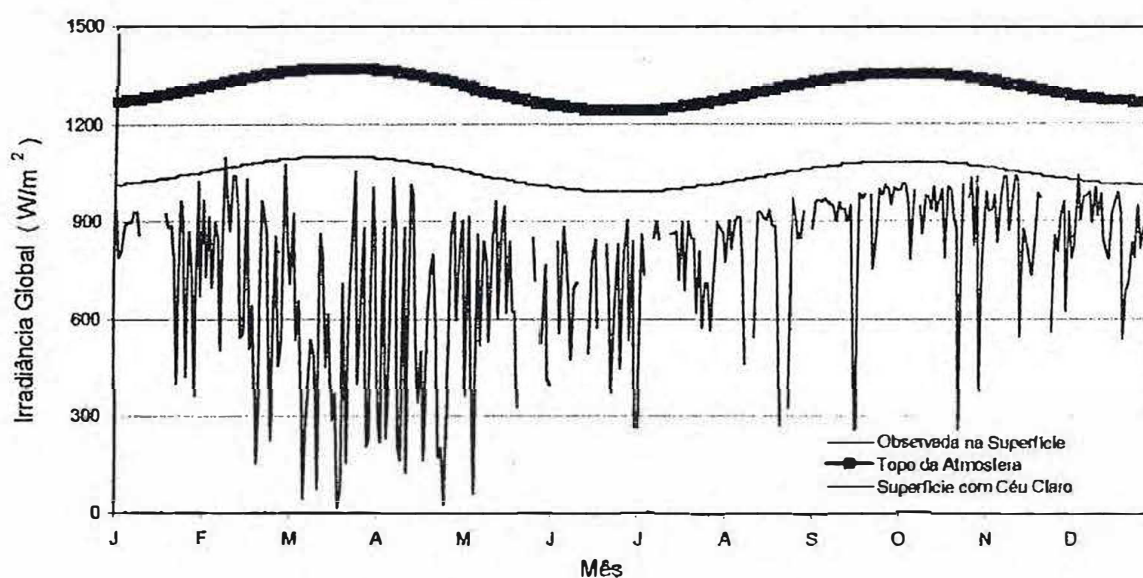


Figura 4-7 Gráfico da irradiância global às 12:00 h

Observamos algumas falhas nos gráficos dos valores medidos, causados pelo mau funcionamento do equipamento e, mais comumente, pela falta de energia elétrica.

A irradiância solar observada na superfície é mais irregular, apresentando maior flutuação no período da estação chuvosa (isto é, entre fevereiro e maio) que a irradiância solar observada nos demais meses, conforme observamos nos gráficos 4.6, 4.7 e 4.8. Destes gráficos também se vê que a irradiância solar observada às 9h é mais irregular no segundo semestre que aquelas



observadas às 12 e 15 h. Este comportamento é devido principalmente à presença de nuvens no período da manhã em Fortaleza.

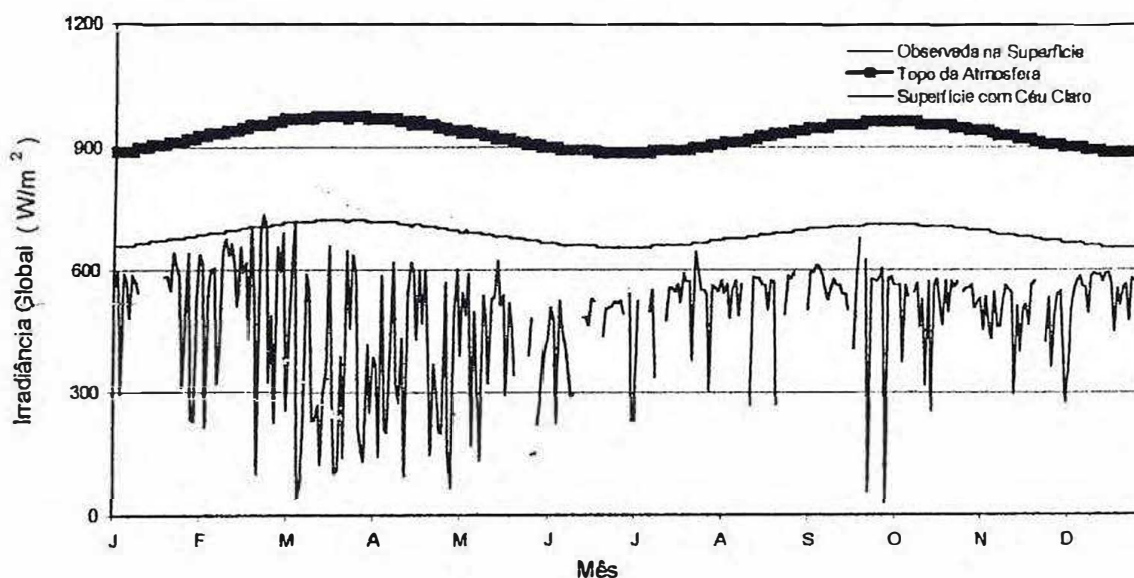


Figura 4.8 Gráfico da irradiância global às 15:00 h

As figuras 4.9 e 4.10 mostram a irradiância global registrada na Estação Solarimétrica do Pici juntamente com a radiação solar global incidente no topo da atmosfera para os dias 26/09/96 e 24/07/96, respectivamente. A partir destes gráficos observamos ser possível ocorrer uma grande variação nos valores da irradiância solar medida na superfície terrestre. A figura 4.9 refere-se a um dia praticamente sem nebulosidade, enquanto que a figura 4.10 apresenta o registro de irradiância solar em um dia com nuvens, notadamente no período da tarde.

A irradiância solar global na superfície terrestre no dia 26/09/96 (figura 4.9) é diminuída do correspondente valor no topo da atmosfera pela atenuação devida aos constituintes atmosféricos, exceto particulado e nuvens.

Observamos que a maior diferença em termos absolutos, entre as irradiâncias registrada e no topo da atmosfera, ocorre em torno do meio-dia. Contudo, as diferenças relativas são maiores no início e final do dia, devido à maior massa atmosférica que a radiação solar tem que atravessar. O erro relativo entre 6 e 8 h, por exemplo, é de cerca da 120 %, enquanto que o erro correspondente entre 10 e 13 h é somente 33 %.

Os parâmetros meteorológicos para o dia 26/09/96 registrados são compatíveis com os valores da irradiância solar observada na superfície, conforme pode ser visto na tabela 4.2 abaixo. A insolação registrada neste dia foi de 10,6 horas.

Na figura 4.10 vemos que os valores da irradiância solar observada em torno das 7:30 h,

Tabela 4.2 Dados meteorológicos no dia 26/09/96.

HORA	9 h	15 h
Umidade Relativa	46 %	51 %
Temperatura do Ar	29,0 °C	30,2 °C
Nebulosidade	0	2
Precipitação	0 mm	0 mm

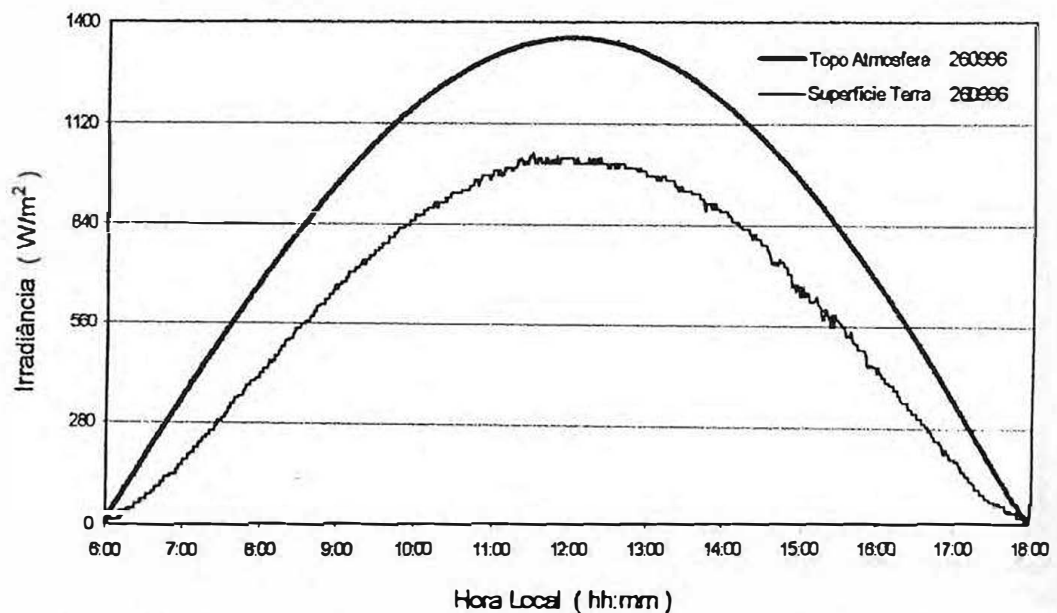


Figura 4.9 Gráfico das irradiâncias no topo da atmosfera(curva superior) e na superfície terrestre, conforme registrada na Estação Solarimétrica do Pici

8:15h e 10:45h, por exemplo, são próximos dos valores da irradiância solar no topo da atmosfera. Isto significa que estes valores são maiores do que aquelas que deveriam ser observados após a atenuação da radiação incidente pelos componentes atmosféricos, exceto nuvens (moléculas, ozônio, particulado, dióxido de carbono, vapor de água). Estes altos valores de irradiância são devidos à reflexão pelas nuvens da irradiância incidente, num efeito de concentração da radiação solar na superfície.

Os parâmetros meteorológicos para o dia 24/07/96 são compatíveis com os valores da irradiância solar observada na superfície, conforme pode ser visto na tabela 4.3. Neste dia foi registrada a insolação de 4,8 horas.

Tabela 4.3 Dados meteorológicos no dia 24/07/96.

HORA	9 h	15 h
Umidade Relativa	69 %	68 %
Temperatura do Ar	26,3 °C	28,2 °C
Nebulosidade	9	9
Precipitação	0 mm	0 mm

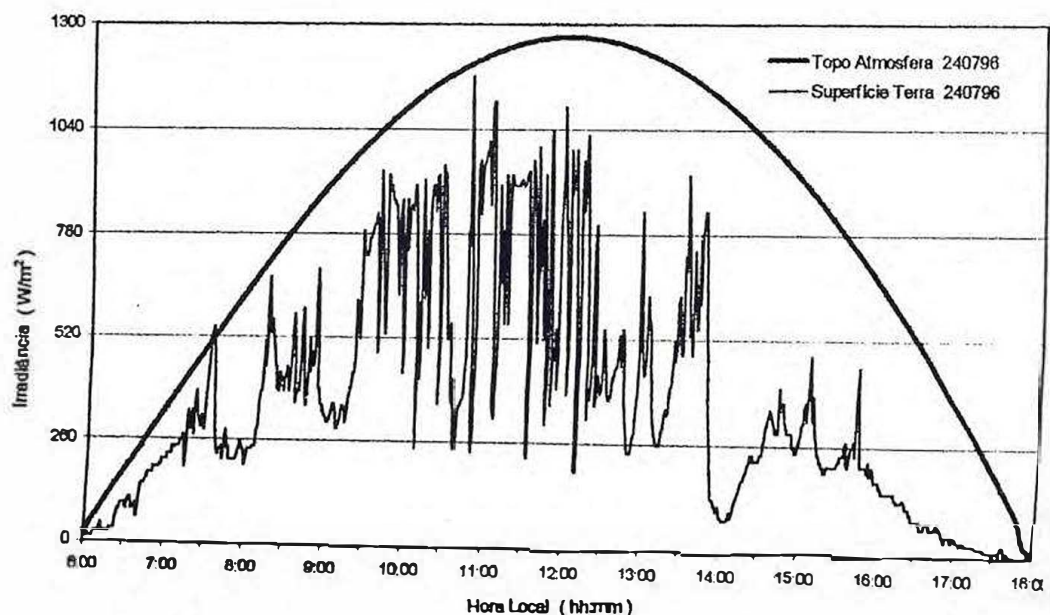


Figura 4.10 Gráfico das irradiâncias no topo da atmosfera (curva superior) e na superfície terrestre, conforme registrada na Estação Solarimétrica do Pici



Na figura 4.11 estão mostradas as irradiâncias globais médias diárias observadas para o ano de 1996. Os valores médios foram obtidos a partir da irradiância total acumulada ao longo do dia. O valor total acumulado de irradiância solar no dia é então dividido por 24 horas e nos fornece o valor médio diário.

Observamos da figura 4.11 uma maior flutuação nos valores médios diários no primeiro semestre, relativamente aos do segundo semestre.

O contorno dos valores médios da figura 4.11 acompanha o máximo esperado em setembro e outubro no topo da atmosfera, mas o mesmo não pode ser dito para o máximo do primeiro semestre. Isto se deve ao fato de termos mais vezes condições de céu claro no segundo semestre e presença de nuvens na maior parte do primeiro semestre.

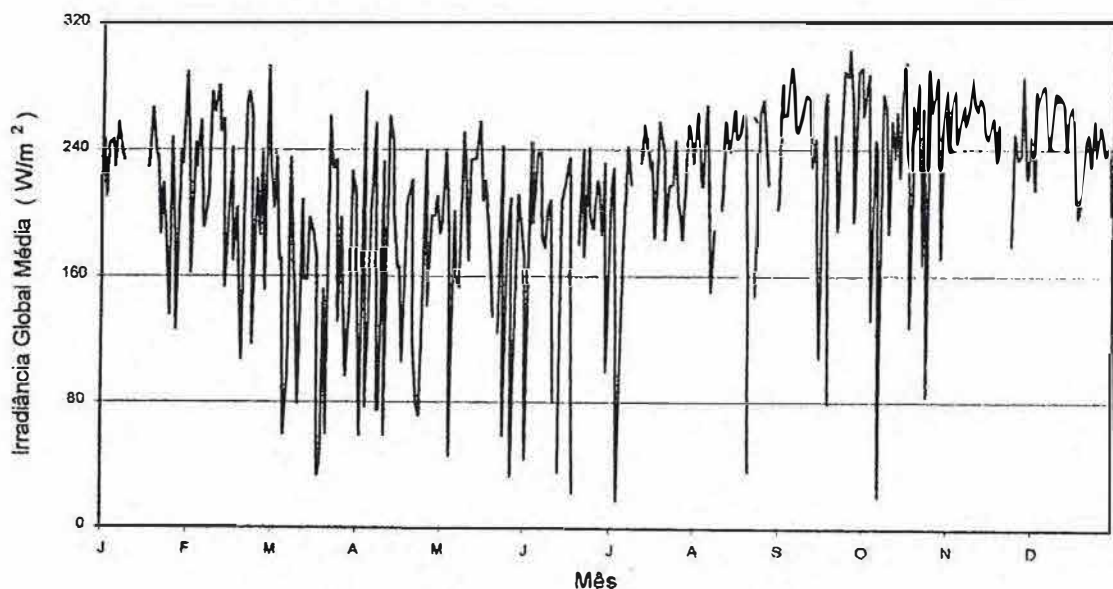


Figura 4-11 Gráfico da irradiância solar global diária média observada na Estação Solarimétrica do Pici.

Na tabela 4.4 são apresentados os valores médios para as irradiâncias globais médias diárias durante a estação chuvosa, no primeiro semestre, no segundo semestre e durante o ano. O valor anual médio de  $217,2 \text{ W/m}^2$  é equivalente a uma energia diária média de  $9,4 \text{ MJ/m}^2$ , ou  $2,6$

kWh/m<sup>2</sup>. Este valor representa aproximadamente um quarto da energia diária consumida em uma residência típica de classe média.

Tabela 4.4 Valores médios das irradiâncias em Fortaleza.

Irradiâncias Médias	W/m <sup>2</sup>
Estação Chuvosa	186,16
Primeiro Semestre	194,01
Segundo Semestre	241,24
Anual	217,21

Os dias de maior e menor incidência de irradiância solar na Estação Solarimétrica do Pici, no intervalo de tempo amostrado, foram, respectivamente, 26/09/96 e 20/03/96. A partir dos gráficos, mostradas na figura 4.12, observamos que houve a presença de pequena quantidade de nuvens, notadamente à tarde, no dia 26/09/96, enquanto que a maior parte do dia 20/03/96 foi praticamente coberto por nuvens.

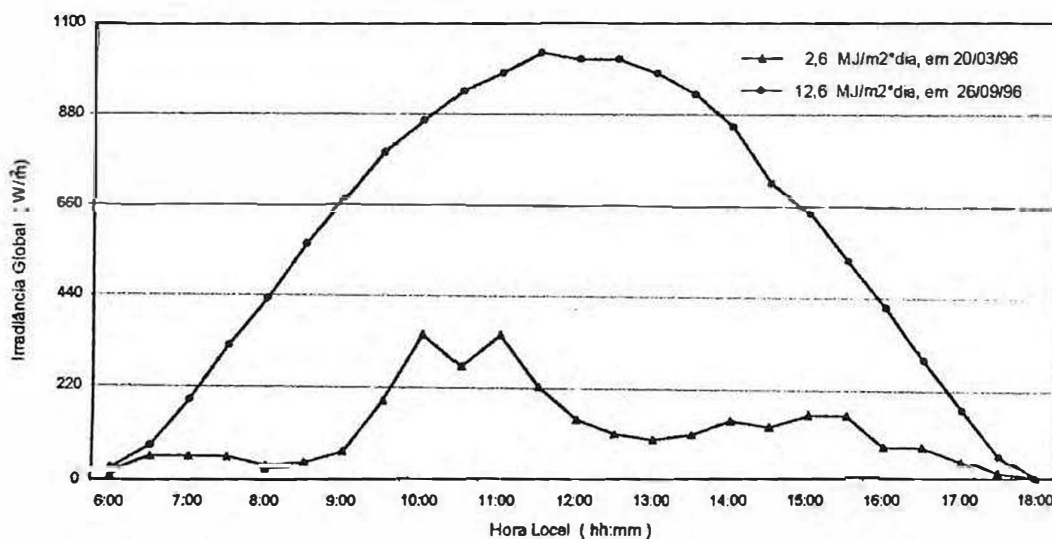


Figura 4.12 Gráfico da irradiância solar global nos dias de maior (26/09/96) e menor (20/03/96) irradiância na superfície terrestre, conforme medido na Estação Solarimétrica do Pici



As variáveis termodinâmicas para os dias 20/03/96 e 26/09/96 são mostradas na tabela 4.5, e são compatíveis com as observações solarimétricas realizadas. Os valores de insolação foram iguais a 10,9 horas e a 0,0 horas, respectivamente, para os dias 26/09/96 e 20/03/96.

Tabela 4.5 Dados meteorológicos nos dias 20/03/96 e 26/09/96.

DATA	20/03/96		26/09/96	
Hora	9 h	15 h	9 h	15 h
Umidade Relativa	96 %	89 %	45 %	52 %
Temperatura do Ar	23,4 °C	25,0 °C	29,0 °C	30,2 °C
Nebulosidade	10	10	0	2
Precipitação	4,4 mm	0,7 mm	0 mm	0 mm

### **4.3 Estimativas Parametrizadas da Irradiância Solar Global, Visível e Infravermelha e Comparações com as Observações na Superfície**

#### **4.3.1 Irradiância Solar Global**

Nesta seção estimaremos a irradiância solar global, visível e infravermelha na superfície terrestre e a compararemos com os correspondentes valores medidos na Estação Solarimétrica do Pici.

A irradiância solar global na Estação foi medida por um radiômetro com filtro transparente WG295, que tem janela ótica seletiva com transmitância no intervalo de comprimentos de onda entre 0,27  $\mu\text{m}$  e 2,5  $\mu\text{m}$ .

A irradiância solar global estimada é igual a irradiância solar global no topo da atmosfera subtraída das componentes espalhadas e absorvidas pelos constituintes atmosféricos (molecular, ozônio, vapor de água e dióxido de carbono). Esta fração, que chamaremos de irradiância solar global estimada na superfície da Terra, é obtida subtraindo da

irradiância solar global no topo da atmosfera o somatório dado pelas equações (3.3) e (3.7) considerando todos os termos que envolvem os valores  $c_\lambda$  (correspondentes ao espalhamento e absorção pelos constituintes atmosféricos especificados acima), ou seja,

$$E_\lambda = E_\lambda^0 - \sum_{\lambda=1,2} E_\lambda^0 \exp^{-c_\lambda m} - \sum_{\lambda=3,4} E_\lambda^0 \exp^{-c_\lambda m} \mathfrak{T}_\lambda^m.$$

Nesta equação  $E_\lambda$  é a irradiância solar global estimada na superfície,  $E_\lambda^0$  é igual a irradiância solar global no topo da atmosfera e os termos dentro dos somatórios são a Lei de Beer-Bouguer-Lambert, para cada comprimento de onda médio especificado nas tabelas 3.8 e 3.9 e  $\mathfrak{T}_\lambda$  representa a transmitância, dadas pelas equações (3.4) e (3.5).

Na análise foram estimadas as irradiâncias na superfície utilizando o valor de água precipitável igual a  $w = 2$  cm. Como anteriormente mencionado, os valores de água precipitável para Fortaleza, conforme dados da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME, encontram-se entre 1,5 cm e 3,0 cm, no segundo semestre. A massa atmosférica a ser atravessada pela radiação é o caminho através da atmosfera percorrido pela radiação, sendo considerada unitária quando o Sol está na vertical do observador, ao nível do mar. Desta forma, teremos  $m=1$  quando o Sol está no zênite, isto é, diretamente acima da cabeça, e  $m=2$  para um ângulo zenital (ângulo subtendido pelo zênite e a linha de visada do Sol) de  $60^\circ$ . Portanto, quanto maior o caminho a ser percorrido pela radiação solar maior será a massa atmosférica a ser atravessada. Os valores da massa atmosférica são simétricos em relação ao meio-dia.

No cálculo da irradiância solar estimada não foram considerados o espalhamento e absorção pelo particulado e pelas nuvens, razão pela qual foram selecionados para análise somente os dias claros, isto é, dias sem, ou com um mínimo, de nebulosidade, e em que não ocorreu nenhuma precipitação. Em termos práticos, os valores de nebulosidade iguais ou menores que 2, significam céu claro. Os dias escolhidos foram: 13/05, 01/08, 21/08, 31/08, 01/09, 06/09, 11/10 e 22/11/96.

A seguir é apresentada a tabela 4.6 na qual constam os valores das variáveis meteorológicas umidade relativa, temperatura do ar, nebulosidade, precipitação e insolação. Da tabela observamos baixos valores para as variáveis umidade relativa e nebulosidade, assim como observamos grandes valores da insolação, com valor diário médio de 10,7 horas de Sol.

Particularmente, para os dias escolhidos os valores de umidade relativa são menores que aqueles típicos para a cidade de Fortaleza.

As relações entre os valores estimados e observados da irradiância solar global na superfície terrestre estão mostrados na tabela 4.7. Observamos uma boa concordância entre os valores observados e estimados da irradiância solar global, principalmente nos dias 11/10/96 e 22/11/96. Também observamos que, para o período entre 9 e 15h, a irradiância observada

Tabela 4-6 Dados meteorológicos dos dias de céu claro analisados.

dd/mm/aa Dia Semana	Hora ( h )	Umidade Relativa ( % )	Temperatura do Ar (C)	Nebulosidade	Precipitação ( mm )	Insolação Diária ( h )
13/05/96	9	61	28,2	1	0,0	
2ª feira	15	66	30,1	3	0,0	11.0
01/08/96	9	61	28,1	1	0,0	
5ª feira	15	66	31,2	2	0,0	11.1
21/08/96	9	53	26,7	1	0,0	
4ª feira	15	54	30,6	2	0,0	10.5
31/08/96	9	49	28,0	1	0,0	
Sábado	15	52	29,5	2	0,0	11.1
01/09/96	9	49	28,7	2	0,0	
Domingo	15	59	30,0	3	0,0	10.8
06/09/96	9	49	28,6	1	0,0	
6ª feira	15	52	30,2	1	0,0	10.1
11/10/96	9	58	29,4	4	0,0	
6ª feira	15	57	30,2	1	0,0	9.7
22/11/96	9	65	29,8	3	0,0	
3ª feira	15	59	31,2	2	0,0	11.2

representa cerca de 80% da irradiância observada durante todo o dia (quinta coluna da tabela 4.7). Desta forma, este intervalo de tempo, que é igual à metade do tempo de registro da irradiância, é o de maior significância em termos de energia solar que atinge a superfície da Terra. Em outras palavras, tem-se que cerca de 80% da energia solar total diária que atinge a



superfície terrestre ocorre entre 9 e 15 h, que é a metade do tempo de observação. Isto se deve, essencialmente, ao fato de que nas primeiras e nas últimas horas do dia, a radiação solar atravessa uma maior massa atmosférica, o que provoca maiores espalhamento e absorção.

A seguir, são mostradas as figuras 4.13 até 4.20 que apresentam os gráficos das irradiâncias observadas na Estação Solarimétrica do Pici e estimadas na superfície terrestre, estas últimas são obtidas pela subtração, da irradiância global que atinge o topo da atmosfera, das frações espalhadas e absorvidas pelos componentes atmosféricos (espalhamento molecular, absorção pelo ozônio, dióxido de carbono e vapor de água). Cada uma das figuras é acompanhada de uma tabela (tabelas 4.8 até 4.15, respectivamente) que consta de quatro colunas: tempo de observação; valor da irradiância global observada, em  $W/m^2$ ; valor da irradiância estimada na superfície, em  $W/m^2$ ; erro relativo entre os valores observados e estimados, em porcentos.

**Tabela 4.7** Relações entre as irradiâncias estimadas e observadas durante o dia e no período de significativa incidência de radiação solar global.

Dia (dd/mm/aa)	Período do Dia	Irradiância Global Estimada / Irradiância Global Observada	Irradiância Global Estimada/ Irradiância Global Observada	Irradiância Global Observada (9-15h) / Irradiância Global Observada (6-18h)
13/05/96	6 - 18 h	1,06		0,80
	9 - 15 h		1,04	
01/08/96	6 - 18 h	1,08		0,79
	9 - 15 h		1,08	
21/08/96	6 - 18 h	1,08		0,79
	9 - 15 h		1,04	
31/08/96	6 - 18 h	1,04		0,79
	9 - 15 h		1,04	
01/09/96	6 - 18 h	1,05		0,80
	9 - 15 h		1,03	
06/09/96	6 - 18 h	1,10		0,80
	9 - 15 h		1,09	
11/10/96	6 - 18 h	1,02		0,77
	9 - 15 h		1,04	
22/11/96	6 - 18 h	1,02		0,82
	9 - 15 h		1,01	

Os gráficos mostram que há uma boa concordância entre os valores observado e estimado da irradiância solar global na superfície. As maiores discrepâncias ocorrem entre 6 e 9h e 15 e 18h. Nestes intervalos a radiação solar percorre um caminho óptico mais longo ficando, desta forma, mais sujeita à atenuação pelos constituintes atmosféricos. Por outro lado, no intervalo entre 9 e 15h, a diferença entre a observação e a estimativa é cerca de 10 %, significando que neste intervalo a irradiância global estimativa representa muito bem os valores medidos.

Embora tenhamos escolhido somente dias claros, isto é, dias com pouca ou nenhuma nebulosidade, os dias 11/10/96 e 22/11/96 apresentam, no período da manhã, pequena quantidade de nuvens, que é caracterizado pela depressão na curva observada - menores valores de irradiância solar na superfície da Terra.

Apesar de termos boas concordâncias entre os gráficos da irradiância global observada e estimada, aqueles que melhor se ajustam, isto é, os que apresentam menores valores de erros relativos são aquelas correspondentes aos dias 31/08/96 e 01/09/96, que são um sábado e um domingo, respectivamente. Por outro lado, os gráficos que apresentam maiores erros relativos são os correspondentes aos dias 01/08/96, 21/08/96 e 06/09/96, que correspondem a duas quintas-feiras e a uma sexta-feira, respectivamente. Esta distribuição, em termos dos dias da semana, pode sugerir que durante a semana, e principalmente nos últimos dias úteis, ocorre uma maior concentração de particulado na atmosfera próximo ao local do experimento. Esta maior concentração de particulado poderia ser a responsável pela maior diferença entre os valores observado e estimado da irradiância solar global nos dias úteis quinta e sexta-feira. Embora não tenhamos conhecimento de qualquer estudo sistemático, observamos que nos finais de semana a quantidade de carros e pessoas no Campus do Pici é menor que em dias úteis, o que nos leva a supor que nos finais de semana há uma menor quantidade de particulado. Em consequência, temos uma melhor concordância entre os valores das irradiâncias globais consideradas (estimada e observada).



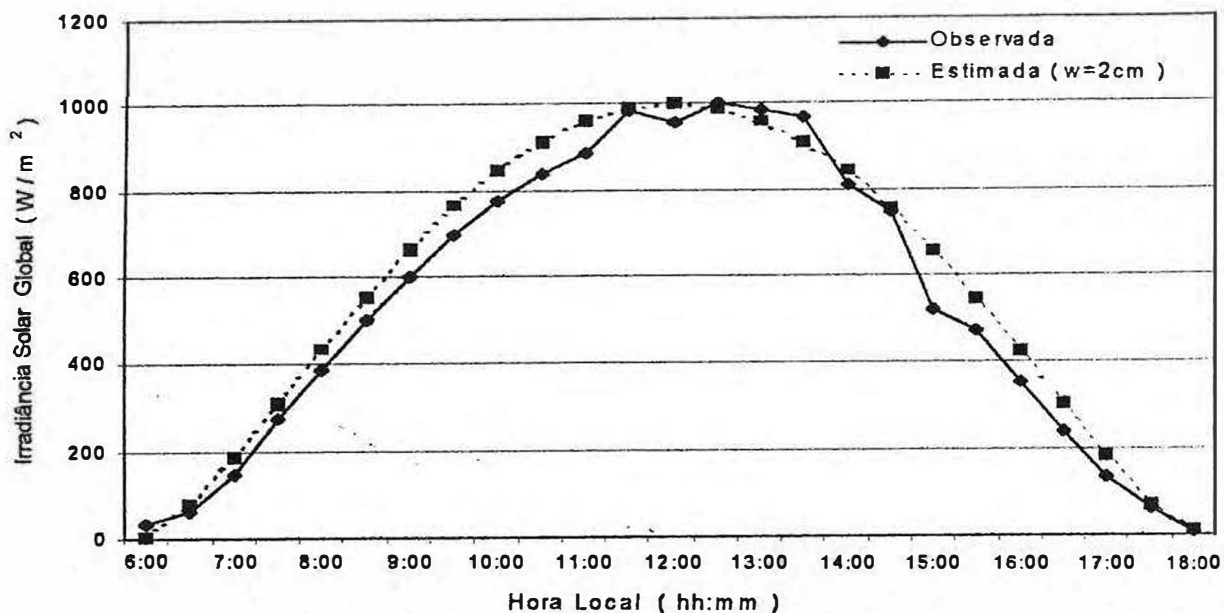


Figura 4.13 Irradiâncias observada e estimada para o dia 13/05/96 (Dia Juliano 133 - 4ª feira)

Tabela 4.8 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 13/05/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Global Observada (Wm <sup>2</sup> )	Irradiância Global Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro Relativo (%) (Estim - Observ) / Observ
6:00	35.20	4.07	-88.45
6:30	63.36	77.71	22.66
7:00	147.83	187.24	26.66
7:30	274.55	309.08	12.58
8:00	387.18	432.73	11.76
8:30	499.82	551.98	10.44
9:00	598.37	662.55	10.72
9:30	696.93	761.10	9.21
10:00	774.37	845.05	9.13
10:30	837.72	912.31	8.90
11:00	887.00	961.30	8.38
11:30	985.56	990.92	0.54
12:00	957.40	1000.51	4.50
12:30	999.64	989.84	-0.98
13:00	985.56	959.16	-2.68
13:30	971.48	909.18	-6.41
14:00	809.57	841.01	3.88
14:30	746.21	756.29	1.35
15:00	520.94	657.10	26.14
15:30	471.66	546.10	15.78
16:00	351.99	426.65	21.21
16:30	239.35	303.11	26.64
17:00	133.75	181.79	35.91
17:30	63.36	73.44	15.91
18:00	6.24	10.62	70.19

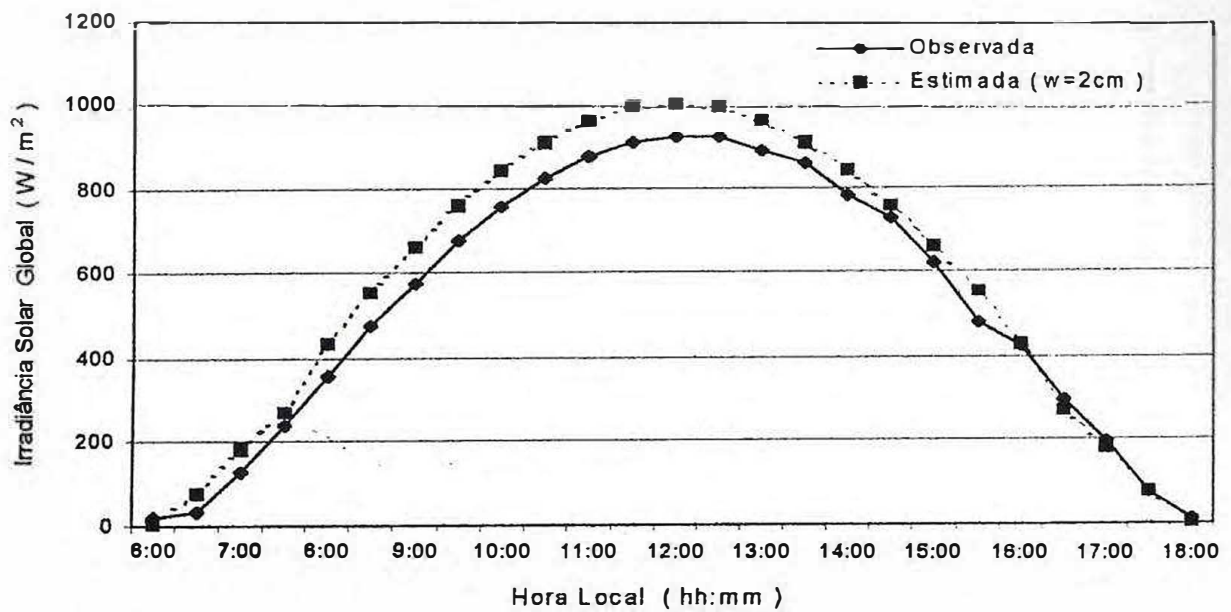


Figura 4.14 Irradiâncias observada e estimada para o dia 01/08/96 (Dia Juliano 213 - 5ª feira)

Tabela 4.9 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 01/08/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Global Observada (W/m <sup>2</sup> )	Irradiância Global Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro Relativo (%) ( Estim - Observ) / Observ
6:00	21.22	3.22	-84.81
6:30	35.37	75.69	113.96
7:00	127.35	184.98	45.25
7:30	240.55	271.91	13.04
8:00	353.74	430.92	21.82
8:30	474.02	551.61	16.37
9:00	573.07	661.72	15.47
9:30	679.19	760.87	12.03
10:00	756.90	845.43	11.70
10:30	827.76	913.31	10.34
11:00	877.29	962.92	9.76
11:30	912.66	998.85	9.44
12:00	926.81	1003.22	8.24
12:30	926.81	998.76	7.76
13:00	891.44	962.75	8.00
13:30	863.14	913.07	5.78
14:00	785.31	845.11	7.61
14:30	728.71	760.49	4.36
15:00	622.59	661.30	6.22
15:30	479.10	551.15	15.04
16:00	424.49	430.44	1.40
16:30	297.15	271.49	-8.63
17:00	198.10	184.55	-6.84
17:30	77.82	75.35	-3.18
18:00	14.15	3.10	-78.08

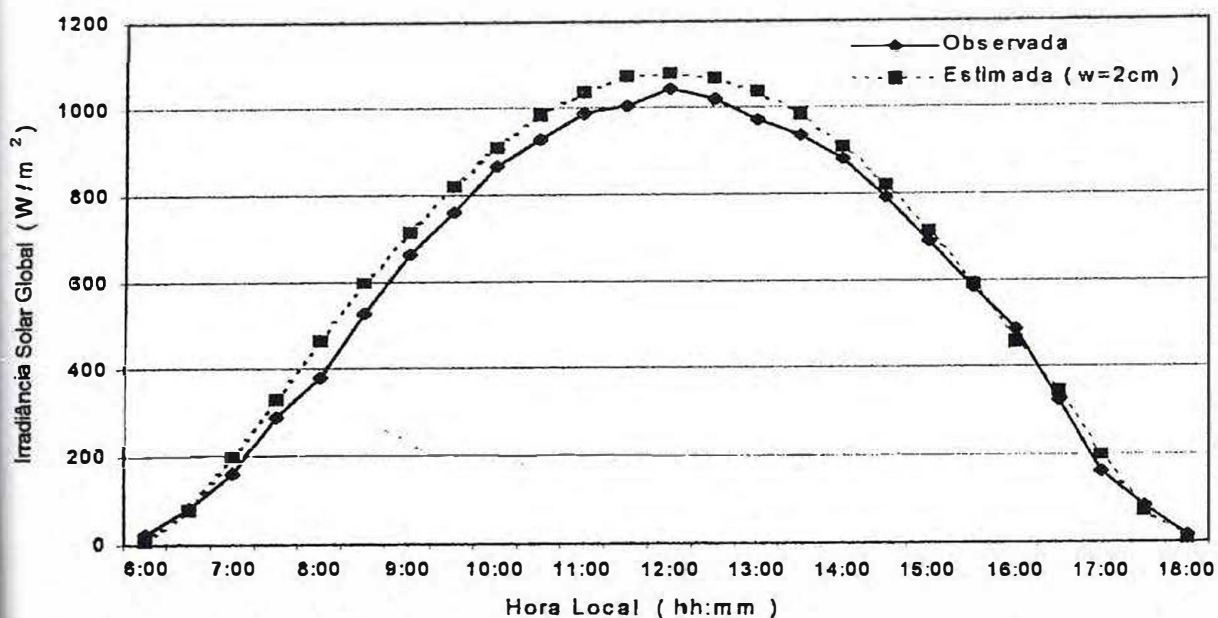


Figura 4.15 Irradiâncias observada e estimada para o dia 21/08/96 (Dia Juliano 233 - 5ª feira)

Tabela 4.10 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 21/08/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Global Observada (W/m <sup>2</sup> )	Irradiância Global Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro Relativo (%) (Estim - Observ) / Observ
6:00	23.00	2.32	-89.90
6:30	84.32	78.52	-6.88
7:00	160.97	197.60	22.76
7:30	291.28	330.20	13.36
8:00	383.26	464.46	21.19
8:30	528.90	593.71	12.25
9:00	659.21	713.38	8.22
9:30	758.86	819.95	8.05
10:00	866.18	910.69	5.14
10:30	927.50	983.43	6.03
11:00	988.82	1036.48	4.82
11:30	1004.15	1068.68	6.43
12:00	1042.48	1079.32	3.53
12:30	1019.48	1068.17	4.78
13:00	973.49	1035.48	6.37
13:30	935.16	981.96	5.00
14:00	881.51	908.80	3.10
14:30	789.52	817.69	3.57
15:00	689.87	710.82	3.04
15:30	582.56	590.95	1.44
16:00	486.82	461.60	-5.18
16:30	321.94	346.99	7.78
17:00	160.97	195.04	21.16
17:30	84.32	76.54	-9.22
18:00	15.33	6.69	-56.35



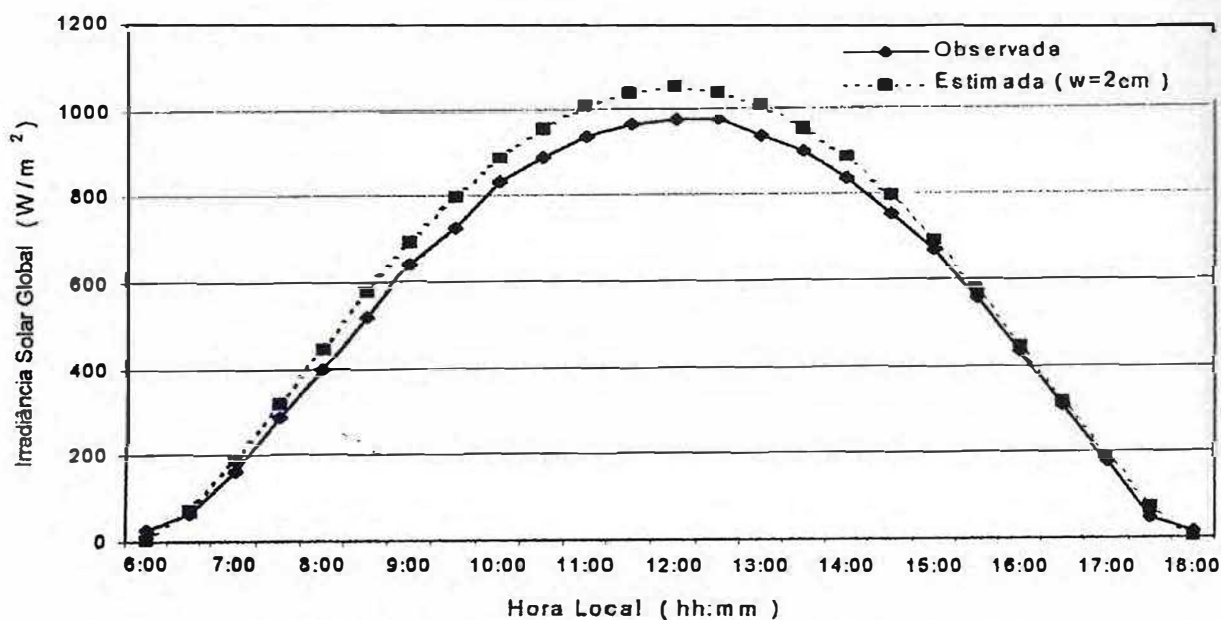


Figura 4.16 Irradiâncias observada e estimada para o dia 31/08/96 (Dia Juliano 243 - Sábado)

Tabela 4.11 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 31/08/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Global Observada (W/m <sup>2</sup> )	Irradiância Global Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro Relativo (%) ( Estim - Observ ) / Observ
6:00	27.96	2.37	-91.52
6:30	62.92	73.54	16.88
7:00	160.79	188.36	17.15
7:30	286.63	317.23	10.68
8:00	398.48	448.31	12.50
8:30	517.33	574.89	11.13
9:00	643.16	692.35	7.65
9:30	727.05	797.16	9.64
10:00	831.92	886.38	6.55
10:30	887.85	958.06	7.91
11:00	936.78	1010.41	7.86
11:30	964.75	1042.26	8.03
12:00	978.73	1052.88	7.58
12:30	978.73	1042.05	6.47
13:00	936.78	1010.00	7.82
13:30	901.83	957.45	6.17
14:00	838.91	885.60	5.57
14:30	755.02	796.23	5.46
15:00	671.13	691.29	3.00
15:30	559.27	573.76	2.59
16:00	433.44	447.13	3.16
16:30	307.60	316.07	2.75
17:00	174.77	187.32	7.18
17:30	48.94	72.74	48.63
18:00	13.98	0.82	-94.16

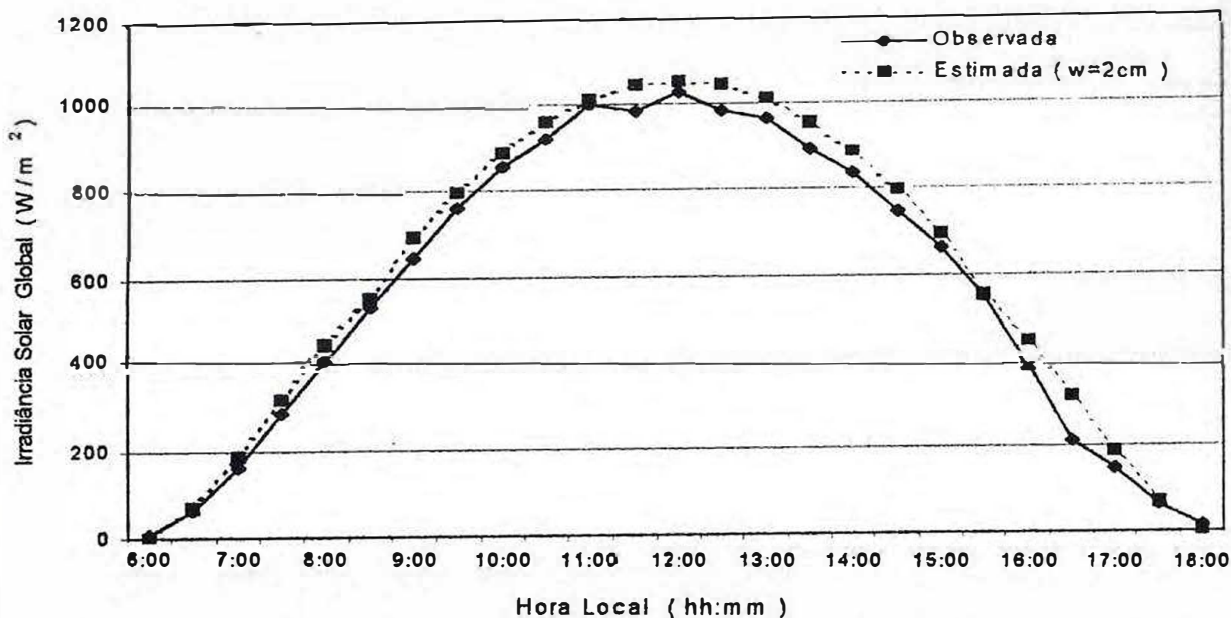


Figura 4.17 Irradiâncias observada e estimada para o dia 01/09/96 (Dia Juliano 244 Domingo)

Tabela 4.12 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 01/09/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Global Observada (W/m <sup>2</sup> )	Irradiância Global Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro Relativo (%) (Estim - Observ) / Observ
6:00	7.04	0.96	-86.42
6:30	63.34	73.57	16.15
7:00	161.86	188.57	16.50
7:30	288.54	317.63	10.08
8:00	408.17	448.90	9.98
8:30	534.85	555.23	3.81
9:00	647.45	693.27	7.08
9:30	760.05	798.14	5.01
10:00	858.57	887.60	3.38
10:30	921.91	959.29	4.05
11:00	999.32	1011.75	1.24
11:30	985.24	1043.60	5.92
12:00	1027.47	1054.20	2.60
12:30	985.24	1043.30	5.89
13:00	964.13	1011.16	4.88
13:30	893.76	958.42	7.23
14:00	837.46	886.48	5.85
14:30	745.97	796.79	6.81
15:00	661.52	691.75	4.57
15:30	548.92	553.65	0.86
16:00	387.06	447.21	15.54
16:30	211.12	315.97	49.66
17:00	147.79	187.06	26.57
17:30	63.34	72.40	14.32
18:00	14.07	4.06	-71.19



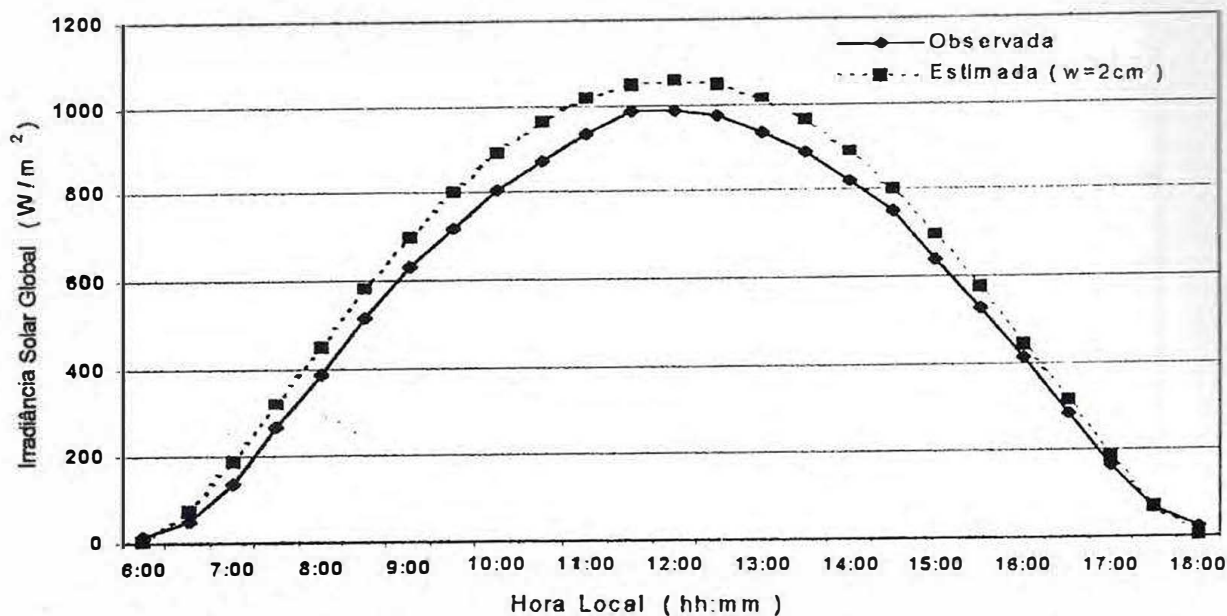


Figura 4.18 Irradiâncias observada e estimada para o dia 06/09/96 (Dia Juliano 249 - 6ª feira)

Tabela 4.13 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 06/09/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Global Observada (W/m <sup>2</sup> )	Irradiância Global Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro Relativo (%) (Estim - Observ) / Observ
6:00	14.53	0.75	-94.83
6:30	50.87	73.62	44.72
7:00	138.08	189.45	37.20
7:30	268.89	319.45	18.80
8:00	385.17	451.63	17.26
8:30	515.98	579.20	12.25
9:00	632.26	697.51	10.32
9:30	719.47	802.98	11.61
10:00	806.68	892.84	10.68
10:30	872.08	964.89	10.64
11:00	937.49	1017.42	8.53
11:30	988.36	1049.26	6.16
12:00	988.36	1059.71	7.22
12:30	973.83	1048.48	7.67
13:00	937.49	1015.89	8.36
13:30	886.62	962.64	8.57
14:00	821.21	889.95	8.37
14:30	748.54	799.53	6.81
15:00	639.53	693.60	8.46
15:30	530.52	574.99	8.38
16:00	414.24	447.28	7.98
16:30	283.43	315.18	11.20
17:00	167.15	185.57	11.02
17:30	65.41	70.65	8.02
18:00	21.80	2.90	-86.72

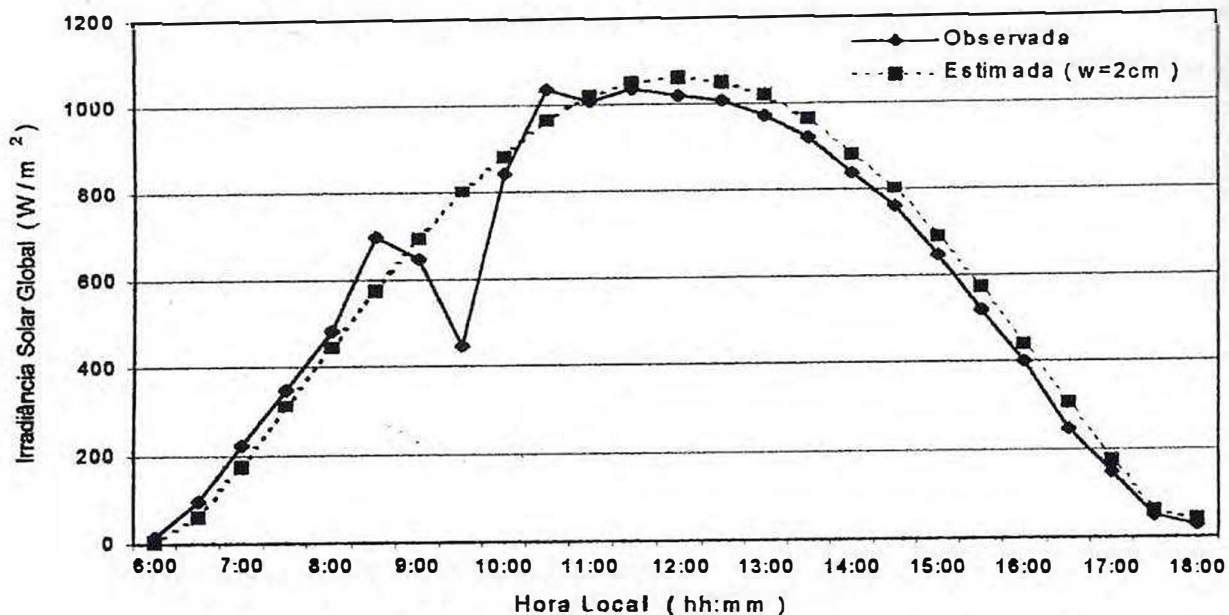


Figura 4.19 Irradiâncias observada e estimada para o dia 11/10/96 (Dia Juliano 248 - 6ª feira)

Tabela 4.14 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 11/10/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Global Observada ( $W/m^2$ )	Irradiância Global Estimada ( $W/m^2$ )	Erro Relativo (%) (Estim - Observ) / Observ
6:00	14.06	1.78	-87.33
6:30	98.44	63.88	-35.11
7:00	225.00	178.64	-20.61
7:30	351.56	309.52	-11.96
8:00	485.16	443.31	-8.63
8:30	696.10	572.73	-17.72
9:00	646.88	692.89	7.11
9:30	450.00	800.13	77.81
10:00	843.75	882.00	4.53
10:30	1033.60	964.88	-6.65
11:00	1005.47	1018.38	1.28
11:30	1033.60	1050.85	1.67
12:00	1019.53	1061.55	4.12
12:30	1005.47	1050.24	4.45
13:00	970.31	1017.17	4.83
13:30	921.10	963.11	4.56
14:00	836.72	879.75	5.14
14:30	759.38	797.41	5.01
15:00	646.88	689.82	6.64
15:30	520.31	569.43	9.44
16:00	400.78	439.90	9.76
16:30	246.09	306.20	24.42
17:00	147.66	175.66	18.97
17:30	49.22	61.67	25.30
18:00	28.13	41.60	47.90

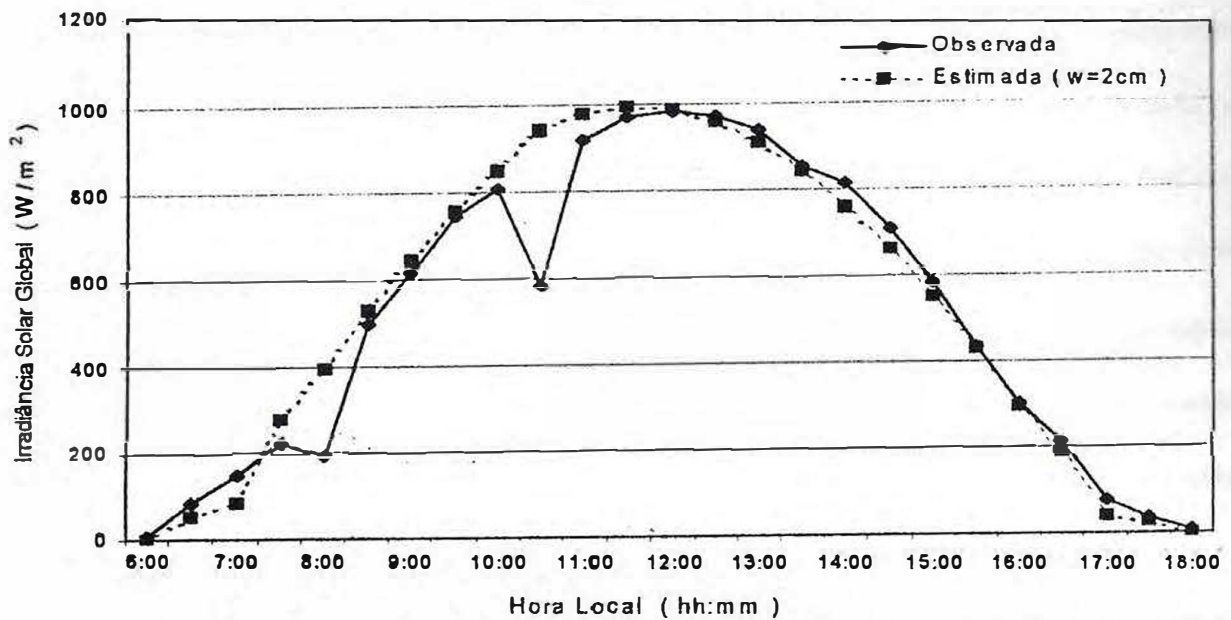


Figura 4.20 Irradiâncias observada e estimada para o dia 22/11/96 (Dia Juliano 326 - 3ª feira)

Tabela 4.15 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 22/11/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Global Observada (W/m <sup>2</sup> )	Irradiância Global Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro Relativo (%) (Estim - Observ) / Observ
6:00	7.04	1.11	-84.23
6:30	84.43	50.38	-40.33
7:00	147.76	85.60	-42.07
7:30	225.16	278.89	23.86
8:00	189.98	393.25	107.00
8:30	499.57	529.28	5.95
9:00	612.15	644.16	5.23
9:30	745.84	756.68	1.45
10:00	809.16	851.55	5.24
10:30	584.01	945.84	61.96
11:00	921.74	981.71	6.51
11:30	971.00	995.82	2.56
12:00	985.07	988.73	0.37
12:30	971.00	960.71	-1.06
13:00	942.85	912.48	-3.22
13:30	858.42	844.58	-1.61
14:00	816.20	760.80	-6.79
14:30	710.66	661.27	-6.95
15:00	584.01	549.49	-5.91
15:30	436.25	428.96	-1.67
16:00	302.56	294.75	-2.58
16:30	211.09	181.45	-14.04
17:00	77.40	38.74	-49.95
17:30	35.18	23.65	-32.78
18:00	7.04	1.11	-84.23



A partir dos resultados discutidos anteriormente decidimos definir o que poderia ser entendido como sendo um dia claro em Fortaleza. Desta forma, escolhemos os máximos valores observados da irradiância solar global incidentes na Estação Solarimétrica do Pici, a cada meia hora, entre 6 e 18h, tomando como base de dados desta escolha o ano de 1996. Em outras palavras, escolhemos dentre todos os valores registrados às 6:00 h, durante todo o ano de 1996, o maior valor observado. Esta escolha foi repetida a cada meia hora até às 18:00 h. Por exemplo, às 10 h escolhemos o maior valor da irradiância solar global dentre todos os valores registrados às 10 h durante o ano. Desta forma, nós obtivemos o conjunto das irradiâncias globais máximas registradas durante o ano de 1996.

Estes valores máximos estão mostrados na figura 4.21, os quais estão representados por bolinhas vazias unidas através de uma linha tracejada. Tal linha não constitui um ajuste; ela é utilizada somente para tornar mais claro o comportamento dos valores máximos da irradiância

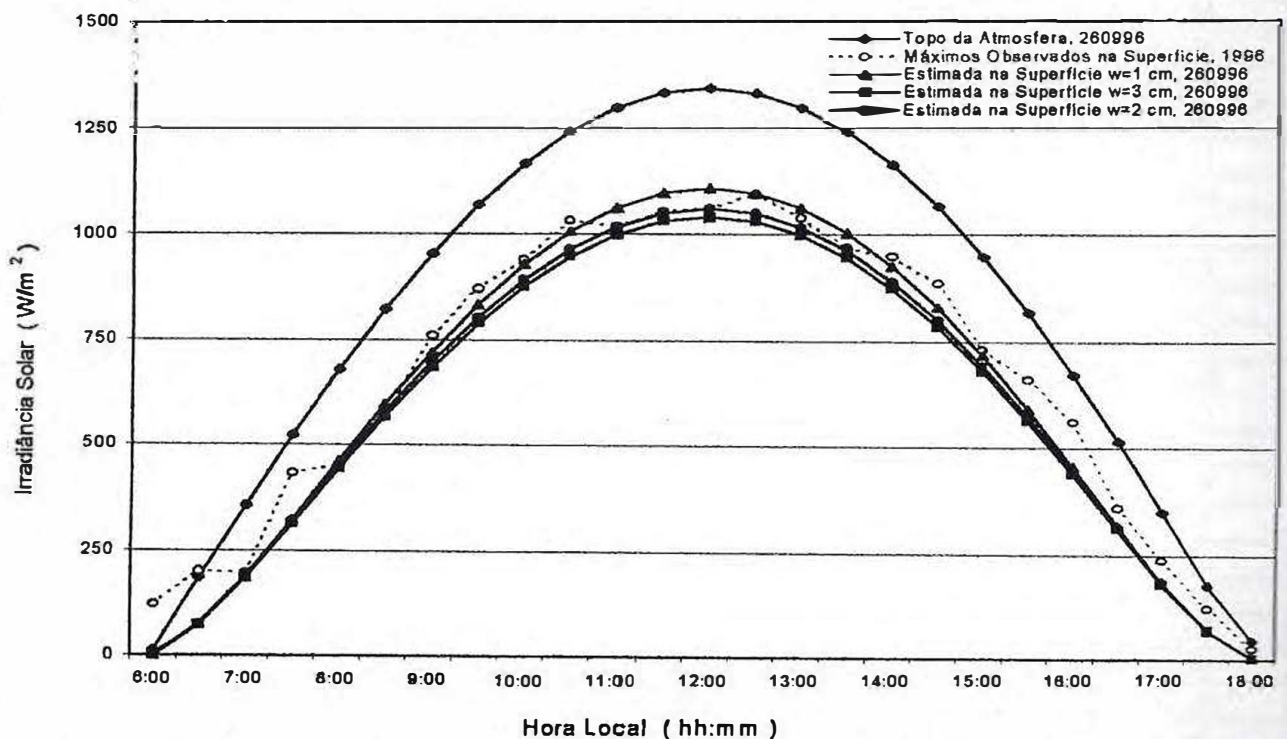


Figura 4.21 Gráfico das irradiâncias máximas observadas no ano de 1996 em Fortaleza. Para efeito de comparação estão a irradiância no topo da atmosfera em 26/09/96 e as irradiâncias estimadas na superfície em 26/09/96, com  $w = 1\text{ cm}$ ,  $w = 2\text{ cm}$  e  $w = 3\text{ cm}$ .



solar global. Para efeitos de comparação, na mesma figura estão os valores da irradiância solar global no topo da atmosfera para o dia 26/09/96 e de sua irradiância solar global estimada na superfície terrestre, para valores de  $w = 1$  cm,  $w = 2$  cm e  $w = 3$  cm. A escolha do dia 26/09/96 deve-se ao fato de a mesma encontrar-se na região de máxima irradiância solar global anual (ver figuras 4.6, 4.7 e 4.8). Foram calculadas as irradiâncias estimadas na superfície para três diferentes valores de água precipitável, observando-se que os valores das máximas irradiâncias seriam melhor ajustados com a curva estimada com  $w = 1$  cm.

Tabela 4.16 Irradiância máxima observada e irradiâncias estimadas na superfície terrestre para 26/09/96 e  $w = 1, 2$  e  $3$  cm. Entre 9 e 15 h o erro relativo é menor para a curva com  $w = 1$  cm, sendo este erro menor ou da ordem de 5 %.

Hora Local (hh:mm)	Irradiância no Topo Atmosfera (26/09/96)	Máximo Observado (Ano de 1996)	Irradiância Estimada Superfície $w = 1$ cm (26/09/96)	Irradiância Estimada Superfície $w = 2$ cm (26/09/96)	Irradiância Estimada Superfície $w = 3$ cm (26/09/96)
6:00	11,64	120,81	0,78	0,75	2,21
6:30	185,77	201,90	71,06	73,62	72,32
7:00	356,84	196,55	186,76	189,45	185,39
7:30	521,95	431,21	321,59	319,45	312,54
8:00	678,26	450,96	460,79	451,63	442,32
8:30	823,10	565,73	595,99	579,20	567,54
9:00	953,99	759,73	721,73	697,51	683,99
9:30	1068,69	871,25	833,95	802,98	788,11
10:00	1165,25	940,95	929,61	892,84	876,58
10:30	1241,99	1031,56	1006,31	964,89	947,70
11:00	1297,63	1017,62	1062,24	1017,42	999,03
11:30	1331,19	1052,47	1096,13	1049,26	1030,84
12:00	1342,11	1059,44	1107,24	1059,71	1041,17
12:30	1330,21	1094,29	1095,32	1048,48	1030,08
13:00	1295,67	1017,62	1060,64	1015,89	997,53
13:30	1239,10	968,83	1003,97	962,64	945,49
14:00	1161,47	948,62	926,60	889,95	873,74
14:30	1064,10	886,35	830,37	799,53	784,72
15:00	948,65	732,31	717,69	693,60	680,16
15:30	817,11	659,83	591,65	574,99	563,41
16:00	671,72	559,69	456,35	447,28	438,05
16:30	514,97	358,96	317,29	315,18	308,36
17:00	349,55	237,68	182,94	185,57	181,60
17:30	178,28	122,90	68,19	70,65	69,40
18:00	44,84	26,25	3,02	2,90	2,85

Da figura 4.21 vemos que um dia claro em Fortaleza, segundo estes resultados, pode ser pensado como um dia em que a atmosfera contem uma quantidade de água precipitável menor que os correspondentes valores típicos para a estação não chuvosa, que varia entre 1,5 cm e 3,0 cm de água precipitável. Também podemos supor que os valores máximos da irradiância medida durante o ano de 1996 coincidiram com pequena quantidade de vapor de água na atmosfera. Conseqüentemente, há uma maior quantidade de radiação solar que atinge a superfície terrestre.

#### 4.3.2 Irradiância Solar Visível

A irradiância solar visível incidente na Estação Solarimétrica do Pici foi obtida a partir dos resultados registrados pelos radiômetros 1 e 5, que utilizaram filtros ópticos WG295 (irradiância solar global) e RG780 (irradiância solar infravermelha), respectivamente. Da diferença entre as leituras dos radiômetros acima foi obtida a irradiância solar visível observada, ou seja, a irradiância solar visível observada na superfície é igual a  $R1 - R5$ , onde  $R1$  e  $R5$  são as leituras das irradiâncias registradas pelos radiômetros 1 e 5, respectivamente.

Sabemos que a fração da irradiância solar visível no topo da atmosfera corresponde a 48,5 % da irradiância total incidente no topo da atmosfera (Liou, 1980). Que fração desta irradiância deveria incidir sobre a superfície terrestre após o espalhamento Rayleigh? Esta fração, que chamaremos de irradiância solar visível estimada na superfície da Terra, é obtida subtraindo da irradiância solar visível no topo da atmosfera o somatório dado pela equação (3.3) considerando somente os termos que envolvem os valores  $c_1$  (correspondentes ao espalhamento Rayleigh), ou seja,

$$E_{\lambda} = E_{\lambda}^0 - \sum_{\lambda} E_{\lambda}^0 \exp(-c_1 m).$$

Nesta equação  $E_{\lambda}$  é a irradiância solar global estimada na superfície,  $E_{\lambda}^0$  é igual a 48,5% da irradiância solar global no topo da atmosfera e o termo dentro do somatório é a Lei de Beer-Bouguer-Lambert, para cada comprimento de onda médio especificado na tabela 3.8.

A seguir faremos a comparação entre os valores da irradiância solar visível observada na Estação Solarimétrica, dada pela diferença das leituras dos radiômetros 1 e 5 (isto é, R1-R5) e da irradiância estimada na superfície, obtida a partir dos valores da irradiância no topo da atmosfera, da qual subtraímos os termos devidos ao espalhamento Rayleigh, onde utilizamos a equação dada na página anterior.

A análise foi realizada para os mesmos dias escolhidos na seção anterior, isto é, 13/05, 01/08, 21/08, 31/08, 01/09, 06/09, 11/10 e 22/11 do ano de 1996. Os resultados obtidos da análise da componente visível da irradiância solar, diferentemente daqueles obtidos com a irradiância solar global, não indicam uma boa concordância entre os valores observados e os correspondentes valores estimados. Invariavelmente, os erros relativos são superiores a 10%, mesmo no intervalo de 9 às 15 h (Hora Local).

Adicionalmente, calculamos, a partir do gráfico das transmitâncias dos filtros em função do comprimento de onda (figura Figura 3.3), a fração que não corresponde à radiação visível, definida no intervalo de comprimento de onda de 0,36 até 0,78  $\mu\text{m}$  (Liou, 1980). Em outras palavras, nós subtraímos da radiação transmitida pelo filtro WG295 a fração correspondente àquela cujos comprimentos de onda são menores que 0,36  $\mu\text{m}$ , ou seja, subtraímos da radiação global transmitida pelo filtro WG295 aquela cujos comprimentos de onda fossem menores que 0,36  $\mu\text{m}$ . Esta fração corresponde a cerca de 16,5 % da diferença das leituras dos radiômetros 1 e 5. Na outra extremidade do intervalo de comprimento de onda correspondente ao visível a diferença é desprezível, isto é, a diferença entre a curva do filtro RG780 e a linha centrada em 0,78  $\mu\text{m}$  é pequena e foi desprezada em nossos cálculos.



A subtração foi efetuada de forma linear, ou seja, subtraímos 16,5% da diferença das leituras dos radiômetros 1 e 5 [ $0,165*(R1-R5)$ ], e o restante,  $0,835*(R1-R5)$ , foi comparado com a irradiância solar visível estimada na superfície. Neste procedimento não há garantia de que os 16,5 % subtraídos correspondam exatamente à quantidade de radiação com comprimentos de onda até  $0,36 \mu\text{m}$ . Contudo, não há como fazê-lo com os dados e instrumental de que dispunhamos nos experimentos.

Ao compararmos a fração igual a  $0,835*(R1-R5)$  com o valor da irradiância solar visível estimado na superfície observamos que os erros revelaram-se da ordem ou menores que 6 %, o que é uma indicação de boa concordância.

A seguir são apresentadas as figuras, e correspondentes tabelas, contendo os dados somente para quatro dos oito dias, quais sejam: 13/05, 21/08, 01/09 e 11/10/96.

As figuras 4.22 até 4.25 apresentam os gráficos da irradiância solar visível observada pelos radiômetros 1 e 5, cujos valores são iguais ao total da diferença de leituras  $R1-R5$  (linha sólida com triângulos). Também é mostrada nas figuras uma linha sólida com losangos que corresponde aos valores da fração de 83,5 % da diferença  $R1-R5$ . Nas tabelas os valores da irradiância solar visível observada correspondem a diferença total  $R1-R5$ , enquanto que os erros relativos apresentados correspondem, tanto a diferença total  $R1-R5$  quanto a fração  $0,835*(R1-R5)$ . A pequena depressão apresentada na figura 4.25, em torno de 9:40 h, deve-se à presença de nuvens.



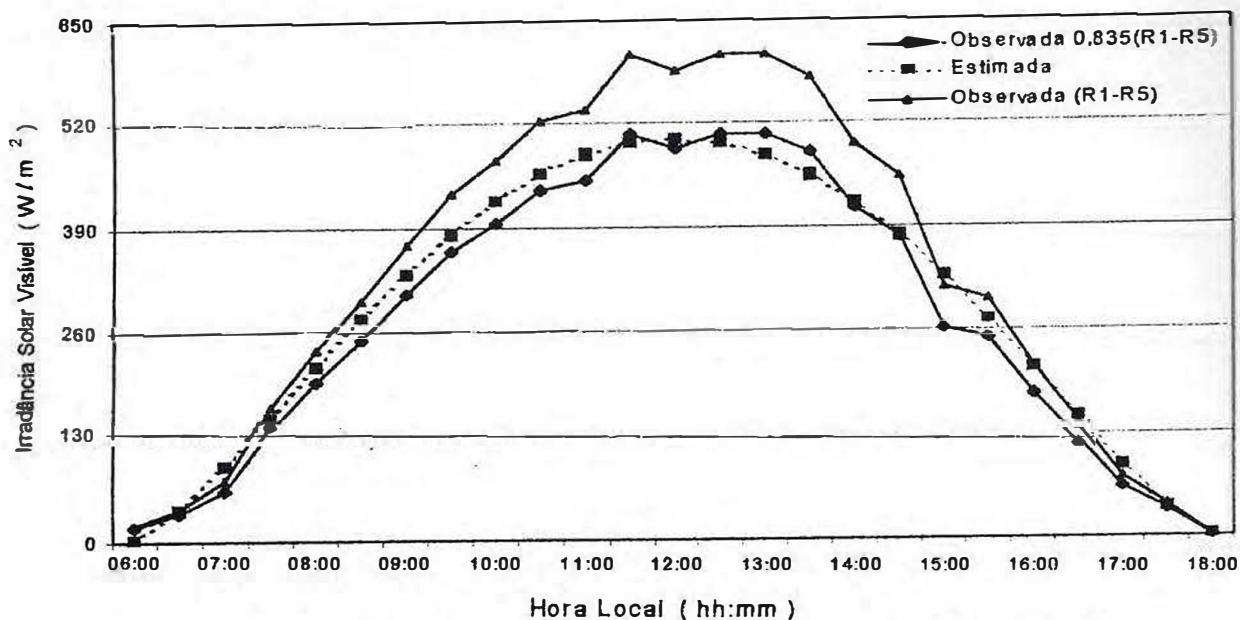


Figura 4.22 Irradiâncias observada e estimada para o dia 13/05/96 (Dia Juliano 233 - 5ª feira)

Tabela 4.17 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 13/05/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Visível Observada (W/m <sup>2</sup> )	Irradiância Visível Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro Relativo ( % ) 100% (Estim-Obser)/Obser	Erro Relativo ( % ) 83.5% (Estim-Obser) / Obser
6:00	20,91	17,46	-88,27	-85,95
6:30	41,82	34,92	-8,32	9,79
7:00	76,67	64,02	22,03	46,15
7:30	167,28	139,68	-7,56	10,70
8:00	236,98	197,88	-8,60	9,46
8:30	299,71	250,26	-7,79	10,43
9:00	369,41	308,46	-10,19	7,56
9:30	432,14	360,84	-11,81	5,62
10:00	473,96	395,76	-10,72	6,92
10:30	522,75	436,50	-12,62	4,64
11:00	536,69	448,14	-10,33	7,39
11:30	606,39	506,34	-18,20	-2,03
12:00	585,48	488,88	-14,46	2,45
12:30	606,39	506,34	-18,29	-2,14
13:00	606,39	506,34	-20,81	-5,17
13:30	578,51	483,06	-21,32	-5,77
14:00	494,87	413,22	-14,91	1,91
14:30	453,05	378,30	-16,41	0,11
15:00	313,65	261,90	4,91	25,64
15:30	299,71	250,26	-8,77	9,26
16:00	216,07	180,42	-1,17	18,36
16:30	146,37	122,22	3,60	24,07
17:00	76,67	64,02	18,48	41,89
17:30	41,82	34,92	-13,37	3,75
18:00	2,788	0,00	1,16	21,15

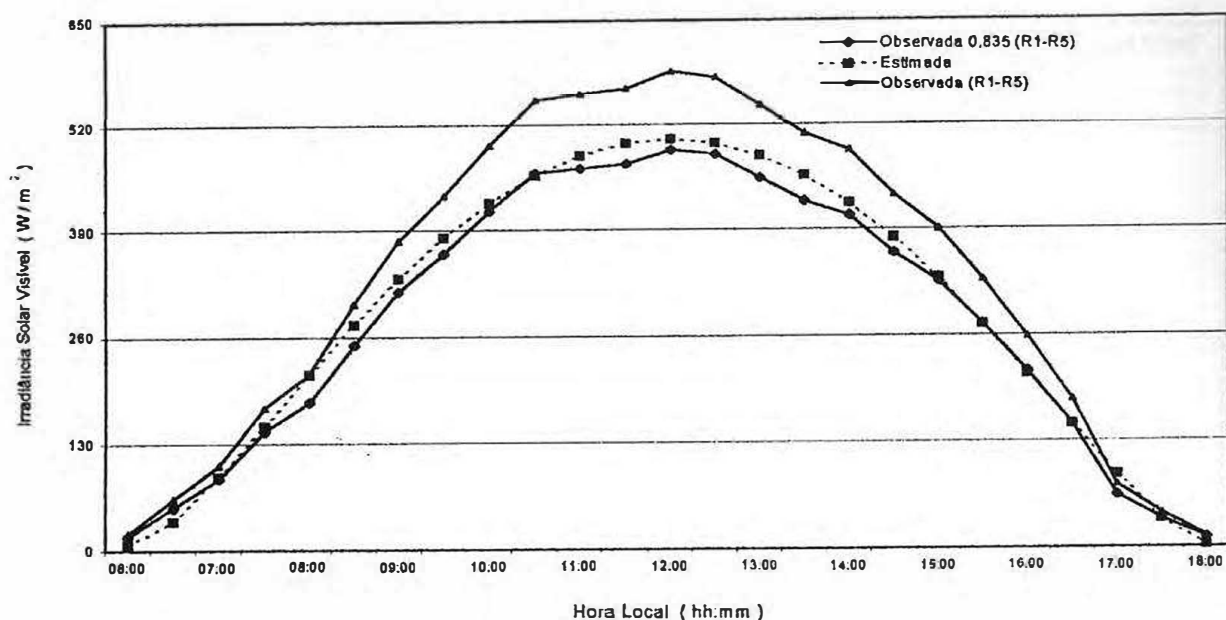


Figura 4.23 Irradiâncias observada e estimada para o dia 21/08/96 (Dia Juliano 233 - 5ª feira)

Tabela 4.18 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 21/08/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Visível Observada (W/m <sup>2</sup> )	Irradiância Visível Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro Relativo (%) 100% (Estim - Obser) / Obser	Erro Relativo (%) 83,5% (Estim - Obser) / Obser
6:00	20,91	17,46	-68,24	-61,96
6:30	62,73	52,38	-44,29	-33,28
7:00	104,55	87,30	-13,94	3,07
7:30	174,25	145,50	-13,12	4,04
8:00	216,07	180,42	-1,01	18,56
8:30	299,71	250,26	-8,48	9,60
9:00	376,38	314,28	-12,24	5,11
9:30	432,14	360,84	-12,00	5,39
10:00	494,87	413,22	-14,56	2,33
10:30	550,63	459,78	-17,02	-0,62
11:00	557,6	465,60	-13,59	3,48
11:30	564,57	471,42	-11,98	5,41
12:00	585,48	488,88	-14,27	2,67
12:30	578,51	483,06	-14,14	2,82
13:00	543,66	453,96	-11,46	6,04
13:30	508,81	424,86	-10,33	7,39
14:00	487,9	407,40	-13,52	3,57
14:30	432,14	360,84	-12,24	5,10
15:00	390,32	325,92	-15,67	0,99
15:30	327,59	273,54	-16,66	-0,19
16:00	257,89	215,34	-17,57	-1,28
16:30	181,22	151,32	-17,18	-0,81
17:00	76,67	64,02	15,83	38,72
17:30	41,82	34,92	-18,54	-2,44
18:00	13,94	11,64	-80,87	-77,09

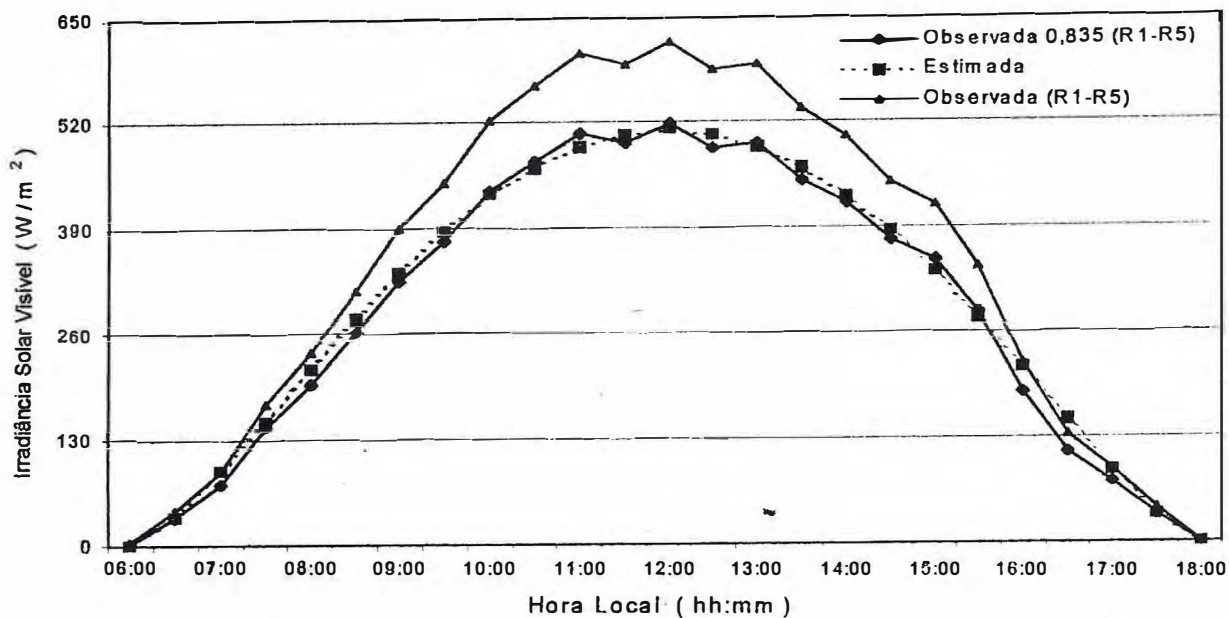


Figura 4.24 Irradiâncias observada e estimada para o dia 01/09/96 (Dia Juliano 248 6ª feira)

Tabela 4.19 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 01/09/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Visível Observada (W/m <sup>2</sup> )	Irradiância Visível Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro Relativo (%) 100% (Estim - Observ) / Observ	Erro Relativo (%) 83,5% (Estim - Observ) / Observ
6:00	3,485	2,91	-94,76	-93,72
6:30	41,82	34,92	-18,55	-2,46
7:00	90,61	75,66	-0,84	18,76
7:30	174,25	145,50	-12,58	4,69
8:00	236,98	197,88	-8,84	9,17
8:30	313,65	261,90	-11,48	6,02
9:00	390,32	325,92	-14,20	2,75
9:30	446,08	372,48	-13,48	3,62
10:00	522,75	436,50	-17,84	-1,60
10:30	564,57	471,42	-17,74	-1,48
11:00	606,39	506,34	-19,20	-3,24
11:30	592,45	494,70	-14,69	2,17
12:00	620,33	517,98	-17,69	-1,42
12:30	585,48	488,88	-13,70	3,36
13:00	592,45	494,70	-17,35	-1,02
13:30	536,69	448,14	-13,54	3,54
14:00	501,84	419,04	-14,52	2,37
14:30	446,08	372,48	-13,62	3,44
15:00	418,2	349,20	-20,10	-4,31
15:30	341,53	285,18	-18,93	-2,92
16:00	223,04	186,24	-3,51	15,56
16:30	132,43	110,58	14,42	37,03
17:00	90,61	75,66	-1,63	17,81
17:30	41,82	34,92	-19,84	-4,00
18:00	0,697	0,00	-67,37	-60,92



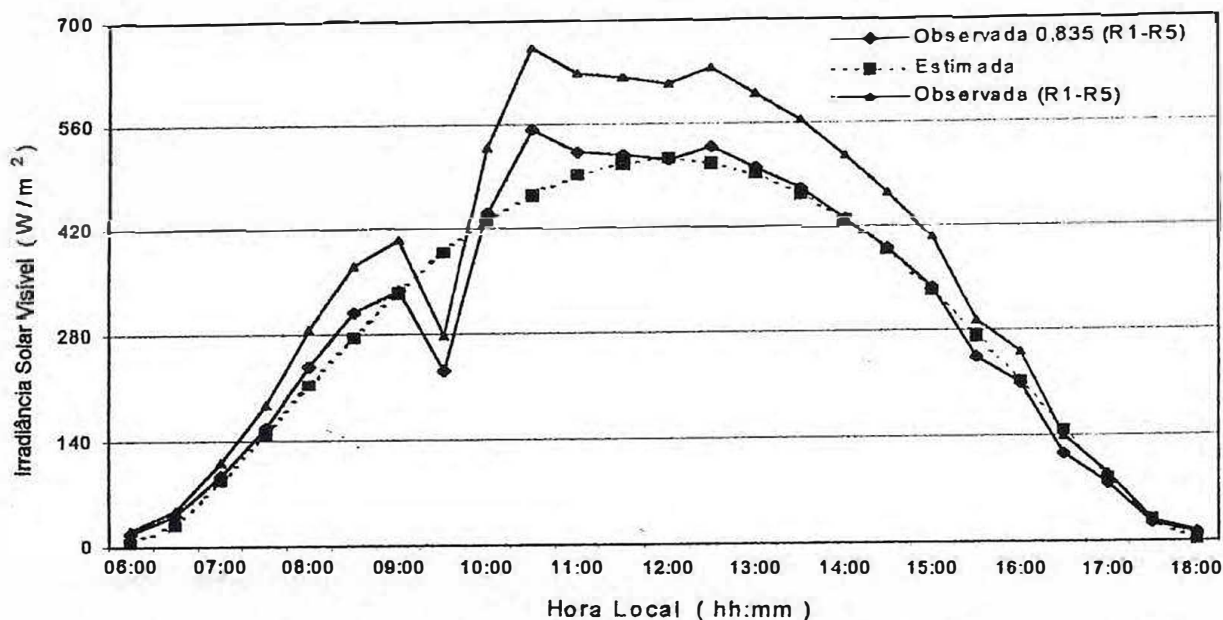


Figura 4.25 Irradiâncias observada e estimada para o dia 11/10/96 (Dia Juliano 248 - 6ª feira)

Tabela 4.20 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 11/10/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Visível Observada (W/m <sup>2</sup> )	Irradiância Visível Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro Relativo (%) 100% (Estim - Obser) / Obser	Erro Relativo (%) 83,5% (Estim - Obser) / Obser
6:00	20,91	17,46	-80,98	-77,23
6:30	48,79	40,74	-40,19	-28,37
7:00	111,52	93,12	-23,79	-8,74
7:30	188,19	157,14	-21,19	-5,61
8:00	285,77	238,62	-25,41	-10,67
8:30	369,41	308,46	-25,30	-10,54
9:00	404,26	337,56	-17,31	-0,97
9:30	278,8	232,80	38,56	65,94
10:00	529,72	442,32	-18,70	-2,64
10:30	662,15	552,90	-29,60	-15,68
11:00	627,3	523,80	-21,55	-6,05
11:30	620,33	517,98	-18,14	-1,96
12:00	613,36	512,16	-16,36	0,17
12:30	634,27	529,62	-19,98	-4,17
13:00	599,42	500,52	-18,00	-1,80
13:30	564,57	471,42	-17,58	-1,29
14:00	515,78	430,68	-16,72	-0,26
14:30	466,99	389,94	-17,56	-1,27
15:00	404,26	337,56	-17,68	-1,41
15:30	292,74	244,44	-6,28	12,24
16:00	250,92	209,52	-15,70	0,96
16:30	139,4	116,40	5,26	26,06
17:00	90,61	75,66	-7,77	10,45
17:30	27,88	23,28	1,05	21,02
18:00	13,94	0,00	-95,60	-94,73



Os valores médios das irradiâncias solar visível observada (R1 – R5) estimada na superfície, assim como o valor médio da fração 83,5% da irradiância observada, foram calculados para os oito dias considerados, a cada trinta minutos. Com o propósito de comparação apresentamos as figuras 4.26 e 4.27 onde são mostradas as relações entre o total e a fração de 83,5% da irradiância observada em função da irradiância estimada na superfície, respectivamente. No primeiro caso, o coeficiente angular da reta é igual a 1,197, enquanto que no segundo obtivemos um coeficiente angular de 0,997. Em ambas as estimativas verifica-se boa concordância entre os valores médios observados e estimados, sendo a correlação entre os conjuntos de dados médios, em ambos os casos, igual a 0,997.

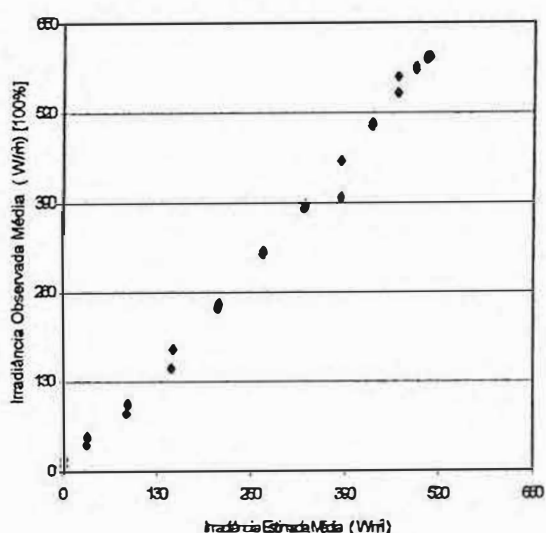


Figura 4.26 Comparação entre o total da irradiância solar visível observada e a irradiância solar visível estimada na superfície terrestre

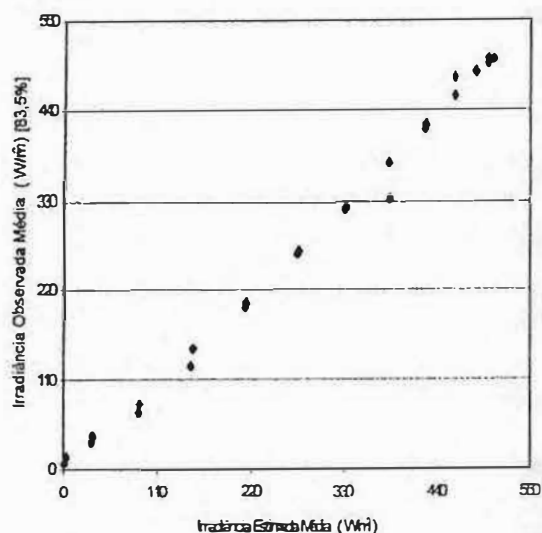


Figura 4.27 Comparação entre a fração de 83,5% da irradiância solar visível observada e a irradiância solar visível estimada na superfície terrestre

### 4.3.3 Irradiância Solar Infravermelha

A irradiância solar infravermelha incidente na Estação Solarimétrica do Pici foi obtida a partir dos resultados registrados pelo radiômetro 5 que utilizou o filtro óptico RG780. A radiação solar global que atinge o topo da atmosfera é composta de ultravioleta, visível e infravermelha, sendo que a fração que corresponde à radiação infravermelha é igual a 43,5 % do valor total

incidente (Liou, 1980). Desta forma, que fração de radiação infravermelha incidirá sobre a superfície terrestre após a absorção pelo vapor de água e dióxido de carbono? Esta fração, que chamaremos de irradiância solar infravermelha estimada na superfície da Terra, é obtida subtraindo da irradiância solar infravermelha no topo da atmosfera o somatório dado pela equação (3.7), considerando os termos que envolvem os valores  $c_3$  e  $c_4$  ( $H_2O_{(v)}$  e  $CO_2$ ), ou seja,

$$E_{\lambda} = E_{\lambda}^0 - \sum_{\lambda} E_{\lambda}^0 \exp(-c_{\lambda} m) \mathfrak{T}_{\lambda j},$$

onde  $\mathfrak{T}_{\lambda i}$  representa a transmitância, dadas pelas equações (3.4) e (3.5). Nesta equação  $E_{\lambda}$  é a irradiância solar global estimada na superfície,  $E_{\lambda}^0$  é igual a 43,5% da irradiância solar global no topo da atmosfera e o termo dentro do somatório é a Lei de Beer-Bouguer-Lambert, para cada comprimento de onda médio especificado na tabela 3.9.

A seguir faremos a comparação entre os valores da irradiância solar infravermelha observada na Estação Solarimétrica e da irradiância solar infravermelha estimada na superfície. A análise foi realizada para os mesmos dias escolhidos na seção anterior (13/05, 01/08, 21/08, 31/08, 01/09, 06/09, 11/10 e 22/11 do ano de 1996). Os resultados obtidos da análise da componente infravermelha da irradiância solar, semelhantemente, àqueles obtidos com a irradiância solar global indicam uma boa concordância entre os valores observados e os correspondentes valores estimados. Para esses dias, observamos que no intervalo de 9 às 15 h (Hora Local) os erros relativos entre os valores observados e estimados na superfície são menores que ou da ordem de 5 %, o que indicam boa concordância, isto é, a estimativa calculada representa bem os valores observados. Particularmente, para os dias 21/08/96 e 11/10/96, observa-se uma pequena diferença, notadamente no período da manhã. Como anteriormente falado, esta diferença deve-se à presença de nuvens.

As figuras e as correspondentes tabelas, contendo os dados somente de quatro dos oito dias (13/05, 21/08, 01/09 e 11/10/96) são apresentadas a seguir.

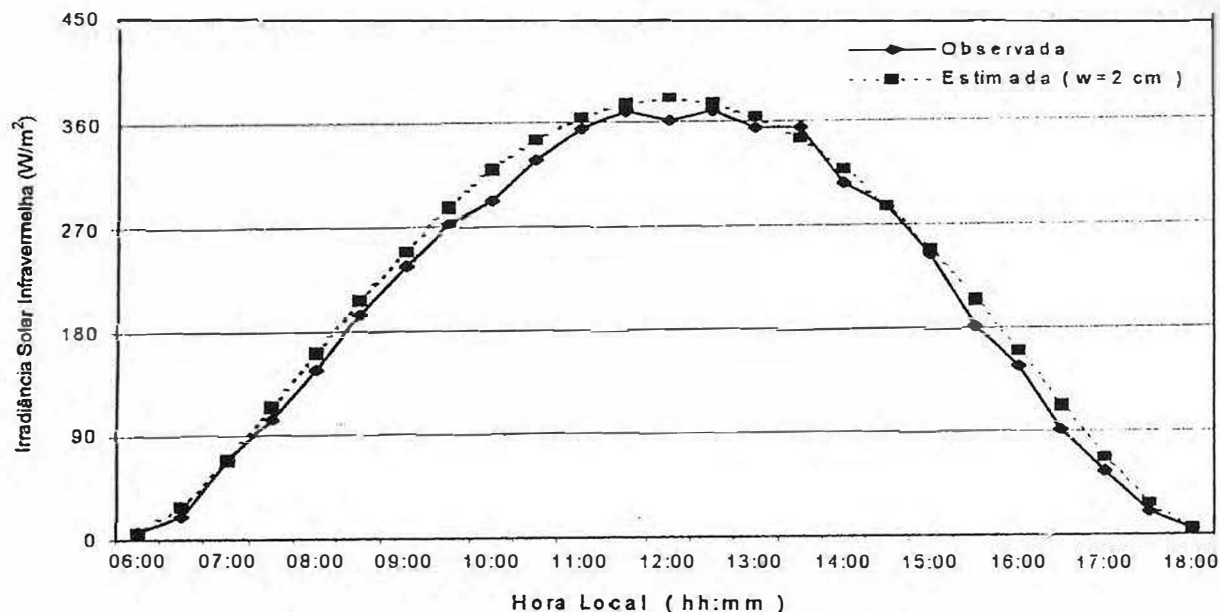


Figura 4.28 Irradiâncias observada e estimada para o dia 13/05/96 (Dia Juliano 233 - 5ª feira)

Tabela 4.21 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 13/05/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Infravermelha Observada (W/m <sup>2</sup> )	Irradiância Infravermelha Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro Relativo (%) (Estim - Obser) / Obser
6:00	6,97	5,26	-32,58
6:30	20,91	28,70	27,13
7:00	69,70	69,02	-0,98
7:30	104,55	114,88	8,99
8:00	146,37	161,87	9,58
8:30	195,16	207,47	5,93
9:00	236,98	249,92	5,18
9:30	271,83	287,86	5,57
10:00	292,74	320,26	8,59
10:30	327,59	346,26	5,39
11:00	355,47	365,22	2,67
11:30	369,41	376,69	1,93
12:00	362,44	380,40	4,72
12:30	369,41	376,28	1,82
13:00	355,47	364,40	2,45
13:30	355,47	345,07	-3,01
14:00	306,68	318,73	3,78
14:30	285,77	286,04	0,10
15:00	243,95	247,87	1,58
15:30	181,22	205,26	11,71
16:00	146,37	159,60	8,29
16:30	90,61	112,66	19,57
17:00	55,76	67,01	16,79
17:30	20,91	27,12	22,88
18:00	5,58	6,07	8,15

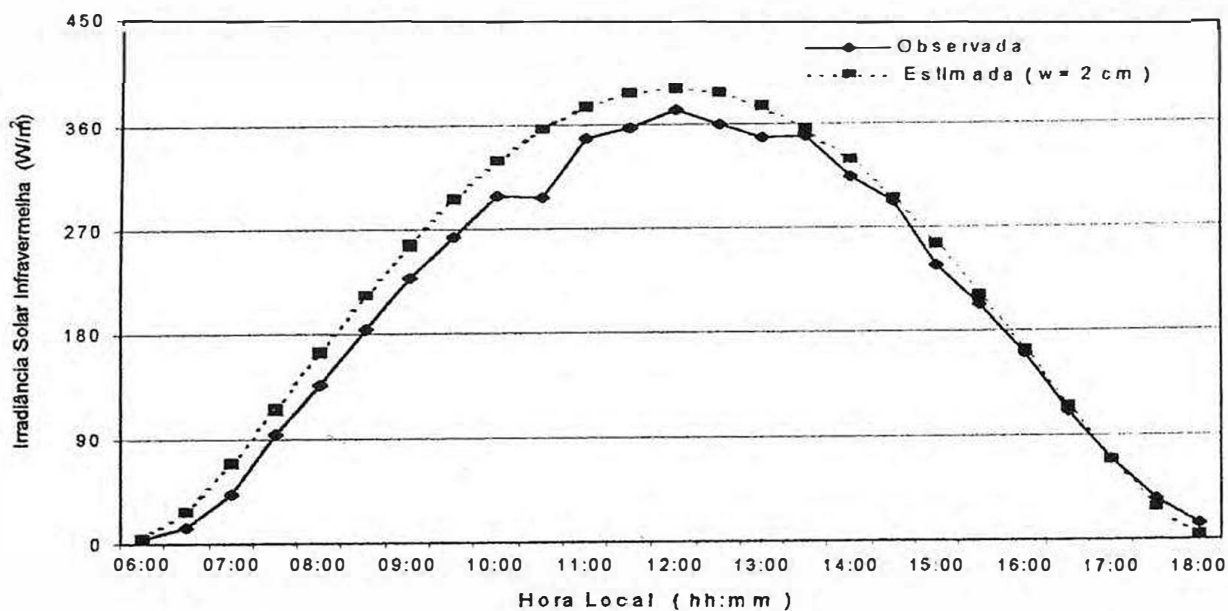


Figura 4.29 Irradiâncias observada e estimada para o dia 21/08/96 (Dia Juliano 233 - 5ª feira)

Tabela 4.22 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 21/08/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Infravermelha Observada ( $W/m^2$ )	Irradiância Infravermelha Estimada ( $W/m^2$ )	Erro Relativo (%) (Estim - Obser) / Obser
6:00	3,59	3,67	2,30
6:30	14,95	27,57	84,39
7:00	43,46	68,91	58,55
7:30	93,96	116,21	23,68
8:00	136,36	164,76	20,83
8:30	184,64	211,90	14,76
9:00	227,43	255,80	12,47
9:30	262,76	295,06	12,30
10:00	298,21	328,61	10,19
10:30	297,48	355,56	19,52
11:00	348,43	375,25	7,70
11:30	356,86	387,21	8,50
12:00	372,32	391,16	5,06
12:30	359,65	387,02	7,61
13:00	347,66	374,89	7,83
13:30	349,89	355,03	1,47
14:00	313,65	327,93	4,55
14:30	291,25	294,25	1,03
15:00	236,98	254,88	7,55
15:30	202,13	210,91	4,34
16:00	160,31	163,75	2,14
16:30	111,52	115,22	3,32
17:00	69,70	68,02	-2,41
17:30	34,85	26,88	-22,88
18:00	13,94	4,20	-69,84



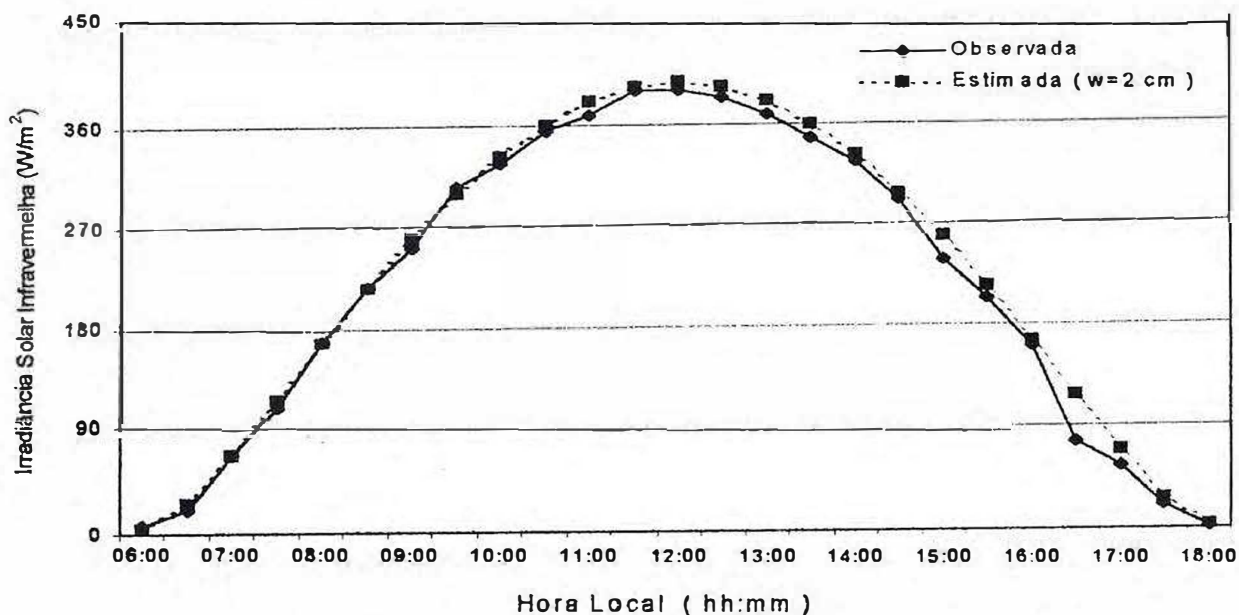


Figura 4.30 Irradiâncias observada e estimada para o dia 01/09/96 (Dia Juliano 248 6ª feira)

Tabela 4.23 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 01/09/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Infravermelha Observada (W/m <sup>2</sup> )	Irradiância Infravermelha Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro Relativo (%) (Estim - Obser) / Obser
6:00	6,97	4,08	-41,44
6:30	20,91	26,94	28,85
7:00	69,70	68,82	-1,27
7:30	111,52	116,92	4,84
8:00	167,28	166,33	-0,57
8:30	216,07	214,36	-0,79
9:00	250,92	259,09	3,26
9:30	306,68	299,07	-2,48
10:00	327,59	333,31	1,74
10:30	355,47	360,72	1,48
11:00	369,41	380,88	3,10
11:30	390,32	393,09	0,71
12:00	390,32	397,16	1,75
12:30	383,35	392,98	2,51
13:00	369,41	380,65	3,04
13:30	348,50	360,39	3,41
14:00	327,59	332,88	1,62
14:30	292,74	298,57	1,99
15:00	236,98	258,52	9,09
15:30	202,13	213,75	5,75
16:00	160,31	165,70	3,37
16:30	76,67	116,30	51,69
17:00	55,76	68,27	22,43
17:30	20,91	26,52	26,81
18:00	2,09	2,91	39,32

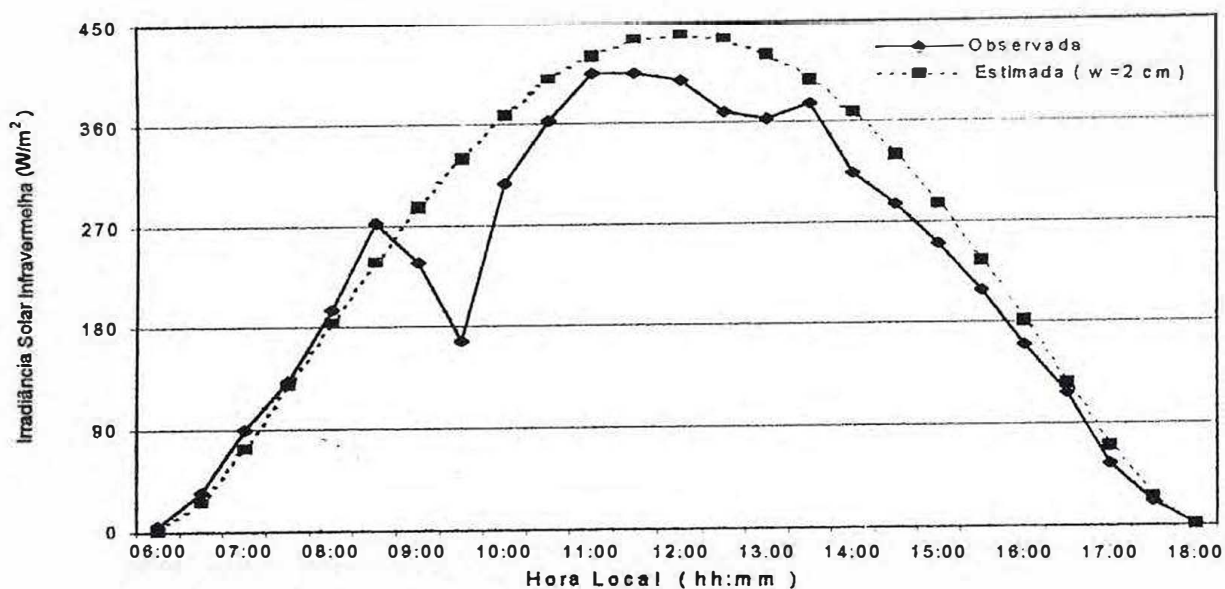


Figura 4.31 Irradiâncias observada e estimada para o dia 11/10/96 (Dia Juliano 248 - 6ª feira)

Tabela 4.24 Valores das irradiâncias observada e estimada para o dia 11/10/96

Hora Local (hh:mm)	Irradiância Infravermelha Observada (W/m <sup>2</sup> )	Irradiância Infravermelha Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro Relativo (%) (Estim - Obser) / Obser
6:00	5,33	1,76	-67,08
6:30	34,85	25,84	-25,85
7:00	90,61	73,20	-19,21
7:30	132,43	127,75	-3,54
8:00	195,16	183,33	-6,06
8:30	271,83	236,90	-12,85
9:00	236,98	286,50	20,90
9:30	167,28	330,66	97,67
10:00	306,68	368,26	20,08
10:30	362,44	398,38	9,92
11:00	404,26	420,34	3,98
11:30	404,26	433,66	7,27
12:00	397,29	438,05	10,26
12:30	368,71	433,41	17,55
13:00	362,44	419,84	15,84
13:30	376,38	397,65	5,65
14:00	313,65	367,32	17,11
14:30	285,77	329,54	15,32
15:00	250,92	285,23	13,68
15:30	208,96	235,54	12,72
16:00	160,31	181,92	13,48
16:30	115,81	126,38	8,19
17:00	55,76	71,98	29,10
17:30	20,91	24,95	19,31
18:00	0,98	0,74	-23,71

## **Capítulo 5**

### **Conclusões e Sugestões**

#### **5.1. Conclusões**

A partir dos dados meteorológicos e solarimétricos coletados na Estação Solarimétrica do Pici e dos resultados das análises realizadas nesta dissertação chegamos a conclusões que podem ser agrupadas em dois conjuntos distintos:

- (1) Conclusões derivadas da caracterização solarimétrica;
- (2) Conclusões relativas às estimativas parametrizadas da irradiância solar global, visível e infravermelha e suas comparações com as correspondentes irradiâncias observadas na superfície.

##### **5.1.1 Caracterização Solarimétrica de Fortaleza**

A curva teórica da irradiância solar global no topo da atmosfera exibiu dois máximos situados aproximadamente nos finais dos meses de março e setembro, e um mínimo em meados de junho e julho, os quais são provocados pela pequena latitude da cidade de Fortaleza, e pelo movimento de declinação do Sol.

A curva com os valores observados tende a ajustar-se melhor à curva estimada para céu claro no segundo semestre que no primeiro semestre. Isto se deve, principalmente, à presença de nuvens no primeiro semestre.

##### **5.1.2 Estimativas parametrizadas da irradiância solar global, visível e infravermelha e suas comparações com as observações na superfície**

Os valores das irradiâncias solar global estimada e observada na superfície terrestre mostram boa concordância. As maiores discrepâncias ocorrem nos períodos entre 6 e 9 h e entre

15 e 18 h. Os erros relativos nestes intervalos de tempo são muito grandes, apesar das pequenas diferenças em termos de valores absolutos das irradiâncias observada e estimada. Entre 6 e 9 h e entre 15 e 18 h a radiação solar percorre um caminho óptico mais longo, ficando desta forma, sujeita à maior atenuação pelos constituintes atmosféricos.

A diferença entre a irradiância solar global observada na Estação Solarimétrica e a correspondente estimativa na superfície, no intervalo entre 9 e 15h, é da ordem ou menores que 10%. Com estes resultados podemos afirmar que, neste intervalo de tempo, os valores estimados da irradiância solar global representam bem os correspondentes valores de irradiância solar global observada.

Nos dias 31/08/96 e 01/09/96, um sábado e um Domingo, respectivamente, os erros relativos são menores que aqueles correspondentes aos dias 01/08/96, 21/08/96 e 06/09/96, que são duas quintas-feiras e uma sextas-feiras, respectivamente. Esta distribuição, em termos de dias da semana, sugere que a quantidade de particulado presente no Campus do Pici é menor no final de semana que nos seus dias úteis. Apesar dos dias 11/10/96 e 22/11/96 apresentarem bons ajustes, eles não foram considerados nestas análise relativa aos dias da semana, por causa da nebulosidade no período da manhã, que é caracterizado pela depressão na curva observada.

Os resultados obtidos da análise da componente visível da irradiância solar, diferentemente daqueles obtidos com a irradiância solar global, não indicam uma boa concordância entre os valores observados e os correspondentes valores estimados. Invariavelmente, os erros relativos são superiores a 10%, mesmo no intervalo de 9 às 15 h. Por outro lado, observamos que a fração igual a  $0,835 \cdot (R1 - R5)$ , que corresponde à subtração da fração igual a 16,5 % da diferença das leituras dos radiômetros 1 e 5, quando comparada com o valor da irradiância solar visível estimado na superfície revelou erros da ordem ou menores que 6 %, o que indicam boa concordância.



A componente infravermelha da irradiância solar mostra resultados semelhantes àqueles da irradiância solar global e fração igual a 83,5% da irradiância solar visível observadas, indicando uma boa concordância entre os valores observados e os correspondentes valores estimados. Particularmente nos dias 21/08/96 e 11/10/96 observou-se uma pequena diferença entre os valores observados e estimados notadamente no período da manhã devido à presença de pequena quantidade de nuvens.

Um dia claro em Fortaleza, definido a partir da escolha dos valores máximos da irradiância solar global observada ao longo do ano de 1996, mostrou melhor ajuste, relativamente ao máximo da irradiância solar global estimada na superfície, quando foi considerado uma irradiância estimada com  $w = 1$  cm de água precipitável.

## **5.2 Sugestões**

Com base no presente trabalho sugerimos:

- (1) Medição independente da componente direta da radiação solar;
- (2) Inclusão de uma parametrização para os aerossóis;
- (3) Implantação de estação(ões) de aquisição automática de dados meteorológicos e solarimétricos em diferentes regiões do Estado do Ceará, notadamente na região do Sertão Central. O objetivo desta última escolha é a realização de estudos das peculiaridades climáticas e solarimétricas das diferentes regiões e suas intercomparações.

# Apêndice

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA  
 ESTAÇÃO - Fortaleza

MES - NOV96

MAPA DE OBSERVAÇÃO METEOROLÓGICA  
 ANO - 1996

DIAS	PRESSAO (mb)			TEMPERATURA °C			UMIDADE RELATIVA(%)			VENTO DIR. E VEL.				PRECIPT.	EVAP	INSOL.	NEBULOSID (0/10)			VISIBILIDADE			PRECIP (mm)					
	09h	15h	21h	09h	15h	21h	09h	15h	21h	09h	15h	21h	TOT.(mm)	(mm)	HORA	09h	15h	21h	09h	15h	21h	09h	15h	21h				
1	1010.0	1007.4	1008.8	29.8	30.4	26.4	62	59	81	SE	7.0	E	6.5	NE	3.0	0.0	5.0	10.4	6	3	3	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
2	1009.2	1006.4	1008.6	28.4	30.5	26.6	75	60	80	E	7.0	E	6.0	NE	4.0	0.0	5.2	10.1	6	3	4	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
3	1009.9	1008.0	1009.0	30.5	31.0	27.0	62	60	73	E	8.0	E	6.0	NE	4.0	0.0	4.6	10.6	4	3	1	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
4	1010.7	1008.0	1009.6	30.0	30.4	26.8	59	56	76	SE	3.5	E	7.5	NE	4.0	0.0	5.5	10.6	4	2	3	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
5	1011.1	1008.3	1010.6	29.2	29.8	26.6	63	62	78	SE	5.5	SE	6.0	E	4.0	0.0	5.6	10.1	5	8	8	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
6	1011.2	1007.2	1010.0	28.6	30.2	26.7	66	62	73	SE	6.5	E	7.5	NE	4.0	0.0	5.2	10.0	6	1	2	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
7	1009.6	1004.8	1008.8	28.8	30.4	26.5	63	59	75	SE	8.0	SE	7.0	E	4.0	1.0	5.2	9.8	7	2	2	8	8	X	1.0	0.0	0.0	
8	1008.7	1005.1	1009.0	29.6	30.0	26.8	59	65	73	SE	6.0	E	7.5	E	4.0	0.0	5.4	9.6	4	3	3	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
9	1009.0	1006.8	1009.0	29.5	30.0	26.7	64	60	81	E	7.0	E	6.0	E	3.0	0.0	5.1	10.5	6	3	2	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
10	1010.2	1007.4	1009.2	29.0	30.0	27.0	71	66	77	E	8.0	E	7.0	E	5.0	2.3	3.5	10.1	8	3	2	8	8	X	2.3	0.0	0.0	
1 período	10099.6	10069.4	10092.6	293.4	302.7	267.1	644	609	767	-	66.5	-	67.0	-	39.0	3.3	50.3	101.8	56	31	30	80	80	X	3.3	0.0	0.0	
11	1009.8	1007.5	1009.8	30.6	30.0	26.6	63	66	80	E	6.0	E	7.0	E	3.0	0.2	3.8	9.7	8	3	3	8	8	X	0.2	0.0	0.0	
12	1009.8	1007.0	1010.0	30.2	30.6	26.8	58	55	73	E	8.0	E	7.0	E	3.0	0.0	3.7	8.5	6	7	2	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
13	1009.8	1006.4	1009.0	28.2	30.6	26.0	71	52	79	SE	5.5	SE	6.0	E	3.0	0.0	4.7	6.9	9	2	5	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
14	1009.0	1005.4	1007.6	28.6	30.2	27.0	68	64	77	E	7.0	E	5.5	E	3.0	0.2	4.0	9.1	8	3	2	8	8	X	0.2	0.0	0.0	
15	1008.7	1006.0	1008.0	29.4	30.0	26.8	68	63	78	E	6.0	E	7.0	E	3.0	0.0	3.8	9.3	6	3	8	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
16	1008.8	1007.0	1008.0	29.2	30.2	26.8	70	63	75	SE	10.0	E	8.0	E	4.0	0.3	3.6	8.1	5	5	3	8	8	X	0.3	0.0	0.0	
17	1009.1	1006.6	1008.6	29.0	28.8	26.8	87	67	81	E	7.0	E	5.0	E	3.0	0.0	3.5	0.3	8	8	4	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
18	1008.8	1005.6	1008.8	28.6	30.2	27.0	71	64	80	SE	5.5	E	6.5	E	3.0	0.4	2.7	4.1	9	3	9	8	8	X	0.4	0.0	0.0	
19	1009.2	1005.9	1009.0	30.2	30.0	27.0	65	65	83	E	6.0	E	4.5	E	3.0	0.0	2.7	9.8	6	5	8	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
20	1009.1	1006.8	1009.0	30.4	29.8	26.7	65	65	81	E	7.0	SE	4.0	E	3.0	0.0	3.6	8.0	9	9	3	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
2 período	10091.9	10064.0	10087.8	294.4	300.4	267.5	666	624	787	-	68.0	-	60.5	-	31.0	1.1	36.1	73.8	74	48	47	80	80	X	1.1	0.0	0.0	
21	1009.8	1007.0	1008.6	28.0	30.4	26.8	71	63	84	E	5.0	E	7.5	E	3.0	0.0	4.0	10.1	6	5	4	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
22	1009.4	1008.2	1009.0	29.8	31.2	27.0	65	59	78	E	8.0	E	4.0	NE	4.0	0.0	3.2	11.2	3	3	2	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
23	1009.8	1006.6	1010.0	30.4	31.0	27.0	84	81	79	E	6.0	E	6.5	NE	2.0	0.0	4.1	7.7	6	5	4	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
24	1011.1	1008.4	1010.0	29.0	30.5	26.5	71	64	80	E	4.0	E	5.0	NE	3.0	0.0	3.8	7.7	8	6	4	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
25	1011.6	1008.3	1010.0	30.8	30.2	26.4	61	64	82	E	5.0	E	3.5	E	3.0	0.0	3.1	10.8	8	4	4	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
26	1010.8	1007.2	1009.6	29.8	29.8	26.0	64	65	79	E	3.0	E	5.5	E	3.0	0.0	3.8	6.4	6	5	2	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
27	1010.0	1007.1	1010.0	30.2	30.0	26.8	57	64	78	E	5.5	E	7.5	NE	4.0	0.0	3.9	10.6	4	4	5	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
28	1010.8	1008.2	1009.8	29.8	30.4	27.0	61	64	75	E	7.0	E	4.5	E	4.0	0.0	3.8	11.0	6	3	3	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
29	1010.0	1008.0	1009.6	29.5	31.0	27.0	58	54	75	E	7.0	E	8.5	E	3.0	0.0	4.0	10.3	3	2	3	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
30	1011.1	1007.4	1009.4	29.2	30.4	27.0	57	63	75	E	7.0	E	7.0	E	3.0	0.0	6.5	10.4	4	5	3	8	8	X	0.0	0.0	0.0	
3 período	10104.4	10072.4	10096.0	297.8	304.9	267.5	629	621	785	-	56.2	-	57.5	-	32.0	0.0	40.0	96.7	50	42	34	80	80	X	0.0	0.0	0.0	
SOMA	30295.9	30205.8	30276.4	885.6	908.0	802.1	1939	1854	2339	X	X	X	X	X	X	4.4	126.4	272.3	180	121	111	240	240	X	4.4	0.0	0.0	
MEDIA	1009.9	1006.9	1009.2	29.5	30.3	26.7	65	62	78	X	6.4	X	6.2	X	3.4	X	X	X	6	4	4	8	8	X	X	X	X	
MAX	1011.6	1008.4	1010.0	30.8	31.2	27.0	75	67	84	X	10.0	X	8.0	X	5.0	2.3	6.5	11.2	X	X	X	X	X	X	X	2.3	0.0	0.0
MIN	1008.7	1004.8	1007.6	28.2	28.8	26.0	57	52	73	X	X	X	X	X	X	X	2.7	0.3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Mapa de dados meteorológicos ( MAPÃO), para o mês de novembro de 1996

# Bibliografia

Bezerra, V. F., 1997: Análise de Componentes de Radiação Solar Observados por um Avião Laboratório, Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba.

Ceballos, J. C. ; Bastos, E, J. B. & Silva, B. B. da, 1983: Interação radiação solar-Atmosfera no Nordeste: Análise preliminar. Revista Brasileira de Geofísica, 1, 109-116.

Ceballos, J. C. e Fattori, A. P., 1984: Avaliação de Água Precipitável a partir de Determinações de fluxo Direcional Solar em Banda Larga - Um estudo para a região de Bauru (SP). III Congresso Brasileiro de Meteorologia, Anais, Belo Horizonte, MG.

Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1974: Solar Energy Thermal Processes. John Willey and Sons, NY.

Fraidenraich, N. e Lyra, F., 1995: Energia Solar: fundamentos e tecnologia de conversão heliotermoelétrica e fotovoltaica. Ed. Universitária da UFPE, Recife, PE. 471pp.

Howard, J. N. , Burch, D. E. e Williams, D., 1956a: Infrared Transmission of Synthetic Atmospheres. I. Instrumentation. Journal of the Optical Society America, 46, 189-190.

Howard, J. N. , Burch, D. E. e Williams, D., 1956b: Infrared Transmission of Synthetic Atmospheres. II. Absorption by Carbon Dioxide. Journal of the Optical Society America, 46, 237-241.

Howard, J. N. , Burch, D. E. e Williams, D., 1956c: Infrared Transmission of Synthetic Atmospheres. III. Absorption by Water Vapor. Journal of the Optical Society America, 46, 242-245.

Howard, J. N. , Burch, D. E. e Williams, D., 1956d: Infrared Transmission of Synthetic Atmospheres. IV. Application of Theoretical Band Models. Journal of the Optical Society America, 46, 334-338.

- Liou, K.N. and Sasamori, T., 1975: On the transfer of solar radiation in aerosol atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, 32, 2166-2177.
- Liou, K. N., 1980: *An introduction to atmosphere radiation*. Academic Press, NY.
- Paltridge, G.W. and Platt, C.M.R., 1976: *Radiative processes in meteorology and climatology*. Elsevier. Holand.
- Paltridge, G. W., 1973: Direct measurement of water vapor absorption of solar radiation in the free atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 30, 156-160.
- Plana-Fattori, A. e Ceballos, J. C., 1996: *Glossário de Termos Técnicos em Radiação Atmosférica*. Instituto Astronômico e Geofísico da USP.
- Roach, W. T., 1961: The absorption of the solar radiation by water vapor and carbon dioxide in the cloudless atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 87, 364-373.
- Sellers, W.D., 1965: *Physical climatology*, Univ. Chicago Press, Chicago.
- Vianello, R. L., e Alves, A. R., 1991: *Meteorologia Básica e Aplicações*. Imprensa Universitária, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, MG.