



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE (UEM)**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

Trabalho de Licenciatura

**CONCEPÇÃO DE UM MODELO PARA A ESTIMATIVA  
DA RADIAÇÃO SOLAR DIRECTA EM UM DIA DE CÉU  
LIMPO**



**Autor : Délio R. Guiliche**

**Maputo, Agosto de 2006**



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE (UEM)**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

Trabalho de Licenciatura

**CONCEPÇÃO DE UM MODELO PARA A ESTIMATIVA  
DA RADIAÇÃO SOLAR DIRECTA EM UM DIA DE CÉU  
LIMPO**

**Autor** : Guiliche, Délio Ricardo

**Supervisor** : Macome, Marcelino A.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar vai o meu muito obrigado ao grande criador celestial por nos conceber a maior riqueza do mundo, a vida. Vai também um agradecimento especial à aqueles que de uma ou de outra forma contribuíram para que este trabalho se concretizasse e que aqui não se fazem menção.

Ao dr. Macome que durante tantos meses e com a maior paciência e consideração guiou-me com a sua sabedoria e zelo, o meu sincero muito obrigado.

Ao corpo docente do Departamento de Física que durante a fase curricular preparou-me para a integração na família dos físicos vai o meu voto de muito sucesso e que sejam incansáveis no processo de formação.

Aos membros do CTA do Departamento de Física, em especial ao do Registo Académico, da Secretária e da Biblioteca vai um especial obrigado pela paciência que sempre tiveram na execução de suas funções.

O meu obrigado vai á minha família, em especial aos meus pais Camacho Guiliche e Sara Lourenço, assim como ás minhas irmãs Geny, Marilda, Luisa e Jéssica.

Aos meus amigos e colegas do Departamento de Física, curso de Física Aplicada, do ramo das energias renováveis, obrigado pelo apoio e companhia durante estes anos.

## DECLARAÇÃO DE HONRA

Declaro por minha honra que a formulação deste trabalho é de minha autoria, fruto de muita pesquisa e leitura e que este nunca antes fora submetido nesta Universidade nem noutra, sob meu conhecimento, para a atribuição do grau de licenciatura ou outro.

O Autor

Dáhu Ricardo Guitiche

## **DEDICATÓRIA**

Com o devido respeito, dedico o presente trabalho aos meus queridos pais.

## RESUMO

O conhecimento dos valores das radiações provenientes do sol permite calcular o balanço energético da terra. A radiação solar é o factor mais importante da dinâmica da atmosfera, e a que atinge a superfície da terra é muito superior a das outras fontes de energia (energia eólica, energia hidroeléctrica, energia da biomassa,...). Até aos dias de hoje procuram-se, em grande escala, formas de racionalizar este recurso energético para benefício humano.

Modelos para a estimativa da radiação solar são uma ferramenta para a criação de um banco de dados através dos quais os designers dos sistemas solares, bem como os responsáveis pela tomada de decisões se poderão basear sobre o fornecimento de energia á sociedade.

Pretende-se neste trabalho conceber um modelo para a estimativa da radiação solar directa em um dia de céu limpo.

Espera-se que o modelo possa fornecer resultados que sirvam de base para análise do comportamento da radiação solar directa em dias de céu limpo para determinadas regiões, resultados estes que possam servir para estudos posteriores com a intenção de determinar as perdas da radiação solar na atmosfera terrestre e ainda que os mesmos possam servir para um estudo de uso de sistemas fotovoltaicos na região.

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

**UV** - Radiação Ultravioleta

**IR** - Radiação Infravermelha

**VIS** - Radiação Visível

**P.** - Pireliómetro

**UEM** – Universidade Eduardo Mondlane

**S** – Sul

**E** - Este

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 3.1** – Factores de correcção definidos por Hottel (1976).

**Tabela 4.1** – Índice de concordância de Willmott e coeficiente de determinação do teste de validade das equações de estimativa.

**Tabela 4.2** – Valores da radiação solar directa para o dia 14/04/06 (Anexo II).

**Tabela 4.3** – Valores da radiação solar directa para o dia 27/04/06 (Anexo II).

**Tabela 4.4** – Valores da radiação solar directa para o dia 14/06/06 (Anexo II).

**Tabela 4.5** – Valores da radiação solar directa para o dia 16/06/06 (Anexo II).

**Tabela 4.6** – Valores da radiação solar directa para o dia 03/07/06 (Anexo II).

**Tabela 4.7** – Valores da radiação solar directa para o dia 08/07/06 (Anexo II).



## LISTA DE FIGURAS

- Fig. 2.1** – Espectro da radiação electromagnética.
- Fig. 2.2** – Distribuição espectral da radiação solar na superfície terrestre.
- Fig. 2.3** – As variações sazonais das estações climáticas.
- Fig. 2.4** – Atenuação da radiação solar pela atmosfera terrestre.
- Fig. 2.5** – Feixe da radiação solar directa na superfície terrestre.
- Fig. 2.6** – A estrutura de um Pireliómetro.
- Fig. 2.7** – Decomposição da radiação solar (Anexo I).
- Fig. 3.1** – Ângulo Zenital da posição do sol.
- Fig. 4.1** – Gráfico da radiação solar directa, medida instrumentalmente e estimada a partir do modelo, para a condição de céu limpo à 14/04/06.
- Fig. 4.2** – Gráfico da radiação solar directa, medida instrumentalmente e estimada a partir do modelo, para a condição de céu limpo à 27/04/06.
- Fig. 4.3** – Gráfico da radiação solar directa, medida instrumentalmente e estimada a partir do modelo, para a condição de céu limpo à 14/06/06.
- Fig. 4.4** – Gráfico da radiação solar directa, medida instrumentalmente e estimada a partir do modelo em um dia de céu parcialmente coberto, à 10/06/06.
- Fig. 4.5** – Gráfico da radiação solar directa, medida instrumentalmente e estimada a partir do modelo em um dia de céu parcialmente coberto, à 16/06/06.
- Fig. 4.6** – Gráfico da radiação solar directa, medida instrumentalmente e estimada a partir do modelo em um dia de céu parcialmente coberto, à 03/07/06.
- Fig. 4.7** – Curva de regressão para o dia 14/04/06
- Fig. 4.8** – Curva de regressão para o dia 27/04/06
- Fig. 4.9** – Curva de regressão para o dia 14/06/06
- Fig. 4.10** – Curva de regressão para o dia 16/06/06
- Fig. 4.11** – Curva de regressão para o dia 03/07/06
- Fig. 4.12** – Curva de regressão para o dia 08/07/06

## ÍNDICE

CAPÍTULO 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 Objectivos.....	4
1.1.1 Geral.....	4
1.1.2 Específicos.....	4
1.2 Motivação do estudo.....	4
CAPÍTULO 2.....	7
Revisão Bibliográfica.....	7
2.1 A Luz.....	8
2.2 O Espectro da Radiação solar.....	10
2.3 Distribuição da Radiação Solar pelo globo.....	12
2.3.1 Intensidade da radiação solar.....	13
2.3.2 Duração e Quantidade de radiação solar.....	13
2.4 Atenuação da Radiação Solar.....	14
2.5 Componentes da radiação solar.....	16
2.5.1 Radiação Solar directa.....	16
2.5.2. Radiação solar difusa.....	17
2.5.3. A radiação solar reflectida.....	18
2.6 Medição da Radiação Solar.....	18
O Pireliómetro (P.).....	19
2.7 Importância da medição da radiação solar directa.....	22
2.8 Constrangimentos na medição directa da componente directa da radiação solar.....	22
CAPÍTULO 3.....	24
Descrição do Modelo Usado.....	24
CAPÍTULO 4.....	31
Resultados e Discussão.....	31
4.2 Relação entre a componente teórica e observada.....	35
4.3 Origem das flutuações.....	40
4.4 Limitações do modelo.....	40
CAPÍTULO 5.....	42
Conclusões e Recomendações.....	42
5.1 Conclusões.....	42
5.2 Recomendações.....	43
Referências Bibliográficas.....	44
ANEXOS.....	46

# CAPÍTULO 1

## Introdução

O sector da energia é coração e pulmão de qualquer programa para o desenvolvimento. Desde muito tempo que o mundo tem-se interessado em questões relativas a energia, procurando deste modo estabelecer o valor económico, a sua distribuição e as formas de obtê-la. Com o desenvolvimento tecnológico este interesse vai crescendo.

Um facto a observar é que com o tempo foi-se descobrindo diversas formas de obter energia. De entre essas formas encontrou-se uma que não é intensamente usada pelo homem mas que já começou a ganhar espaço: a energia de origem renovável, principalmente a de origem solar, da biomassa, eólica e hidroeléctrica. A outra forma vem de produtos fósseis, como o caso do petróleo, carvão e o gás natural, e de origem nuclear, isto é, formas não renováveis que quando são usadas continuamente e indiscriminadamente trazem consigo efeitos negativos a humanidade, como a poluição ambiental, o efeito estufa ou a contaminação radiactiva (Gonzales,1998).

A humanidade tomando conhecimento dos efeitos negativos que as formas de energia não renovável possam causar vai incentivando constantemente o uso de tecnologias de energia renovável e com o andar do tempo já se pode observar que esta forma de energia já começa a ser consumida por diversos países do mundo.

A radiação solar por ser uma fonte primária de inúmeras outras fontes renováveis, como a hidroeléctrica ou a biomassa, por estar associada aos baixos impactos ambientais e por se encontrar distribuída em todo o planeta, ocupa um lugar de destaque.

A radiação solar é uma energia electromagnética que se propaga no espaço em forma de onda transversal, isto é, nenhum meio material é necessário para a sua propagação.

Uma das formas de aproveitamento directo da energia solar é como energia térmica, com o propósito fundamental de obter-se temperaturas mais elevadas para o aquecimento de fluídos, fornos, etc. Outra forma de se aproveitar a energia solar é através do efeito fotovoltaico, onde células solares recebem a energia electromagnética vinda do sol e a transformam directamente em energia eléctrica, não havendo nesta conversão qualquer tipo de emissão de poluentes. Esta tecnologia é totalmente renovável e limpa na sua utilização e manutenção, havendo alguns problemas ambientais apenas na fabricação de células que são feitas por meio de elementos químicos.

Além disso os sistemas fotovoltaicos possuem baixo custo de manutenção, uma vez que são sistemas normalmente fixos embora esta tecnologia ainda tenha algumas desvantagens como o custo das células e o problema da necessidade de armazenamento da energia produzida. Contudo, o custo destas poderá ser reduzido em alguns anos, melhorando assim significativamente a sua competitividade (Gonzales,1998).

Observando-se a ampla utilidade da energia solar, deu-se atenção crescente ao estudo desta e muitas outras possibilidades de aproveitamento desta energia para o qual, em primeira instância, necessita-se realizar o levantamento dos potenciais da mesma nos locais onde vai ser utilizada. Existem diversos métodos para a determinação destes recursos através de informações radiométricas, levantadas geralmente durante prolongados períodos de tempo; assim alguns países contam com um conjunto de estações radiométricas, onde habitualmente são obtidas informações sobre a radiação solar.

Os dados são apresentados geralmente na forma de potência colectada por unidade de área ( $W/m^2$ ) num plano horizontal ao longo de um dia, podendo-se deste modo apresentar distribuições da radiação solar diária, da média mensal e anual no plano horizontal. A informação mais frequente utilizada é a radiação mensal que dividida pelo número de dias de medição num mês denomina-se radiação diária mensal.

Outro valor importante é a radiação no topo da atmosfera (constante solar) que foi obtida através de diversas estações situadas a grandes altitudes (como satélites), sendo o valor padrão internacionalmente estabelecido de  $1367 \text{ W/m}^2$  (Duffie e Beckman, 1991).

Para a obtenção de alguns outros factores como a radiação directa, a radiação global diária, etc., e também parâmetros utilizados em aplicações fotovoltaicas como a inclinação óptima dos painéis em determinada localização, é preciso ainda o conhecimento de dados geográficos como a latitude, declinação solar, ângulo zenital, etc. (Gonzales, 1998). Com todas estas informações pode-se obter parâmetros mais específicos como a constante de perdas de radiação solar pela atmosfera, determinação de parâmetros de absorção de radiação solar e eficiência dos sistemas fotovoltaicos.

A maioria das estações radiométricas existentes fazem medições de número de horas de insolação e poucas medindo a radiação solar global e a radiação solar difusa. Observa-se que existe um défice de informação pois não se conhece a componente directa muito importante para o funcionamento dos sistemas concentradores solares que só funcionam na base desta. Muitas das vezes para a obtenção desta componente efectua-se um cálculo aritmético que consiste na diferença das componentes medidas, difusa e Global.

Para a solução desta necessidade muitas vezes opta-se por se elaborar modelos de estimativa que possibilitam a obtenção desta componente e nesta pesquisa usa-se um modelo para a estimativa da radiação solar em um dia de céu limpo que leva em conta uma equação proposta por Hottel (1976) para a determinação da transmissividade monocromática de uma atmosfera transparente padrão (céu limpo).

## 1.1 Objectivos

### 1.1.1 Geral

Este trabalho tem como objectivo principal conceber um modelo de estimativa da radiação solar directa, em um dia de céu limpo.

### 1.1.2 Específicos

- Conceber o modelo para um dia de céu limpo.
- Avaliar a correlacção entre os valores da radiação estimada e os medidos.

## 1.2 Motivação do estudo

Como é sabido, nem toda a população Moçambicana beneficia do fornecimento convencional da energia eléctrica. Somente alguma parte da população residente em cidades e vilas é que beneficia do fornecimento da energia a partir da rede hidroeléctrica.

Segundo o Ministério da Energia têm sido efectuados constantes estudos para se apurar como é que se poderia fornecer energia a população moçambicana usando diversas fontes. O uso de grupos geradores nas capitais provinciais, revelou-se insustentável dado o elevado custo de combustível e a manutenção dos equipamentos.

A maior parte da população moçambicana vive na zona rural onde o recurso de energia mais comum é a biomassa (combustível lenhoso). A implementação de tecnologias de energias renováveis para o fornecimento de energia à população residente em zonas remotas, com difícil acesso a rede convencional é uma iniciativa a estimular. A radiação solar como fonte de energia renovável pode ser uma aposta a considerar.

O uso da energia proveniente da radiação solar para a iluminação, refrigeração, bombeamento de água, sustento de pequenos projectos afigura-se como uma alternativa.

O conhecimento dos valores das radiações provenientes do sol permite calcular o balanço energético da terra. A radiação solar é o factor mais importante da dinâmica da atmosfera, e a que atinge a superfície da terra é muito superior a das outras fontes de energia (energia eólica, energia hidroeléctrica, energia da biomassa,...). Até aos dias de hoje procuram-se, em grande escala, formas de racionalizar este recurso energético para benefício humano.

A quantidade de radiação solar  $dW$  que incide num local de área  $dA$  no intervalo de tempo  $dt$  é

$$dW = I.dA.dt.\text{sen}\alpha \quad (1)$$

Em que  $I$  é a intensidade da radiação e  $\alpha$  é o ângulo entre a normal e o ponto de observação.

A radiação solar para além de benéfica é também prejudicial pois em sua composição encontram-se partes nocivas que ao atravessarem a camada de ozono atacam directamente a pele humana, chegando a provocar doenças cancerígenas. Contudo, o desenho e uso das tecnologias de energia solar exige um conhecimento substancial sobre o potencial de energia solar ao longo do país, o que neste momento falta devido a quase inexistência de estações radiométricas no país. Maior parte das estações meteorológicas fazem registo do numero de horas de insolação e, este formato de informação não é adequado para o efeito de exploração energética.

A rede de fornecimento de energia hidroeléctrica abrange apenas cerca de 7% da população moçambicana, concentrada nas grandes cidades e vilas. O conhecimento real da disponibilidade da energia solar pode conduzir a uma planificação e possível uso desta energia barata (Cuamba et al., 2004).

Mesmo nas grandes cidades e vilas o uso da energia solar pode ser muito benéfico dado que o custo da energia hidroeléctrica e de outras fontes convencionais vai aumentando.

O modelo para a estimativa da radiação solar é uma ferramenta para a criação de um banco de dados através dos quais os designers dos sistemas solares, bem como os responsáveis pela tomada de decisões se poderão basear para a exploração da energia solar.

Espera-se que o modelo concebido possa fornecer resultados que sirvam de base para análise do comportamento da radiação solar directa de céu limpo em determinadas regiões, que possam servir para estudos posteriores com a intenção de se determinar as perdas da radiação solar na atmosfera terrestre e ainda que os mesmos possam servir para uma avaliação com o objectivo de viabilizar a aplicação de sistemas fotovoltaicos na região.



## CAPÍTULO 2

### Revisão Bibliográfica

O sol é um astro constituído por matéria em grande parte ionizada, principalmente nas regiões de baixa pressão e alta temperatura, condições que favorecem a acção ionizante do choque electrónico e das radiações existentes. O sol apresenta actividade variável, o que tem como consequência emitir radiações de natureza (electromagnética e corpuscular) e intensidade variável (Pecker e Schatzman, 1962).

No geral, o sol pode apresentar-se em dois estados: sol agitado e sol calmo. Ao sol agitado opõe-se o sol calmo, cuja radiação emitida é constituída quase exclusivamente por radiação electromagnética e constitui o fundo da radiação total emitida. A esta sobrepõe-se a radiação emitida pelas regiões agitadas, a qual é constituída principalmente por protões e electrões, com velocidades da ordem dos 1500 Km/s. Este fluxo permanente de partículas, que cria no espaço interplanetário um campo magnético, constitui uma espécie de “vento” solar, formando um plasma cujas partículas e campos magnéticos se distribuem por aquele espaço (Pecker e Schatzman, 1962).

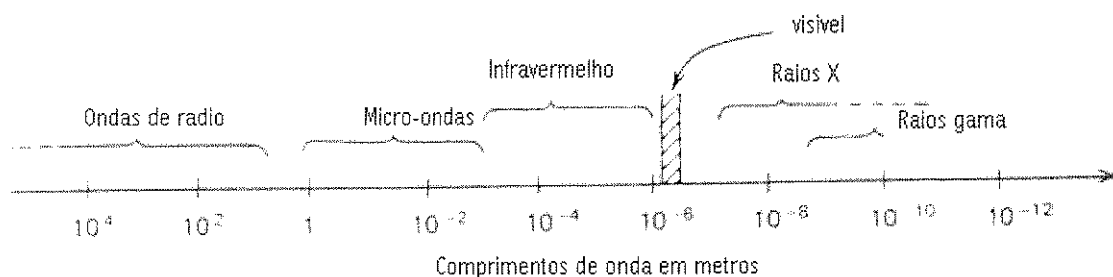
O sol emite todas as formas de energia radiante, desde os raios gama até às ondas de rádio. Mas apenas a radiação visível (luminosa), as ondas de rádio e algumas radiações infravermelhas e ultravioletas atravessam a atmosfera terrestre (Clarke, 1954).

Considerando a radiação solar como um exemplo de um fenómeno geral conhecido como movimento de onda, começa-se por uma revisão sobre as ondas, isto é, por um olhar a algumas das propriedades importantes da luz.

## 2.1 A Luz

A luz é a radiação electromagnética que tem a propriedade de impressionar o olho humano. Ela é somente uma das formas pela qual a radiação electromagnética se apresenta na natureza. Existem outros tipos de radiação como os raios x, raios gama, radiação infravermelha, radiação ultravioleta, ondas de rádio, etc. As radiações electromagnéticas são determinadas pela sua frequência e conseqüentemente, pelo seu comprimento de onda, devido a sua natureza ondulatória (Crescesb, 2006).

A figura 2.1 é uma representação esquematizada dos diferentes tipos de radiação emitidas pelo sol segundo McDaniels (McDaniels,1929),



**Figura 2.1:** Espectro da radiação electromagnética (McDaniels,1929)

A luz durante a sua emissão ou absorção, comporta-se como um fluxo de partículas com energia dependente da frequência, isto é:

$$E = h \cdot f \quad (2)$$

Onde,  $E$  é a energia do fluxo de partículas,  $h$  é a constante de Planck ( $h=6.626 \times 10^{-34} J.s$ ) e  $f$  é a frequência da luz.

As propriedades que se verificam durante a absorção ou emissão dizem-se propriedades corpusculares, ao passo que a partícula de luz chama-se fóton ou quantum luminoso. A natureza ondulatória da luz é provada pelos fenómenos de interferência e difracção.

Durante a propagação verificam-se as propriedades ondulatórias e durante a sua interacção com as substâncias (radiação e absorção) se manifestam as propriedades corpusculares, onde se pode verificar uma espécie de dualismo da luz.

Existe uma relação importante e fundamental entre o comprimento de onda de uma onda e sua velocidade.

A velocidade de propagação das ondas é

$$V = \frac{\lambda}{T} \quad (3)$$

Onde:

$V$  é a velocidade de propagação das ondas;

$\lambda$  é o comprimento da onda; e

$T$  é o período de um ciclo completo de vibração da onda

A frequência do movimento periódico ( $f$ ) é relacionada ao período  $T$  por

$$f = \frac{1}{T} \quad (4)$$

A equação (2) pode ser escrita como:

$$V = f \cdot \lambda \quad (5)$$

A equação geral (4) acima descrita é válida e verdadeira para qualquer onda simples e periódica.

## 2.2 O Espectro da Radiação solar

O espectro solar é a imagem colorida do sol obtida pela decomposição da luz branca. A radiação emitida por uma origem não é constituída por radiação com o mesmo comprimento de onda, isto é, é uma radiação heterocromática (Tavares, 1990).

Existem aparelhos que permitem decompor esta mistura de radiações nas diferentes componentes, transformando-a em diversos feixes monocromáticos que compõem a mistura. Esta mistura pode ser decomposta nas seguintes porções:

- Raios gama, raios X, Radiação ultravioleta (UV), Luz Visível, Radiação infravermelha (IR), Microondas e as Ondas de rádio, como mostra o anexo I.

É este conjunto de feixes, cada com um único comprimento de onda, a que se chama espectro da luz emitida. A distribuição espectral da radiação solar na superfície terrestre é mostrada na figura 2.2.

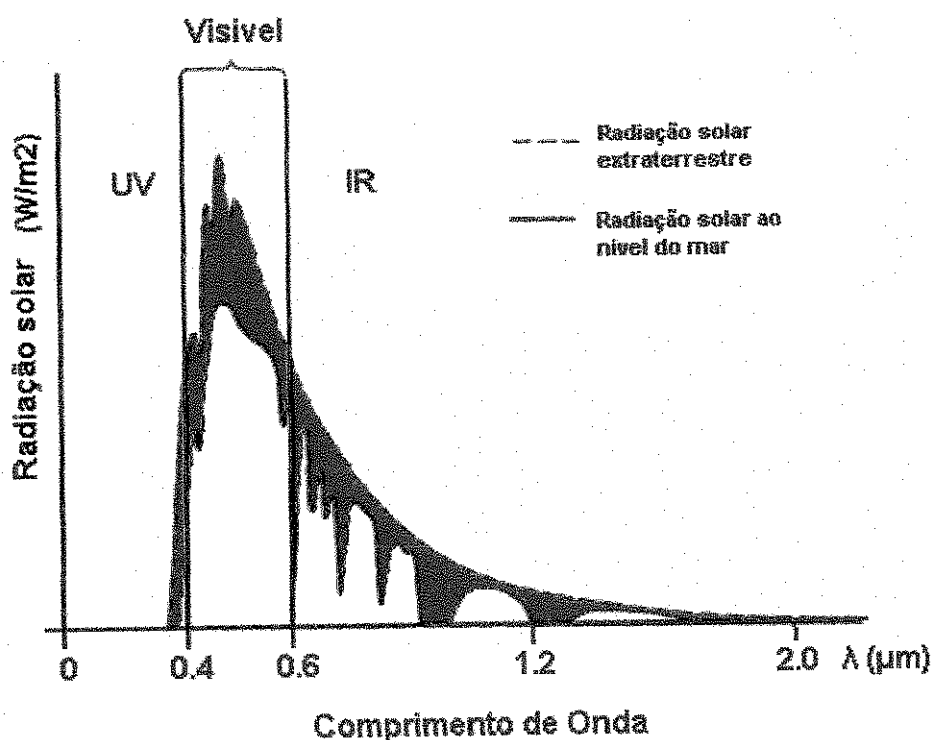


Figura 2.2 Distribuição espectral da radiação solar na superfície terrestre (Crescesb, 2006).

O espectro da radiação solar pode ser dividido em três regiões principais em função do comprimento de onda, a região da radiação ultravioleta (UV), a região da radiação visível (VIS) e a região da radiação infravermelha (IR).

2.2.1. A região da *radiação solar ultravioleta* (UV) que se compreende como a radiação inferior aos  $0.4 \mu\text{m}$  de comprimento de onda (figura 2.2) não é visível ao olho humano desarmado (olho nu). A sua emissão resulta das modificações de energia dos electrões orbitais de átomos de substancias extremamente a altas temperaturas. O sol é a principal fonte natural desta radiação, emitindo numa ampla gama de frequências ultravioleta.

A maior parte da radiação ultravioleta de alta frequência, energética e potencialmente perigosa não alcança a superfície da terra, devido à absorção que sofre na parte superior da atmosfera (Estratosfera) para a formação e manutenção da camada de ozono, resultado com que a radiação UV que alcança a superfície terrestre seja somente 1 a 3% da Radiação total. A radiação ultravioleta de baixa frequência (de aproximadamente  $0.3$  à  $0.4$  conforme a fig.2.2) penetra na atmosfera e é usada na fotossíntese das plantas verdes (Plante, 1983).

2.2.2. A região da *radiação solar visível* (VIS), compreende a região dos comprimentos de onda média entre  $0.4$  e  $0.6 \mu\text{m}$  (figura 2.2), é a região do espectro solar que pode ser detectado pelo olho humano, daí a designação de radiação solar visível. Quando esta radiação atravessa uma peça triangular especialmente construída de vidro designada por prisma, as velocidades variáveis que esses comprimentos de onda alcançam, resultam numa divisão de cores que variam de violeta, passando do azul e verde até ao vermelho. O espectro visível é uma banda extremamente estreita quando comparada com as bandas ultravioleta e infravermelha (McDaniels, 1929).

2.2.3. A região da *radiação solar infravermelha* (IR), é região de comprimentos de onda dos  $0.6 \mu\text{m}$  em diante (figura 2.2). É também conhecida como radiação de calor, embora

o último termo não seja o adequado, pois ambas radiações UV e IR podem aquecer um objecto. É o tipo de radiação electromagnética não ionizante, quer dizer que ao interagir com a matéria, a radiação infravermelha não provoca a formação de iões, ou seja não remove electrões da matéria, mas provoca vibrações de algumas moléculas. O resultado da interacção é o aumento da temperatura do sistema.

## 2.3 Distribuição da Radiação Solar pelo globo

A magnitude da radiação solar que alcança o exterior da atmosfera conhecida como a constante solar tem o valor de cerca de  $1,9 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$ . Ao nível do mar a intensidade da radiação solar atinge aproximadamente a média de  $1,5 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$  (Clarke, 1954). Porém, sabe-se muito bem que a radiação solar não é distribuída uniformemente no tempo e no espaço.

A radiação solar também varia em intensidade e em duração, resultando em diferenças no total da radiação solar que chega a cada unidade de superfície, numa hora, num dia ou num mês.

Quando o sol se encontra nas posições a que se chamam nascer do sol, no período da manhã, e pôr do sol, período do fim da tarde significa que se tem um valor elevado do ângulo horário e para estes casos registam-se valores mínimos da radiação solar, tomando como referência o meio dia solar. Quando o sol se encontra no meio dia (ponto de referência) registam-se maiores valores da radiação solar. Quer-se assim dizer que quanto mais se aproxima do meio dia, partindo do nascer do sol a quantidade de radiação solar que a terra recebe vai aumentando até se atingir um valor máximo. Depois, quanto mais se aproxima do pôr do sol a radiação solar vai diminuindo até um certo valor (um mínimo). Isto acontece devido a variação do ângulo horário que é um dos parâmetros para a localização do sol.

### **2.3.1 Intensidade da radiação solar**

A intensidade da radiação solar varia com a alteração do ângulo de incidência e com a quantidade da radiação absorvida pela atmosfera e pelos seus constituintes. Quando se tem o sol a uma baixa altitude significa que o ângulo de incidência é maior e menor é a intensidade da radiação solar porque para chegar ao ponto de observação a radiação solar percorre um caminho longo e encontra-se sujeita a diversas interações com os constituintes da atmosfera terrestre e mais, como edifícios, o relevo, clima, etc. Quando se encontra uma altitude elevada o efeito da radiação solar é quase directo, tem-se um menor ângulo de incidência, o sol age directamente sobre o ponto de observação registando-se assim maiores valores da intensidade de radiação solar recebida.

Pode-se concluir que para diferentes altitudes do sol registam-se diferentes valores de intensidade da radiação solar. Este efeito se pode observar no decorrer do dia: pelo início da manhã e pelo final da tarde o sol se encontra à uma baixa altitude (valores mínimos), pelo meio do dia o sol encontra-se a uma altitude elevada (valores máximos).

A latitude também afecta a intensidade da radiação solar mas seu efeito não é bem definido. Existem outros factores que podem ter muita maior influência como a humidade, as nuvens e póis na atmosfera que causam um efeito irregular e profundo reduzindo a intensidade da radiação solar.

### **2.3.2 Duração e Quantidade de radiação solar na superfície terrestre**

O total da radiação recebida por um organismo é determinado pela intensidade da radiação e pela duração do período de irradiação. A terra recebe somente uma pequena fracção da radiação total emitida pelo sol. A quantidade de radiação que chega a terra por ano é equivalente a dezenas de milhares de vezes da energia anualmente necessária para o mundo (McDaniels, 1929).

2. A reflexão pelas nuvens e poeiras existentes na atmosfera.
3. O espalhamento por moléculas de ar, por vapor de água e poeiras.

## 2.5 Componentes da radiação solar

A radiação solar, ao atravessar a atmosfera terrestre, sofre acidentes de propagação que diminuem a sua intensidade, sendo em parte absorvida, reflectida e difundida. Tem-se, assim, a radiação recebida directamente do sol designada por *radiação solar directa*, a radiação solar reflectida e difundida pelas moléculas de ar atmosférico e pelas nuvens designada por *radiação solar difusa* e o conjunto da radiação solar directa e a radiação solar difusa chama-se *radiação solar global*. A diferença entre as radiações emitidas pelo globo e pela atmosfera chama-se radiação efectiva e nocturna (McDaniels, 1929).

### 2.5.1 Radiação Solar directa

É a radiação recebida na superfície da terra proveniente directamente do sol sem sofrer alteração na sua direcção. A radiação solar directa é o fluxo energético da radiação por unidade de superfície de um receptor plano disposto normalmente aos raios incidentes, isto é trata-se, portanto de uma iluminação produzida pela radiação solar com incidência normal. A figura 2.5 esquematiza o feixe da radiação solar directa que chega a superfície da terra.



pequena em quantidade comparada à radiação solar directa, mas para cálculos científicos ela não pode ser ignorada. Em dias completamente cheios de nuvens, somente esta radiação pode alcançar a superfície terrestre.

Para prever a quantidade de radiação solar difusa na superfície terrestre assume-se que o céu é a fonte difusa e que ele é um irradiador uniforme deste tipo de radiação (Myers, 2001, citado por Macome, 2004).

### **2.5.3. A radiação solar reflectida**

Designa-se por radiação solar reflectida à aquela que alcança a superfície terrestre depois de sua direcção ter sido alterada por objectos circundantes como nuvens, edifícios e árvores. Geralmente, a quantidade de radiação solar reflectida na superfície de um objecto depende da localização do objecto, da orientação da superfície e das características da reflectividade solar da superfície em redor (Scielo, 2006, citado por Macome, 2004). A reflectividade do solo, por exemplo, varia com o tipo de cobertura do solo.

## **2.6 Medição da Radiação Solar**

O conhecimento do fluxo solar incidente é claramente necessário para que se faça o uso adequado da energia proveniente do sol. A medição da radiação solar, tanto a componente directa como a componente difusa na superfície terrestre é de maior importância para o estudo das influências das condições climáticas e atmosféricas. Com o conhecimento dessas medições, pode-se viabilizar as instalações de sistemas térmicos e fotovoltaicos numa determinada região garantindo o máximo aproveitamento ao longo do ano onde, as variações da intensidade da radiação solar sofrem significativas alterações.

A medição da radiação solar faz-se com Pireliómetros, Actinómetros, Piranómetros e aparelhos de balanço de radiação. A medição da radiação solar é completada com a

medição da insolação (número de horas de sol descoberto) que se efectua com heliógrafos. Os instrumentos aqui descritos são os mais utilizados na actualidade.

Os instrumentos solares têm como objectivo medir a energia associada a radiação incidente num plano sob uma determinada orientação e fornecer informação sobre a distribuição espectral e espacial dessa energia. Estes instrumentos convertem a energia da radiação solar incidente em outra forma de energia que já pode ser convenientemente medida.

Assim, conforme a posição em relação ao ângulo sólido definido pelo sol e pelo ponto de observação, os instrumentos de observação e registo contínuo da radiação solar podem registar valores mínimos (nulos), máximos e intermédios (entre os mínimos e máximos) (Da Mata, 1966).

No presente trabalho a descrição dos instrumentos destinados a medição da radiação solar, concentrar-se-á no pireliómetro o instrumento destinado a medição da radiação solar directa, objecto principal da pesquisa.

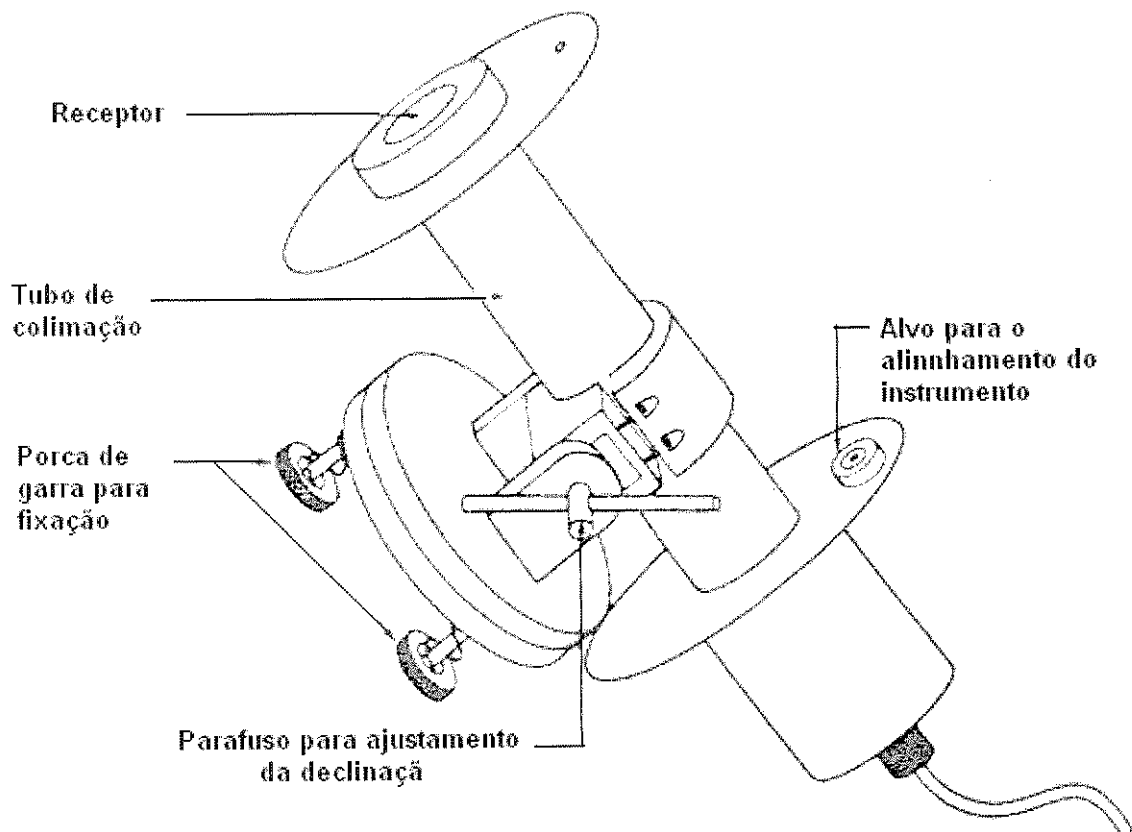
### **2.6.1 O Pireliómetro (P.)**

É usado para a medição da radiação proveniente directamente do sol, a radiação directa. O qualificativo «directa» indica que se trata da radiação proveniente directamente do sol sem o acréscimo da radiação difusa ou reflectida.

O pireliómetro é formado por um cilindro metálico com a base superior enegrecida e dirigida para o sol; a base inferior está ligada a um suporte que permite orientar o aparelho na direcção conveniente, permitindo assim medir, a partir da energia recebida, a radiação solar directa. O método de medida mais usado consiste em transformar a energia recebida em calor e utilizar os métodos calorimétricos clássicos, seguros e precisos (Pecker e Schatzman, 1962).

O pireliómetro caracteriza-se por apresentar uma pequena abertura de forma a "visualizar" apenas o disco solar e a região vizinha denominada circunsolar. O instrumento é montado a um mecanismo que se move seguindo o movimento aparente do sol onde é constantemente ajustado para focalizar melhor a região do sensor (Crescesb, 2006).

Os pireliómetros são instrumentos que devem apresentar uma resposta linear ao fluxo da radiação solar directa, sem sofrer a influência das condições ambientais. A linearidade de um pireliómetro pode variar ao longo do dia, devido à presença de poeiras. As condições ambientais, ventos ou baixas temperaturas, são factores que aumentam as perdas por condução e convecção no sensor do pireliómetro que se encontra exposto às variações climáticas (Moura et al.). A Figura 2.6 é a representação esquematizada da estrutura de um pireliómetro.



**Figura 2.6** A estrutura de um pireliómetro, montado no mecanismo que permite seguir o movimento aparente do sol.

A aceitação angular de um pireliómetro é determinada pelas dimensões do tubo cilíndrico e pelos diafragmas associados.

Muitos dos pireliómetros hoje são autocalibráveis apresentando uma precisão na faixa dos 0.5% quando adequadamente utilizados para medições (Crescesb, 2006).

Os pireliómetros (P.) podem classificar-se em três categorias:

1. Aparelhos padrões absolutos utilizando os métodos calorimétricos, tais como: P. de compensação eléctrica de Angstrom (1899), um dos mais usados e mais digno de confiança; P. de Waterflow de Abbot; Abbot e Aldrich (1927); Tingwald (1934); P. de gelo (Volochine); P. de disco de prata Abbot (1913) e Aldrich (1949). É constituído por pares termoelectrónicos em que as soldaduras quentes ligam-se as superfícies receptoras de radiação solar e coberta de tinta negra muito absorvente. As soldaduras frias são mantidas a temperatura do ar por estarem ligadas a uma superfície pintada de branco. Devido a acção da radiação solar incidente cria-se uma tensão entre as soldaduras e assim pode-se medir o valor da energia solar.
2. P. de medida tais como: Actinómetro de Michelson-Buttner (1903); bimetálico de Michelson (1908); Martin (1931); blindado de Linke-Feussner. Estes medem a energia solar com base nas deformações que esta causa as lâminas metálicas que constituem o instrumento. Estas deformações são transmitidas por meio de alavancas ao registador (Pecker e Schatzman, 1962).
3. P. de termopilhas tais como o Actinómetro de Moll-Gorezynski (1924); P. de Eppley, de incidência normal; Volochine (Pecker e Schatzman, 1962). Estes geralmente são constituídos por um corpo cilíndrico de aço inoxidável, termopilha constituída por termopares instalada na base do tubo colimador que funciona como sensor de radiação. O seu funcionamento baseia-se na medição da

diferença de temperaturas entre duas superfícies, uma pintada de preto e outra de branco, igualmente iluminadas. A expansão sofrida provoca uma diferença de potencial que ao ser medida mostra o valor da energia solar (Moura et al.).

## 2.7 Importância da medição da radiação solar directa

A medição da radiação solar directa, assim como da difusa, na superfície terrestre é de maior importância para estudos das influências climáticas e atmosféricas, para o uso fotoeléctrico, fotoquímico e termoquímico da energia solar (Daniels e Duffie, 1955). Os estudos referidos poderão contribuir para:

- A transformação da energia dentro do sistema terra-atmosfera e sua variação no tempo ou no espaço;
- A interpretação de fenómenos atmosféricos no que diz respeito a turbidez, seus constituintes e os constituintes da radiação;
- Analisar a distribuição e as variações da radiação que a terra absorve ou emite e o conjunto destas;
- Satisfazer as necessidades das actividades biológicas, médicas, agrícolas e industriais com o respeito à radiação.

## 2.8 Constrangimentos na medição da radiação solar directa

É vantajoso fazer a medição, usando a instrumentação, da componente directa da radiação solar, pois esse processo consome pouco tempo e dependendo da eficiência poder-se-á obter alta precisão na medição, isto é, poder-se-á obter uma margem de erro mínima. Mas por vezes torna-se difícil e para se efectuarem as medições recorre-se a outras alternativas.

Os instrumentos que fazem a medição directa da radiação solar directa são de elevado custo. Estes instrumentos requerem ajustes diários para acompanhar o movimento do sol o que torna difícil o seu manejo.

Existe um instrumento (o rastreador) que permite acompanhar o movimento do sol, mas este é muito caro e, por tal, opta-se por excluir este elemento. Com esta exclusão torna-se indispensável a aquisição da mão-de-obra, que por sua vez também constitui dificuldade pois nota-se por vezes a carência de fundos.

## CAPÍTULO 3

### Descrição do Modelo Usado

O modelo usado para estimar a média horária da radiação solar directa baseia-se na equação proposta por Hottel (1976), para a determinação da transmissividade monocromática de uma atmosfera transparente padrão (céu limpo).

Para que se possa representar um facto ou fenómeno real é necessário que se tomem em conta todas as características e parâmetros associados ao fenómeno. É importante distinguir os parâmetros que caracterizam o processo, a sua dependência (factores), o mecanismo que determina o processo e a importância do factor a modelar.

Os efeitos da atmosfera no espalhamento e na absorção da radiação solar encontram-se variáveis com o tempo e com condições atmosféricas. É vantajoso definir um céu "limpo" Standard (padrão) e calcular a radiação horária e diária que poderia ser recebida numa superfície horizontal sobre as tais condições padrão em determinado local, para um desenho e utilização adequada das tecnologias de energia solar (Duffie e Beckman, 1991). Define-se céu "limpo" ao céu livre de factores que poderiam atenuar a radiação solar, como nuvens e poeiras.

A equação proposta pelo Hottel (1976) para a determinação da transmissividade atmosférica num dia de céu limpo que leva em conta o ângulo Zenital, a altitude da atmosfera padrão e quatro tipos de clima é apresentada na equação (6). Assim, a transmissividade atmosférica para um céu limpo  $\tau_d$  é dada na forma:

$$\tau_d = a_0 + a_1 \cdot \exp\left(\frac{-k}{\cos\theta_z}\right) \quad (6)$$

Onde  $a_0$ ,  $a_1$  e  $k$  são constantes climáticas empíricas; Estas constantes são dadas para uma atmosfera padrão com 23 Km de visibilidade e são encontradas à partir de  $a_0^*$ ,  $a_1^*$  e  $k^*$ , que são dadas para altitudes baixas de 2,5 Km por:

$$\begin{aligned} a_0^* &= 0,4237 - 0,00821(6 - A)^2 \\ a_1^* &= 0,5055 + 0,0059(6,5 - A)^2 \\ k^* &= 0,2711 + 0,01858(2,5 - A)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Onde,  $A$  é a altitude do observador dada em km e  $\theta_z$  é o ângulo zenital. Foram introduzidos factores de correcção para os quatro tipos de climas e são dados pelas expressões:

$$\begin{aligned} r_0 &= \frac{a_0}{a_0^*} \\ r_1 &= \frac{a_1}{a_1^*} \\ r_k &= \frac{k}{k^*} \end{aligned} \quad (8)$$

O método para a determinação da transmissividade para uma atmosfera padrão envolve quatro tipos de clima e o azimute ( $\cos\theta_z$ ). Para cada tipo de clima existem factores de correcção que devem ser aplicados para o cálculo de parâmetros que se integram na descrição destes climas, factores estes que são ilustrados na tabela 3.1 (Hottel,1976).

**Tabela 3.1.** Factores de correcção definidos por Hottel (1976).

Tipos de clima	$r_0$	$r_1$	$r_k$
Tropical	0.95	0.98	1.02
Verão latitudes médias	0.97	0.99	1.02
Verão subártico	0.99	0.99	1.01
Inverno latitudes médias	1.03	1.01	1.00



Assim, a transmissividade da atmosfera padrão para a radiação directa pode ser determinada para qualquer ângulo zenital e para qualquer altitude acima dos 2,5 km.

Onde :

O clima tropical caracteriza-se pela existência de duas estações: a estação húmida e a estação seca. Na primeira predominam as baixas pressões equatoriais, a monção marítima. Na segunda predominam as altas pressões subtropicais, a monção terrestre.

É um clima de transição entre o equatorial e o desértico quente, ou seja, à medida que nos afastamos do equador a estação húmida vai desaparecendo dando lugar à estação seca. No clima tropical húmido a estação húmida é mais prolongada que a estação seca. No clima tropical seco é o inverso(FCCN, 2006). Este clima foi o escolhido para o nosso trabalho pois o nosso país encontra-se sob sua influência.

O clima de tipo verão latitudes médias é também um clima continental de latitude média que se caracteriza por uma precipitação relativamente baixa, embora as áreas do leste da costa (principalmente na América do Norte) possam mostrar uma distribuição uniforme de precipitação(CPD, 2005).

O Clima de tipo verão Subártico é do tipo com uma temperatura moderada. Nas áreas onde predomina não ocorre muita precipitação. Este clima é típico de zonas subárticas(WorldBook, 2006).

O clima do tipo inverno latitudes médias é um clima de tipo continental de latitude média que ocorre no interior dos grandes continentes do hemisfério norte nas zonas de ventos do oeste. Este clima é caracterizado por temperaturas frias, o bastante para suportar por todos o ano um período fixo de tampa de neve. Neste período algumas partes do mundo, como o Irão, a Turquia e a Ásia Central mostram máximos de precipitação que provocam inundações de tempo curto(CPD, 2005).

Os climas continentais de latitudes médias existem ao longo das costas do leste e sudoeste dos continentes do hemisfério norte, em zonas semi-áridas, desérticas e em partes elevadas de todo o mundo. As áreas onde ocorrem estes climas são áreas com altas temperaturas no verão e baixas no inverno. Ocorre uma precipitação moderada em quase todo o ano (GNU, 2006).

O coseno do ângulo zenital ( $\cos\theta_z$ ) é dado de forma seguinte:

$$\cos\theta_z = \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\phi \cdot \sin\delta \quad (9)$$

Onde :

A **latitude** ( $\phi$ ) é o ângulo que a normal à superfície terrestre faz com a linha do equador. É convencionalmente positiva no hemisfério norte e tem valores entre 0 e 90°.

A **declinação** ( $\delta$ ) é o ângulo que a linha que liga o centro da terra ao centro do sol faz com o plano do equador. Tem valores entre -23,45° e +23,45° (Gonzales, 1998) e é encontrada de modo:

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (10)$$

Onde, n é o número do dia do ano que varia de 1 à 365 dias para ano comum e de 1 à 366 dias para o ano bissexto.

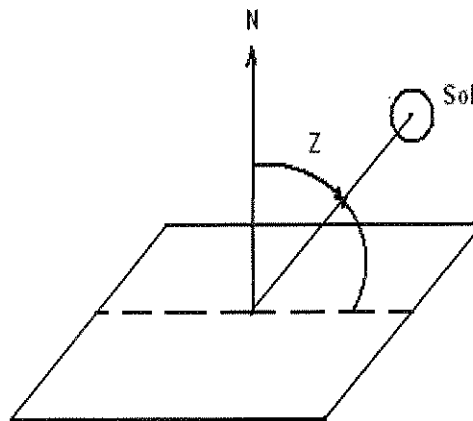
O **ângulo horário** do sol ( $\omega$ ) é o deslocamento angular do sol, este ou oeste do meridiano local devido a rotação da terra no seu eixo. Este ângulo expressa o instante t, onde t é expresso como a fracção de hora com origem em t=0, correspondendo ao meio-dia (momento em que o sol passa pelo meridiano do local). Varia de 15 em 15 Graus por hora, nas manhãs é positivo e nas tardes negativo.

O ângulo horário é obtido por meio da expressão:

$$\omega = (12 - t)15^\circ \quad (11)$$

Onde,  $t$  representa a hora do dia.

**Zênite (Z):** se se juntar um ponto da superfície da terra com o centro do sol através de uma linha, o ângulo que esta faz com a vertical (normal) do lugar denomina-se ângulo zenital ( $\theta_z$ ). A figura 3.1 mostra esse efeito.



**Figura 3.1:** Ângulo Zenital da posição do sol.

A radiação solar que incide normalmente (perpendicularmente) sobre uma superfície pode ser determinada a partir da equação:

$$G_{nd} = G_o \cdot \tau_d \quad (12)$$

Onde:

$G_{nd}$  = radiação solar normal directa;

$G_o$  = radiação extraterrestre que é medida num plano normal a radiação num determinado dia do ano;

$\tau_d$  = transmissividade atmosférica para a radiação solar directa.

Devido ao deslocamento do sol a radiação solar directa poderá ser obtida a partir da equação:

$$G_d = G_o \tau_d \cos \theta_z \quad (13)$$

Onde:

$G_d$  = radiação solar directa que incide sobre uma superfície e vista de diversos pontos;

$\theta_z$  = ângulo zenital solar.

E para a determinação da radiação extraterrestre  $G_o$  a equação:

$$G_o = S \left( 1 + 0,33 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (14)$$

Aqui  $S$  representa a constante solar, a energia do sol por unidade de tempo, recebida por uma unidade de área de uma superfície perpendicular a direcção de propagação da radiação, correspondente a distância da terra ao sol, fora da atmosfera terrestre.

Para o teste do modelo foram usados dados de Radiação solar medidos na estação radiométrica do programa de investigação em energias renováveis da UEM localizada no terraço do Edifício onde funciona o Departamento de Física da Faculdade de Ciências na cidade de Maputo, situada à 25°35'10 S de latitude e 32°35'39 E de longitude com a altitude de 65 m. A estação encontra-se ainda em fase de desenvolvimento e os instrumentos precisam ainda de ser calibrados.

Foram seleccionadas medições da radiação solar directa em dias de céu limpo em Maputo correspondentes aos meses de Abril, Junho e Julho de 2006 para a comparação com os resultados obtidos a partir do modelo já que este apenas oferece valores para dia de céu limpo. Contudo, com o fim de avaliar de facto a praticabilidade do modelo, foram

também considerados alguns dados medidos em dia de céu coberto. Com estas medidas elaboraram-se tabelas de radiação média horária.

Utilizaram-se dados da radiação solar directa registados nos dias 14/04, 27/04 e 14/06, dados de dias de céu limpo, e dos dias 16/06, 03/07 e 08/07, dados de céu coberto. Estes dados são necessário para que se possa fazer uma avaliação do nível de fiabilidade do modelo.

O modelo foi testado num ambiente do *Matlab* com o cálculo da declinação, seguindo-se o ângulo horário e com a latitude determina-se o coseno do ângulo zenital ( $\cos\theta_z$ ). Tendo estes valores prossegue-se com a obtenção da transmissividade para o céu limpo que envolve parâmetros propostos por Hottel e finalmente o teste do modelo.

Para a avaliação do modelo de estimativa de radiação solar directa para um dia de céu limpo, realizaram-se análises de regressão entre dados observados num dia de céu limpo na estação radiométrica e dados estimados pelo modelo, executando-se um conjunto de dados que serão considerados como independentes, para a validação das estimativas.

O conjunto de dados considerados independentes referem-se ao período compreendido entre as 6 e 19 horas. A validade das equações de estimativa fez-se pela comparação entre os dados observados e estimados por meio de uma análise de regressão. Para verificar a significância e a exactidão da correlação calcula-se o índice de concordância de Willmott ( $d$ ), descrito por Willmott et al. (1995) e citado por Hernandes et al. (2004). O índice  $d$  é obtido pela seguinte equação:

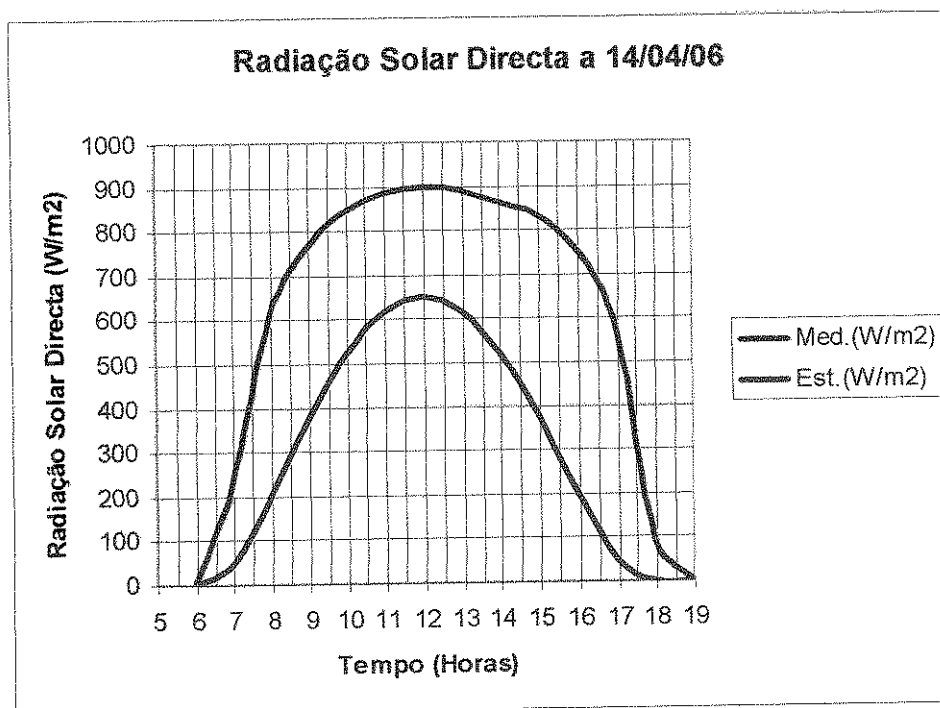
$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (15)$$

Em que,  $P_i$  é o valor previsto,  $O_i$  é o valor observado e  $O$  é a média dos valores observados.

## CAPÍTULO 4

### Resultados e Discussão

Para os dias referidos no capítulo 3 foram estimados valores da radiação solar directa que se podem observar nas tabelas em anexo. Pela análise destes valores, verifica-se que os dados estimados pelo modelo repetem-se. Acontece devido a variação do ângulo horário, pois este entra na forma de coseno e esta é uma função par e por este ser um modelo padrão que estima a média horária e a variação angular para cada lado partindo do nascer do sol, tomando em conta o meio dia solar como ponto de referencia, isto é a variação é a mesma tanto para manhã como para a tarde. As figuras 4.1, 4.2 e 4.3 são gráficos da radiação solar directa medida a partir do pireliómetro e estimada a partir do modelo, em três dias de céu limpo.



**Figura 4.1:** Gráfico da radiação solar directa, medida instrumentalmente e estimada a partir do modelo, para a condição de céu limpo à 14/04/06.

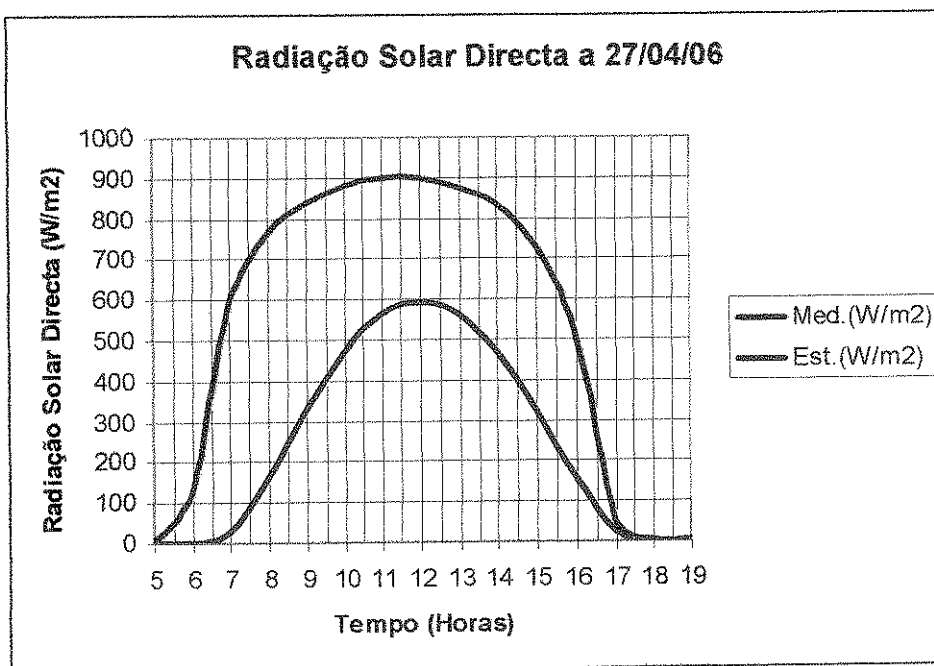


Figura 4.2: Gráfico da radiação solar directa, medida instrumentalmente e estimada a partir do modelo, para a condição de céu limpo à 27/04/06.

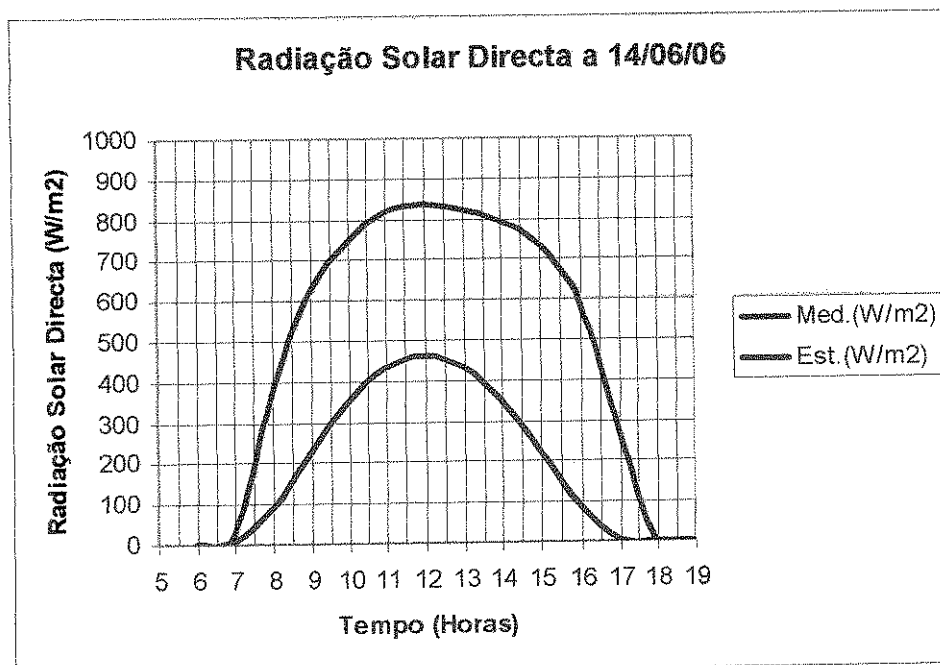


Figura 4.3: Gráfico da radiação solar directa, medida instrumentalmente e estimada a partir do modelo, para a condição de céu limpo à 14/06/06.

Observa-se que apesar de não coincidirem as curvas apresentam um comportamento semelhante e os picos verificam-se sensivelmente no mesmo período mas há que realçar uma diferença em termos de valores. A diferença de valores pode ser explicada pelas condições impostas na concepção do modelo, como a que este faz a previsão para dias de céu limpo, por outro lado não tem em consideração as perturbações que a terra sofre nos seus movimentos de rotação e translação. Outra razão poderá ser o facto de os instrumentos da estação não se terem beneficiado de calibração.

Em condições normais o modelo deveria ter valores iguais ou aproximados pois este não leva em conta todos os parâmetros que caracterizam a atenuação da radiação na atmosfera terrestre, ao passo que o instrumento de medição da radiação mede-a depois desta ter atravessado todos os factores atenuantes. As figuras 4.4, 4.5 e 4.6, mostram gráficos da radiação solar directa obtida a partir da medição instrumental e estimada a partir do modelo para dias de céu parcialmente coberto.

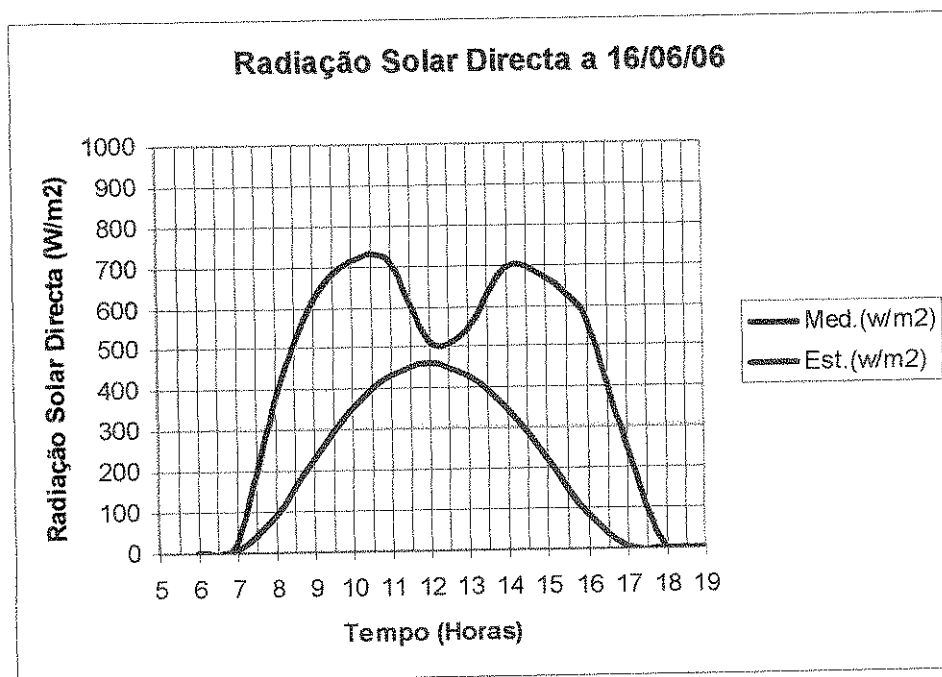


Figura 4.4: Gráfico da radiação solar directa, em um dia de céu parcialmente coberto, obtida através de medição instrumental e estimada a partir do modelo à 16/06/06.



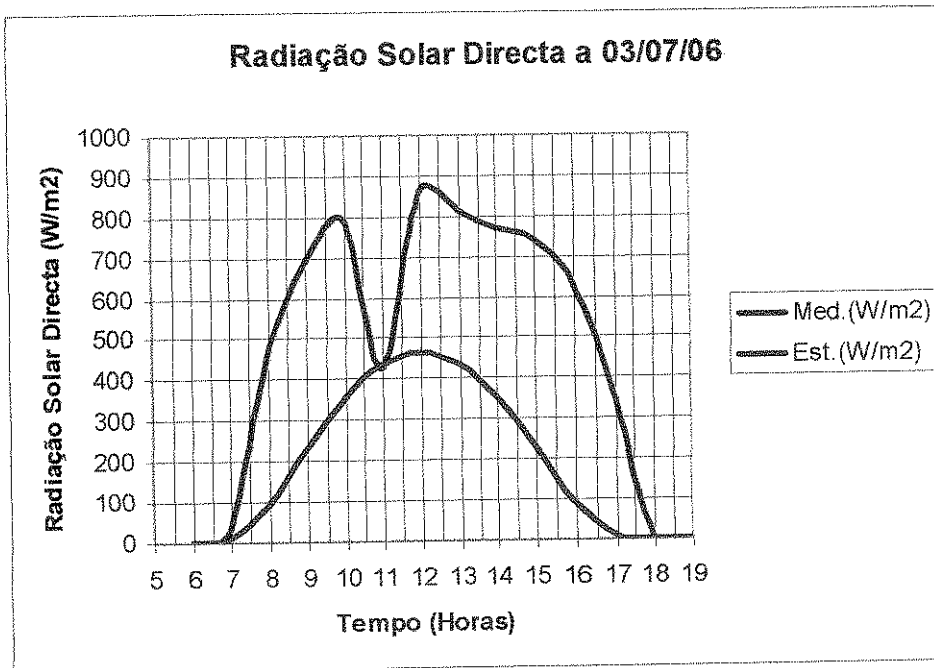


Figura 4.5: Gráfico da radiação solar directa, em um dia de céu parcialmente coberto, obtida através de medição instrumental e estimada a partir do modelo à 03/07/06.

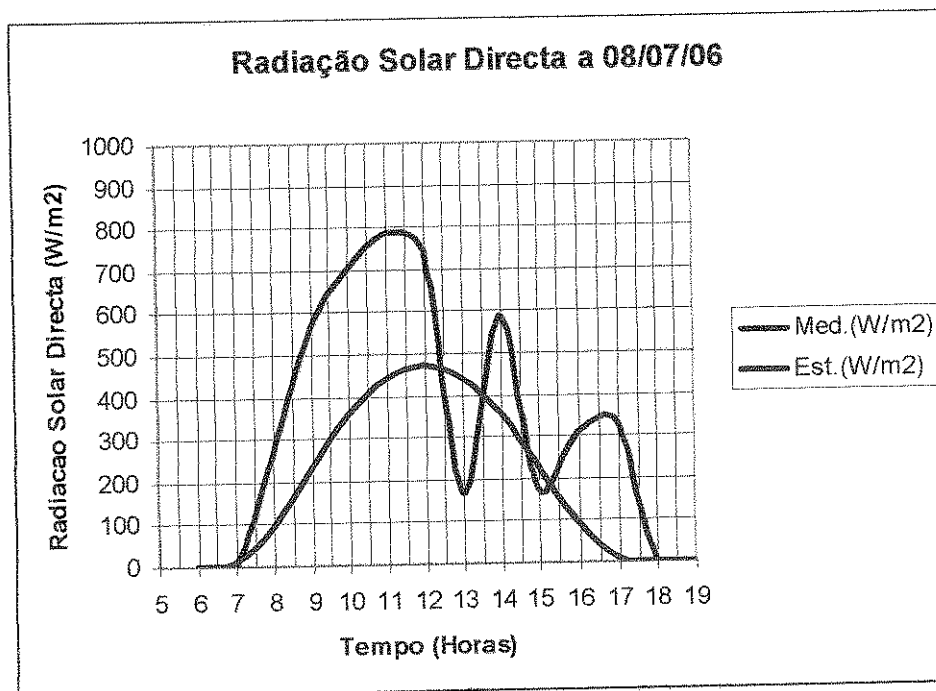


Figura 4.6: Gráfico da radiação solar directa, em um dia de céu parcialmente coberto, obtida através de medição instrumental e estimada a partir do modelo à 08/07/06.

Para os dias de céu coberto o modelo já não serve pois não segue o comportamento da radiação solar directa nesses dias. Observa-se que os gráficos possuem oscilações: eles começam por crescer mas num determinado ponto eles decrescem, depois de um tempo voltam a crescer mas no final decrescem, apresentando deste modo diversos picos. Isto pode ser causado pela influencia de certos factores (nuvens) que alteram o seu comportamento. Este facto é analisado a partir das curvas de regressão.

## 4.2 Relação entre os dados obtidos instrumentalmente e os estimados a partir do modelo

Nos gráficos que se apresentam neste sub-capítulo mostram-se as relações entre a radiação solar directa em dias de céu limpo medida a partir do pireliómetro da estação radiométrica localizada no Terraço do Edifício do Departamento de Física da UEM e da obtida a partir do modelo, bem como as equações de regressão com os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ).

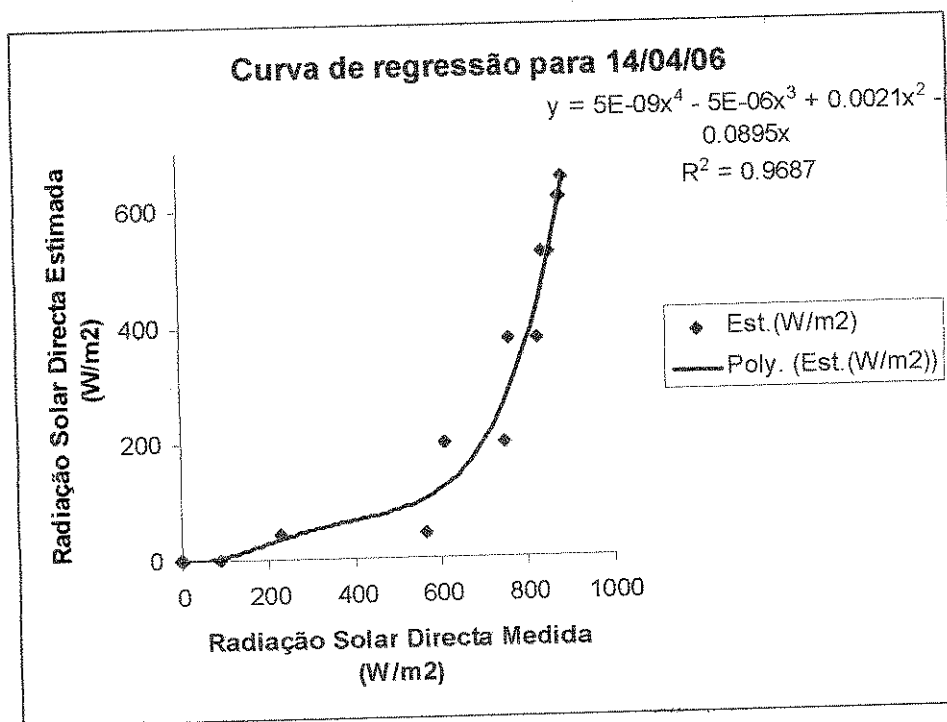
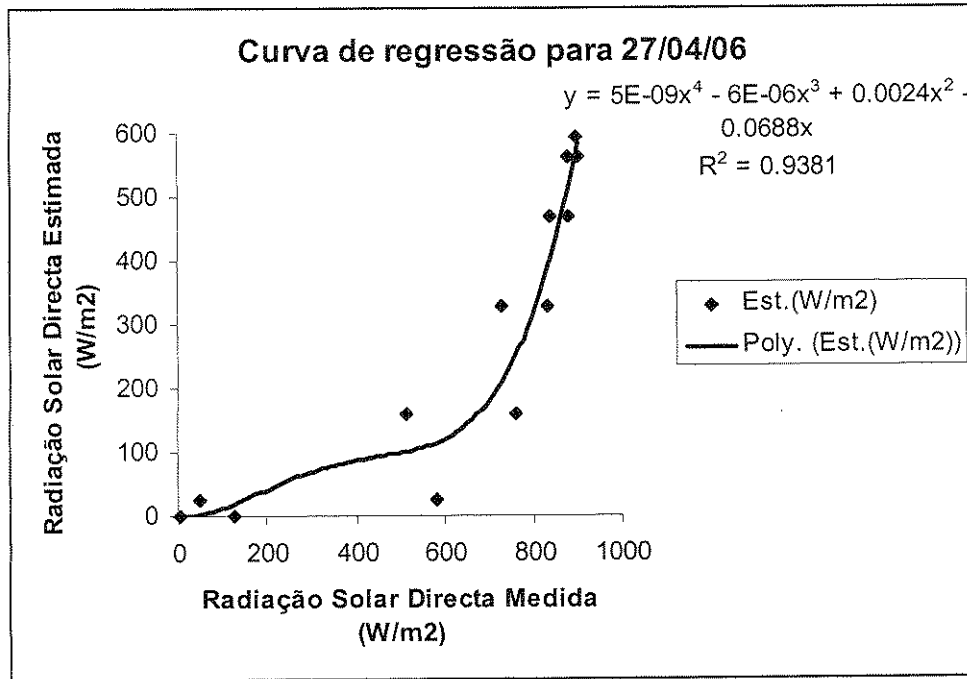
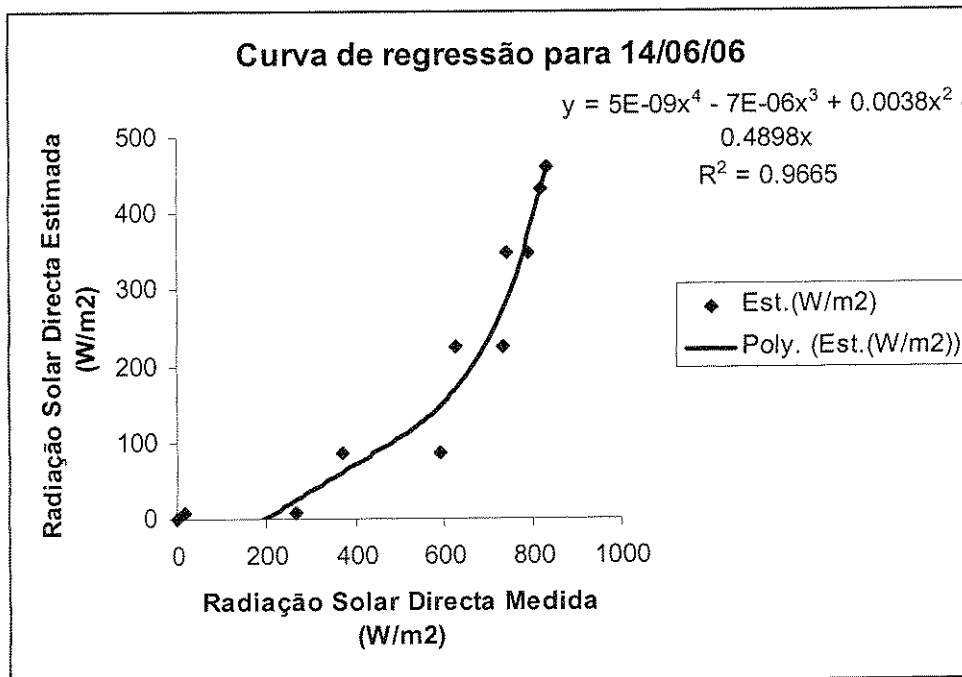


Figura 4.7: Curva de regressão para o dia 14/04/06



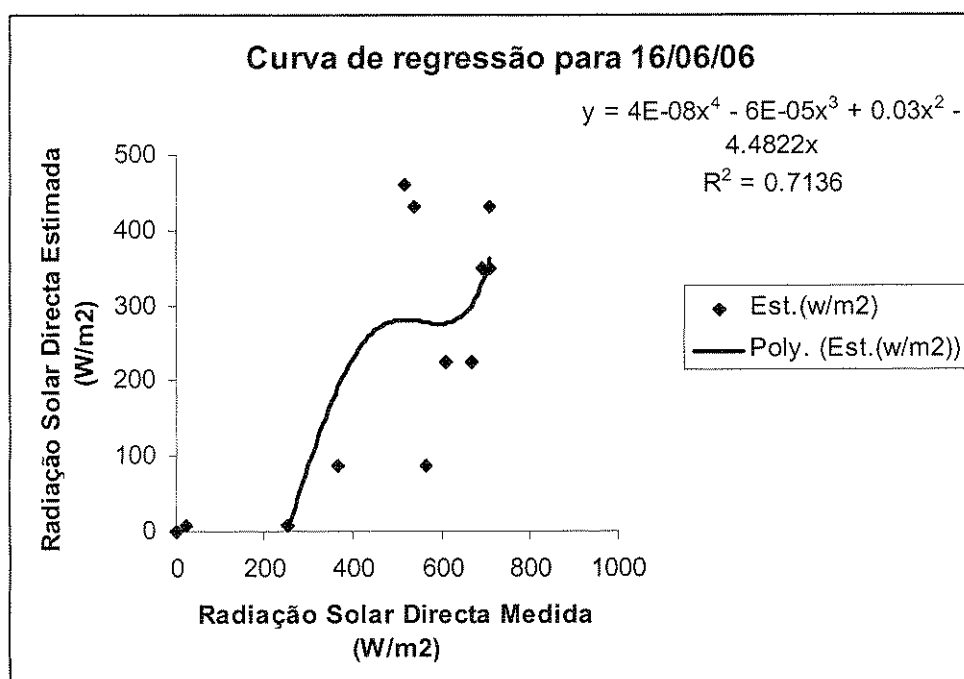
**Figura 4.8:** Curva de regressão para o dia 27/04/06



**Figura 4.9:** Curva de regressão para o dia 14/06/06

Para os três gráficos que representam as correlações entre os valores medidos e estimados, o coeficiente de determinação possui valores que se aproximam à unidade, 0.97, 0.94 e 0.97 respectivamente, o que significa que não se está muito longe da real situação porque se por acaso os coeficientes resultarem na unidade, significa que o valor estimado é igual ao medido.

As figuras 4.10, 4.11 e 4.12 são gráficos de correlação entre os dados obtidos instrumentalmente e os obtidos a partir do modelo para dias de céu coberto.



**Figura 4.10** Curva de regressão para o dia 16/06/06

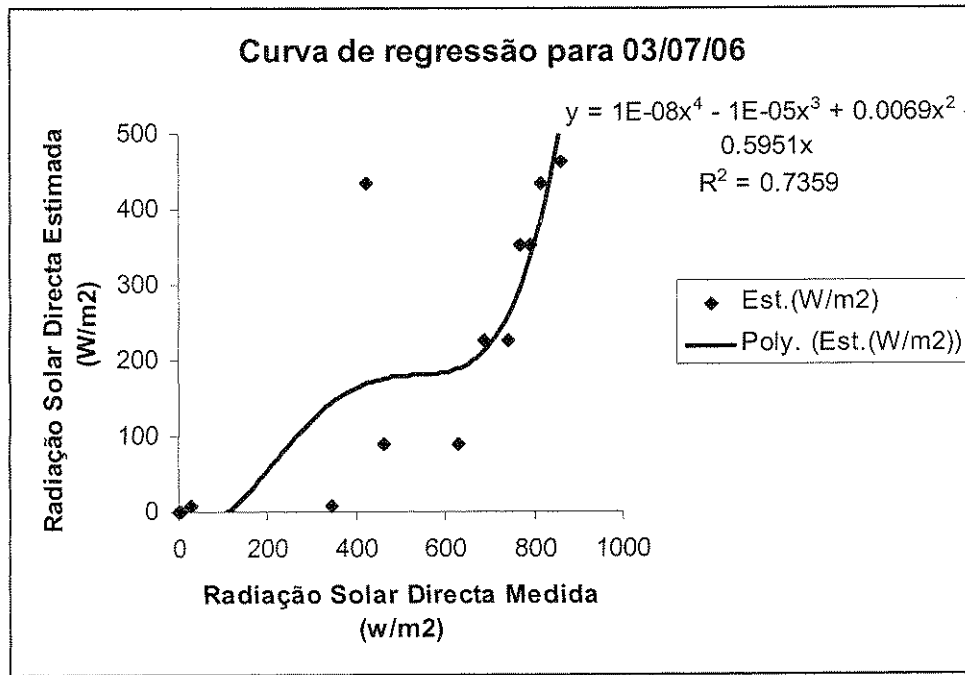


Figura 4.11: Curva de regressão para o dia 03/07/06

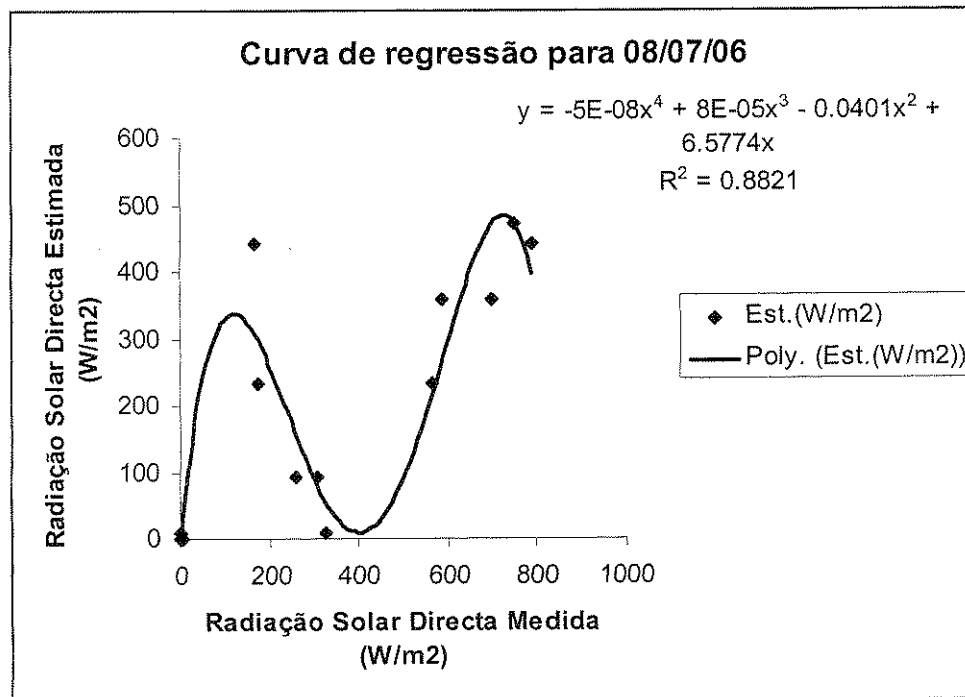


Figura 4.12: Curva de regressão para o dia 08/07/06

Estas curvas apresentam valores do coeficiente de determinação, 0,71, 0.74, 0.88 respectivamente, que se afastam substancialmente da unidade, isto é, a diferença entre estes e a unidade mostra que o modelo não pode ser utilizado com bom nível de confiança para dias de céu coberto.

O testes de validade das estimativas da radiação solar directa em dias de céu limpo e coberto, foram feitos com base em dados da estação radiométrica instalada no edifício onde funciona o Departamento de Física da Faculdade de Ciências da UEM na cidade de Maputo. Para o efeito usaram-se equações de regressão aplicadas sobre um conjunto de dados considerados independentes, estabelecendo-se uma correlacção entre valores estimados e os obtidos a partir do pireliómetro, permitindo a obtenção do coeficientes  $R^2$  e a determinação dos índices  $d$  de concordância de Willmott (para os dias em questão) que também por sua vez se relacionam com a unidade. Quanto mais se aproxima da unidade eleva-se o nível de concordância. Os valores dos coeficientes  $R^2$  e dos índices  $d$  são apresentados na tabela (4.1).

**Tabela 4.1** Índice de concordância de Willmott e o coeficiente de determinação do teste de validade das equações de estimativa.

	<b>Data</b>	<b>d</b>	<b><math>R^2</math></b>
<b>Dias de céu limpo</b>	14/04/06	0,75	0.97
	27/04/06	0.77	0.94
	14/06/06	0.72	0.97
<b>Dias de céu coberto</b>	16/06/06	0.75	0.71
	03/07/06	0.64	0.74
	08/07/06	0.76	0.88

Verifica-se que o teste de validação das estimativas apresentou para os dias de céu limpo valores do coeficiente de determinação( $R^2$ ) superiores a 0.94 e para os dias de céu coberto valores inferiores a 0.82. Para o índice de concordância ( $d$ ) apresentaram-se valores médios superiores a 0.74 para dias de céu limpo e valores médios inferiores a

0.74 para dias de céu coberto. Estas constatações permitem avaliar os resultados obtidos, indicando um bom nível de confiança.

### 4.3 Origem das flutuações

Os resultados obtidos a partir do modelo distanciam-se em termos de número dos valores observados muito provavelmente porque o modelo é concebido levando em conta a transmissividade monocromática e é sabido que a transmissividade atmosférica é heterocromática, possui vários comprimentos de onda.

O cálculo da transmissividade é determinado pelo tipo de clima. O clima varia consoante a região e existem diversos factores, como a situação geográfica, o relevo, correntes de ar, a massa do ar, etc., que contribuem para esta variação. Para o caso o clima dominante é o tropical e este é constantemente afectado pelos factores descritos que entram para o cálculo da transmissividade. Aconteceria que para cada dia esta teria de ser alterada devido a cada situação climática.

Nesta pesquisa não foi possível a determinação dos parâmetros (coeficiente de turbidez, o comprimento de onda, o tamanho da distribuição dos aerossóis) descritos pelos factores que afectam o clima e consequentemente a radiação solar e que também poderiam entrar para o cálculo da transmissividade heterocromática.

### 4.4 Limitações do modelo

O modelo é concebido para condições de céu limpo (atmosfera padrão), podendo a partir dele se obter uma ideia sobre o potencial da energia solar na região, o que poderá auxiliar na elaboração de projectos de uso e aplicação da energia solar. Para condições de céu nublado este apresenta consideráveis margens de erro e já não poderá servir. Por se tratar de um modelo que de princípio servirá de base para prováveis estudos e análises, para o

teste optou-se pelo uso de dados de alguns dias céu limpo e coberto somente de uma estação(UEM).

Portanto, se por um lado pode-se calcular com precisão a intensidade de radiação solar que atingiria o solo caso não houvessem perdas na atmosfera, por outro lado é bastante difícil o cálculo teórico das perdas verificadas, dada a complexidade dos fenómenos de absorção e dispersão desta radiação num meio não homogéneo como é a atmosfera terrestre.

Do ponto de vista das aplicações da energia solar não é sempre obrigatório ter dados diários precisos, mas sim intensidades médias que representem satisfatoriamente a quantidade de energia disponível no período. Assim sendo, procurou-se obter neste trabalho um modelo simplificado para as perdas da radiação solar na atmosfera terrestre, destinada principalmente à céus limpos, que de uma forma geral fornece a ideia sobre o comportamento da radiação solar em um dado local caso não haja forte interferência atmosférica.



# CAPÍTULO 5

## Conclusões e Recomendações

### 5.1 Conclusões

A necessidade de se conhecer o comportamento e a disponibilidade da radiação solar é maior e crescente, contudo a falta de instrumentos apropriados torna escassa a informação limitando deste modo o conhecimento. O desenho e concepção de modelos para a estimativa deste elemento importante na dinâmica da terra e da atmosfera é uma alternativa para a solução desta necessidade.

Embora o modelo não tenha considerado a dependência da absorção e dispersão com o comprimento de onda da radiação electromagnética luminosa, os resultados deste modelo apresentam um comportamento semelhante ao do resultado instrumental e procurou contribuir nas estimativas que podem ser feitas para se obter dados regionalizados.

O modelo aqui apresentado, com as características que apresenta e para a finalidade que se lhe é proposto, mostra que poderá servir de base para possíveis trabalhos e desenho de sistemas de tecnologias de energia solar com uma relativa margem de erro aceitável, dado que oferece uma ideia aproximada da radiação solar disponível distribuída no tempo e espaço.

## 5.2 Recomendações

Existe uma enorme necessidade em se conhecer os potenciais e a disponibilidade da energia solar, especialmente a componente directa da radiação solar, por toda a região do país. Para tal recomenda-se:

- O desenvolvimento de trabalhos complementares onde se propõe analisar as distribuições da radiação solar directa na superfície terrestre para dias nublados.
- Que se criem condições para que este projecto se torne uma realidade pois este trará enormes benefícios.

## Referências Bibliográficas

Clarke, G.L. (1954), "Elements of Ecology", Harvard University, John Wiley and Sons, New York, USA.

Cuamba et al. (2004), "General characterisation of the solar radiation Behaviour in Mozambique", Euro Sun.

Da Mata, L.A. (1996), "Características da incidência da radiação solar em Moçambique", INAM, Maputo, Moçambique.

Daniels, F. and Duffie, John A. (1955), "Solar Energy research", University of Wisconsin, Madison, USA.

Duffie and Beckman. (1991), "Solar Engineering of thermal Processes", 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley and Sons. Inc, New York, USA.

Gonzales, R.M.P. (1998), "Estudo da absorção da radiação solar pela atmosfera em aplicações fotovoltaicas", Tese de Mestrado, UICAMP, Campinas, Brasil.

Hernandes et al. (2004), "Seasonal variation of solar radiation at an open site and a semideciduous forest understory", Rev. Árvore, vol.28, n<sup>o</sup>2,p.167-172, ISSN, Brazil.

Macome, M.A. (2004), "Characterization and Improvement of a direct solar radiation detector", Tese de Mestrado, University of KwaZulu-Natal, Durban, SA.

McDaniel's, D.K. (1929), "The Sun: Our Future Energy Source", 2<sup>nd</sup> Ed., University of Oregon, Eugene (Oregon), USA.

Moura et al.(em preparação), "Determinação do factor de calibração de um pireliómetro",vol.12, p39-48, Botucatu, SP, Brasil.

Pecker e Schatzman (1962), "Astronomie", Encyclopédie de la Pléiade, vol. XIII.

Plante, R.H. (1983), "Solar Domestic Hot Water: A practical Guide to Installation and Understanding", John Wiley and Sons, New York, USA.

Tavares, J.F.S. (1990), "Ciência e Tecnologia: A Física-Chave do Progresso", Resomnia Editores, Lisboa, Portugal.

Cresce Brasil (Crescesb), 2006, "Tutorial: Energia Solar – Princípios e Aplicações", [Online, acessado 2 Agosto 2006], URL: <http://www.Crescesb.cepel.br>.

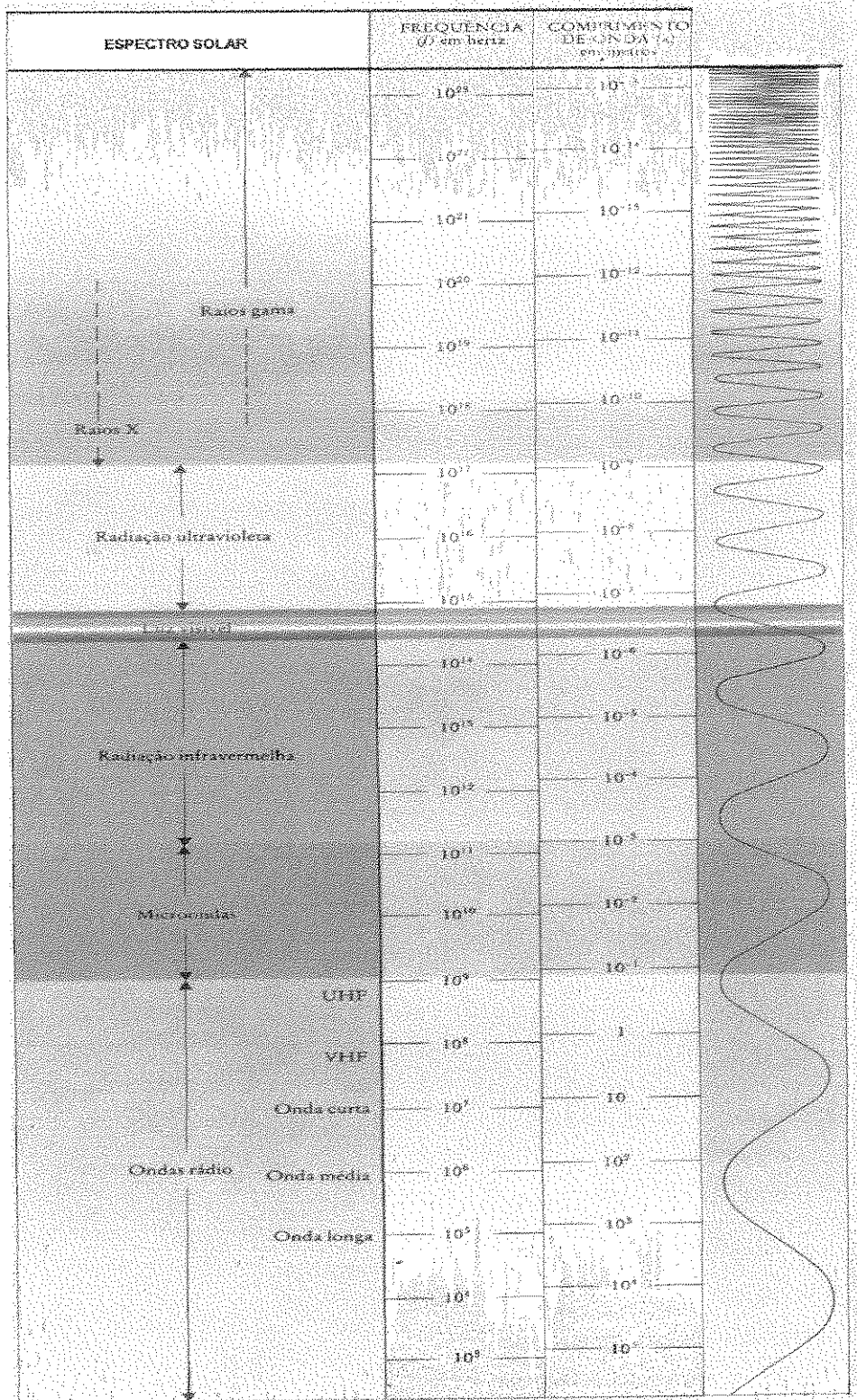
Scientific Electronic Library Online (SciELO), 2002, "Revista Árvore", [Online, acessado 2 Agosto 2006], URL: <http://www.Scielo.org>.

Climate of the Past Discussions (CPD), 2005, "Copernicus Gmblton behalf of the EGU Journal", [Online, acessado 3 Agosto 2006], URL: <http://www.overview.sref.org>.

GNU Free Documentation License (FDL), 1916, "A Enciclopédia Livre: Climas Continentais", [Online, acessado 3 Agosto 2006], URL: <http://www.wikipedia.org>.

The World Book Encyclopedia, "Encyclopedia of Solar System and Space Exploration Library", [Online, acessado 3 Agosto 2006], URL: <http://www.worlbook.com>.

Fundação para a Computação Científica Nacional (FCCN), "RCTS- Rede Ciência, Tecnologia e Sociedade", [Online, acessado 3 Agosto 2006], URL: <http://www.rets.pt>.



II.

**Tabe4.2** – Valores da radiação solar directa para o dia 14/04/06.

Dia 14 de Abril de 2006				
Hora	Med.(W/m2)	Est.(W/m2)	Med.(cal/cm2)	Est.(cal/cm2)
6	4.9759	0	0.428956897	0
7	227.7445	42.2439	19.63314655	3.6417
8	611.9799	197.6917	52.75688793	17.0424
9	767.204	374.9454	66.13827586	32.3229
10	847.0808	522.0004	73.0242069	45
11	885.9974	617.2298	76.37908621	53.2095
12	898.1953	650.0719	77.43062931	56.0407
13	890.0083	617.2298	76.72485345	53.2095
14	864.3931	522.0004	74.51664655	45
15	831.7026	374.9454	71.6985	32.3329
16	753.0739	197.6917	64.92016379	17.0186
17	568.294	42.2439	48.99086207	17.0424
18	88.02466	0	7.588332759	0
19	1.3101	0	0.112939655	0

**Tabela 4.3** – Valores da radiação solar directa para o dia 27/04/06.

Dia 27 de Abril de 2006				
Hora	Med.(W/m2)	Est.(W/m2)	Med.(cal/cm2)	Est.(cal/cm2)
6	126.0465	0	10.86607759	0
7	583.1149	26.3186	50.26852586	2.2688
8	761.8417	160.496	65.67600862	13.8359
9	834.7113	328.0377	71.95787069	28.2791
10	877.8289	469.5003	75.67490517	40.4742
11	899.8423	561.607	77.57261207	48.4144
12	898.5238	593.4302	77.45894828	51.1578
13	876.8288	561.607	75.58868966	48.4144
14	838.3172	469.5003	72.26872414	40.4742
15	730.1182	328.0377	62.94122414	28.2791
16	514.6275	160.496	44.36443966	13.8359
17	47.4653	26.3186	4.091836207	2.2688
18	3.2897	0	0.283594828	0
19	3.2071	0	0.276474138	0

**Tabela 4.4** – Valores da radiação solar directa para o dia 14/06/06.

<b>Dia 14 de Junho de 2006</b>				
<b>Hora</b>	<b>Med.(W/m2)</b>	<b>Est.(W/m2)</b>	<b>Med.(cal/cm2)</b>	<b>Est.(cal/cm2)</b>
6	0.3017	0	0.0260	0
7	20.0792	6.8873	1.7310	0.5937
8	371.3492	86.7304	32.0129	7.4768
9	623.9981	224.7387	53.7929	19.3740
10	745.0108	349.2395	64.2251	30.1069
11	817.7544	431.8652	70.4961	37.2298
12	834.4199	460.591	71.9328	39.7061
13	821.1061	431.8652	70.7850	37.2298
14	793.5051	349.2395	68.4056	30.1069
15	734.7015	224.7387	63.3363	19.3740
16	590.1091	86.7304	50.8715	7.4768
17	266.8285	6.8873	23.0025	0.5937
18	0.6199	0	0.0534	0
19	-0.0248	0	-0.0021	0

**Tabela 4.5** – Valores da radiação solar directa para o dia 16/06/06.

<b>Dia 16 de Junho de 2006</b>				
<b>Hora</b>	<b>Med.(w/m2)</b>	<b>Est.(w/m2)</b>	<b>Med.(cal/cm2)</b>	<b>Est.(cal/cm2)</b>
6	1.2233	0	0.1055	0
7	21.3067	6.7581	1.8368	0.5826
8	367.5326	86.112	31.6838	7.4234
9	610.5933	223.7713	52.6374	19.2906
10	712.3988	348.0672	61.4137	30.0058
11	710.9606	430.5771	61.2897	37.1187
12	516.1297	459.265	44.4939	39.5918
13	539.0255	430.5771	46.4677	37.1187
14	693.6648	348.0672	59.7987	30.0058
15	670.238	223.7713	57.7791	19.2906
16	566.1966	86.112	48.8101	7.4234
17	252.0268	6.7581	21.7264	0.5826
18	0.521	0	0.0449	0
19	0.4319	0	0.0372	0

**Tabela 4.6** – Valores da radiação solar directa para o dia 03/07/06.

Dia 3 de Julho de 2006				
Hora	Med.(W/m2)	Est.(W/m2)	Med.(cal/cm2)	Est.(cal/cm2)
6	0.9939	0	0.08568	0
7	27.6733	7.3099	2.38563	0.6302
8	461.7148	88.617	39.80300	7.6394
9	690.1457	227.4402	59.49532	19.6069
10	790.8043	352.3046	68.17278	30.3711
11	423.4722	435.1038	36.50622	37.5089
12	860.9135	463.8823	74.21668	39.9899
13	814.5267	435.1038	70.21782	37.5089
14	769.258	352.3046	66.31534	30.3711
15	743.3494	227.4402	64.08184	19.6069
16	632.6398	88.617	54.53791	7.6394
17	348.9742	7.3099	30.08398	0.6302
18	4.5854	0	0.39529	0
19	0.124	0	0.01069	0

**Tabela 4.7** – Valores da radiação solar directa para o dia 08/07/06.

Dia 08 de Julho de 2006				
Hora	Med.(W/m2)	Est.(W/m2)	Med.(cal/cm2)	Est.(cal/cm2)
6	0.4153	0	0.0358	0
7	1.866	8.0323	0.1609	0.6924
8	262.0778	92.0118	22.5929	7.932
9	565.9879	232.5294	48.7921	20.0456
10	701.1059	358.3197	60.4402	30.8896
11	788.4693	441.6231	67.9715	38.071
12	747.4822	470.5647	64.4381	40.5659
13	168.1577	441.6231	14.4964	38.071
14	585.813	358.3197	50.5011	30.8896
15	173.7081	232.5294	14.9748	20.0456
16	309.415	92.0118	26.6737	7.932
17	328.4176	8.0323	28.3119	0.6924
18	4.2051	0	0.3625	0
19	0.4939	0	0.0426	0