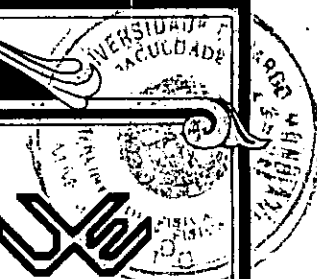




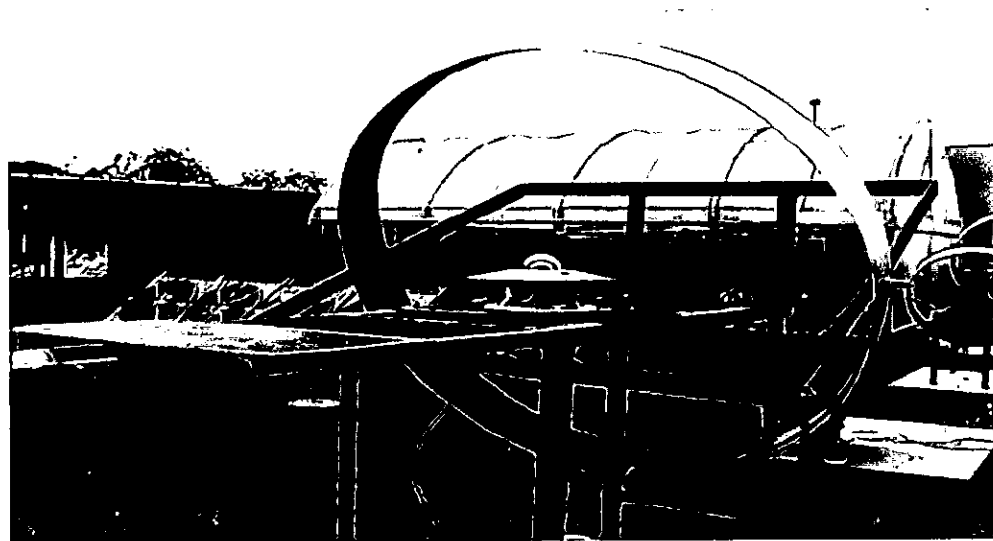
FIS-36



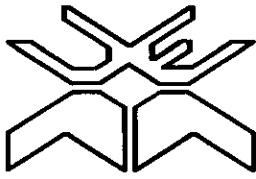
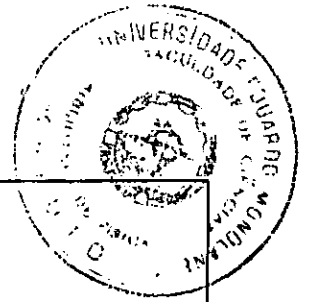
**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**TRABALHO DE LICENCIATURA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR EM**  
**MOÇAMBIQUE**



**Daniel Zefanias Quissico**  
**Maputo, Setembro de 2005**



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**TRABALHO DE LICENCIATURA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR EM  
MOÇAMBIQUE**

**Autor: Quissico, Daniel Zefanias**

**Supervisor: dr. Manuel Chenene**

**Co – Supervisor: Prof. Dr. Boaventura Cuamba**

**Setembro, 2005**

**DEDICATÓRIA**

**Aos meus Anjos , celeste e terrestre ...**

**minha família, pelo amor, incentivo,**

**carinho, paciência e apoio sempre**

**Presente e constante.**

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho tornou-se possível graças à colaboração da secção de Radiação solar do Instituto Nacional de Meteorologia (INAM) constituído por Alberto Machochomela Sele, Vasco Ernesto, Augusto Joaquim, Caldina Tcheco, Artur Mandlate e Jazalde Gomes.

Ao meu Supervisor, dr. Manuel Chenene, pela orientação atenta e cuidadosa ao longo de cada dia de trabalho e pelas tantas valiosas discussões que sem dúvida ajudarão para além da minha vida académica .

Aos Professores do Departamento de Física por fornecerem todo o apoio e ajuda de que precisei, estando sempre à disposição para trocas de opiniões e discussões, em especial ao Prof. Dr. Boaventura Chongo Cuamba na qualidade de co-supervisor.

Aos dr. Gilberto Mahumane e dr. António Joaquim Queface, que deram o suporte científico e a leitura cuidadosa da versão final deste trabalho.

Aos meus amigos da Física e de outros lugares: Felícia de Lurdes, Flávio Melo, Francisco Nostado, Maria de Fátima, dr. André Mucavel, Eng. Zeferino Zunguene, Álvaro Siteo, e tantos outros que me acompanharam em tantos constrangimentos e alegrias e souberam também entender os vários momentos de ausência.

À Cecília Fernando Coana, que me tem acompanhado e me tem dado tanto carinho, ajudando neste longo, belo e difícil processo de crescimento.

À Felícia de Lurdes, exemplo de força e persistência, pelo carinho dado ao longo deste trabalho.

Aos meus pais, Francisco Zefanias Quissico e Helena Monjane, que me têm dado respaldo, atenção e carinho em todos os momentos que precisei. Enfim, ao Armindo Sumburane, pelas proveitosas discussões e constante incentivo para prosseguir o caminho que escolhi.

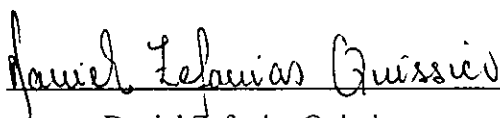
*" A mente que se abre a uma nova ideia  
jamais volta ao seu tamanho original"*

*Albert Einstein(1879-1955)*

**DECLARAÇÃO DE HONRA**

Declaro que este trabalho é da minha autoria e resulta da minha investigação. Esta é a primeira vez que o submeto para obter um grau académico numa instituição educacional.

Maputo, 13 de Setembro de 2005

  
Daniel Zefanias Quissico

## RESUMO

O Sol envia para o espaço uma grande quantidade de energia, que se propaga em todas as direcções, denominada energia radiante ou radiação. Daí a designação de radiação solar à energia proveniente do Sol.

A Terra recebe apenas uma pequena parte da energia produzida pelo Sol, responsável pela continuidade de vida em nosso planeta. Esta energia pode ser utilizada pelo homem nas mais diferentes formas, como por exemplo, no aquecimento de água, secagem de produtos agrícolas, geração de vapor, geração de energia eléctrica, climatização de ambientes e outras.

Recorrendo às leis fundamentais da Física é possível avaliar a quantidade da radiação que chega à Terra e estimar, em cada instante, as várias formas que a energia radiante solar assume. Pode bem dizer-se que tal constitui uma vitória do entendimento humano.

É da análise e da aplicação das leis da Física à determinação da disponibilidade da radiação solar em Moçambique que se ocupa o presente trabalho.

Depois de analisar o espectro da radiação solar, e a sua distribuição no topo da atmosfera em função da latitude, para as várias épocas do ano, estuda-se o efeito da atmosfera da Terra na radiação solar, o que conduz à uma depleção sistemática desta devido, principalmente, à absorção, à difusão e ao efeito das nuvens. Apresenta-se depois a distribuição da radiação solar em Moçambique e indicam-se métodos para a sua avaliação e para a sua medição.

Por fim, analisou-se os dados disponíveis para Moçambique, propôs-se uma correlação para estimar a radiação global, difusa e directa. Apresentou-se também o processo para a geração de sequências mensais dos índices de claridade atmosférica.

## ABREVIATURAS

- a : Coeficiente regreção de angostrom  
b : Coeficiente de regreção de angostrom  
Abr: Abril  
Ago: Agosto  
Bei: Beira  
Chk: Chokwe  
Chi: Chimoio  
dn : dia do ano  
Dez: Dezembro  
Fev: Fevereiro  
Go : irradiância espectral no topo da atmosfera (distância solar média)  
Ho : irradiância espectral no topo da atmosfera (distância solar média)  
Ibane: Inhambane  
Jan: Janeiro  
Jul: Julho  
Jun: Junho  
 $K_d$ : factor de correcção para a radiação difusa  
 $K_t$ : Coeficiente de transparência  
Lch: Lichinga  
Lum: Lumbo  
Mai: Maio  
Mar: Março  
Mpt: Maputo  
n : Insolação real  
N: Insolação Astronómica  
Nov: Novembro  
Npl: Nampula  
Out: Outubro  
Pb: Pemba  
Set: Setembro  
Tet: Tete  
TSV: Tempo solar verdadeiro  
Z: Ângulo zenital solar aparente  
 $\delta$ : Declinação solar  
 $\varphi$ : Latitude  
 $\lambda$ : Longitude; comprimento de onda

## LISTA DE FIGURAS

Figuras	Páginas
Fig 2.1 Espectro electromagnético .....	7
Fig 2.2 Circulo de horizontal celeste do observador.....	10
Fig 2.3 Radiação global e suas componentes.....	20
Fig 2.4 Pireliômetro Eppley NIP.....	21
Fig 2.5 Piranómetro Epley PSP com painel.....	22
Fig 2.6 Piranómetro Epley PSP acoplado ao nel de sombra.....	23
Fig 2.7 Heliógrafo Campbel .....	24
Fig 4.1 Radiação solar extraterrestre.....	33
Fig 4.2 Variação da duração do dia solar.....	33
Fig 4.3 Variação da declinação do sol.....	34



Tabelas	Páginas
Tabela 2.1 Comprimento de onda e as cores correspondentes.....	8
Tabela 2.2 Equações para o cálculo do factor de radiação difusa.....	18
Tabela 2.3 Equações para o cálculo do factor de radiação directa.....	19
Tabela 3.1 Estações Actinométricas e parâmetros médidos.....	26
Tabela 3.2 Constantes Climáticas.....	28
Tabela 4.1 Coeficiente de correlação de determinação e erro relativo.....	32
Tabela 4.2 Radiação Astronómica.....	37
Tabela 4.3 Insolação Astronómica.....	38
Tabela 4.2.1 Radiação global.....	39
Tabela 4.2.2 Radiação difusa.....	40
Tabela 4.2.3 Radiação directa.....	40
Tabela 4.2.4 Insolação observada.....	41
Tabela 4.2.5 Coeficientes para a redução de quantidade de radiação solar por meio de distância terra-sol.....	42

## ÍNDICE GERAL

ÍNDICE	PÁGINA
Dedicatória.....	I
Agradecimentos.....	II
Declaração de honra.....	III
Resumo .....	IV
<b>CAPÍTULO I :INTRODUÇÃO, MOTIVAÇÃO E OBJECTIVO</b>	
1. Introdução .....	1
1.2. Motivação.....	2
1.3. Objectivos do trabalho.....	3
1.3.1. Objectivos gerais.....	3
1.3.2. Objectivos específicos.....	3
<b>CAPÍTULO II : FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	
2.1. O Sol e a origem da energia solar.....	4
2.1.1. A Distância Terra - Sol .....	9
2.1.2. Declinação solar .....	9
2.1.3. Posição do sol relativamente a superfícies horizontais.....	10
2.1.4. Atenuação da radiação solar pela atmosfera.....	11
2.1.5. Componentes da radiação solar à superfície.....	14
2.1.6. A Constante solar.....	14
2.1.7. Radiação no topo da atmosfera.....	14
2.1.8. Cálculo do ângulo zenital solar.....	14
2.2. A ligação da radiação solar global com outras variáveis meteorológicas.....	16
2.3. Tratamento estatístico da radiação solar.....	17
2.4. Coeficiente de transparência da atmosfera terrestre.....	18
2.5. Descrição de equipamentos.....	21
2.5.1. Medição de radiação solar.....	23
2.5.2. Medição de insolação.....	25
2.5.3. O heliógrafo de campbell- Stokes.....	26

**CAPÍTULO III : DADOS E METODOLOGIA**

3.1. Dados .....	28
3.2. Metodologia.....	29
3.2.1. Determinação da radiação solar.....	29
3.2.2. Classificação do Clima.....	30

**CAPÍTULO IV : RESULTADOS E DISCUSSÃO**

4.1. Análise dos dados.....	29
4.2. Radiação extraterrestre, insolação astronómica e declinação do Sol.....	30
4.3. Radiação global estimada.....	31

**CAPÍTULO V: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

5.1. Conclusões.....	33
5.2. Recomendações.....	33
6. Bibliografia.....	34

**ANEXOS**

Anexo A: Tabelas da radiação extraterrestre, variação da duração do dia e da declinação.....	36
Anexo B: Apresentação dos dados da radiação global, difusa, directa, insolação e coeficientes de redução da radiação solar.....	38
Anexo C: Apresentação dos gráficos que comparam a radiação observada e a radiação estimada.....	41
Anexo D: Apresentação dos gráficos e dados da radiação observada por região ....	44

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO, OBJECTIVOS E MOTIVAÇÃO**

#### **1.1 Introdução**

Pode-se dizer que todas as formas de energia existentes na terra são provenientes directa ou indirectamente do Sol. A energia solar constitui a verdadeira causa de todos os processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem na Terra, responsáveis pelas condições meteorológicas pelas circulações oceânicas, pela modelação da crosta terrestre e por todos fenómenos biológicos.

A radiação solar é o factor principal do clima, determina as formas da circulação geral da atmosfera e dos oceanos e, por fim, origina, condiciona e mantém o ciclo hidrológico em escala planetária.

O Sol fornece a energia que faz crescer as plantas e, portanto, mantém a vida e a luz que nos ilumina. O desenvolvimento cultural e social do homem e a sua diferenciação dos outros animais, só foi possível pela capacidade que tem de concentrar, controlar e explorar fontes de energia exteriores a si próprio.

Os raios solares ao atravessarem a atmosfera sofrem os conhecidos acidentes de propagação da radiação, tais como a reflexão, a refacção, a difracção, absorção e a difusão. A reflexão, a refacção e a difracção da luz originam vários fenómenos ópticos da atmosfera, designadamente o arco-íris, os halos, as coroas, etc.

A difusão da luz, que permite ver os objectos não iluminados directamente, à sombra, é a causa da cor azul do céu e das tonalidades amarelo-avermelhadas dos crepúsculos e das alvoradas.

O aquecimento desigual da atmosfera e da superfície do globo terrestre é devido à absorção da radiação solar, é a causa da circulação geral da atmosfera, que, por sua vez, induz os grandes sistemas de correntes marítimas que transportam não só grandes massas de água como grandes quantidades de calor, que condicionam os climas. Os ventos e as vagas do mar constituem, assim fontes secundárias e renováveis de energia solar.

A atmosfera actual da terra resultou da interacção da radiação solar com a matéria que, na fase inicial, constituía a atmosfera e a parte mais condensada do planeta.

A intensidade da radiação solar recebida na superfície do globo é muito variável de ponto para ponto, de latitude para latitude, devido, entre outras causas, à transmissividade não uniforme da atmosfera e à variação da nebulosidade. A atmosfera filtra a luz solar, absorvendo a maior parte da radiação ultravioleta e parte da infravermelha, mantendo as condições propícias à vida, tal como a concebemos.

Recorrendo às leis fundamentais da Física é possível avaliar a quantidade da radiação solar que chega à Terra, determinar a sua distribuição planetária e estimar, em cada instante, as várias formas que a energia radiante solar assume.

Como a maior parte das estações meteorológicas de superfície não dispõem de instrumentos apropriados para medir a radiação solar global, os investigadores tentam obter uma relação que estime o seu valor mais próximo possível do valor real. Existem variedades de métodos citados pela literatura com as opções de estimativas baseadas nas variáveis meteorológicas mais disponíveis nas estações.

## **1.2 Motivação**

O problema da urgência de fontes de energia alternativa tem atraído uma atenção especial ao desenvolvimento dos métodos do uso directo de energia solar. A quantidade de energia que chega a superfície da terra está sendo pouco aproveitada comparativamente a necessidade desta para o uso.

Para solução de diversos problemas de engenharia de energia solar é necessário acima de tudo ter-se dados de radiação solar. As grandes vantagens da energia solar são, primeiramente, o facto de ser uma fonte de energia gratuita e praticamente inesgotável (renovável). Assim, além de gratuita, ela está amplamente disponível. A outra grande vantagem é que ela não polui o meio ambiente e portanto, é ecologicamente correcta, convivendo harmoniosamente com as águas, o ar, as matas, os animais e o ser humano.

Actualmente presencia-se um forte incremento na utilização da energia solar no Mundo e em Moçambique particularmente. Da mesma forma, aumentou a necessidade de se aproveitar, ao máximo possível e ao menor custo, o potencial deste recurso energético, tornando-o cada vez mais competitivo num âmbito mais amplo de aplicações.

Ao estudar as características da radiação solar, os princípios de funcionamento dos componentes e as formas de conciliar estes dois factores para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, estará sendo feita uma contribuição valiosa para o desenvolvimento desta tecnologia.

### **1.3 Objectivos do trabalho**

#### **1.3.1 Objectivos gerais**

A finalidade deste trabalho é auxiliar no planeamento e execução de programas de fornecimento de energia rural que utilizem a tecnologia fotovoltaica.

#### **1.3.2 Objectivos específicos**

- Estudar a radiação solar em Moçambique, tomando em consideração as diversas componentes da radiação (global, difusa e directa) para um período de 30 anos (1970-2000).
- A valiar a disponibilidade de radiação solar incidente no plano horizontal, estudando o seu comportamento e quantificando a sua disponibilidade em locais onde se conheçam as médias mensais dos índices de claridade atmosférica.
- Estimar a radiação solar em Moçambique usando os modelos teóricos, amplamente difundidos na literatura.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1 O Sol e a origem da energia solar

O Sol é uma estrela comum, constituída principalmente por hidrogénio e com uma temperatura à superfície da ordem de 6000 K. É um corpo gasoso animado de movimento de rotação relativamente lento, com um diâmetro de  $1.4 \times 10^6$  km.

A energia emitida pelo Sol distribui-se em todas as direcções propagando-se pela vastidão do espaço, só uma fracção diminuta dessa energia é intersectada pela Terra. Mesmo assim é enorme e da ordem de  $3 \times 10^{11}$  kW.

Para explicar a quantidade de energia prodigiosa, emitida pelo Sol, têm sido apresentadas numerosas teorias. Começa-se por se referir às antigas teorias da combustão Lord Kelvin (1885), à hipótese da contracção de Helmholtz (1880) e às teorias baseadas na radioactividade natural.

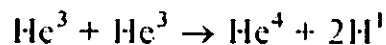
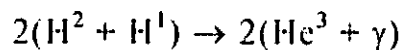
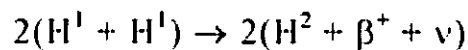
Estas teorias não eram adequadas para explicar a energia solar que se observa e levariam a admitir para o Sol uma vida média muito curta, absolutamente irrisória. Por outro lado, não são consistentes com o conhecimento que hoje se dispõe sobre a composição do Sol, o seu estado físico e a sua estrutura.

O problema da origem solar começou a ser encarado mais tarde por Eddington (1920) duma forma mais objectiva, a partir do estudo da constituição do interior das estrelas e da forma como emitiam energia. Houtermans, um fisico austríaco, e Atkinson (1898-1982), um astrónomo britânico formularam a hipótese de que a produção de energia no interior das estrelas, e portanto do Sol, se podia atribuir a transformações nucleares causadas pela temperatura extremamente elevada do seu interior com a formação de núcleos de hélio a partir de núcleos de Hidrogénio. Esta hipótese aproxima-se, nas suas linhas gerais, com as ideias actuais. Teller e Gawow admitiram uma série de reacções termonucleares possíveis no interior do Sol. Mas foi a teoria apresentada por Bethe e Von Weizäcker (1906) que permitiu explicar e conciliar as temperaturas observadas no Sol, com a energia libertada, e as vidas médias das fontes bem como a quantidade de hélio existente no Sol.

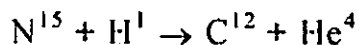
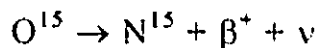
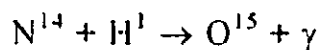
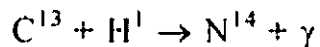
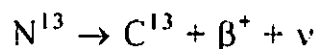
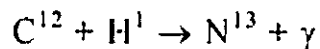
De acordo com a teoria de Bethe (1906), a energia radiada pelo Sol provém de reacções termonucleares complexas, que convertem prótons ( núcleos de hidrogenio) em partículas  $\alpha$  (núcleos de hélio) à custa de quatro núcleos de hidrogénio. Neste processo há uma conversão de massa,  $m$ , em energia,  $e$ , de acordo com a conhecida relação de Einsten,  $E = m c^2$ , em que  $c$  representa a velocidade de propagação da luz no vácuo.

A fusão do hidogénio pode processar de duas formas: i) através da reacção protão – protão (cadeia PP) e ii) pelo ciclo do carbono – nitrogênio (cadeia CN): As principais reacções envolvidas neste processo são:

### **Cadeia PP**



### **Ciclo CN**



(1)



A contracção da enorme massa do Sol pela acção da gravidade produz a temperatura necessária para que sejam possíveis as reacções termonucleares. Nestas reacções há consumo de hidrogénio com uma taxa de conversão de cerca de  $4 \times 10^6$  toneladas por segundo. O Sol produz energia com uma taxa da ordem de  $3.90 \times 10^{26}$  W. A julgar pela quantidade de hidrogénio ainda disponível no Sol pode-se estar descansado, porque mesmo com esta taxa de consumo, o Sol continuára a brilhar ainda por mais  $10^{11}$  anos, visto que o consumo de hidrogénio por segundo é apenas  $0.5 \times 10^{-21}$  da massa total do Sol, Maciel (1991).

A energia emitida pelo Sol exprime-se em unidades de energia, e a sua qualidade é caracterizada pela frequência,  $\nu$ , ou, conhecidas as características do meio de propagação, pelo seu comprimento de onda,  $\lambda$ . Os comprimentos de onda exprimem-se em unidades de comprimento. Para os comprimentos de onda pequenos usam-se o micrómetro ( $\mu\text{m}$ ) que vale  $10^{-6}$  m, o nanómetro (nm) que vale  $10^{-9}$  m, e por vezes, ainda, o angostrom (Å) que vale  $10^{-10}$  m. A frequência exprime-se em hertz (hz), ou segundo<sup>-1</sup> ( $\text{s}^{-1}$ ).

Se a Terra recebesse radiação solar sem ela própria perder energia, a sua temperatura aumentaria indefinidamente. Ora, verifica-se que a temperatura média do globo é praticamente constante, sofrendo pequenas variações dentro de certos intervalos limitados. Logo, a Terra, incluindo a atmosfera, deve perder energia solar recebida e a energia terrestre emitida constitui o balanço energético que permite a existência de um ambiente em que é possível a existência de formas de vida. Qualquer ruptura deste balanço pode conduzir a sérias consequências, tais como um aquecimento global, glaciações, etc., originando portanto, variações do clima.

A atmosfera tem um papel importante, porque condiciona a quantidade de energia solar que atinge o globo e a quantidade de energia terrestre que se escapa para o exterior. Portanto, a atmosfera influencia a temperatura média da superfície do globo e determina a climatologia e a meteorologia da Terra.

O Sol emite energia electromagnética, cujos comprimentos de onda ( $\lambda$ ) vão de centenas de metros até valores inferiores a  $10^{-10}$  metros. Assim, 99% da radiação visível encontra-se entre 400 nm e 730 nm. A radiação do comprimento de onda (c.d.o) inferior a 400 nm é chamada radiação

ultravioleta (UV), e radiação com c.d.o superior a 730 nm é chamada de radiação infravermelha (IR).

O conjunto da radiação electromagnética tem características ondulatórias e propaga-se no vazio com uma mesma velocidade,  $c$ , e que tem o valor de  $2,998 \times 10^8$  m /s. Por isso, entre o comprimento de onda,  $\lambda$ , e a frequência,  $\nu$ , existe uma relação, dada pela expressão:

$$\lambda \nu = c \quad (2)$$

A algumas regiões do espectro são dadas designações de acordo com os comprimentos de onda e a outras de acordo com a frequência. As regiões do espectro do *ultravioleta* e do *infravermelho* referem-se respectivamente, a frequências mais elevadas e mais baixas, quando comparadas às frequências do *visível*. É usual caracterizar a radiação do espectro solar pelos seus comprimentos de onda do que pelas frequências. Ultravioleta quer dizer no domínio das frequências «para além do violeta» e infravermelho «abaixo do vermelho».

O espectro da radiação solar compreende, portanto, além das radiações luminosas que impressionam a retina, as radiações ultravioletas, invisíveis, mas capazes de impressionar chapas fotográficas, e com profunda influência nos processos bioquímicos, e as radiações infravermelhas, também invisíveis, e facilmente absorvidas pelos gases da atmosfera. Na Figura 2.1 está representada a curva da irradiância espectral da radiação solar que atinge o topo da atmosfera.

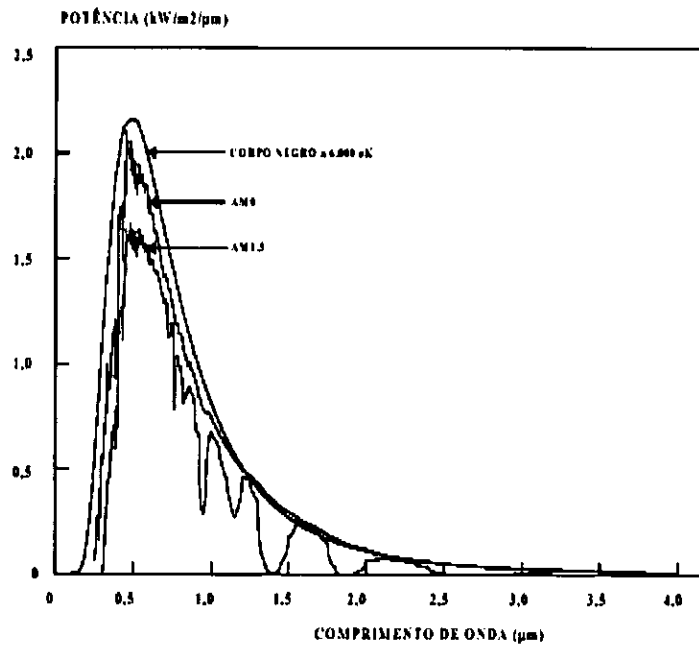


Figura 2.1 - Espectro electromagnético [Cometta, 1978]

Tabela - 2.1: Comprimentos de onda (c.d.o) e cores correspondentes do espectro da radiação solar na região do visível

Cor	Intervalo de c.d.o ( $\mu\text{m}$ )	c.d.o característico ( $\mu\text{m}$ )
Violeta	0.390---0.455	0.430
Azul escuro	0.455---0.485	0.470
Azul claro	0.485---0.505	0.495
Verde	0.505---0.550	0.530
Amarelo esverdeado	0.550---0.575	0.560
Amarelo	0.575---0.585	0.580
Laranja	0.585---0.620	0.600
Vermelho	0.620---0.760	0.640

### **2.1.1 A Distância Terra - Sol**

A terra no seu movimento anual descreve uma elipse em torno do sol, em que este ocupa um dos focos. A quantidade da radiação que atinge a terra é inversamente proporcional ao quadrado da sua distância ao sol sendo portanto necessário conhecer com um certo grau de precisão o valor dessa distância ao longo do ano (tabela B.5).

A distância média terra-sol é  $1.496 \times 10^{11}$  m e é conhecida como a unidade Astronómica. O máximo da distância terra-sol (afélio) é de  $1.520 \times 10^{11}$  m e o mínimo (perihélio)  $1.471 \times 10^{11}$  m. Estas posições são atingidas aproximadamente a 4 de Julho e 3 de Janeiro respectivamente.

Algumas expressões matemáticas que permitem conhecer a distância terra-sol para qualquer dia do ano com uma precisão considerável foram concebidas por vários cientistas. Tradicionalmente essa distância (d) é expressa em termos de um desenvolvimento em serie de fourier para uma precisão da ordem de  $10^{-4}$ , Spencer desenvolveu a seguinte expressão para o inverso do quadrado da distância terra-sol, designada por factor de correcção à excentricidade da orbita da terra em torno do Sol.

$$(dm / d^2) = 1.000110 + 0.044221 \cos \Gamma + 0.001280 \sin \Gamma + 0.00719 \cos 2 \Gamma + 0.000077 \sin 2 \Gamma \quad (2)$$

o ângulo  $\Gamma$  é dado em radiano como função do número de ordem do dia do ano  $dn$  variando de 1 (dia 1 de Janeiro) a 365 (dia 31 de Dezembro).

$$\Gamma = 2\pi (dn-1) / 365 \quad (3)$$

### **2.1.2 Declinação solar**

O eixo de rotação da Terra (eixo Polar) está inclinado de  $66,55^\circ$  sobre o plano da orbita da Terra em volta do sol, ou (o que é o mesmo) o eixo de rotação da Terra faz um ângulo de  $23,45^\circ$  com a normal ao plano da elíptica. A rotação da Terra em torno do seu eixo provoca as variações diurnas da radiação que atinge o topo da atmosfera; a posição deste eixo relativamente ao sol provoca as variações sazonais da radiação solar. O ângulo entre o eixo polar e a normal ao plano da elíptica no entanto mantém-se constante. O mesmo se passa com o ângulo entre o plano equatorial da Terra e o

plano da elíptica. Contudo, o ângulo entre a linha que une o centro da terra com o centro do sol e o plano equatorial varia a cada instante. Este ângulo designa-se por declinação solar ( $\delta$ ). Este ângulo é nulo nos equinócios e vale  $+23.45^\circ$  no solstício de Inverno e  $-23.45^\circ$  no solstício de Verão [ Fraindenraich, 1995] e [ Duffie & Beekman,1991].

A declinação solar tem uma variação diária máxima (que ocorre nos equinócios) inferior a 0.5 (0.017 rad) daí que se possa considerar constante para um dia. A declinação solar é encontrada pela equação de Cooper (1969), Duffie Beckman(1991) e ASHARAE (1999):

$$\delta = 23.45 \sin \left[ 360 \frac{(284 + n)}{365} \right] \quad (4)$$

onde  $n$  é o dia do ano ( $n=1$  para 1 de Janeiro,  $n=365$  ou  $366$  para 31 de Dezembro).

### **2.1.3 Posição do Sol relativamente a superfícies horizontais**

As principais características da radiação à superfície da Terra são determinadas pela rotação da Terra em torno do seu eixo e pela sua órbita elíptica em torno do Sol.

Portanto, para o cálculo da radiação que atinge uma superfície horizontal na terra é necessário estabelecer as relações trigonométricas entre a posição do Sol e as coordenadas da superfície do globo. Estas relações poderão ser obtidas facilmente se utilizarmos a esfera celeste com centro na terra. Assim, em qualquer momento um observador à superfície da terra tem uma posição correspondente na esfera celeste, chamado o zenete do observador, que é definido como o ponto na esfera na vertical sobre o observador.

O plano que passa pelo centro da terra, e é normal à linha que une o centro da terra e o zenete, intersecta a esfera celeste segundo um grande círculo chamado horizonte celeste do observador (Figura. 2.2).

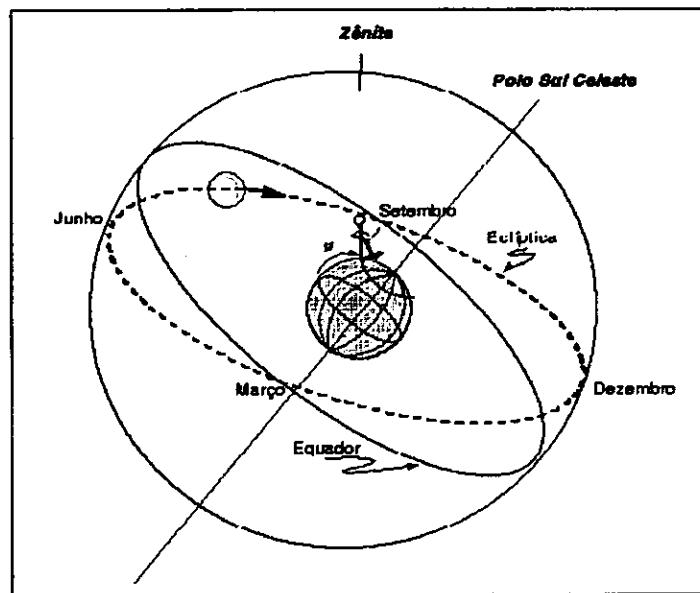


Figura 2.2 - Círculo de horizontal celeste do observador [Lourenzo,1994]

O ângulo zenital é o ângulo que o observador obtém entre o Sol e a vertical. A altitude solar  $\alpha$  é o ângulo entre o Sol e o horizonte do observador. O zimute solar  $\Psi$  é o ângulo entre o Sul e o ponto no horizonte directamente de baixo do Sol. O ângulo horário  $\omega$  é o ângulo medido no Polo celeste, entre o meridiano do observador e o meridiano, medido para Oeste a partir do meridiano do observador. Este ângulo é medido a partir do meio dia solar (altura em que o Sol está no meridiano do observador) e varia  $15^\circ$  por hora. Para uma dada posição geográfica, a relação trigonométrica entre o Sol (centro do disco solar) e a superfície horizontal é bem conhecida.

#### 2.1.4 Atenuação da radiação solar pela atmosfera

A radiação solar depois de atingir e penetrar na atmosfera fica sujeita aos seguintes acidentes: à difusão pelas moléculas da atmosfera e por partículas em suspensão; à absorção pelos gases da atmosfera e partículas de água; à difracção por gotas de água das nuvens; à refração pelos cristais de gelo que formam as nuvens altas, a reflexão pelas nuvens e pela superfície do globo.

A intensidade da radiação solar, à medida que penetra e atravessa a atmosfera, vai sofrendo uma diminuição e uma atenuação progressiva, que designaremos genericamente por depleção da radiação solar. Entre os factores da depleção da radiação os que têm maior importância são a absorção e a difusão.

A absorção é um processo em que a energia radiante é convertida noutra forma de energia. Em geral, a conversão manifesta-se pela transformação em calor e só, ocasionalmente, a conversão conduz a outro tipo de radiação. A absorção ocorre nos gases, nos líquidos e nos sólidos e é selectiva, na medida em que a absorvidade varia com o comprimento de onda da radiação incidente.

A energia pode ser reemitida uniformemente em todas as direcções e a difusão é *isotrópica*, ou pode haver predomínio numa direcção, e diz-se que a difusão é *anisotrópica*. É o que se verifica com o radar, em que há retrodifusão, isto, é uma difusão em que há predomínio da direcção incidente, mas com sentido oposto de propagação.

Os absorventes gasosos mais importantes da atmosfera são oxigénio ( $O_2$ ), ozono ( $O_3$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), vapor de água ( $H_2O$ ), o óxido de azoto ( $N_2O$ ) e o metano ( $CH_4$ ).

Outra causa da depleção da energia solar na atmosfera é, como mencionamos, a difusão devida à presença de partículas de natureza muito variada, que existem na atmosfera.

A difusão ao contrário do que acontece com absorção, não envolve qualquer transformação da energia, nem modificações nas "características" da radiação. A difusão origina a redistribuição da energia radiante em torno das partículas difusoras levando a um decréscimo da irradiância ao longo da direcção incidente.

Para que se dê o fenómeno da difusão é necessário que as dimensões das partículas difusoras, sejam de ordem de grandeza igual ou inferior ao comprimento de onda da radiação excitante. Por isso, a difusão é selectiva, quer dizer, uma partícula pode ser difusora para uma radiação de um dado comprimento de onda, e não o ser para outra.

Se não houvesse a difusão da luz solar não teríamos a possibilidade de ver os objectos à sombra. Só poderíamos ver e observar os que fossem iluminados directamente pelo Sol. As janelas duma casa só serviriam quando recebessem directamente a radiação solar.

A difusão depende da existência e das dimensões médias das partículas, ditas difusoras, do comprimento de onda da radiação incidente e, em menor escala, do índice de refacção do meio.

Para, além das moléculas há em suspensão na atmosfera partículas sólidas e líquidas da natureza muito variada. Há ainda as nuvens que são suspensões de gotículas de água e de cristais de gelo na atmosfera, cujas dimensões variam entre 5 e 100  $\mu\text{m}$ , e cuja concentração é muito variável, indo de 200 a 500 gotículas por centímetro cúbico.

As partículas sólidas são constituídas por poeiras, esporos, sal marinho, fumos e outros poluentes, uns visíveis outros invisíveis. As partículas imersas na atmosfera constituem verdadeiros aerossóis (suspensões em fase aérea, isto é, na atmosfera), cuja concentração é em geral maior sobre os continentes e nas regiões de forte poluição do que sobre os oceanos.

Quando a concentração de poeiras é elevada, e a atmosfera é estável, forma-se a bruma seca que imprime um tom acastanhado sujo à camada da atmosfera, reduzindo muito a visibilidade.

A difusão apresenta duas formas. A primeira, fotões individuais chocando com moléculas de qualquer gás da atmosfera são desviados mais ou menos uniformemente em todas as direcções, processo conhecido por difusão de Rayleigh. Este físico mostrou que a difusão molecular é proporcional a  $\lambda^{-4.09}$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda (c.d.o) e para c.d.o varia em função do número de moléculas encontradas por cada raio solar no seu percurso. A difusão de Rayleigh está confinada a sistemas em que o diâmetro da partícula difusora é muito menor que (c.d.o) da radiação. Estas condições não são encontradas nas partículas de pó, fumo, etc, presentes na atmosfera, referidas como "aerossol" que apresentam geralmente dimensões da mesma ordem de grandeza do c.d.o. A difusão devida aos aerossóis é proporcional a  $\lambda^\alpha$ , em que  $\alpha$  depende da quantidade, natureza e dimensões dos aerossóis presentes.



### **2.1.5 Componentes da radiação solar à superfície**

Como consequência da atenuação, a radiação quando atinge a superfície apresenta duas componentes distintas. Uma das componentes é a radiação directa, definida como a radiação recebida numa superfície horizontal proveniente do ângulo sólido limitado ao disco solar (cerca de  $32'$ ), durante os períodos em que o Sol se encontra descoberto. A outra é a radiação solar difusa, definida como a radiação recebida numa superfície horizontal que provém de todos os ângulos à excepção do ângulo sólido limitado ao disco solar.

A radiação solar global,  $H$ , é a radiação solar proveniente de um ângulo sólido de  $2\pi$  em que incide numa superfície horizontal. Em casos de céu completamente coberto, não existe radiação solar directa, e a radiação global é somente a radiação difusa.

### **2.1.6 A Constante solar**

A quantidade de energia de origem solar, que em cada segundo atravessa a unidade de área colocada no topo de atmosfera normalmente à direcção de propagação, é praticamente constante e chama-se constante solar. A ideia do conceito de "constante solar",  $G_{sc}$ , foi apresentada por Ponillet (1837), mas a sua determinação experimental quantitativa só foi conseguida mais tarde por Langley (1881). Esta energia ( $G_{sc}$ ) é em média, segundo ASHARE (1999), de  $1367 \text{ W/m}^2$ .

### **2.1.7 Radiação no topo da atmosfera**

A radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre provém da região da fotosfera solar que é uma camada com aproximadamente 300 km de espessura e temperatura superficial da ordem de 5800 K. Porém, esta radiação não se apresenta como um modelo de regularidade, pois há a influência das camadas externas do Sol (cromosfera e coroa), com pontos quentes e frios, erupções cromosféricas, etc.

Apesar disto, pode-se definir um valor médio para o nível de radiação solar incidente normalmente sobre uma superfície situada no topo da atmosfera.

As variações na radiação total emitida pelo Sol são inferiores a 1,5%. Pode-se dizer, com razoável precisão, que a radiação incidente no topo da atmosfera depende apenas da distância entre o Sol e a Terra, que pode ser aproximada por:

$$R = R_0 \left[ 1 - 0,0167 \cos \left( \frac{360d_n}{365} \right) \right] \quad (5)$$

onde  $R_0 = 1,495 \times 10^8$  Km e  $d_n$  o dia juliano.

Define-se como radiação extraterrestre a média diária,  $G_{0,d}$ , como sendo o fluxo de radiação incidente em uma superfície unitária, disposta perpendicularmente ao feixe, localizada no topo da atmosfera terrestre à distância de 1 u.a. do Sol, em um determinado dia. Para estabelecer o seu valor, utiliza-se a "constante solar",  $G_{sc}$ , e o dia do ano. Sabe-se ainda que a radiação sobre uma superfície normal à direcção dos raios solares varia inversamente com o quadrado da distância entre a superfície e o Sol. Para um dia qualquer do ano,  $d_n$ , a radiação fora da atmosfera pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$G_{0,d_n} = G_{sc} \left[ 1 + 0,0167 \cos \left( \frac{360d_n}{365} \right) \right]^2 \times \cos \theta_z \quad (6)$$

ao desprezar os termos de segunda ordem encontramos:

$$G_{0,d_n} = G_{sc} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360d_n}{365} \right) \right] \times (\cos \phi \cos \delta \cos w + \sin \phi \sin \delta) \quad (7)$$

onde  $G_{0,d_n}$  é a radiação no plano horizontal incidente no dia  $d_n$  no topo da atmosfera,  $G_{sc}$  é a constante solar e  $\theta_z$  o ângulo zenital, definido mais adiante.

### 2.1.8 Cálculo do ângulo zenital solar

O ângulo zenital do Sol  $\theta_z$  é calculado a partir da seguinte equação:

$$Z = \arccos(\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) \quad (8)$$

onde  $\varphi$  é a latitude do local,  $\delta$  a declinação solar e  $\omega$  o ângulo horário. A declinação solar em radianos pode ser obtida através da equação 3.

O ângulo horário  $\omega$  é calculado a partir da seguinte expressão:

$$\omega = (TSV - 12) \frac{360^\circ}{12} \quad (9)$$

onde  $TSV$  é a hora em Tempo Solar Verdadeiro:

$$TSV = TUC - \frac{4(0^\circ - \lambda) + ET}{60} \quad (10)$$

$TUC$  é a hora em Tempo Universal Coordenado na longitude<sup>1</sup>  $\lambda$  (graus) e  $ET$  é a Equação do Tempo em minutos.

$$ET = 0.0172 + 0.4281 \cos \theta - 7.3515 \sin \theta - 3.3495 \cos 2\theta - 9.3619 \sin 2\theta \quad (11)$$

Em alguns casos, é importante conhecer o ângulo horário do pôr do Sol ou nascer do Sol,  $\omega_s$ . Para tal utiliza-se a seguinte expressão para, no caso do nascer do Sol:

$$\omega_s = -\ar \cos(-tg \delta tg \phi) \quad (12)$$

O ângulo horário de saída do Sol sobre uma superfície com inclinação de  $\beta$  graus com a horizontal,  $\omega_{s,\beta}$ , pode ser encontrada através da seguinte expressão:

$$\omega_{s,\beta} = -\arccos(-tg \delta tg(\phi - \beta)) \quad (13)$$

<sup>1</sup>  $\lambda$  é positivo para longitudes E e negativo para longitudes W.

O número de horas que o Sol ficará acima do horizonte da superfície em questão,  $N$ , ou seja, o comprimento em horas do dia é dado pela seguinte fórmula:

$$N = \frac{2}{15} \arccos(\omega_s) \quad (14)$$

## **2.2 A ligação da radiação Solar global com outras variáveis meteorológicas**

A radiação global que atinge a superfície do globo depende, em cada momento, da altitude, latitude do lugar, da altura e declinação solar, do grau de turvação atmosférica, da qualidade de vapor de água presente na atmosfera e da nebulosidade.

O conhecimento dos campos de radiação global exige a disponibilidade de registos numa malha de pontos o mais densa possível. Quando se trata de regiões vastas como um país, normalmente a densidade das estações onde se fazem esses registos (estações actinométricas) é baixa. Este facto levou ao desenvolvimento de modelos para inferir, em locais onde não existem registos experimentais, valores da radiação global em função de outros parâmetros meteorológicos.

Os modelos desenvolvidos são essencialmente de dois tipos:

Modelos teóricos e modelos empíricos. Os modelos teóricos baseam-se fundamentalmente em propriedades ópticas mensuráveis da atmosfera como o percurso óptico e o albedo atmosférico. São em geral modelos válidos só para determinadas situações de nebulosidade ou para condições de céu limpo. Estes modelos têm por isso um uso restrito.

Modelos empíricos resultam da tentativa de estabelecer relações estatísticas entre a radiação global e outras variáveis meteorológicas de superfície. Como as estações meteorológicas existem numa malha muito mais densa que as actinométricas, registando valores de diversos parâmetros meteorológicos correntes, podemos desta forma inferir valores da radiação global à custa destes, num número de pontos suficiente para a definição do campo radiativo global.

### 2.3 Tratamento estatístico da radiação

Na secção 2.1.7. foi apresentado como se determina o valor da radiação que chega ao topo da atmosfera e de que modo se decompõe em radiação directa e difusa.

A atenuação e dispersão atmosféricas dependem de parâmetros aleatórios, justificando a utilização de procedimentos estatísticos para sua caracterização.

O objectivo deste trabalho é estudar o comportamento da incidência da radiação solar na superfície terrestre, sob o ponto de vista estatístico, e estabelecer as bases para determinar o valor médio e a função de distribuição da radiação solar incidente sobre uma superfície inclinada, para qualquer mês do ano.

Em primeiro lugar, calcula-se a radiação extraterrestre horizontal diária através da integração da equação (7).

A radiação horizontal incidente no topo da atmosfera é integrada, multiplicada pelo co-seno de ângulo zenital, desde o nascer até o pôr do Sol.

$$H_0 = 2 * \int_0^{\frac{24}{\pi} \omega_s} G_{0,dh} \cos \theta_z dt \quad (15)$$

Dado  $t$  (horas) =  $(12/\pi) \omega$  (radianos) e a partir da expressão para o cálculo do co-seno de  $\theta_z$ , chega-se ao seguinte resultado:

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360 d_n}{365} \right) \right] \times \left[ \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2 \pi \omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (16)$$

que determina a quantidade de energia incidente numa superfície unitária horizontal situada no topo da atmosfera. A expressão (16) fornece o resultado em MJ/m<sup>2</sup> caso  $G_{sc}$  seja dado em W/m<sup>2</sup>. Caso seja necessário obter o resultado em kWh/m<sup>2</sup>, basta dividir o resultado obtido (em MJ/m<sup>2</sup>) por 3,6.

## **2.4 Coeficiente de transparência da atmosfera terrestre**

Este parâmetro permite avaliar a quantidade de radiação solar que chega à superfície terrestre num dia específico, tendo em consideração que a radiação solar extraterrestre é um parâmetro “invariável” para cada dia específico.

Através de medidas experimentais, feitas por instrumentos apropriados, descritos em ‘3.1,’ obtém-se dados da radiação diária média que incide no plano horizontal na superfície terrestre,  $H$ . O coeficiente de transparência atmosférica,  $k_t$  é definido como sendo a relação entre a radiação incidente na superfície terrestre,  $H$ , e a radiação no topo da atmosfera,  $H_0$ , equação (16).

Podemos assim, quantificar a interferência que a radiação solar sofre ao passar pela atmosfera. Matematicamente,  $k_t$  é definido pela seguinte expressão:

$$k_t = \frac{H}{H_0} \quad (17)$$

A radiação difusa presente no céu local, pode ser obtida a partir do estabelecimento do factor de radiação difusa ou proporção de difusa,  $k_d$ , mediante a expressão:

$$H_d = k_d \cdot H \quad (18)$$

Esta relação, corresponde a uma das expressões que correlacionam  $k_d$  com  $k_t$ , na tentativa de estimar a contribuição da componente difusa na radiação global incidente.

Tabela - 2.2: Equações para o cálculo do factor de radiação difusa

Intervalos de coeficiente de transparencia	Factor de radiação difusa
$k_t$	$\frac{H_d}{H}$
$k_t < 0,17$	$\frac{H_d}{H} = 0,99$
$0,17 < k_t < 0,75$	$\frac{H_d}{H} = 1,188 - 2,272.k + 9,473.k_t^2 - 21,865.k_t^3 + 14,648.k_t^4$
$0,75 < k_t < 0,8$	$\frac{H_d}{H} = -0,54.k_t + 0,632$
$k_t > 0,80$	$\frac{H_d}{H} = 0,2$

(19)

Uma outra tentativa de modelar a relação entre a claridade atmosférica e a contribuição de difusa, ou seja, determinar a expressão que correlaciona  $k_d$  com  $k_t$ , foi proposta por Erbs et al (1982).

Neste modelo, foram introduzidas algumas modificações que consideram a interferência do efeito sazonal anual. As expressões encontradas, equações (20), neste modelo estão apresentadas a seguir:

Tabela – 2.3: Equações para o cálculo do factor de radiação directa

Ângulos	Coefficiente de transparência	Factor de radiação directa
$\omega_s$	$k_t$	$K_d$
$\omega_s < 81,4^\circ$	$k_t < 0,715$	$K_d = 1,0000 + 0,2727k_t + 2,4495k_t^2 - 11,9514k_t^3 + 9,3879k_t^4$
	$k_t > 0,715$	$K_d = 0,143$
$\omega_s > 81,4^\circ$	$k_t < 0,722$	$k_d = 1,0000 + 0,2832k_t - 2,5557k_t^2 + 0,8448k_t^3$
	$k_t > 0,722$	$K_d = 0,175$

(20)

$k_d$  é determinada a partir das expressões algébricas obtidas pelas expressões (20) dos modelos apresentados.

## 2.5 Descrição dos equipamentos

Para que haja um aproveitamento máximo da energia solar torna-se indispensável o seu conhecimento. Desenvolveu-se um projecto que é a montagem de uma bancada de instrumentos para medir a radiação do Sol. Esta bancada é composta por sensores capazes de detectar todas as componentes da radiação solar, ilustradas na Figura 2.3.



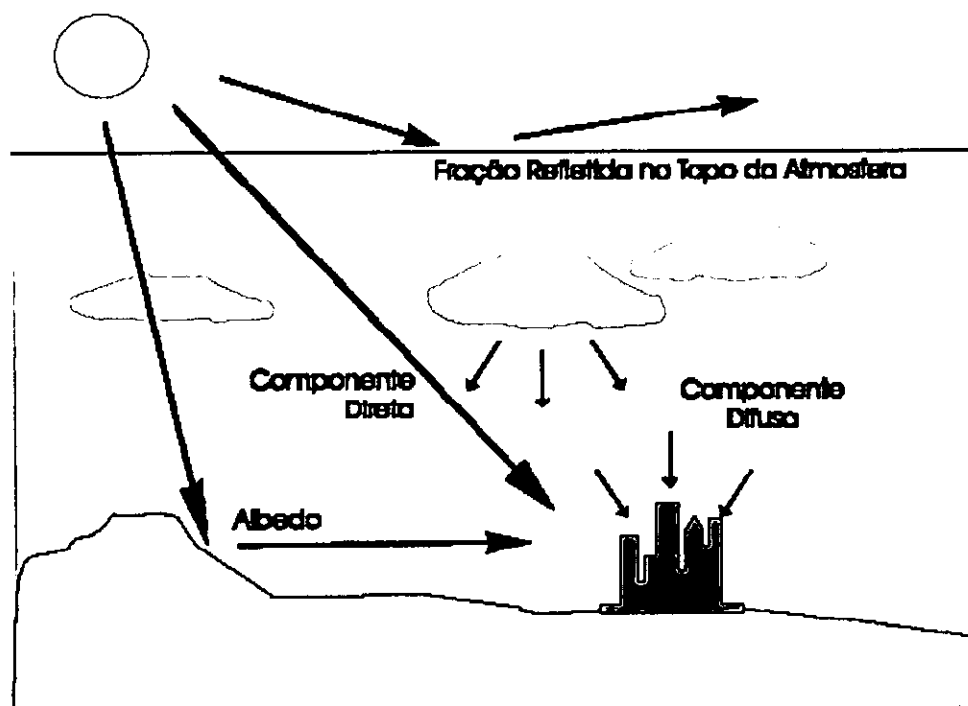


Figura 2.3- Componentes da radiação solar incidente na superfície terrestre [Lourenzo,1994]

Realizar medições da radiação solar global e difusa, horária ou diária, em diversas regiões, por longo período de tempo, é extremamente importante para o estabelecimento de uma base de dados de radiação solar fiável. Estes dados serão utilizados, entre outras coisas, para a elaboração de modelos teóricos, para testar os modelos existentes, para avaliar o desempenho de equipamentos solares, para dimensionar sistemas e determinar o potencial da energia solar numa dada região.

Para que a base de dados seja fiável, é importante que uma série de cuidados sejam tomados, tais como: estabelecer um espaçamento óptimo entre os instrumentos de medição, acumular séries de dados por um longo período de tempo, realizar calibrações e manutenção periódicas nos instrumentos. Sem precauções como as citadas, as séries de dados podem ser inutilizadas.

### 2.5.1 Medição de radiação solar

O instrumento fundamental para a medição da radiação solar é o *radiómetro* que detecta e mede a energia radiante, convertendo esta em energia eléctrica ou mecânica.

A radiação directa é definida como a fracção da radiação solar, que atravessa a atmosfera terrestre sem sofrer qualquer alteração na sua direcção original. É medida com *pireheliómetro*, associado a um dispositivo de acompanhamento do movimento do Sol.

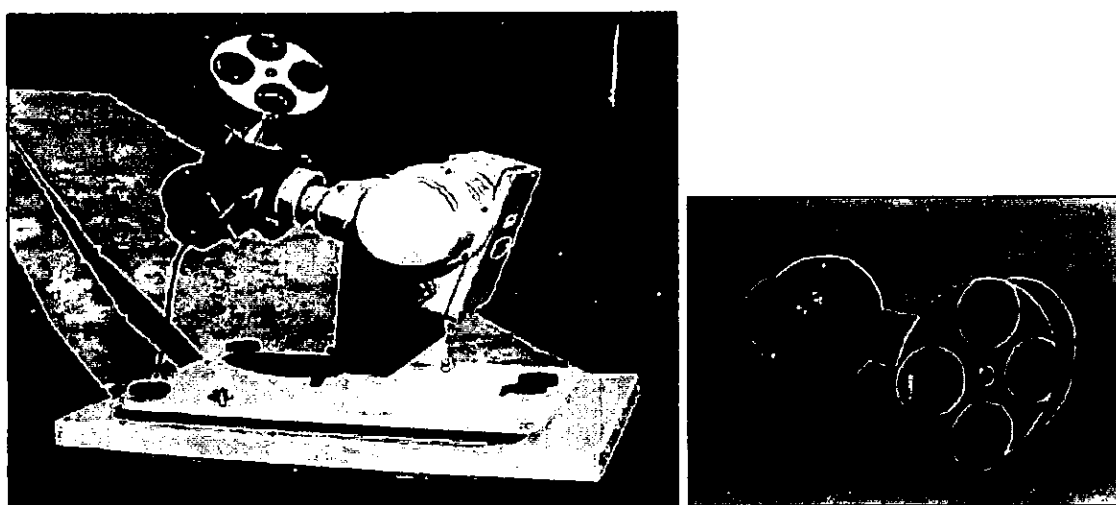


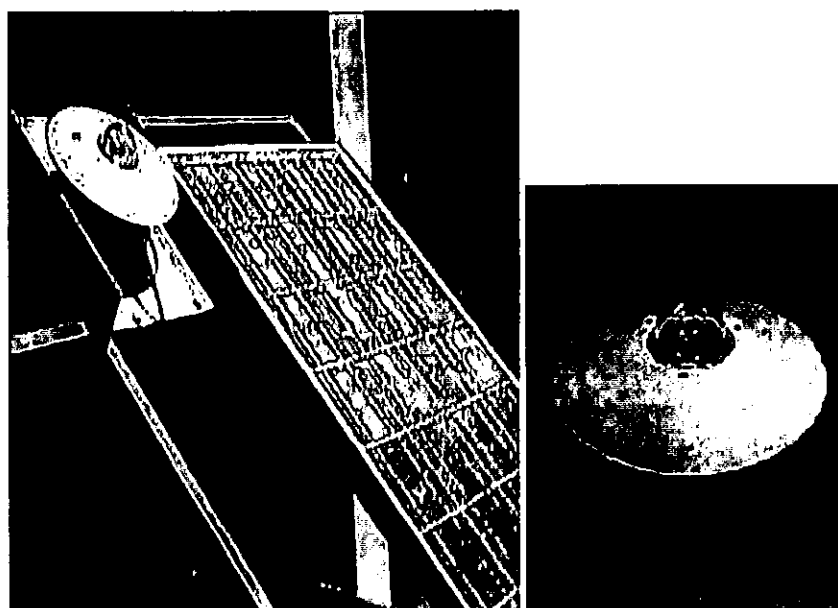
Figura 2.4: Pireliómetro Eppley NIP com um sistema de Seguimento do solar (tracker)

Os *piranómetros* são instrumentos especialmente concebidos para a medição regular e contínua da radiação global entre  $0.3 \mu\text{m}$  e  $3.0 \mu\text{m}$ . Os dados disponibilizados para este estudo foram obtidos a partir de medições efectuadas com piranómetros Kipp & Zonen CM11.

O sensor do piranómetro CM11 consiste de um disco de cerâmica ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) pintado de preto, no qual estão impressos um conjunto de 100 termopares constituindo uma termopilha. Apenas a periferia do disco encontra-se em contacto térmico com o corpo do piranómetro que por sua vez constitui um dissipador de calor e onde estão também distribuídos os 100 terminais “frios” dos termopares atrás referidos. Os 100 terminais “quentes” dos termopares estão dispostos no centro do disco por forma a constituírem um arranjo rotacional simétrico. A radiação absorvida pelo

piranómetro para um dado fluxo de calor depende da condutibilidade térmica do disco de cerâmica e da potência termoeléctrica do material dos termopares. Estas grandezas físicas dependem da temperatura, pelo que um termistor é integrado no circuito eléctrico por forma a garantir uma resposta constante para temperaturas entre  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $+40^{\circ}\text{C}$ .

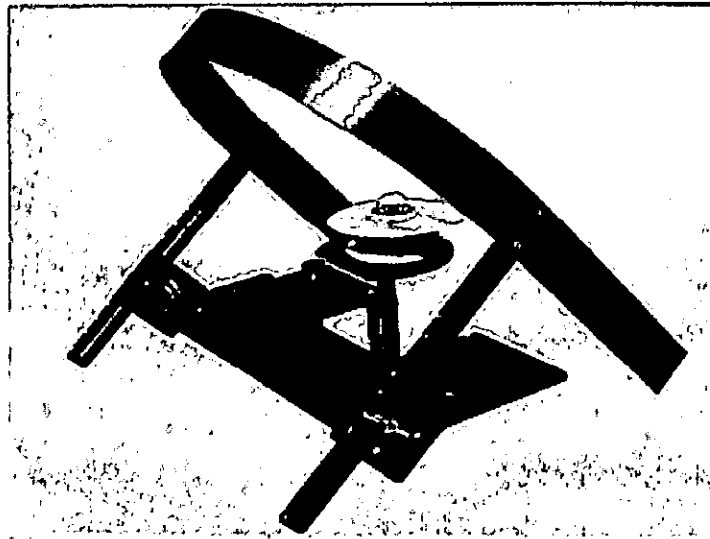
A radiação global (total) é a energia radiante por unidade de tempo e de área incidente numa superfície, expressa em  $\text{W}/\text{m}^2/\text{dia}$ , dada pela soma de suas componentes directa e difusa. Pode ser medida utilizando-se diferentes instrumentos, sendo o piranómetro um dos mais utilizados para realizar a medição desta componente da radiação.



**Figura 2.5: Piranómetro Eppley PSP com painel fotovoltaico**

A radiação difusa é medida com um piranómetro provido de um arco que intercepta a radiação solar directa e mantém na sombra o órgão sensível do piranómetro. O mais tradicional é o uso da banda de sombra em forma de arco ou semi-aro, conforme a Figura 2.6 ilustra. Deste modo, a radiação recebida pelo piranómetro é essencialmente a radiação global menos a componente directa.

A radiação difusa refere-se à componente da radiação que, ao atravessar a atmosfera, é difundida por aerossóis, poeira, ou mesmo reflectida pelos elementos constituintes dessa atmosfera, atingindo a superfície terrestre em diversas direcções.



**Figura 2. 6: Piranómetro PSP acoplado ao anel de sombreamento (Epleey)**

Os piranómetros CM11 possuem um conjunto de especificações técnicas que os colocam na categoria de piranómetros de 2ª classe (WMO), adequados para medição regular da radiação global e difusa dentro de uma rede meteorológica.

### **2.5.2 Medição da insolação**

Ao tratar da radiação solar não podemos deixar de referir, e de nos determos por algum tempo numa manifestação importante desse elemento.

#### **Difinição**

A insolação é a duração de Sol descoberto. Por exemplo, a insolação diária é o número de horas de Sol descoberto desde o nascer até o pôr de sol. A insolação média num dado local é um dos factores que determinam o clima desse local.

#### **Unidades**

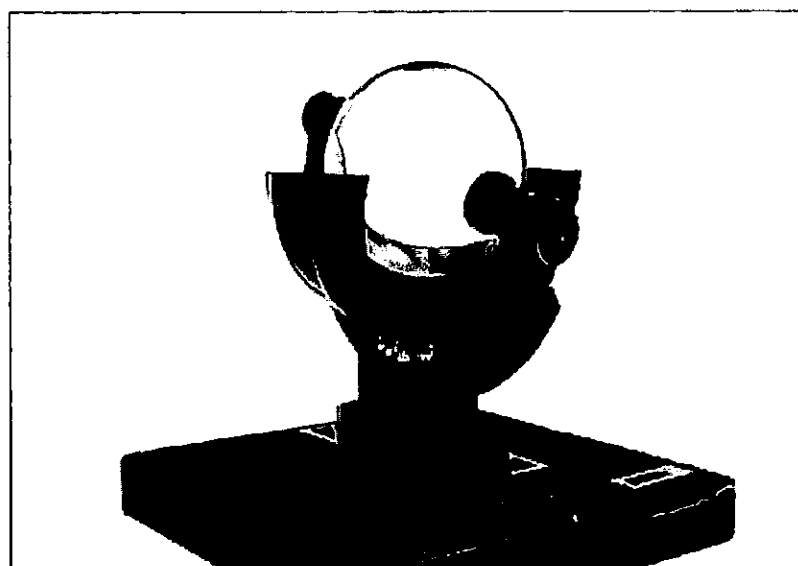
A dimensão física da insolação é obviamente o tempo. A unidade usada é o segundo ou a hora. Frequentemente exprime-se em “horas de insolação diária” ou em percentagem (%) definida pelo

quociente, expresso em centésimos (de 0 a 100), da insolação total pela insolação máxima possível, no mesmo intervalo de tempo acima do horizonte no local do heliógrafo.

### **2.5.3 O Heliógrafo de Campbell-Stokes**

É um instrumento que mede a insolação, número de horas diárias que a radiação solar é superior a  $120 \text{ W/m}^2$ . Este tipo de informação tem como característica importante a grande quantidade de dados disponíveis. Pela sua importância nas pesquisas relacionadas à agricultura, no comportamento e evolução dos ecossistemas, no desenvolvimento de numerosas actividades humanas, designadamente no urbanismo, na arquitectura, no turismo, na agricultura, na pecuária, etc. É um elemento importante e decisivo para o planeamento de instalações destinadas ao aproveitamento de energia solar. E existem séries de dados extensos no tempo e densamente distribuídas no espaço.

Este instrumento foi desenvolvido inicialmente por Campbell em 1853. A versão inicial consistia num bolbo esférico de vidro cheio de água, suportada no centro por um segmento de arco em madeira. A radiação solar incidida na parte interior do arco e queimava uma faixa de papel, deixando traço que indicava a insolação. Mais tarde em 1879, Stokes melhorou o instrumento até a sua forma actual (Fig.2.7).



**Figura 2.7: Heliógrafo de Campbel**

O heliógrafo de Campbell-Stokes consiste essencialmente de uma esfera de vidro, sem cor ou de um verde amarelado, tem cerca de 10 cm de diâmetro e encontra-se montada concêntricamente num suporte metálico esférico.

O diâmetro interno do suporte esférico dos cartões é tal que, quando a esfera de vidro se encontra exposta ao Sol, a imagem deste é formada numa tira de cartão colocada em fendas próprias existentes no interior da face do suporte esférico.

A imagem do Sol descreve um arco de círculo, provocando uma queimadura ou descoloração do cartão. A intensidade e uniformidade do registo (traço queimado) dependem da distância focal da esfera de vidro, das dimensões dessa mesma esfera, da sua cor e das dimensões dos cartões. Os cartões são mudados diariamente para análise dos registos, em horas e décimos. O comprimento do traço queimado é comparado com a escala de tempo impressa no cartão, referindo-se esta ao tempo solar verdadeiro (TSV). O suporte esférico dos cartões é provido de três pares de fendas para colocação de três tipos de cartões a utilizar durante o ano, de acordo com a declinação do Sol.

## CAPÍTULO 3

### DADOS E METODOLOGIA

#### 3.1 Dados

O presente estudo foi desenvolvido utilizando-se dados radiométricos das estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INAM) durante o período 1970 - 2000. Estes dados da radiação solar foram convertidos para kWh/m<sup>2</sup>/dia. Primeiramente, fez-se a pesquisa bibliográfica para apresentação dos conceitos da Radiação solar.

A densidade de fluxos de radiação solar global foi medida por actinógrafos de placa bimetálica de Robtitzsch e seus totais diários obtidos por integração dos actinogramas, com o uso de um planímetro digital Tamaya, tipo Planix 6, e o número de horas de brilho solar foi obtido através da carbonização das fitas de um heliógrafo Campbell-Stockes.

Estação	Localização			Tipo de variável		
	Lat. (S)	Log.(E)	Alt(m)	Global	Difusa	Insolação
Maputo	25°58'	32°36'	60.0	x	x	x
Maniquenique	24°44'	33°32'	13.0	x		x
Chokwe	24°33'	33°00'	33.0	x		x
Inhambane	23° 52'	35° 23'	14.0	x	x	x
Beira	19°48'	34°54'	8.0	x	x	x
Chimoio	19°07'	32°28'	731.0	x		x
Tete	16°11'	33°35'	149.0	x	x	x
Nampula	15°06'	39°17'	438.0	x	x	x
Lumbo	15°02'	40°40'	10.0	x		x
Pemba	12°59'	40°32'	101.0	x	x	x
Lichinga	13°18'	35°14'	1365.0	x	x	x

Tabela 3.1: Estações actinométricas e os parâmetros medidos em Moçambique.

## **3.2 Metodologia**

### **3.2.1 Determinação da radiação solar**

De maneira geral, não existem dados adequados para que se possa fazer uma avaliação completa da radiação solar na superfície horizontal. A elaboração de uma completa base de dados de radiação solar necessita de estações de medida bem distribuídas espacialmente, dotadas de instrumentos regularmente calibrados, tomando dados durante longos períodos de tempo, cerca de 20 anos. Só assim, é possível saber a radiação incidente (retirando as variações devido a anos atípicos) e construir um mapa de radiação solar para a região, utilizando modelos para interpolar as medições feitas em cada estação.

Mapas de radiação solar precisos são muito difíceis de obter. As principais dificuldades encontradas são a falta de séries credíveis e uma cobertura insuficiente e não uniforme.

Como já se disse, em Moçambique são poucas as estações que possuem piranômetros. Menor ainda é o número de estações realizando medições com este instrumento durante longos períodos de tempo com calibrações periódicas.

Em geral, os dados da radiação disponíveis em Moçambique e em muitos países do Mundo, foram medidos com heliógrafos, instrumento que estima a insolação diária, número de horas do dia em que a radiação é maior que um valor prefixado. Para a determinação da radiação neste trabalho foi utilizado o modelo de Angostron, cuja a primeira relação entre a radiação global e a insolação foi sugerida por Kimbal (1918) e posteriormente foi melhorada por Ångstron (1924):

$$\frac{H}{H_0} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) \quad (21)$$

onde  $n$  é o número de horas em que o Sol efectivamente brilhou durante um certo dia, medido experimentalmente com um heliógrafo;  $N$  é o comprimento total do dia, ou número de horas em que o sol esteve acima do horizonte no determinado dia; este número pode ser determinado pela equação (14); 'a' e 'b', são coeficientes que dependem das condições climáticas do local.



### 3.2.2 Classificação do clima

O clima das três zonas classificou-se, segundo o sistema Köppen (1970). De acordo com a classificação de Köppen, a região Norte e a região costeira (60%) tem o clima tropical de savana ( $A_w$ ). O interior das zonas Central e Sul (28%) tem um clima seco de savana ( $BS_w$ ). Uma pequena área próximo da fronteira do Limpopo (2%) tem o clima desértico ( $BW_w$ ), entretanto as zonas altas (10%) têm o clima húmido temperado ( $C_w$ ). Na tabela 3.2 estão apresentadas as constantes das zonas climáticas acima mencionadas.

Tabela - 3.2: Constantes Climáticas

Tipo de Clima/Constantes	a	b
$A_w$	0.42	0.22
$BS_w$	0.41	0.37
$BW$	0.30	0.43
$C_s$	0.17	0.63

Para o estudo da radiação solar na região Sul, Centro e Norte de Moçambique foi necessário analisar o comportamento da radiação solar, o coeficiente de transparência e o cálculo da radiação global a partir da insolação.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 Análise dos dados

A partir das análises realizadas com base nos dados da radiação solar directa, difusa e global, nas regiões Sul, Centro e Norte de Moçambique, observa-se que em média ao longo dos anos a radiação directa tem valores superiores que a radiação difusa. Num dado dia de Sol, ao nível do solo, a potência incidente é de cerca de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Os valores mais baixos da radiação global foram registados nas estações de Inhambane, Beira, Chimoio e Lichinga. Isto traduz mais o efeito da nebulosidade, que aumenta de Sul para o Norte e do interior para a costa, do que o efeito de latitude. Paralelamente, observa-se um aumento de valores de radiação global da costa para o interior. Os máximos relativos nas regiões de Maputo e Lumbo são devidos à diminuição da nebulosidade nestas estações.

A radiação global em Moçambique é em média  $5.2 \text{ kWh/m}^2$ . Na região Sul é  $5.2 \text{ kWh/m}^2$ , na região Centro  $5.2 \text{ kWh/m}^2$ , na região Norte é  $5.1 \text{ kWh/m}^2$ . Os valores máximos observam-se no mês de Dezembro, sendo de  $7.7 \text{ kWh/m}^2$  para todo o território e  $7.7 \text{ kWh/m}^2$ ,  $7.7 \text{ kWh/m}^2$  e  $7.8 \text{ kWh/m}^2$ , para cada uma das regiões citadas, respectivamente.

Os valores mínimos da radiação global ocorrem em Junho:  $3.9 \text{ kWh/m}^2$  para todo o país e  $3.6 \text{ kWh/m}^2$ ,  $3.9 \text{ kWh/m}^2$  e  $4.1 \text{ kWh/m}^2$  para as regiões Sul, Centro e Norte, respectivamente. Os valores médios mensais da radiação global, difusa e directa, figuram nas tabelas dos anexos B.1, B.2 e B.3 respectivamente, mostram que a radiação global é máxima em Dezembro e mínima em Junho. A radiação directa e difusa seguem uma variação anual semelhante.

Os anexos B.1, B.2 e B.3, anteriormente referidas, mostram que, dum modo geral, os valores da radiação global, difusa, directa são maiores no verão do que no inverno.

Os valores médios da insolação apresentados na Tabela 4.2.4, mostram que a insolação tem valores maiores no verão com um máximo de 8.7 horas/dia, 9.4 horas/dia e 10.5 horas/dia para as regiões Sul, Centro e Norte, respectivamente e os mínimos no inverno de 7.3 horas/dia, 6.7

horas/dia, 4.0 horas/dia para as regiões Sul, Centro e Norte, respectivamente. Esse comportamento deve-se ao facto da nebulosidade no inverno aumentam de Sul para Norte.

#### 4.2 A radiação extraterrestre , insolação astronómica e declinação do Sol

A radiação global extraterrestre na superfície paralela à horizontal e a duração do dia solar, que por características locais têm valores máximos no mês de Dezembro e os valores mínimos em Junho, como se pode ver na Figura 4.2. O dados correspondentes à figura 4.1, estão no Anexo A.1.

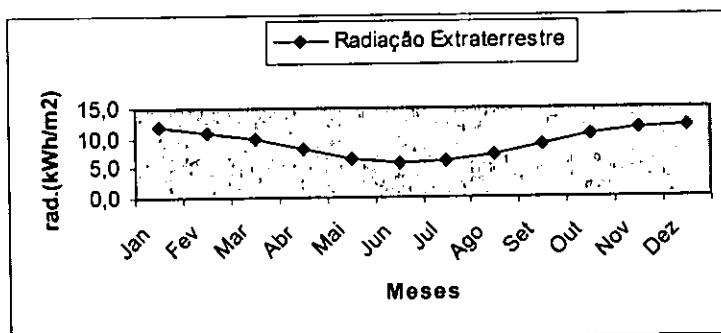


Fig. 4.1. Radiação solar extraterrestre.

A variação da duração do dia solar é de 12.00 h/dia nos equinócios, período em que a declinação do Sol é igual a zero ( $0^{\circ}$ ). Este fenómeno ocorre quando o Sol cruza o equador e dá-se por volta dos dias 21 de Março e 21 de Setembro. Ao longo do ano observa-se que a duração do dia solar máxima e mínima, são por volta de 14.00 h/dia e 10.00 h/dia, que acontece quando o Sol atinge a sua declinação máxima ( $+23.5^{\circ}$ ) e declinação mínima ( $-23.5^{\circ}$ ), i.e. nos solistícios, por volta de 21 de Junho e de 21 de Dezembro.

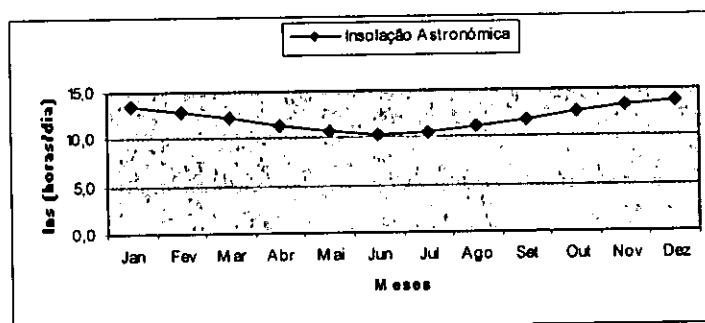


Fig. 4.2. Variação da duração do dia solar.

A variação da declinação do Sol ao longo do ano atinge o seu valor máximo sua máximo ( $23.5^{\circ}$ ) e mínima ( $-23.5^{\circ}$ ), nos solstícios por volta de 21 de Junho e 21 de Dezembro. Vê-se que o Inverno é caracterizado por noites longas e dias curtos, contrariamente ao Verão, que é caracterizado por noites curtas e dias longos (Figura 4.3). Para melhor compreensão da variação da declinação do Sol veja o anexo A.3.

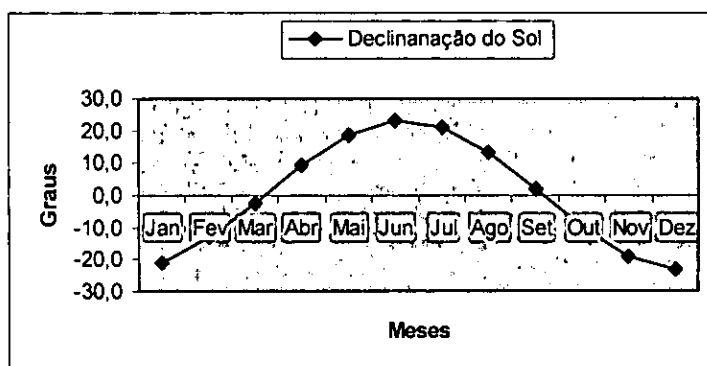


Fig. 4.3. Variação da declinação do sol.

### 4.3 Radiação solar global estimada

Nas figuras do anexo C estão representadas as curvas correspondentes à radiação solar estimada e observada. Como se vê claramente, a radiação estimada está muito próxima da radiação observada. Tal comparação, mostrou que os valores da radiação solar global calculados a partir da insolação, usando o modelo de Ångström, são aproximados aos observados com os coeficientes de correlação média e crítico de 0.9567 e 0.8449, respectivamente.

Os valores de  $R^2$  apresentados na Tabela 4.1, indicam que a estimativa da radiação global pode ser realizada com precisão, a partir de insolação. A avaliação do modelo foi feita através do cálculo do erro relativo ( $\epsilon$ ), cujos resultados estão na Tabela 4.1. A radiação estimada apresenta um erro relativo menor do que 1, o que significa que se pode considerar o modelo usado como bom. O coeficiente de variação é alto, e isto era de esperar devido à variação da radiação solar em função da nebulosidade, uma vez que o número e a natureza discreta das transições da radiação solar directa determinam a possível incerteza da insolação, os requisitos meteorológicos estão essencialmente correlacionados com as condições de nebulosidade WMO (1985).

Tabela – 4.1: Coeficiente de correlação, coeficiente de determinação e erro relativo da radiação solar estimada.

Radiação Solar (estimada)	Coeficiente de correlação ( R )	Coeficiente de determinação ( R <sup>2</sup> )	Erro relativo (6er)
Maputo	0.990673	0.981433	-0.12
Maniquenique	0.997488	0.994982	0.03
Chokwe	0.993022	0.986093	-0.17
Inhambane	0.997499	0.995005	0.04
Beira	0.996242	0.992498	0.04
Chimoio	0.955941	0.913824	0.09
Tete	0.954595	0.911252	-0.12
Nampula	0.930760	0.866315	0.05
Lumbo	0.962093	0.827182	0.17
Pemba	0.844866	0.713799	0.06
Lichinga	0.900089	0.811599	0.05

Ao comparar-se os resultados obtidos em todas as estações das zonas Sul, Centro e Norte do país, que apresentam uma média mensal aproximada de 5 kWh/m<sup>2</sup>/dia, pode-se concluir que existe uma boa disponibilidade de energia solar em Moçambique. Em geral a radiação diminui no Inverno e aumenta no Verão, como se pode ver no Anexo D1.

As estações junto a costa possuem grande quantidade de vapor de água na atmosfera e há maior atenuação da radiação solar por absorção, enquanto que as estações do interior possuem uma atmosfera com grandes quantidades de partículas sólidas e poeiras, o que resulta na atenuação da radiação solar devido ao fenómeno da difusão. Há no entanto, uma particularidade nas estações do interior, em que a radiação solar diminui com a altitude.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

#### **5.1 Conclusões**

Com base nos dados obtidos neste trabalho, conclui-se que:

- O Modelo de Angostron demonstrou que, para estimativas mensais da radiação solar, existe boa concordância com os dados observados.
- O modelo desenvolvido para a simulação de dados mensais de radiação solar global, gera dados sintéticos semelhantes aos dados reais, de maneira que os mesmos podem perfeitamente representar este elemento para localidades estudadas.
- O modelo pode ser aplicado para qualquer localidade do país, em actividades de pesquisa, envolvendo planeamento agrícola, avaliações de natureza hidrológica e projectos de sistemas que utilizam a radiação solar como fonte de energia.
- A radiação astronómica e a duração do dia aumenta de Sul para o Norte no inverno, e diminui no mesmo sentido no Verão.
- Relativamente à energia solar, Moçambique tem a vantagem de se localizar dentro da área de "Sunbelt", compreendendo os paralelos 10° aos 26°. Os dados das três zonas estudadas indicam que a radiação solar em Moçambique alcança valores altos de cerca de 5.0 kWh/m<sup>2</sup>/dia.

#### **5.2 Recomendações**

Pela grande importância que a radiação representa no ramo das energias renováveis, no aquecimento de água, secagem de produtos agrícolas, geração de vapor, geração de energia eléctrica, climatização de ambientes e outras, torna-se necessário o seguinte:

- As séries devem ser submetidas a um cuidadoso processo de verificação, o qual permitirá rejeitar os dados inconsistentes, tais como radiação superior a 90% da radiação solar no topo de atmosfera e insolação superior a 300 hora/mes.
- Descrição dos poluentes que afectam a radiação global, directa e difusa para Moçambique.
- Investigação do impacto dos poluentes atmosféricos na evolução das componentes da radiação solar global, difusa e directa em Moçambique.

## BIBLIOGRAFIA

Aguiar R. J., Collares-Pereira, M. and Conde, J. P., "A Simple Procedure for the Generation of Sequences of Daily Radiation Values Using Markov Transition Matrices", *Solar Energy*, 40, 3, pp 269 - 279, 1988.

Aguiar, R. J., Collares-Pereira, M., "TAG: A Time-Dependent, Autoregressive, Gaussian Model for Generating Synthetic Hourly Radiation", *Solar Energy*, 49, 3, pp 167 - 174, 1992.

Collares-Pereira, M. and Rabl, A., "The Average Distribution of Solar Radiation Correlations Between Diffuse and Hemispherical and Between Daily and Hourly Insolation Values", *Solar Energy* 22, pp 155 - 164, 1979.

Cometta E. *Energia Solar: Utilização e Empregos Práticos*, Hemus livraria, 1979.

Cuamba, B.C., e J. Lovseth *General Characterization of the Global and Direct Solar Radiation Fields Behavior in Mozambique*.

Duffie, J.A., and W. A. Beckman (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2ª edição. 136pp, John Wiley & Sons Inc, New York.

Duffie, J.A., and Beckman, W.A., Available Solar Radiation. In: *Solar Engineering Of Thermal Process*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980. P.28-110.

Liu, B.Y.H. and Jordan, R.C., 1962: Daily insolation on surfaces tilted toward the equator, *ASHRAE transactions* No. 1762, 526-541.

Lorenzo E. *Electricidad Solar: Ingenieria de Los Sistemas Fotovoltaicos*, Espanha, Artes Gráficas Gala, S.L. 1994.

Maciel W. J., *Astronomia e Astrofisica*, IAG/USP, São Paulo, Brasil, 1991.

Page, J.K., 1975: The estimation of monthly mean values of daily short-wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitude  $60^{\circ}$  to  $60^{\circ}$  S, *Uni. Sheffield internal Note*, 43 pp.

WMO, 1981, *Technical Note No. 557*

## **ANEXOS**



**ANEXO A**

**A.1 – Radiação solar no topo da atmosfera (Kwh/m<sup>2</sup>)**

Local/mês	Mpt	Chk	Mnc	Ibane	Bei	Chi	Tet	Npl	Lum	Pb	Lch
Jan	11.8	11.8	11.8	11.8	11.6	11.6	11.4	11.3	11.3	11.2	11.2
Fev	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.0	11.0	11.0	11.0
Mar	9.8	9.9	9.9	9.9	10.1	10.2	10.3	10.3	10.3	1.4	10.4
Abr	8.0	8.3	8.2	8.3	8.7	8.8	9.1	9.1	9.2	9.4	9.3
Mai	6.5	6.8	6.7	6.8	7.4	7.5	7.9	8.0	8.0	8.3	8.2
Jun	5.8	6.1	6.0	6.1	6.7	6.8	7.3	7.4	7.4	7.7	7.7
Jul	6.1	6.4	6.3	6.4	7.0	7.1	7.5	7.6	7.7	7.9	7.9
Ago	7.3	7.6	7.5	7.6	8.1	8.2	8.5	8.6	8.6	8.8	8.8
Set	9.0	9.2	9.1	9.2	9.5	9.6	9.8	9.8	9.8	9.9	9.9
Out	10.6	10.6	10.6	10.6	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7
Nov	11.6	11.5	11.6	11.5	11.4	11.4	11.3	11.2	11.2	11.1	11.1
Dez	12.0	11.9	11.9	11.9	11.7	11.6	11.4	11.3	11.3	11.2	11.2

**A.2 – Insolação extraterrestre (horas)**

Local/mês	Mpt	Chk	Mnc	Ibane	Bei	Chi	Tet	Npl	Lum	Pb	Lch
Jan	13.4	13.3	13.4	13.3	13.1	13.0	12.8	12.8	12.8	12.7	12.7
Fev	12.9	12.8	12.8	12.8	12.6	12.6	12.5	12.5	12.5	12.4	12.4
Mar	12.2	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
Abr	11.4	11.4	11.4	11.4	11.5	11.6	11.6	11.6	11.7	11.7	11.7
Mai	10.7	10.8	10.8	10.8	11.1	11.1	11.2	11.3	11.3	11.4	11.4
Jun	10.4	10.5	10.5	10.6	10.8	10.9	11.1	11.1	11.1	11.2	11.2
Jul	10.5	10.6	10.6	10.7	10.9	11.0	11.1	11.2	11.2	11.3	11.3
Ago	11.1	11.2	11.2	11.2	11.3	11.4	11.5	11.5	11.5	11.6	11.6
Set	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9
Out	12.6	12.6	12.6	12.6	12.5	12.4	12.4	12.3	12.3	12.3	12.3
Nov	13.3	13.2	13.2	13.2	12.9	12.9	12.8	12.7	12.7	12.6	12.6
Dez	13.6	13.5	13.5	13.4	13.2	13.1	12.9	12.9	12.9	12.7	12.8

**A.3 – Declinação solar (graus)**

Mês	Declinação	Mês	Declinação
Janeiro	-20.9	Julho	21.2
Fevereiro	-13.0	Agosto	13.5
Março	-2.4	Setembro	2.2
Abril	9.4	Outubro	-9.6
Maio	18.8	Novembro	-18.9
Junho	23.1	Dezembro	-23.0

**ANEXO B**

**B.1 – Radiação global (kWh/m<sup>2</sup>)**

Local/mês	Mpt	Chk	Mnc	Ibane	Bei	Chi	Tet	Npl	Lum	Pb	Lch
Jan	7.7	7.5	7.6	6.6	6.5	5.9	7.0	6.1	7.0	6.1	4.1
Fev	7.3	7.1	7.3	6.3	6.2	5.9	7.1	6.0	6.9	5.9	4.6
Mar	6.4	6.4	6.5	5.7	5.7	5.4	6.8	5.7	6.5	5.8	4.2
Abr	5.3	5.5	5.5	4.8	5.1	5.2	6.2	5.2	6.1	5.4	4.5
Mai	4.4	4.6	4.6	4.0	4.4	4.7	5.5	4.6	5.5	5.0	4.8
Jun	3.9	4.2	4.0	3.6	3.9	4.2	5.0	4.2	5.0	4.6	4.6
Jul	4.1	4.3	4.3	3.8	4.1	4.0	5.2	4.3	5.2	4.7	4.4
Ago	4.9	5.1	5.1	4.4	4.7	4.9	6.0	5.0	6.1	5.3	5.4
Set	5.8	5.9	6.0	5.2	5.5	5.4	6.7	5.8	7.0	5.9	6.2
Out	6.7	6.6	6.7	6.0	6.1	5.8	7.3	6.3	7.7	6.5	6.2
Nov	7.1	7.1	7.2	6.4	6.4	5.8	7.7	6.5	7.8	6.7	6.0
Dez	7.7	7.6	7.6	6.7	6.5	5.3	7.2	6.2	7.2	6.4	4.7

**B.2 – Radiação difusa (kWh/m<sup>2</sup>)**

Local/mês	Mpt	Chk	Mnc	Ibane	Bei	Chi	Tete	Npl	Lum	Pb	Lch
Jan	2.7	2.7	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.3
Fev	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.3
Mar	2.1	2.1	2.1	2.1	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1
Abr	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.5	1.9	1.9	1.9	2.0	1.9
Mai	1.3	1.4	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7
Jun	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6
Jul	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6
Ago	1.5	1.5	1.5	1.5	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Set	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Out	2.3	2.3	2.4	2.3	2.3	2.3	2.4	2.3	2.4	2.3	2.3
Nov	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4
Dez	2.8	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.5	2.6	2.5	2.4

**B.3 – Radiação directa (kWh/m<sup>2</sup>)**

Local/mês	Mpt	Chk	Mnc	Ibane	Bei	Chi	Tet	Npl	Lum	Pb	Lch
Jan	5.0	4.8	4.9	3.9	3.9	3.3	4.4	3.6	4.5	3.6	1.9
Fev	4.8	4.7	4.8	3.8	3.8	3.5	4.7	3.6	4.4	3.5	2.3
Mar	4.3	4.3	4.3	3.5	3.6	3.3	4.6	3.5	4.3	3.5	2.1
Abr	3.7	3.8	3.8	3.1	3.2	3.1	4.3	3.3	4.2	3.5	2.6
Mai	3.1	3.3	3.2	2.7	2.9	3.1	3.9	3.0	3.9	3.3	3.1
Jun	2.8	3.0	2.9	2.4	2.6	2.9	3.5	2.7	3.5	3.0	3.0
Jul	2.9	3.1	3.0	2.5	2.7	2.5	3.6	2.8	3.6	3.1	2.8
Ago	3.4	3.6	3.5	2.9	3.1	3.2	4.2	3.2	4.3	3.5	3.5
Set	3.9	4.0	4.0	3.3	3.5	3.4	4.6	3.7	4.9	3.8	4.1
Out	4.3	4.3	4.4	3.6	3.8	3.5	5.0	4.0	5.4	4.2	3.8
Nov	4.5	4.5	4.5	3.8	3.9	3.3	5.2	4.0	5.3	4.2	3.5
Dez	4.9	4.8	4.8	3.9	3.8	2.7	4.6	3.7	4.7	3.9	2.3

**B.4 – Insolação observada (horas)**

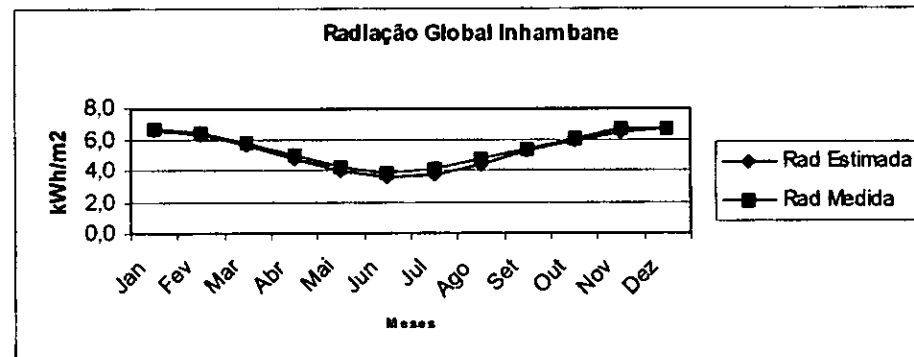
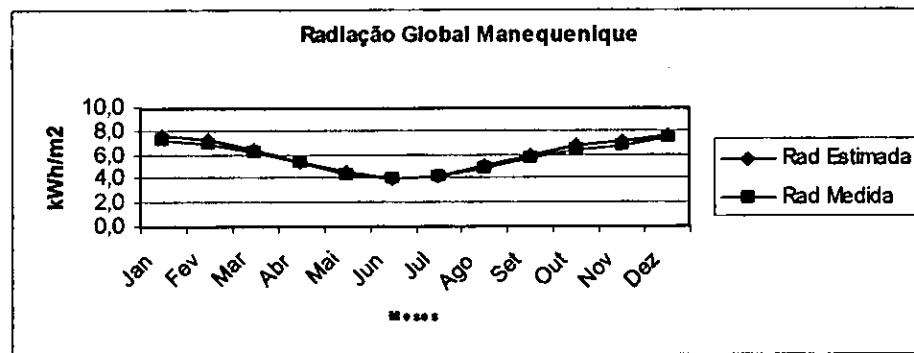
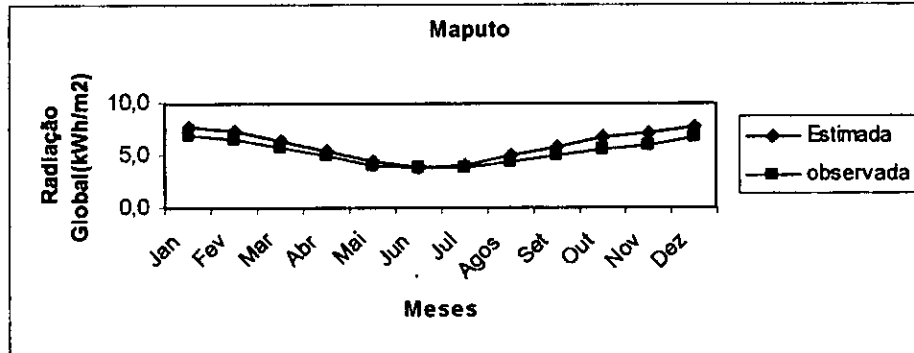
Local/mês	Mpt	Chk	Mnc	Ibane	Bei	Chi	Tet	Npl	Lum	Pb	Lch
Jan	8.6	8.3	8.6	8.7	8.4	7.1	7.1	6.8	7.3	7.0	4.0
Fev	8.6	8.1	8.6	8.7	8.1	7.3	7.9	6.9	7.2	6.7	4.9
Mar	8.0	7.9	8.1	8.4	8.1	7.0	8.2	7.3	7.3	7.4	4.6
Abr	7.8	8.1	8.0	8.2	8.4	7.8	8.5	7.9	8.0	8.6	5.9
Mai	7.7	8.1	7.8	8.3	8.4	8.0	8.9	8.1	8.6	9.3	7.4
Jun	7.3	8.0	7.4	7.8	8.1	7.8	8.4	7.5	8.0	8.8	7.6
Jul	7.4	8.0	7.7	8.2	8.0	6.7	8.3	7.4	8.0	8.8	6.9
Ago	7.8	8.2	8.0	8.4	8.5	7.8	9.3	8.2	9.2	9.5	8.1
Set	7.6	7.6	7.8	8.1	8.4	7.6	9.0	9.1	9.8	9.6	8.6
Out	7.5	7.3	7.7	8.1	8.5	7.4	9.2	9.4	10.3	10.5	7.9
Nov	7.4	7.3	7.6	8.0	8.4	7.0	9.4	9.1	9.8	10.5	7.4
Dez	8.4	8.1	8.3	8.6	8.1	6.0	7.8	7.5	7.9	8.7	5.1

**B.5 – Coeficientes para a redução de quantidade de radiação solar por meio de distância Terra - Sol**

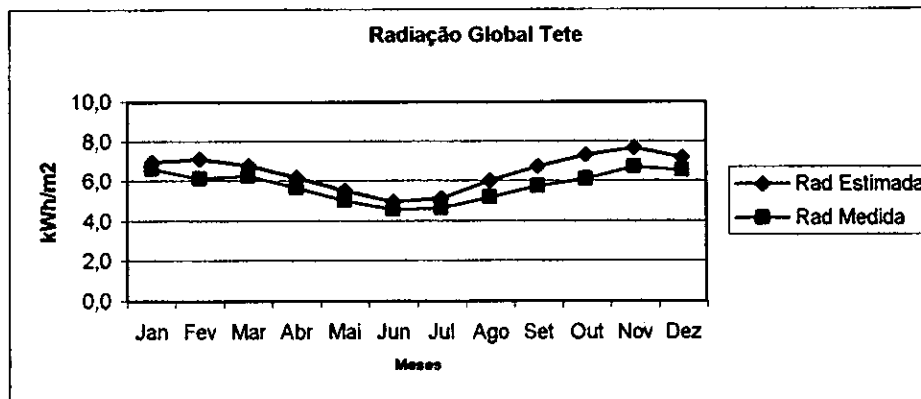
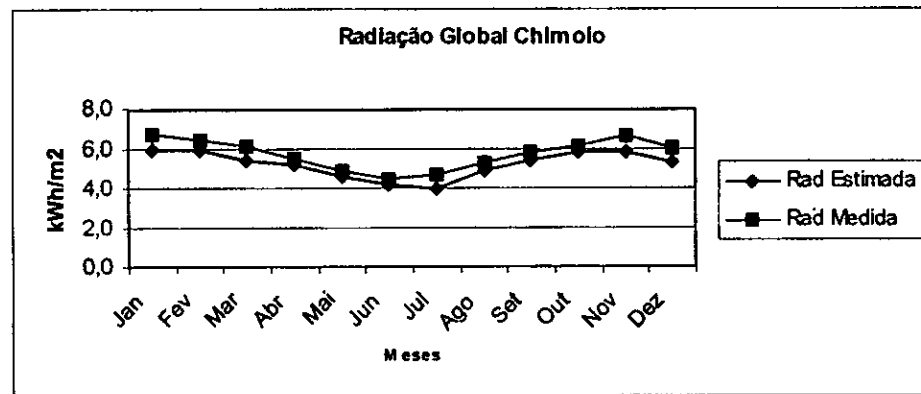
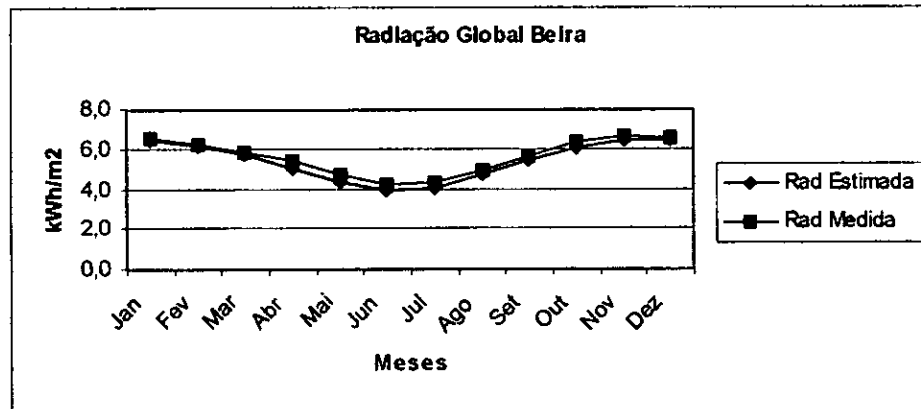
Dia	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho
1	0.9667	0.9708	0.9819	0.9986	1.0155	1.0284
5	0.9669	0.9723	0.9842	1.0013	1.0177	1.0296
10	0.9671	0.9738	0.9864	1.0040	1.0199	1.0308
15	0.9677	0.9757	0.9892	1.0067	1.0220	1.0317
20	0.9682	0.9777	0.9920	1.0096	1.0241	1.0327
25	0.9693	0.9798	0.9950	1.0125	1.0261	1.0332
Dia	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1	1.0337	1.0300	1.0182	1.0022	0.9849	0.9722
5	1.0337	1.0288	1.0161	1.0000	0.9827	0.9710
10	1.0337	1.0272	1.0138	0.9970	0.9805	0.9698
15	1.0331	1.0257	1.0111	0.9942	0.9783	0.9688
20	1.0324	1.0237	1.0084	0.9914	0.9761	0.9679
25	1.0316	1.0214	1.0053	0.9884	0.9742	0.9673

ANEXO C

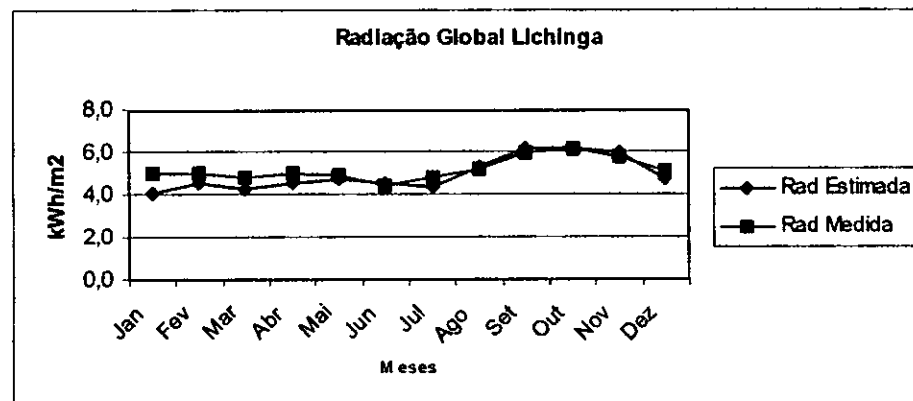
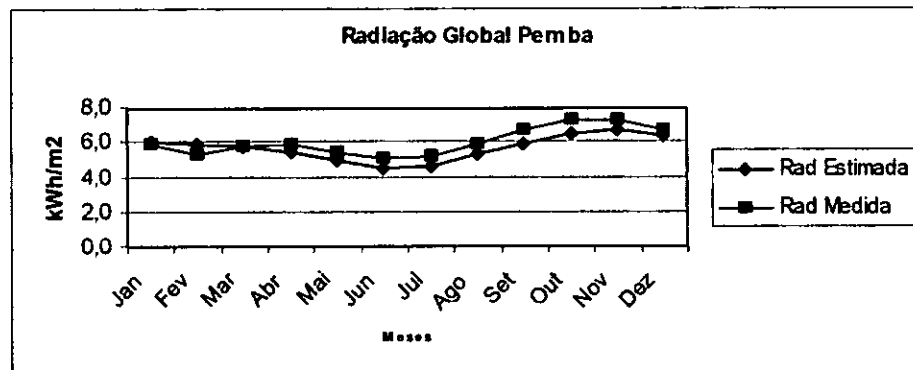
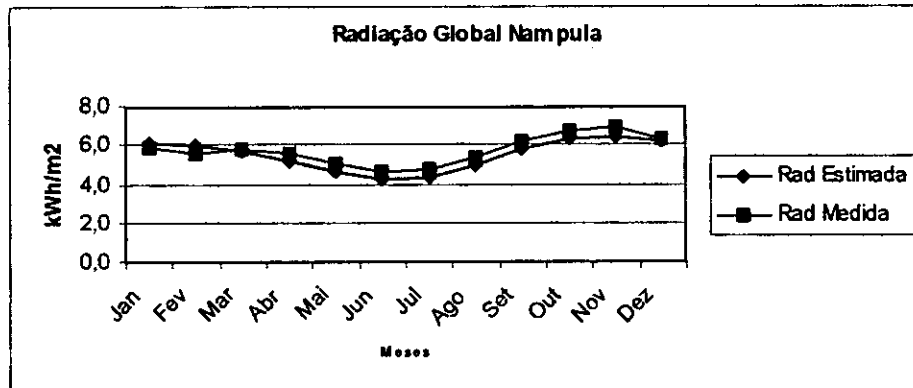
C.1 – Comparação entre valores médios mensais estimados e observados para o período de 1970 – 2000



C.2 – Comparação entre valores mensais estimados e observados na região Centro para o período de 1970 – 2000



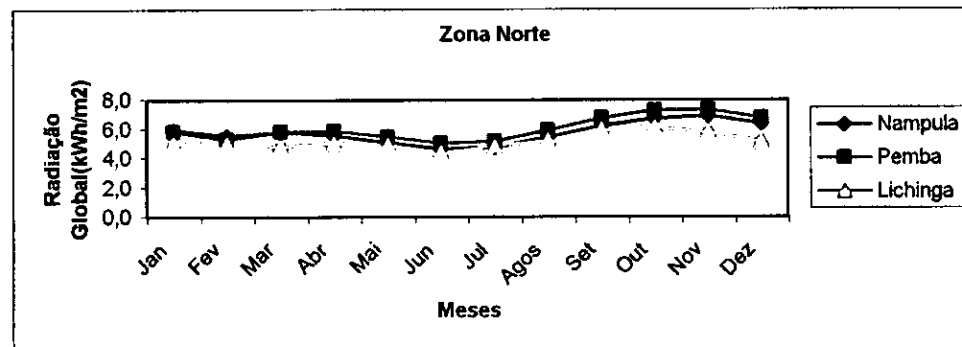
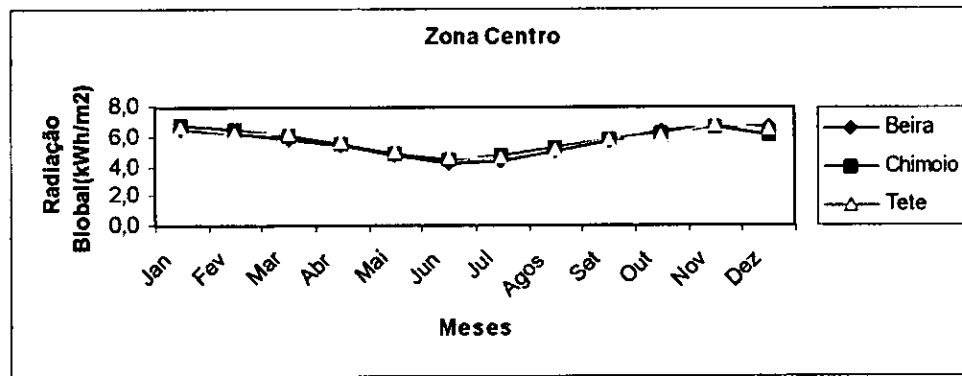
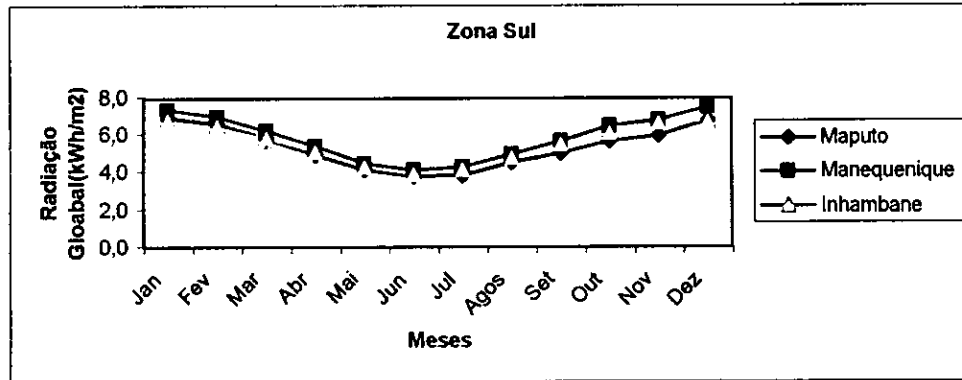
### C.3 – Comparação entre valores mensais estimados e observados na região Norte para o período de 1970 – 2000





ANEXO D

D.1 – Comparação de valores mensais diários da radiação solar global por região



**D.2 – Média anual da radiação solar global por região**

Região	Estação	Média anual (kWh/m <sup>2</sup> )	Média anual / Região (kWh/m <sup>2</sup> )
Sul	Maputo	5.3	5.2
	Manequenique	5.4	
	Chokwe	5.4	
	Inhambane	4.7	
Centro	Beira	4.9	5.2
	Chimoio	4.8	
	Tete	5.9	
Norte	Nampula	4.9	5.1
	Pemba	5.9	
	Lumbo	5.2	
	Lichinga	4.6	