

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE FÍSICA "GLEB WATAGHIN"

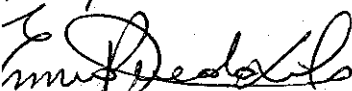
ESTUDO DO EFEITO DA ABSORÇÃO DA
RADIAÇÃO
SOLAR PELA ATMOSFERA EM APLICAÇÕES
FOTOVOLTAICAS

Rolando Moisés Perca Gonzales

Orientador: Ennio Peres da Silva

exemplar
responde à
ação final da
de mestrado
entida pelo
io Rolando Moises
a Gonzales e
vada pela Comissão
gadora.

01/04/98


ENNIO PERES DA SILVA
LAB. HIDROGÊNIO

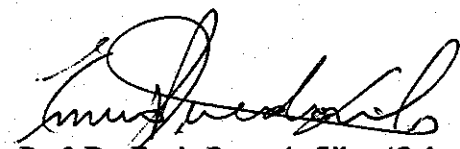
Dissertação apresentada ao
Instituto de Física "Gleb Wataghin"
para obtenção do título de
Mestre em Física.
UNICAMP

Março de 1998

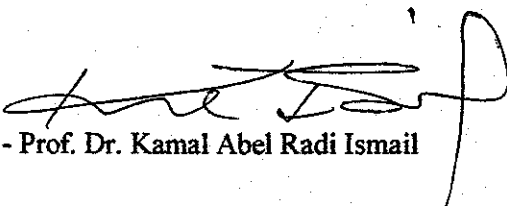
PARECER DE APROVAÇÃO
DEFESA DE TESE DE MESTRADO DE
ROLANDO MOISÉS PERCA GONZALES

DATA : 24 / 03 / 98

BANCA EXAMINADORA:



- Prof. Dr. Ennio Peres da Silva (Orientador do Candidato)



- Prof. Dr. Kamal Abel Radi Ismail



- Profa. Dra. Margarita Ballester Ferreira Santos

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Ennio Peres da Silva pela orientação constante do presente trabalho.

Ao CNPq pelos 30 meses de bolsa concedida no curso de mestrado em Física.

Ao CEPAGRI/UNICAMP pelos dados de irradiação solar proporcionados para comparação com os apresentados no presente trabalho.

Aos meus amigos e colegas que de muitas maneiras ajudaram na minha pesquisa.

ÍNDICE

RELAÇÃO DE VARIÁVEIS UTILIZADAS	iv
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
OBJETIVOS	x
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	5
PROBLEMAS AMBIENTAIS PROVOCADOS PELO USO INTENSIVO DE FONTES NÃO RENOVÁVEIS DE ENERGIA	5
2.1 Introdução	5
2.2 A Atmosfera Natural	5
2.2.1 Dióxido de Carbono	8
2.2.2 Compostos de Enxofre	8
2.2.3 Compostos Nitrogenados	10
2.2.4 Hidrocarbonetos	10
2.2.5 Partículas	10
2.2.6 Radiatividade	11
2.3 A agenda 21 e a Preocupação Mundial com as Emissões de CO ₂	12
CAPÍTULO 3	18
ESTADO DA ARTE DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	18
3.1 Efeito Fotovoltaico	18
3.2 Junções Tipo p-n	20
3.3 Características das Células Solares	22
3.3.1 Absorção de Energia Solar por Células Solares	22
3.3.2 Características I-V	23
3.3.3 Potência	24
3.3.4 Fator de Preenchimento	25

3.3.5 Eficiência de Células Fotovoltaicas	26
3.3.6 Efeito do Comprimento de Onda	27
3.4 Limites Teóricos de Aproveitamento Fotovoltaico	28
3.5 Tecnologias de Conversão Fotovoltaica e Comerciais	29
3.5.1 Perspectivas para as Células Fotovoltaicas	29
CAPÍTULO 4	33
DESENVOLVIMENTOS TEÓRICOS	33
4.1 Fluxo Radiante Solar	33
4.1.1 Algumas Relações Terra-Sol	35
4.1.2 Relações Entre φ , δ , h e Z	37
4.1.3 Radiação Sobre Superfícies Inclinadas	37
4.1.4 Radiação Solar Terrestre	39
4.1.5 Radiação Global e Difusa	39
4.1.6 Irradiação Total Diária	39
4.2 Determinação do Fluxo de Radiação Solar Global em Função do Tempo no Topo da Atmosfera	40
4.3 Radiação Solar Medida na Superfície Terrestre e massa de ar	45
4.4 Determinação das Constantes “ K_0 ” e “ K ” de Perdas de Energia de Radiação Solar na Atmosfera Terrestre	46
CAPÍTULO 5	52
ARRANJO E MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS DA IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA EM CAMPINAS	51
5.1 Medidas Experimentais da Irradiação Solar Direta em Campinas	52
5.2 Montagem do sistema	52
5.3 Descrição do equipamento	53
5.3.1 Baterias	53
5.3.2 Estabilizador (No-Break)	53
5.3.3 Amplificador	53

5.3.4 Piranômetro espectral de precisão (Eppley)	54
5.3.5 Energy Logger	55
5.4 Testes dos sistemas e resultados preliminares da operação	55
CAPÍTULO 6	60
ANÁLISE DOS TESTES E RESULTADOS	60
6.1 Comparação da Irradiação Solar Livre de Perdas por Absorção e Dispersão e a Radiação Solar Direta com Perdas na Superfície da Terra	60
6.2 Irradiação Solar Média Diária e Mensal	63
6.3 Média Mensal de Radiação Direta Diária em Plano Horizontal, Comparação Teórica e Experimental	66
6.4 Determinação dos Valores de “K” Diários e Interpretações	66
6.4.1 Determinação de K_0	66
6.4.2 Determinação de K	72
6.5 Distribuições Teóricas da Irradiação Solar Direta na Superfície Terrestre	77
6.6 Irradiação Média Diária e Valores Máximos da Irradiação Solar	81
6.7 Comparação de Dados Obtidos com o Medidor Solar Eppley e os Obtidos pelo CEPAGRI	83
CONCLUSÕES E SUGESTÕES	87
ANEXO 1	89
ANEXO 2	91
REFERÊNCIAS	101

LISTA DE VARIÁVEIS UTILIZADAS

A	área da célula, (m^2)
c	velocidade da luz $3 \cdot 10^8$ m/s
d	distância real percorrida pelos raios solares na atmosfera terrestre, (m)
d'	distância medida na direção zenital (Sol-Terra) na atmosfera terrestre, (m)
E	quantidade de irradiação solar total diária (W/m^2)
E_c	borda inferior da banda de condução de um semicondutor (eV)
E_e	radiação total diária global na superfície da Terra, (J)
E_f	energia de fótons, (eV)
E_F	energia de Fermi (eV)
E_g	largura do poço de potência (gap. de energia), (eV)
E_0	radiação solar total diária entre o nascer e o por do Sol (W/m^2)
E_t	radiação total diária no topo da atmosfera, (W/m^2)
E_v	borda superior da banda de valência de um semicondutor (eV)
e	distância mínima coberta pelos raios solares 100 km
F	fluxo radiante da radiação de calor, (W)
F_R	fator de preenchimento
f_s	razão $(R_s/R_{TS})^2$
H	hora do dia (h)
h	ângulo horário de um astro (h)
h_n	ângulo horário do nascer de Sol
h_p	ângulo horário do por do Sol
h	constante de Planck, $6,62 \cdot 10^{-34}$ Js
I	radiação solar global, (W/m^2)

I_d	radiação solar direta, (W/m^2)
I_f	radiação solar difusa, (W/m^2)
I_s	intensidade da radiação na superfície solar, (W/m^2)
$\bar{I}_{e,\text{diário}}$	valor médio diário da irradiação global que atinge o solo terrestre para um dia qualquer com irradiação I_e em algum instante t do dia (0-24 hrs), (W/m^2)
I_t	constante solar $1.372,7 \text{ W/m}^2$ (irradiação solar no topo da atmosfera), (W/m^2)
$\bar{I}_{t,\text{diário}}$	valor médio diário da irradiação no topo da atmosfera para um dia qualquer com irradiação I_t em algum instante t do dia no intervalo de horas de Sol (6-18 hrs.), (W/m^2)
i	intensidade de corrente na célula, (A)
i_m	intensidade de corrente máxima na célula, (A)
i_{sc}	corrente de curto-circuito na célula, (A)
j_s	densidade de corrente de saturação do diodo, (A/m^2)
K	constante de perdas por absorção e dispersão na atmosfera terrestre da radiação solar segundo o modelo de Beer, ($1/\text{m}$)
K_0	constante de perdas por absorção e dispersão na atmosfera terrestre da radiação solar segundo o modelo do redutor constante de radiação
k	constante de Boltzmann $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
L	longitude geográfica
n_h	vector direcional da posição do Sol com referência a Terra
n_s	vector direcional do plano receptor da radiação solar com referência a Terra
n_β	vetor direcional no ponto de interesse da posição inclinada de um plano
$n_{\beta\gamma}$	vetor direcional do plano receptor da radiação solar
P	potência, (W)

P_m	potência máxima, (W)
R_s	raio do Sol $6,96.10^8$ m
R_{TS}	distância Terra-Sol $1,5.10^{11}$ m
R_y	dispersão de Ryleigh
r	raio médio da Terra 6.368 km
sr	unidade de ângulo solido stereoradian
T	temperatura absoluta, ($^{\circ}K$)
T	período do dia (24 horas), (h)
T_s	temperatura da superfície solar, ($^{\circ}K$)
t	tempo, fração de hora respeito ao meio dia (12-H), (h)
t_n	tempo de nascer do Sol, (h)
t_p	tempo de por do Sol, (h)
V	tensão na célula, (V)
V_m	tensão máxima na célula, (V)
V_{OC}	tensão de circuito aberto na célula, (V)
x_p	coordenada de posição do intercepto da região p de da junção p-n de um semiconductor, (m)
x_p	coordenada de posição do intercepto da região n e da junção p-n de um semiconductor, (m)
Z	ângulo de Zênite
α	ângulo relativo entre a latitude e declinação geográficas
β	inclinação superficial de um plano inclinado sobre a superfície da Terra
γ	azimute superficial de um plano inclinado sobre a superfície da Terra
δ	declinação geográfica
ε	emitância de materiais emissores de calor
η	eficiência da célula fotovoltaica
Θ	ângulo de inclinação de uma radiação solar sobre um plano

inclinado

λ

comprimento de onda, (μm)

λ_c

comprimento de onda de corte o qual corresponde à energia gap. do semiconductor, (μm)

ν

frequência, (1/s)

σ

constante de Stefan-Boltzmann $5,6 \cdot 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

τ

coeficiente de transmissão

φ

latitude geográfica

RESUMO

A utilização das energias renováveis como fontes de geração de energia, que no seu uso produzem relativamente menores problemas de poluição ambiental que as fontes não renováveis tradicionais, é um dos temas de consideráveis estudos para se melhorar as condições do meio ambiente que no presente vivemos, onde predomina amplamente o uso indiscriminado das fontes não renováveis como exploração do petróleo e todos seus derivados, uso da radiatividade, etc.

A energia solar é uma dessas fontes renováveis, com seu potencial quase inesgotável de energia, que pode ser de grande utilidade em muitas aplicações entre as quais temos o aproveitamento fotovoltaico, aquecimento de água, etc. Para tais aplicações é preciso um estudo quantitativo e qualitativo da radiação solar, o qual permita conhecer-se as propriedades físicas desta, como a quantidade de radiação solar disponível numa determinada região, distribuições diárias e mensais; médias diárias, mensais, etc. Outra análise importante é aquela das perdas da irradiação solar por absorção e dispersão na camada da atmosfera terrestre permitindo-se determinar a quantidade de radiação líquida que atinge a superfície terrestre (quantidade útil nas aplicações solariméricas).

Este trabalho trata da análise de algumas propriedades físicas da radiação solar na região de Campinas -SP, procurando determinar as distribuições de radiação solar diárias e mensais. Aqui também são propostos dois modelos semi-empíricos para determinar as perdas por absorção e dispersão na atmosfera terrestre da radiação solar, visando um estudo posterior no uso de sistemas fotovoltaicos na região.

ABSTRACT

The renewable energy utilization like sources of energy generation, whose use procure relatively a little problems about ambient pollution, than the traditionally no renewable sources is a subject of considerable studies to improve the environment conditions that on the present we live, whose great domains id the indiscriminate use of the no renewable sources like to petrol and its derivatives exploitation, radioactivity use, and so on.

The solar energy is a of those renewable sources, with its production almost inexhaustible of energy, it can be of great utility in many applications, one of them is the photovoltaic available, water heating, etc. For these applications is necessary a quantitative and qualitative study of solar radiation, that will allow to know the physical properties of this, like to solar available radiation quantity, in determined region, daily and mensal distributions, daily and mensal means, etc. Other important analysis is the solar radiation dispersion and absorption losses in the atmospheric terrestrial layer allowing to determine the total radiation quantity that come to terrestrial surface (usual quantity at the solarimetric applications).

This work investigates about some physical properties of solar radiation on the Campinas-SP region, trying to determine the mensal and daily solar radiation distributions. Here also are given semi-empirical models to determinate the absorption and dispersion losses in the terrestrial atmospheric of the solar radiation and visa a posterior study about photovoltaic systems use at the region.

OBJETIVOS

Os principais objetivos deste trabalho foram:

- a) Determinar e analisar de maneira quantitativa as características físicas da energia solar em Campinas, SP, a partir da coleta de dados de irradiação solar. Com estes dados se buscará obter valores médios diários e médios mensais úteis em qualquer aplicação solarimétrica, ou comparando-os com outros já registrados em anos anteriores para garantir a eficácia do método experimental utilizado.
- b) Fazer comparações das medidas de irradiação solar com outras fontes de medição disponíveis em Campinas, SP, como por exemplo as obtidas pelo CEPAGRI (Centro de Estudos e Pesquisas em Agricultura), para confirmar a validade dos dados medidos com o sistema instalado para nossa pesquisa.
- c) Desenvolver e provar a eficiência de modelos teóricos semi-empíricos na determinação das perdas totais por absorção e dispersão da irradiação solar na atmosfera terrestre e fazer comparações entre eles para se determinar o de melhores resultados para sua utilização em futuros trabalhos solarimétricos, como no cálculo da eficiência de painéis fotovoltaicos.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A energia é uma das forças primárias em toda economia. Desde tempos remotos as nações de todo mundo tem-se interessado nas questões relativas à energia, procurando estabelecer seu valor econômico, as formas de obtê-la, etc., com ênfase acentuada após a Revolução Industrial.

Um fato marcante é que atualmente apenas cerca de um quinto da energia utilizada pelo homem é de origem renovável, principalmente solar, biomassa, eólica e hidroeletricidade. O resto vem de produtos fósseis (petróleo, carvão, gás natural), da energia nuclear, ou seja, de formas não renováveis as quais, quando de seu uso contínuo e indiscriminado, trazem consigo efeitos negativos ao ser humano, como contaminação por poluição no meio ambiente, efeito estufa, contaminação por lixo radiativo, etc. [1]

Considerando-se as previsões de que até o final deste século o consumo da energia renovável terá crescido para um terço do total [2], vemos que existe um vasto campo de progresso nesta área, onde a energia solar ocupa um lugar destacado, não só por ser a fonte primária de inúmeras outras fontes renováveis, como hidráulica, biomassa, etc., mas também por estar associada a baixos impactos ambientais e estar distribuída, em maior ou menor grau, em todo o planeta.

Uma das formas de aproveitamento direto da energia solar é como energia térmica, mediante o emprego de coletores planos, concentradores, etc., de diversos tamanhos e geometrias, com o propósito fundamental de obter-se temperaturas mais elevadas para o aquecimento de fluidos, fornos, etc.

Outra forma de se aproveitar a energia solar é através do efeito fotovoltaico, onde células solares recebem a energia eletromagnética vinda do Sol e a transforma diretamente em energia elétrica, não havendo nesta conversão qualquer tipo de emissões de poluentes, como ocorre por exemplo na conversão de combustíveis fósseis em eletricidade (termoeletricos). Esta tecnologia é totalmente renovável e limpa em suas

etapas de utilização e manutenção, havendo alguns problemas ambientais apenas na etapa de fabricação das células, principalmente se a eletricidade requerida não for de origem renovável. Além disso os sistemas fotovoltaicos possuem baixo custo de manutenção, uma vez que são sistemas normalmente fixos, e sua utilização é distribuída, sendo possível fazer-se os módulos solares do tamanho das necessidades a que se destinam. Embora esta tecnologia ainda tenha algumas desvantagens como o custo das células e o problema da necessidade de armazenamento da energia produzida, elas poderão ser reduzidas em alguns anos, melhorando significativamente sua competitividade.

Atualmente tem aumentado em todo o mundo o interesse pelos sistemas fotovoltaicos, motivado principalmente pela redução dos custos das células solares e pelos crescentes problemas ambientais causados pelas formas tradicionais de geração de energia.

Observando-se esta ampla utilidade da energia solar é que ao longo deste século deu-se atenção crescente ao estudo destas e muitas outras possibilidades de aproveitamento desta energia para o qual, em primeira instância, necessita-se realizar o levantamento dos potenciais da mesma na região onde vai ser utilizada. Existem diversos métodos para a determinação destes recursos através de informações solarimétricas, levantadas geralmente durante prolongados períodos de tempo; assim alguns países contam com um conjunto de estações solarimétricas, onde habitualmente são obtidas informações sobre as radiações direta e total (e de maneira indireta a radiação difusa; para mais detalhes ver Capítulo 4). Os dados são apresentados geralmente na forma de potência coletada por unidade de área (W/m^2) no plano horizontal ao longo de um dia, podendo-se deste modo apresentar distribuições mundiais da radiação solar diária, da média mensal e anual no plano horizontal.

A informação mais freqüentemente utilizada é a radiação mensal medida ao longo de muitos anos. Esta, dividida pelo número de dias de medição no mês, é denominada radiação diária média 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 obtido pela NASA (1967-1970) de 1353 W/m^2 . Medições recentes tem apontado o valor de $1372,7 \text{ W/m}^2$.

Para obtenção de alguns outros fatores como a radiação difusa, a radiação total diária, etc., e também parâmetros utilizados em aplicações fotovoltaicas como a inclinação ótima dos painéis em determinada localização, é preciso ainda o conhecimento de dados geográficos como latitude, declinação solar, ângulo zenital, etc. Com todas estas informações pode-se obter parâmetros mais específicos como a constante de perdas de radiação solar pela atmosfera ou, em aplicações fotovoltaicas, determinação de parâmetros de absorção de radiação solar e eficiência dos mesmos, que é um dos objetivos deste trabalho. Estes últimos parâmetros são de importância em trabalhos solarimétricos e de vital relevância no cálculo da eficiência de painéis fotovoltaicos.

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 é bastante difícil o cálculo teórico das perdas verificadas, dada a complexidade dos fenômenos de absorção e dispersão desta radiação em um meio não homogêneo como é a atmosfera terrestre. Do ponto de vista das aplicações da energia solar não são necessários dados diários precisos, mas sim intensidades médias mensais ou anuais que representem satisfatoriamente a quantidade de energia disponível no período. Assim sendo, procurou-se obter neste trabalho uma expressão semi-empírica para as perdas da radiação solar na atmosfera terrestre, destinada principalmente às aplicações práticas da energia solar.

Por fim deve-se mencionar que esta dissertação insere-se no contexto de um projeto que, entre outros objetivos, busca determinar quantitativamente as possibilidades de uso da energia solar na região de Campinas SP [3], procurando analisar as características físicas principais desta energia que atinge a região a partir da coleta de dados de irradiação solar, bem como desenvolver parâmetros que permitam quantificar de maneira simples a intensidade de energia solar local.

Para alcançar seus objetivos esta dissertação está estruturada em capítulos da seguinte maneira:

a) No Capítulo 1 apresenta-se uma introdução na qual se faz uma análise e comparação do uso de fontes de energia tanto renováveis como não renováveis, apresentando os problemas ambientais provocados pelo segundo tipo, concluindo-se como uma das soluções a esses problemas o incremento do uso das fontes renováveis.

b) No Capítulo 2 são estudados diversos aspectos relacionados aos impactos ambientais provocados pelo uso da energia, principalmente não renovável, importantes para a justificativa e relevância do assunto abordado, tanto no que se refere aos problemas provocados por poluentes gerados pelo seu uso como as medidas que vem sendo tomadas por diversos países para diminuir a emissão dos mesmos.

c) No Capítulo 3 são aprofundados os conceitos e levantadas as principais características referentes à energia solar fotovoltaica, buscando-se detalhes dos processos físicos envolvidos, assim como também os projetos desenvolvidos no mundo para sua utilização e aplicações.

d) No Capítulo 4, específico com relação à energia solar, foi aplicado um cálculo matemático para determinação da quantidade de irradiação solar que atinge a superfície terrestre livre de perdas por absorção na atmosfera. São determinadas segundo este cálculo as quantidades de irradiação solar para alguns meses dos anos 1996 e 1997, em intervalos de 20 minutos e diariamente. Também se desenvolve um modelo para determinação das perdas de energia da radiação solar na atmosfera terrestre devida à absorção e dispersão pelos constituintes da mesma.

e) Nos Capítulos 5 e 6 são analisados os resultados dos testes do sistema de medição de irradiação solar instalado, obtendo-se gráficos das distribuições diárias, médias diárias, mensais e conclusões acerca das características de radiação solar no intervalo de tempo de medição. Compara-se as distribuições de irradiação solar teóricas (livres de perdas por absorção e dispersão na atmosfera) e práticas (com perdas) para a determinação dos valores das perdas diárias e mensais. Por último se faz interpretações através das comparações das distribuições e dos valores de perdas.

CAPÍTULO 2

PROBLEMAS AMBIENTAIS PROVOCADOS PELO USO INTENSIVO DE FONTES NÃO RENOVÁVEIS DE ENERGIA

2.1 Introdução

Devido ao intenso uso de fontes não renováveis de energia, nosso meio ambiente vem sofrendo uma série de impactos, entre os quais se encontram a contaminação dos oceanos com petróleo, possível aquecimento global produzido pelo aumento do CO_2 atmosférico (efeito estufa), contaminação de solos e mares por compostos radiativos, chuva ácida resultante da emissão de SO_2 e NO_x na atmosfera, etc. A Tabela 2.1 mostra os problemas ambientais causados pelas atividades humanas, destacando os efeitos das fontes não renováveis de energia.

Neste capítulo será feita uma breve revisão bibliográfica sobre os problemas de contaminação atmosférica provocados pelo uso indiscriminado de recursos energéticos fósseis e a utilização de fontes renováveis de energia como uma possível solução para estes problemas, em especial a energia solar.

Apesar destes impactos ambientais não se limitarem à atmosfera do planeta, como é o caso do derramamento de petróleo nos oceanos e a contaminação do solo por radiatividade, esta restrição aqui utilizada é motivada pela extensão global da poluição atmosférica e pelo fato do objetivo deste trabalho ser exatamente a determinação da influencia da atmosfera na intensidade da radiação solar.

2.2 Atmosfera Natural

O ar na atmosfera natural consiste de uma mistura de gases, apresentados na Tabela 2.2 em % por volume e % por peso de ar seco e limpo.

A Tabela 2.3 mostra a origem dos principais tipos de poluentes atmosféricos, com destaque para aqueles produzidos nos processos de geração e utilização de energia,

muitos dos quais presentes na atmosfera natural mas que, devido seu aumento continuado, provoca inúmeras consequências negativas ao meio ambiente.

Tabela 2.1

Efeitos ambientais provocados pelas atividades humanas na biosfera da Terra [4]

Efeito	Quantidade	Efeitos causados por:			
		Energia da Indústria	Energia Tradicional	Agricultura	Manufatura e outros
Chumbo	375.000 tons./ano	63%: queima de combustíveis fósseis, incluindo aditivos	pequeno	pequeno	37%: proces. de metais, manufatura, combustão de refugos
Petróleo nos oceanos	5.000.000 tons/ano	60%: produç. processamento e transporte de petróleo	pequeno	pequeno	40%: descarte de resíduos de petróleo
Cádmio	8.000 tons/ano	13%: queima de combustíveis fósseis	5%: queima de combustíveis tradicionais	12%: queima-das agrícolas	70%: proces. de metais, manufat., comb. refugos
SO ₂	70.000.000 tons/ano	85%: queima de combustíveis fósseis	0,5%: queima de combustíveis tradicionais	1%: queima-das agrícolas	13%: fundições, queima de refugos
CH ₄	880 p.p.b.	18%: produção e processamento de combustíveis fósseis	5%: queima de combustíveis tradicionais	65%: plantio arroz, animais domésticos e desmatamento	12%: terraplanagem
Mercúrio	17.500 tons/ano	20%: queima de combustíveis fósseis	1%: queima de combustíveis tradicionais	2%: queima-das agrícolas	77%: proces. de metais, manufatura, comb. refugos
NO _x	4.000.000 tons/ano	12%: queima de combustíveis fósseis	8%: queima de combustíveis tradicionais	80%: fertilizantes, manuseio da Terra	pequeno
Partículas	125.000.000 tons/ano	35%: queima de combustíveis fósseis	10%: queima de combustíveis tradicionais	40%: queima-das agrícolas, manuseio do trigo	15%: fundiç., limp. Terra (não agrícola) queima de refugos
CO ₂	70 p.p.m.	75%: queima de combustíveis fósseis	3%: desmatamento para uso energético da biomassa	15%: desmatamento para limpeza da Terra	7%: desmat. para depósitos, manufatura de cimento

Tabela 2.2

Constituintes em ar seco e limpo. [5]

CONSTITUINTE	% POR VOLUME	% POR PESO	CONSTITUINTE	% POR VOLUME	% POR PESO
N ₂	78,1	75,5	H	5x10 ⁻⁵	3,5x10 ⁻⁶
O ₂	20,9	23,1	N ₂ O	5x10 ⁻⁵	7,6x10 ⁻⁵
Ar	0,9	1,3	CO	1x10 ⁻⁵	2x10 ⁻⁵
CO ₂	3,2x10 ⁻²	4,6x10 ⁻²	Xe	8,6x10 ⁻⁶	3,9x10 ⁻⁵
Ne	1,8x10 ⁻³	1,3x10 ⁻³	O ₃	2x10 ⁻⁶	6x10 ⁻⁶
He	5,2x10 ⁻⁴	7,2x10 ⁻⁵	NH ₃	1x10 ⁻⁶	1x10 ⁻⁶
CH ₄	1,4x10 ⁻⁴	7,8x10 ⁻⁵	NO ₂	1x10 ⁻⁷	3x10 ⁻⁷
Kr	1,1x10 ⁻⁴	3,3x10 ⁻⁴	SO ₂	2x10 ⁻⁸	9x10 ⁻⁸

Tabela 2.3

Tipos de fontes e poluentes atmosféricos. [5]

TIPO	FONTE
CO ₂	Vulcões QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS Animais
CO	MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA Vulcões
Compostos de enxofre	Bactérias QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS Vulcões
Hidrocarbonetos	MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA Bactérias Plantas
Compostos Nitrogenados	Bactérias COMBUSTÃO
Material Particulado (0.1-10µm)	Vulcões Ação do vento COMBUSTÃO Processos industriais Meteoros Queima de florestas
Resíduos radiativos	CENTRAIS NUCLEARES

A seguir é apresentado um pequeno resumo das principais características destes compostos.

2.2.1 Dióxido de Carbono

O dióxido de carbono (CO_2), fundamentalmente, e alguns outros gases na atmosfera, são transparentes aos comprimentos de onda mais curtos da radiação eletromagnética. Entretanto, frente às radiações mais longas como o infravermelho (por volta de 10-20 mm), a radiação solar é absorvida por estes compostos e reemitida, retornando parte desta energia para o solo. Portanto, quanto maior a concentração destes gases na atmosfera, menor é a quantidade de radiação emitida para o espaço. Como resultado pode ocorrer o denominado “efeito estufa”, quando a temperatura de equilíbrio da biosfera seria aumentada. O CO_2 é o mais importante dos gases provocadores deste fenômeno, genericamente conhecidos como gases de efeito estufa, entre os quais destacando-se ainda o metano, o óxido nitroso, o ozônio e os clorofluorocarbonetos [6].

Se por um lado não há consenso sobre a existência de fato deste efeito, por outro é forçoso admitir-se que o aumento continuado da quantidade de CO_2 na atmosfera deve ser motivo de grande preocupação. Para se ter uma idéia quantitativa deste problema, a Tabela 2.4 apresenta as quantias relativas atuais (1990) e projetadas (2010 e 2040) da emissão deste composto associadas com a geração de eletricidade térmica total em MtC (milhões de toneladas de carvão) e a geração per capita em tC (toneladas de carvão), para cidades industrializadas, cidades desenvolvidas e a China, incluindo as populações, a geração total de energia em TWh e a geração per capita em MWh de eletricidade térmica (aqui “eletricidade térmica” significa geração de eletricidade a partir de combustíveis fósseis) [7].

Assim, observa-se que o teor de CO_2 na atmosfera, originado da produção de eletricidade térmica, dobrará até 2010 e triplicará até 2040. O uso de fontes renováveis de energia, como a fotovoltaica, poderá ter importante papel a desempenhar nas estratégias de contenção e redução dessas emissões.

2.2.2 Compostos de Enxofre

O enxofre encontra-se na Terra principalmente nas seguintes formas: H_2S , SO_2 e compostos de SO_4 .

A emissão de H_2S na atmosfera é feita de maneira natural como ocorre na degradação anaeróbica da biomassa. O SO_2 também possui fontes materiais, como os vulcões, mas desde a Revolução Industrial vem sendo emitido, principalmente através da queima de hidrocarbonetos que contém enxofre como impureza, mais notadamente o petróleo e seus derivados. Outra forma não menos importante é a queima de compostos de enxofre, como na incineração de lixo doméstico e industrial. A produção de SO_2 é provavelmente um dos piores problemas de poluição por gases emitidos na atmosfera.

Tabela 2.4
População, geração de eletricidade térmica e emissões de CO_2 anuais projetadas desde 1990 até 2040 [7]

	Cidades Industrializadas	Cidades Desenvolvidas	China	Mundo
População(milhões)				
1990	789	2.849	1.236	4.874
2010	842	4.288	1.507	6.637
2040	864	6.521	1.784	9.169
Geração de Eletricidade Térmica (TWh)				
1990	3.802	1072	476	5.390
2010	4.779	4033	1.791	10.602
2040	6.253	15.458	6.864	28.574
Eletricidade Térmica per capita (MWh)				
1990	4,8	0,4	0,4	1,1
2010	5,7	0,9	1,2	1,6
2040	7,2	2,4	3,9	3,1
CO_2 Total de Eletricidade (MtC)				
1990	772	218	112	1.102
2010	970	8.19	364	2.153
2040	1.269	3.138	1.393	5.800
CO_2 per capita de Eletricidade (tC)				
1990	0,98	0,08	0,09	0,23
2010	1,15	0,19	0,24	0,32
2040	1,47	0,48	0,78	0,63

Uma vez liberado, o SO_2 pode reagir quimicamente com o oxigênio atmosférico formando o composto SO_3 , sendo que a reação deste com o vapor de água produz ácido sulfúrico, H_2SO_4 , que é um dos componentes da chuva ácida, responsável por uma variedade de problemas ambientais como a acidificação do solo, que destrói a vegetação e diminui a produtividade da agricultura, provoca a corrosão de estruturas metálicas, etc. [5]

2.2.3 Compostos Nitrogenados

O gás Nitrogênio, N_2 , constituinte básico do ar, é inócuo ao ser humano, mas seus óxidos NO e NO_2 , produzidos pela oxidação por parte do oxigênio atmosférico em altas concentrações, são altamente tóxicos para o ser humano, em especial o NO_2 .

O contato do NO_2 com o vapor de água na atmosfera produz uma reação química que provoca a geração de HNO_3 (em torno de 5% de NO_2 é transformado em ácido nítrico à temperatura ambiente nestas condições). Este ácido assim obtido é um dos principais constituintes, junto com o H_2SO_4 , da chuva ácida [5].

2.2.4 Hidrocarbonetos

Existe uma grande variedade de hidrocarbonetos, desde o gás metano (CH_4), o mais simples deles, até compostos com elevado número de átomos de carbono. Os hidrocarbonetos, associados ao refinamento, queima e evaporação do petróleo e seus derivados, são ingredientes essenciais do “smog” químico na atmosfera. A oxidação pelo oxigênio atmosférico e a ação da luz solar podem dissociar estas moléculas complexas em radicais livres, os quais são mais ativos quimicamente, reagindo com os constituintes atmosféricos e produzindo uma grande quantidade de poluentes estranhos e nocivos ao ser humano [5].

2.2.5 Partículas

Os materiais particulados ($0,1\text{-}10\mu\text{m}$), desenvolvem um papel muito importante na determinação das propriedades de dispersão na atmosfera, podendo até produzir um

“smog” visível. Estes poluentes atmosféricos podem ser facilmente transportados de um lugar para outro pelo ar.

Uma grande quantidade de matéria em forma de partículas presentes na atmosfera está na troposfera, podendo esta quantidade variar de acordo com a disposição de fontes locais e condições meteorológicas.

Alguns tipos de partículas de pequenas dimensões ($0,1-1\mu\text{m}$) podem produzir doenças a longo prazo, como cânceres respiratórios. Toda região com problemas de qualidade de ar deve ser monitorada para determinar a quantidade e o conteúdo de partículas nessa região e assim tomar medidas para melhorar o nível de vida da população [5].

2.2.6 Radiatividade

As fontes radiativas naturais incluem os gases radônio e tório que decaem de maneira natural para Pb, a radiação cósmica e elementos radiativos produzidos por elas, tais como H, K, C, Na, Be, etc.

Entre as fontes artificiais, os reatores nucleares tem um papel importante, uma vez que podem liberar para a atmosfera gases radiativos, como ^{85}Kr , ^3He , ^{131}I sendo o ^{85}Kr (produto de fissão) o de maior vida média (10,76 anos).

Quando ingeridos pelo ser humano, estes produtos produzirão consequências por tempo prolongado. Em doses elevadas, dependendo da sensibilidade do ser humano (que pode variar de um para outro), podem produzir a destruição ou mutação das células dos tecidos, gerando-se cânceres como a leucemia e outros, dependendo da zona de exposição[5].

Tendo-se em conta estes riscos, os custos de construção e a manutenção das plantas nucleares, custos estes ainda crescentes devido à contínua elevação dos preços dos componentes nucleares, dos materiais de construção e mão de obra, e considerando-se ainda as questões de segurança envolvidas, pode ser interessante numa determinada região prescindir-se ou limitar-se a quantidade de reatores nucleares, buscando-se a produção de energia mediante o uso de fontes renováveis, com menor emissão de poluentes e menores riscos [6].

2.3 A Agenda 21 e a Preocupação Mundial com as Emissões de CO₂

Como parte da estratégia mundial para se controlar as emissões de CO₂ e aumentar as eficiências dos usos da energia, está-se considerando taxações para as fontes de energia emissoras, o que elevaria o custo daquelas baseadas no carbono, como petróleo, gás natural e carvão. Além disso, realizam-se estudos para reduzir as emissões de CO₂ mediante a substituição de combustíveis fósseis, com a introdução de medidas legislativas e políticas que tornem mais eficiente e racional o uso da energia, investimentos no desenvolvimento das fontes renováveis (como fotovoltaica e eólica) e produção de combustíveis limpos, com baixa ou nenhuma emissão de poluentes. Na Tabela 2.4 mostra-se algumas medidas previstas por alguns países para reduzir as emissões de gases de efeito estufa [8].

Como pode-se observar nesta Tabela, alguns países como Dinamarca e Alemanha de forma direta e outros de maneira indireta, tem como perspectiva o incremento do uso de fontes energéticas limpas, renováveis, o que justifica os estudos que vem sendo desenvolvidos nesta área, incluindo-se aqui a presente dissertação.

De fato a Alemanha vem realizando projetos para analisar os potenciais técnicos, a distribuição e os custos correspondentes a todas as fontes de energia renovável que poderiam ser usadas na República Federal. Para isto estão sendo consideradas opções para produzir eletricidade (hidropotência, energia do vento, fotovoltaica), para produzir combustíveis líquidos e sólidos (culturas energéticas) para uso de produtos residuais (madeira residual, biogás de resíduos animais e outros resíduos orgânicos), e opções de obtenção direta da demanda calórica (aquecimento solar e geotérmico). Entre todas tem-se destacado o uso da energia eólica no caso de obtenção de eletricidade.[9]

Outros países como os Estados Unidos de América, o Reino Unido, o Japão e a Espanha procuram reduzir as emissões anuais de CO₂ aos níveis de 1990 até 2000, utilizando medidas diferentes para o mesmo efeito, entre as quais podem-se citar; aumento da eficiência dos utilitários, utilização de veículos de combustível limpo, taxaço do consumo de combustíveis e energia (com taxas mais baixas para fontes renováveis de energia), construção de mais plantas nucleares, etc.[8]

Tabela 2.4

Medidas previstas por alguns países para reduzir as emissões de “gases de efeito estufa” (G.E.E.) [3].

País	Objetivo	Medidas	Crítica às medidas
Dinamarca	Reduzir as emissões anuais de CO ₂ a 80% dos níveis de 1998 até 2005	Taxação das emissões, melhoria nas eficiências energéticas, <u>aumento do uso de fontes alternativas de energia</u>	Prováveis de serem bem sucedidas.
Alemanha	Reduzir as emissões anuais de G.E.E. a 50% dos níveis de 1987 até 2005	Fechar fábricas orientais, <u>promover o uso de energias fotovoltaica e eólica</u> ; descontos econômicos para uso de energias alternativas	Pequeno impacto no uso de carvão
Japão	Estabilizar as emissões anuais per capita de CO ₂ em 2000 aos níveis de 1990	Incremento da eficiência dos combustíveis de veículos; construção de mais plantas nucleares	Mais plantas a carvão, poucas fontes alternativas
Espanha	Emissões máximas de CO ₂ anuais a 125% dos níveis de 1990 até 2000	Contar com mais gás natural e mais carvão	Aumento das emissões de CO ₂
Reino Unido	Reduzir as emissões anuais de CO ₂ aos níveis de 1990 até 2000	Taxação do consumo de combustíveis e energia; conversão de carvão a gás natural	Prováveis de obterem resultados
E.U.A	Reduzir as emissões anuais de CO ₂ aos níveis de 1990 até 2000	Aumento da eficiência dos utilitários; iniciativa em veículos limpos; incentivos industriais	Conta demais com medidas voluntárias

A nível mundial existe interesse em se conduzir projetos de conjunta entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, especialmente para mitigar os níveis de poluentes tipo CO₂ e NO_x, como por exemplo o apoio mútuo entre alguns países africanos que estão em diferentes níveis de desenvolvimento. Assim em Zimbabwe o Banco Mundial e os programas de desenvolvimento e meio ambiente das nações unidas estabeleceram um programa para instalar 9000 centros de venda de sistemas fotovoltaicos, cujo propósito

fundamental é diminuir as emissões de gases de efeito estufa como foi aclarado anteriormente.[10]

A Índia têm um programa ambicioso de eletrificação mediante sistemas fotovoltaicos, possivelmente o maior do mundo, com capacidade de 5,75MWp/ano com adicional de 2,75MWp/ano ainda em construção [11].

Os Estados Unidos criaram o “Cranfield Joint Venture Programme” para expansão e melhor utilização das energias renováveis. Este projeto vem sendo desenvolvido no Leste da Europa, Ásia, América Latina, e África do Sul [12].

Um grupo de companhias suecas e alemãs com o financiamento dos seus governos e da União Europeia (EU) estão trabalhando no desenvolvimento de turbinas de vento de grande escala, sendo a companhia envolvida no projeto a “Kvaerner Turin AB”. Neste mesmo campo de energia eólica outros projetos como o “Eureka” está interessado em desenvolver tecnologias para reduzir o barulho criado durante a operação de turbinas eólicas[12].

No Brasil o interesse pelo uso da energia solar e outras energias renováveis no momento está sendo motivado pela implantação de alguns projetos demonstrativos no âmbito de programas de cooperação internacional, que procuram introduzir novas tecnologias num grande mercado, assim como também atender a preocupação dos problemas de contaminação ambiental.

Existem cooperações internacionais que estão levando à implantação de projetos pilotos demonstrativos envolvendo concessionárias de energia elétrica, governos estaduais, universidades, etc. A Tabela 2.5 mostra alguns destes casos.

Entre estes projetos destaca-se o convênio entre o Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL), os governos dos Estados do Ceará e Pernambuco e o National Renewable Energy Laboratory (NREL) do Departamento de Energia dos Estados Unidos, abrangendo o uso das energias solar fotovoltaica e eólica. Aqui será discutido apenas o que se refere à energia solar fotovoltaica. Este convênio, na sua primeira fase, iluminou residências e escolas em vilas no interior destes estados, trabalhando em projetos demonstrativos com algumas concessionárias como COELCE, CELPE, CEMIG, COELBA, LIGHT, entre outras, fez a criação do Grupo de Trabalho de Energia Solar

Fotovoltaica (GTEF), cujos objetivos são levantamentos de dados solarimétricos, divulgação e treinamento, montagem de uma base de dados e normatização, etc. Numa segunda fase na Bahia e outros estados, ver Tabela 2.5, foram priorizados os usos produtivos da tecnologia fotovoltaica além de iluminação e bombeamento de água, como por exemplo no Amazonas e Pará, onde se fizeram uso de sistemas híbridos solar, eólico e Diesel, etc.

Tabela 2.5 *Projetos de cooperação instalados ou em instalação [13]*

PROJETO	FOTOVOLTAICO (Wp)	CARACTERISTICAS
GTZ (Alemanha)	14.450	15 Sistemas de bombeamento
NREL-Fase 1		
Pernambuco	36.570	345 residências
Ceará	30.790	492 residências, 71 outros [w1] ^(*)
NREL-Fase 2		
Bahia	24.320	17 bomb., 107 residências, 32 outros ^(*)
Pará	10.180	Sistema híbrido solar eólico diesel
Amazonas	51.200	Sistema híbrido solar diesel
Minas Gerais	14.690	30 residências, 19 outros, 7 bomb.
Alagoas	7.890	eólico
Brasília	290	46 residências, 6 bomb., 8 outros, 1 residência, 1 escola.
Eldorado/CELPE	59.450	404 escolas, 15 bomb.
SOS		
PG-Belgica/APAEB	645	15 cercas elétricas
IPADE/AECI/CEAM ^(**)	2.180	35 residências, 6 outros
AECI/USP	300	2 escolas, 1 centro comunitário

(*) Inclui: iluminação pública, centros comunitários, escolas, creches, centros de saúde, cercas elétricas, igrejas.

(**) Instituto de Promoción y Apoyo al Desarrollo (IPADE), Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI)

No que se refere a iniciativas não vinculadas a projetos de cooperação, estas se vem desenvolvendo em diversos estados. Alguns destes sistemas implantados são mostrados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6.

Sistemas implantados com recursos inteiramente nacionais [13]

SISTEMAS	FOTOVOLTAICO (Wp)	CARACTERISTICAS
COELBA	721	1 poço de bombeamento
CESP	6220	11 centros comunitários
CEMIG	1470	4 resid. rurais, 1 irrigação
LIGHT	817	19 sistemas de iluminação
PRODEEM		
PE	650	carregamento de baterias
MS	1.600	bombeamento e outros
CE, BA, RN, SE ES, MG, RJ, PR, RS (*)	15.850	sistemas comunitários
Outros estados(**)	15.150	sistemas comunitários

Além destes projetos e como complemento do acima mencionado, o Estado da Paraíba vem utilizando um Sistema de Informação Geográfica (GIS) para viabilizar informações energéticas (de tipo solar e eólica) e, em consequência, gerar mapas temáticos com os potenciais destas fontes e elaborar análises de perspectivas energéticas.[14]

Da mesma forma a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) vem promovendo um projeto de demonstração do uso de painéis fotovoltaicos em residências em um município próximo a Belo Horizonte. A experiência deve ser expandida a um

(*) Em instalação

(**) Estágio de projeto concluído

maior número de pontos, com atendimento a outras residências, a escolas rurais e postos de saúde. [14]

Existem ainda estudos desenvolvidos pela COELBA sobre metodologia e aplicação na seleção de localidades rurais a serem eletrificadas com a utilização de energia solar fotovoltaica [13].

No que se refere a projetos de pesquisas na área da energia solar no país destacam-se as seguintes linhas:

- Busca de células de alta eficiência para aplicações espaciais ou para aplicações industriais.
- Caracterização de materiais básicos como ligas de silício e germânio, filmes finos (TeCd)
- Performance dos concentradores
- Modelização da distribuição espacial e espectral da radiação solar
- Desenvolvimento de medidores para levantamento do potencial solar
- Desenvolvimento de sistemas híbridos
- Desenvolvimento de componentes e periféricos
- Dimensionamento e operação de sistemas fotovoltaicos interligados a rede elétrica e produção de softwares. [15]

CAPITULO 3

ESTADO DA ARTE DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Neste capítulo são apresentados, de forma resumida, os princípios básicos do efeito fotovoltaico, mostrando-se a relação entre a energia produzida na célula e a intensidade da radiação solar incidente, bem como a eficiência teórica do processo; apresenta-se também o estado da arte da tecnologia de conversão fotovoltaica, permitindo uma visão clara das possibilidades desta tecnologia.

3.1 Efeito Fotovoltaico

A grande maioria das células solares fabricadas nas últimas décadas são à base de Si, e mesmo as que são produzidas com materiais diferentes seguem o mesmo fundamento físico, denominado efeito fotovoltaico, que será analisado a seguir para o caso do Si, mas que vale para todos os outros tipos de células.

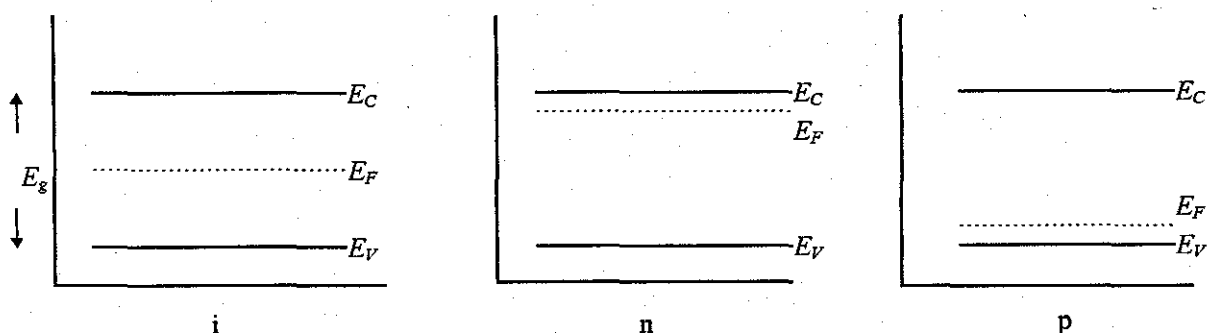
Um átomo de Si tem 4 elétrons de valência, os quais para formar cristais do mesmo elemento dispõem-se simetricamente de tal forma que compartilham os seus elétrons com outros 4 átomos mediante enlaces covalentes. Estes enlaces podem ser quebrados se são expostos a energias maiores de 1.1 eV, correspondente ao poço do potencial do Si. Assim, os elétrons liberados mediante este processo podem ser acelerados na presença de campos elétricos no interior do cristal, e no seu lugar deixar “buracos” (cargas positivas). Além disso, elétrons vizinhos podem deixar seus enlaces pelo mesmo processo e ocupar estes “buracos”; desta maneira, elétrons e “buracos” se movimentam através do cristal. Isto é chamado de Efeito Fotocondutivo. O semicondutor que se comporta deste jeito chama-se **semicondutor “tipo i”**.

Se são introduzidas impurezas no Si cristalino puro, por exemplo Fósforo P, que tem 5 elétrons de valência, 4 deles estarão em ligação com átomos do Si do cristal e um ficará fracamente ligado. Este elétron, por efeitos térmicos meio-ambientais, pode ser

libertado na banda de condução do cristal; uma vez que estes elétrons são dopados pela impureza, este semiconductor resultante denomina-se **semiconductor de doadores** ou “**tipo n**”.

Do mesmo jeito, se é introduzido no Si cristalino puro o Boro (B), que tem 3 elétrons de valência, fará falta um elétron para se ligar com um dos átomos de Si do cristal; este “buraco” se comporta como carga positiva, libertado na banda de valência do cristal. Este semiconductor resultante denomina-se **semiconductor de aceitores** ou “**tipo p**”.

Devido à proximidade dos átomos no cristal, a energia individual dos mesmos se superpõe e formam-se bandas de energia. A Fig. 3.1, mostra estas bandas para semicondutores tipo i, tipo n e tipo p. Para maiores detalhes ver Ref. [16].



E_C : Borda inferior da banda de condução E_V : Borda superior da banda de valência

E_F : Nível de energia de Fermi E_g : Largura da banda proibida poço de potencial

Fig. 3.1 Estrutura de bandas dos semicondutores tipo i, n, p [17].

A largura da banda proibida, na qual nem elétrons e nem “buracos” podem ter energia, depende do semiconductor; no caso do Si o seu valor é de 1.1eV.

Na Fig. 3.1 se observa também o nível de Fermi, E_F , que corresponde à energia na qual a ocupação de estados tem a probabilidade de $\frac{1}{2}$. Num semiconductor tipo i este nível encontra-se no centro da banda proibida; num tipo n está perto da borda inferior da banda de condução, devido a que os elétrons dos doadores estão fracamente ligados e precisam

de pouca energia para passar para a banda de condução; num semiconductor tipo p o nível de Fermi esta perto da banda de valência, já que nela se encontram em maior quantidade os “buracos” dos átomos aceitadores.

Com o auxilio do conceito de bandas de energia explica-se o fenômeno de condutividade nos semicondutores, através do efeito da temperatura. Assim, por efeito térmico, justifica-se a presença de elétrons de átomos doadores na banda de condução e “buracos” de átomos aceptores na banda de valência.

3.2 Junções Tipo p-n

Quando um material tipo p junta-se a um outro tipo n, produzindo-se uma junção tipo p-n, os elétrons fracamente ligados no material n deslocam-se para o material tipo p devido ao forte gradiente de concentração, e os “buracos” do material p ao n. Assim se produz um campo elétrico na junção p-n; este campo dá lugar a uma pequena corrente no sentido oposto à corrente de difusão referida anteriormente. No equilíbrio estas correntes se anulam de tal forma que a corrente de ambos os portadores de carga na junção é nula.

Quando é aplicada uma tensão d.c. externa (Fig. 3.2, linha descontínua) numa **junção sem iluminação** em polarização direta, o equilíbrio entre a corrente de campo e de difusão é quebrada. Se a tensão aplicada iguala à tensão de barreira de potencial esta desaparece e a corrente aumenta consideravelmente como mostra a mesma linha descontínua. Quando aplicada uma tensão reversa, existe um aumento contínuo da barreira de potencial e aparece uma corrente reversa pequena na junção, devida aos portadores minoritários, mostrado na mesma linha descontínua.[18]

Quando o semiconductor composto absorve fótons de radiação eletromagnética luminosa (**junção sob iluminação**), formam-se pares eletrón-“buraco” em ambos os materiais p e n. Devido à difusão, os portadores de carga em menor quantidade existentes em cada material alcançam a junção p-n, onde o campo elétrico desloca-os à região onde estes elétrons e “buracos” são portadores de carga majoritários. Assim a região p carrega-se positivamente, enquanto que a n negativamente, trazendo como produto uma diferença de potencial. Então, se colocarmos um circuito exterior ligado ao semiconductor, gera-se

uma corrente elétrica, sendo este o princípio físico do efeito fotovoltaico em células solares.

A característica I-V no caso de **junção sob iluminação** é a mesma que aquela da **junção sem iluminação** exceto que é adicionada uma fotocorrente independente da tensão aplicada e proporcional à intensidade de luz, fluindo em sentido oposto ao da corrente direta da junção não iluminada. A curva característica da célula fotovoltaica será portanto o resultado da superposição de uma fotocorrente e a curva característica da junção não iluminada, como mostra a Fig. 3.2.

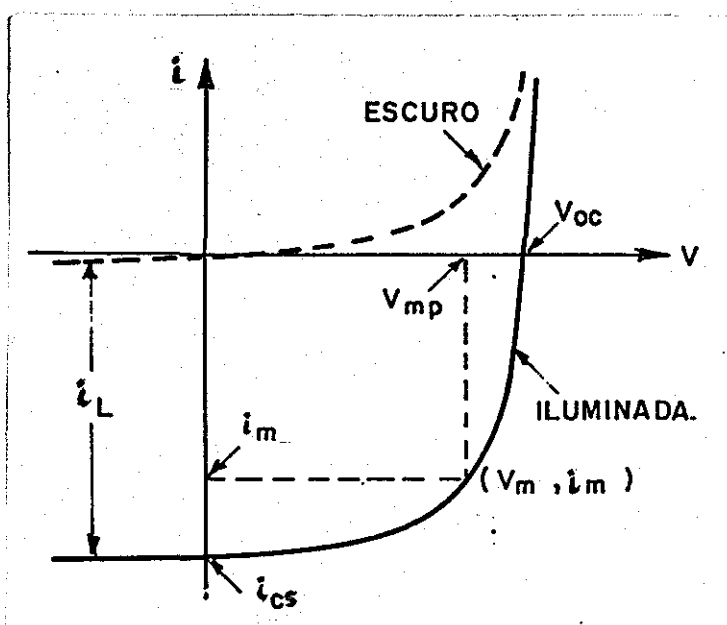
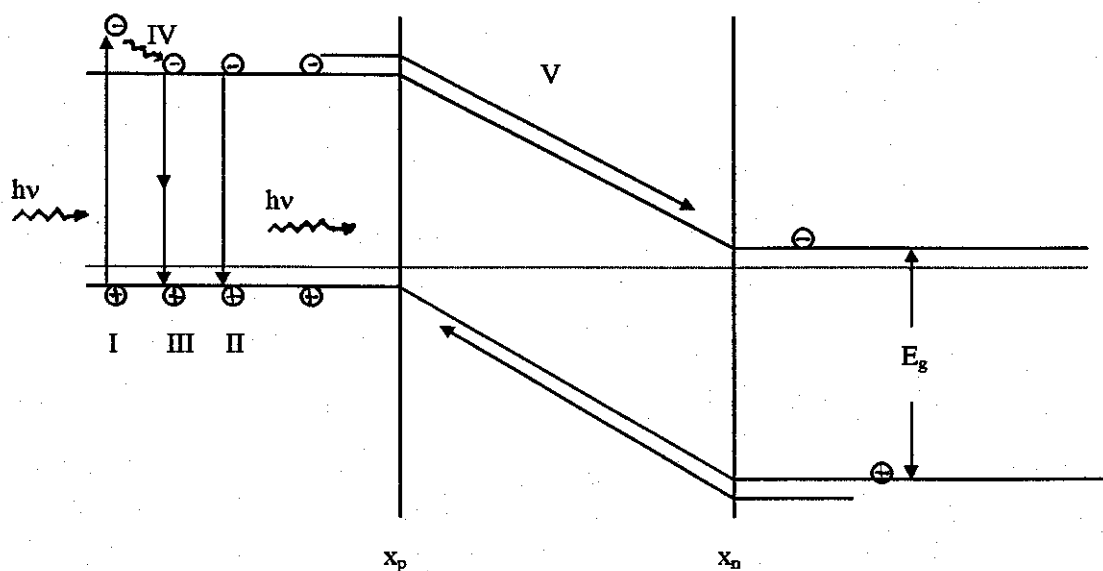


Fig. 3.2 Polarização direta e reversa e curvas características corrente versus tensão de uma junção p-n não iluminada (linha descontinua) e iluminada (linha contínua). [18]

A Fig. 3.3 mostra as bandas de energia para uma junção p-n, o processo fotovoltaico e os mecanismos de perdas de energia.



- I Absorção de luz $h\nu > E_g$
- II Recombinação radiativa
- III Recombinação não radiativa
- IV Termalização de elétrons
- V Separação de cargas (efeito fotovoltaico) [17].

Fig.3.3 Junção tipo p-n e mecanismos de perdas de energia

3.3 Características das Células Solares

3.3.1 Absorção de Energia Solar por Células Solares

A Fig. 3.4 mostra o espectro de energia de radiação eletromagnética solar para um dia de céu claro na superfície da terra ao nível do mar. A mesma figura também mostra a curva da máxima quantidade de energia utilizada na geração de pares elétron-“buraco” no semiconductor de Silício (curva de linha escura). Esta energia utilizada está limitada pelo gap do semiconductor e valores menores que este não produzirão a formação de pares elétron-“buraco”. Assim a radiação eletromagnética vinda do Sol com comprimentos de onda maiores que o comprimento correspondente dos fotons com energia igual ao gap do semiconductor, não serão úteis na produção do efeito fotovoltaico nas células. No caso do Si, cujo valor do gap é de 1.1 eV, o espectro útil se encontra na faixa do espectro visível e ultravioleta, com um máximo de $1,1\mu\text{m}$ de comprimento de onda.[18]

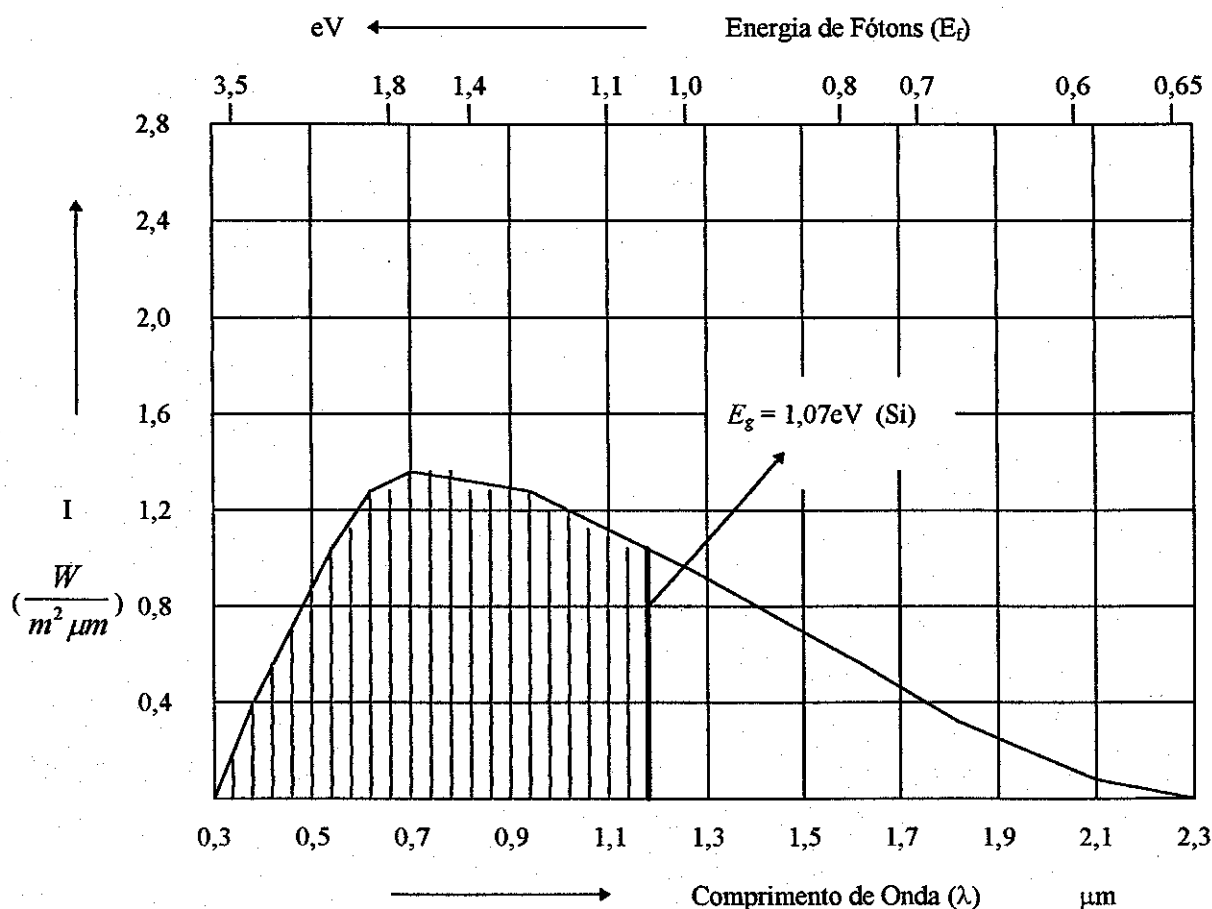


Fig. 3.4 Densidade de energia solar utilizada na geração de pares elétron-“buraco” no semiconductor Si para produção do efeito fotovoltaico.[18]

3.3.2 Característica i-V

A concentração de equilíbrio de estado constante de elétrons e buracos em função da distância dentro da junção pode ser escrita como distribuição de Boltzmann. Partindo deste fato a intensidade de corrente (i) em Amps. numa célula solar, produzida pelo efeito fotovoltaico é: [17]

$$i = A j_s \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] - ACI \quad (3.1)$$

onde

A: é a área da célula (m^2)

C: Uma constante dependente do material semiconductor (A/W)

I: Irradiação solar (W/m^2)

j_s : Densidade de corrente de saturação do diodo (A/m^2)

$e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$ carga do elétron

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} J/K$ a constante de Boltzmann

T: Temperatura absoluta (K)

V: Tensão na célula

Fora da presença da irradiação solar (no escuro), a característica é a de um diodo.

$$i_d = A j_s \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

Na Fig. 3.2 foi mostrada a curva característica I-V de uma célula fotovoltaica, numa **junção sem iluminação** (linha descontinua) e **sob iluminação** (linha contínua)

Dois parâmetros importantes nas células fotovoltaicas são: a corrente de curto-circuito, i_{sc} e a voltagem de circuito aberto, V_{oc} .

Para o caso de curto-circuito $V=0$, tem-se

$$i_{sc} = -ACI \quad (3.3)$$

Esta relação é utilizada para a medição da irradiação I, usando-se as células solares como sensores.

Para o caso de circuito aberto $i=0$ e fazendo a aproximação $j_s \ll CI$, tem-se

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left[\frac{CI}{j_s} + 1 \right] \approx \left(\frac{kT}{e} \right) \ln \left[\frac{CI}{j_s} \right] \quad (3.4)$$

3.3.3 Potência Máxima

A potência desenvolvida no processo é a área baixo a curva característica i-v (Fig. 3.2). A potência máxima que pode-se obter da célula é a área do máximo retângulo inscrito na curva característica, ou seja,

$$P_m = V_m i_m \quad (3.5)$$

Para uma determinada corrente i e tensão V na célula, a potência é dada por

$$P = Vi = AV \left\{ j_s \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] - CI \right\}$$

Utilizando a condição de máximos nesta expressão, $dP/dV = 0$, obtém-se a equação transcendental para a tensão máxima na célula (V_m)

$$V_m = V_{oc} - \left(\frac{kT}{e}\right) \ln \left\{ 1 + \left(\frac{eV_m}{kT}\right) \right\} \quad (3.6)$$

no ranjo de valores entre $V=0$ (curto circuito) e $V=V_{oc}$ (circuito aberto). A solução pode ser encontrada numericamente. Entretanto pode-se determinar mediante uma solução gráfica mais simples que mostra diretamente os valores pontuais da potência máxima (V_m, i_m, P_m), os quais por sua vez são encontrados a partir do ponto de contato da hipérbola de potência ($V \cdot i = P$) mais próxima com a característica i - V dada. Como mostra a Fig. 3.5. [19]

A informação obtida com P_m é usada para derivar outros parâmetros da célula: fator de preenchimento e eficiência.

3.3.4 Fator de Preenchimento

É definido como:

$$F_R = \frac{V_m i_m}{V_{oc} i_{sc}} \quad (3.7)$$

é um fator que mede o desvio da retangularidade de máxima potência na curva característica que apresenta uma célula fotovoltaica; é uma medida da qualidade da mesma em termos da potência máxima hipotética $P_m = V_{oc} i_{sc}$. Na Fig 3.2 é mostrado o retângulo que mede o fator de preenchimento.

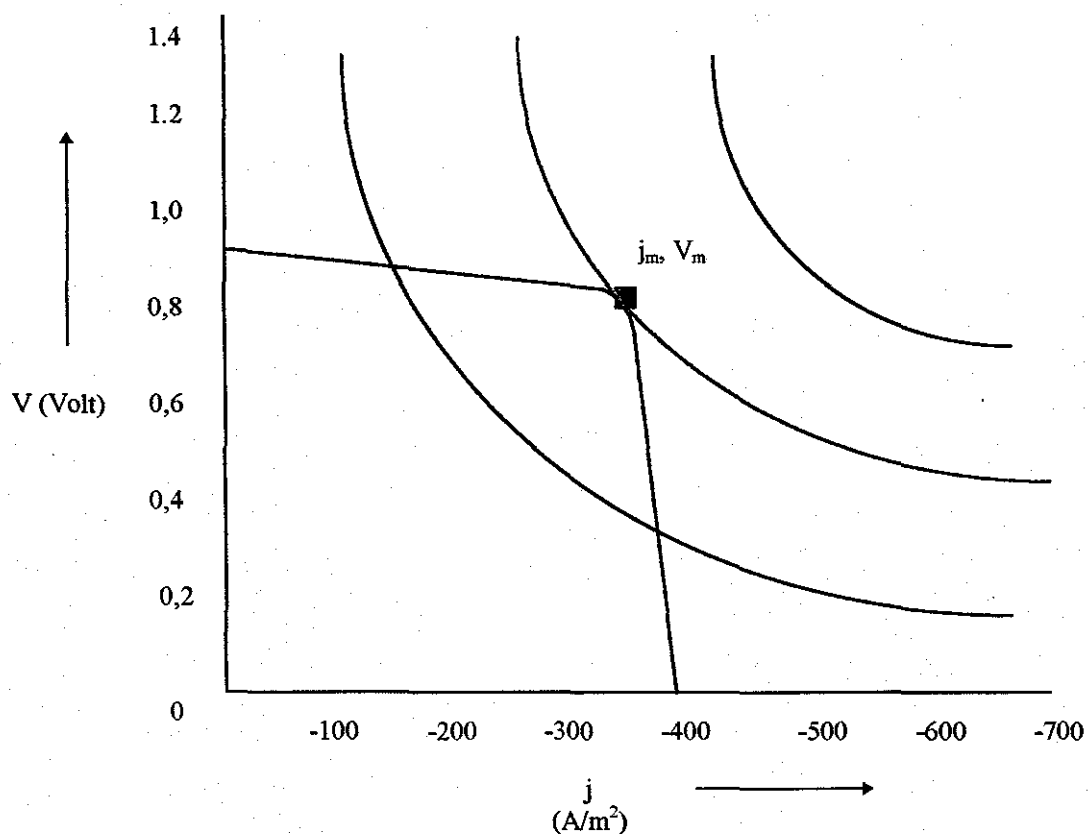


Fig. 3.5 Diagrama densidade de corrente-tensão de uma célula com gap de energia de 1,2eV com uma temperatura de 300K. Os pontos de máxima potência correspondem aos indicados nas coordenadas do ponto verde. [19]

3.3.5 Eficiência de Células Fotovoltaicas

A eficiência máxima de uma célula fotovoltaica solar é definida como

$$\eta = \frac{\text{Potência máxima elétrica}}{\text{Potência solar incidente}} = \frac{P_m}{AI} \quad (3.8)$$

Tomando-se as equações (3.7) e (3.3) para expressar a potência máxima elétrica, tem-se

$$\eta = \frac{V_{oc} i_{sc} F_R}{AI} \quad (3.9)$$

É importante notar a dependência da eficiência da célula com a intensidade de radiação solar incidente, não só na forma explícita do termo de potência solar incide (AI) da equação 3.8 senão também de maneira implícita no termo do fator de preenchimento (F_R , equação 3.9).

3.3.6 Efeito do Comprimento de Onda

Existem perdas no processo fotovoltaico devido à existência de um espectro de comprimentos de onda na luz solar. Estas podem ser explicadas do seguinte modo: se a energia $h\nu$ do fóton for menor do que a energia de excitação E_g (energia gap), não ocorre produção de nenhum par elétron-“buraco” e sua energia é dissipada sob forma de calor. Quando a energia do fóton for maior do que E_g ocorre a formação de um par elétron-“buraco” e o excesso desta energia se transforma em calor. Como se sabe, o espectro da luz solar visível está compreendido entre os comprimentos de onda de $0,4\mu\text{m}$ (violeta) e $0,7\mu\text{m}$ (da luz vermelha). Seja uma célula solar de silício na qual $E_g=1,1\text{eV}$. O comprimento de onda de corte pode ser calculado igualando-se E_g com $h\nu$ e fazendo-se uso da conhecida relação $v\lambda_c=c$. Obtém-se facilmente o seguinte valor para o comprimento de onda de corte: $\lambda_c=1,1\mu\text{m}$, o que pode ser observado na Fig. 3.4.

Como todos os comprimentos de onda da luz solar visível são menores do que o comprimento de onda acima, conclui-se que a maioria dos fótons incidentes produzem a promoção dos elétrons da banda de valência para a banda de condução. Contudo, como o espectro solar possui um limite inferior bastante menor que o limite dado pela relação acima, conclui-se também que grande parte da radiação (incluindo o ultravioleta) só pode excitar um único elétron e, conforme visto, a energia excedente ($h\nu-E_g$) é transformada em calor. [16] No Silício, para AM 1,5 (veja-se definição de AM no capítulo 4), esta perda é de 31% aproximadamente. [18]

Os rendimentos práticos das células fotovoltaicas é significativamente inferior aos valores máximos teóricos, resultado de inúmeras perdas de energia observadas no processo. Tem-se perdas de vários os tipos: por exemplo, considerando-se uma célula de Si cristalino, cujo rendimento poderia ser até de 36%, perto de 16% dessa energia é dissipada em processos internos, como recombinação de portadores, e outros processos, como as perdas por contatos elétricos, por reflexão, etc., que reduzem o rendimento para valores entre 14-22%.

Há poucos anos foram introduzidos alguns conceitos novos como o PESC (“passivated emitter solar cell”) e o “buried contac” (contato gravado), que permitem a redução de perdas.

Assim células de Si cristalino tem sido construídas com eficiência ao nível do laboratório de até 24,2%.

3.5 Tecnologias de Conversão Fotovoltaica e Comerciais

3.5.1 Perspectivas para as Células Fotovoltaicas:

A fabricação de células de Si para produção comercial está mudando, com a incorporação de células de mais alta eficiência desenvolvidas em laboratórios de pesquisa desde a passada década. A rede de contatos ocultos tem sido usada para dar eficiência comerciais às células entre 17,5% e 18%. Uma linha piloto na “University of New South Wales” produz células de $7 \times 7 \text{ cm}^2$ no intervalo de 19,5-20%.

Outras duas tecnologias de microesfera e filmes finos de silício parecem promissoras para a produção comercial nos próximos anos, prometendo baixos custos e melhores eficiência, teoricamente superiores às tradicionais células de Si.

A Tabela 3.1 mostra as eficiências e custos estimados de varias tecnologias fotovoltaicas. Esta Tabela também inclui estimativas para células de concentração, onde a componente direta da radiação solar é concentrada por espelhos ou lentes. O custo destas células pode ser bastante alto, dado que sua eficiência de conversão também é alta. Para maiores detalhes sobre células com concentradores consultar a Ref. [21].

Os recordes atuais para células de laboratório de Si podem ser observados na Tabela 3.2. Espera-se que com o desenvolvimento destas tecnologias elas possam ser

levadas à escala industrial. Outros recordes de laboratório para células de filmes finos podem ser observados na Tabela 3.3. O poder de ajustar a largura da banda proibida e a elevada eficiência destas células faz com que a tecnologia de filmes finos seja altamente promissora no futuro. Alguns exemplos podem ser estudados com mais detalhes nas Refs. [21] e [22].

Tabela 3.1

Materiais e eficiência de fotovoltaicos disponíveis nos anos 90, com custos de módulos estimados para diferentes taxas de produção anual. [22].

Material da Célula	e*	M**	Custos do Módulo (\$/Wp)		
			1	10	100
			MWp/ano		
Silício monocristalino	24	16	4,5	2,3	1,5
Silício policristalino	20	14	4,5	1,8	1,2
Silício amorfo	14	6	3,0	1,5	0,6
Diseleneto de Cu e In	14	> 10	3,0	1,5	0,6
Telureto de Cádmio	14	> 10	3,0	1,5	0,6
Células com concentração					
Silício	27	15-19	6,0	2,3	1,2
Arseneto de Gálio	29	-	4,5	1,8	1,2
Multifunção	35	-	6,0	1,5	0,8

*e = Melhor eficiência alcançada em Laboratórios de pesquisa

** M = Eficiência do módulo comercial standard

Tabela 3.2

Células de Si, eficiência e laboratório de pesquisa [17].

CELULA Si	ÁREA (cm ²)	EFICIÊNCIA RECORDE (%)	CENTRO DE PESQUISA
Si-m**	4	24,2	UNSW*
Si-m contato gravado	100	18,0	BP Solar
Si-m contato gravado	12	21,3	UNSW
Si-m		18	Telefunken
Si-p***		17,0	UNSW
Si-p contato impresso	100	16,4	Sharp
Si-p contato impresso	225	15,3	Kyocera
Película delgada epitaxial	1	15,7	Astropower
Células esféricas	10	11,5	Texas Instrumentos

* UNSW: University of South Wales, Australia

** Si-m: Si monocristalino

*** Si-p: Si policristalino

Tabela 3.3
Eficiência e laboratórios de pesquisa de células de filmes finos [17]

CELULAS DE FILMES FINOS	ÁREA (cm ²)	EFICIÊNCIA RECORDE (%)	LABORATÓRIOS DE PESQUISA
Si-a* junção simples	1	12,6	SELC
Cd-Te	1	13,4	USF
Cu(In,Ga)Se ₂ (25%Ga)		16,2	IPE/RIT**
CuInSe ₂	1	14,1	SIEMENS SOLAR
GaAs/CuInSe ₂	4	25,8	BOEING/KOPIN

*Si-a: Si amorfo

**IPE/RIT: Institut für Physikalische Elektronik Uni. Stuttgart, Alemanha e Royal Institute of Technology, Stockholm. Suécia.

Todo o processo de aproveitamento da energia solar através do efeito fotovoltaico pode então ser resumido pelo fluxograma da Fig. 3.6, que apresenta o balanço energético do processo.

Assim todas as perdas no sistema fotovoltaico fazem um total de 740,6 W/m² o equivalente a 83% da radiação incidente no painel (892,3 W/m²), o que mostra uma eficiência na célula fotovoltaica de 17% aproximadamente; outras perdas não consideradas podem baixar esta eficiência para até 14%.

Conclui-se portanto que a energia elétrica produzida pelos sistemas fotovoltaicos pode ser entendida como dependente da intensidade da radiação solar no topo da atmosfera onde o sistema está instalado (determinada no próximo capítulo), das perdas ocorridas na passagem dos raios solares pela atmosfera (calculados no próximo capítulo e estimados para a região de Campinas no capítulo seguinte) e, finalmente, da eficiência global das células utilizadas (não analisada em profundidade neste trabalho).

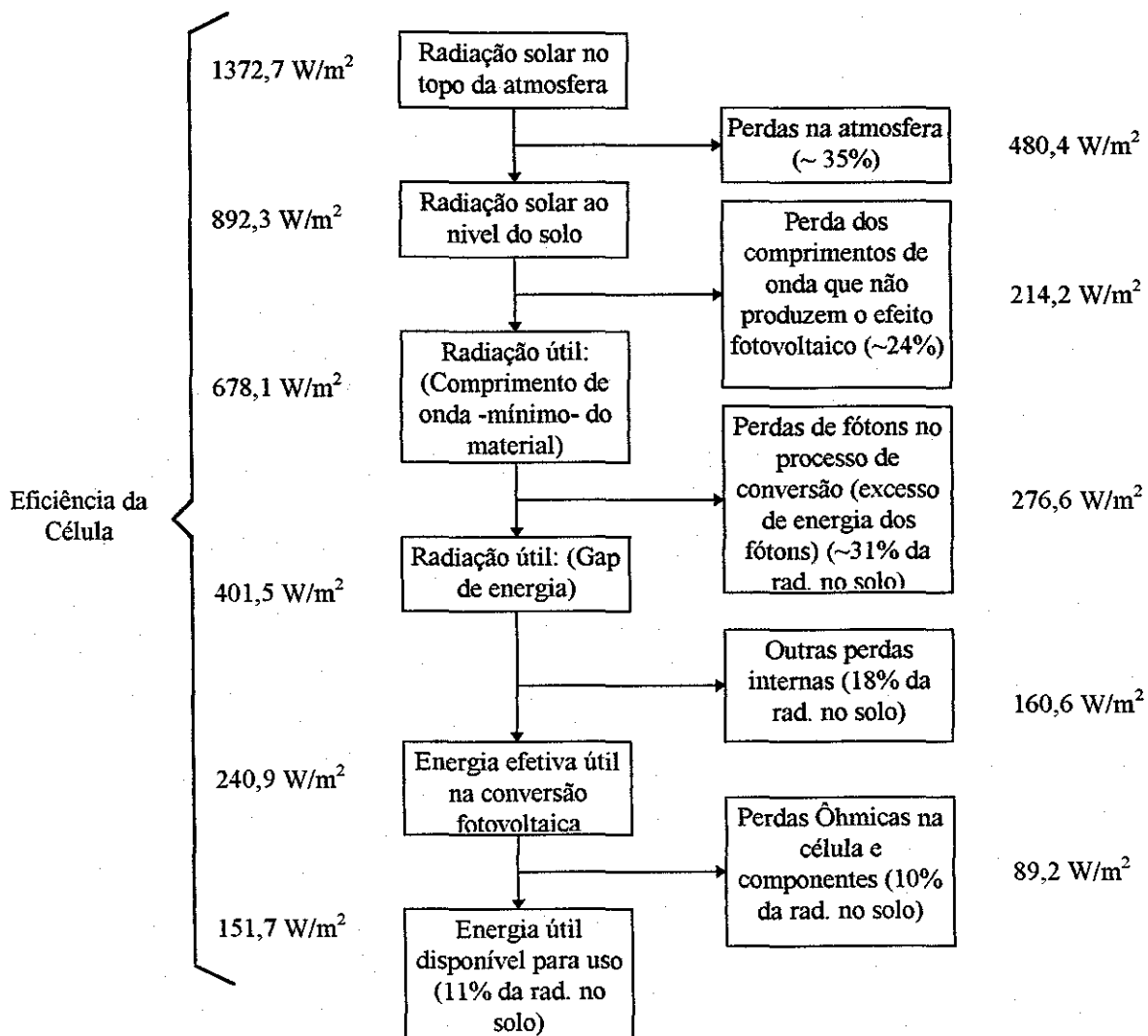


Fig. 3.6 Fluxograma energético do aproveitamento da energia solar através do processo de conversão fotovoltaico.

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTOS TEÓRICOS

4.1 Fluxo Radiante Solar

A quantidade de energia radiante emitida por um corpo, por unidade de área, $I(\text{W/m}^2)$, tem dependência com a temperatura absoluta e as propriedades do material emissor, como indicado pela equação de Stefan-Boltzmann,

$$I = \sigma T^4 \quad (4.1)$$

onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ é a constante de Stefan-Boltzmann, sendo ainda definida a emitância do material emissor, $\varepsilon \leq 1$.

Se o Sol é considerado como um emissor tipo corpo negro ($\varepsilon = 1$), esférico, então seu fluxo radiante F_s é

$$F_s = 4\pi R_s^2 I_s = 4\pi R_s^2 \sigma T_s^4 \quad (4.2)$$

onde $R_s = 6,96 \times 10^8 \text{m}$ é o raio do Sol [18]

T_s : é a temperatura da superfície solar

I_s : é a densidade de fluxo na superfície solar

Por conservação da energia, à distancia R_{TS} entre a Terra e o Sol:

$$4\pi R_s^2 I_s = 4\pi R_{TS}^2 I_t \quad (4.3)$$

onde $R_{TS} = 1,5 \times 10^{11} \text{m}$, é a distância Terra-Sol [18]

$I_t = 1.372,7 \text{Wm}^{-2}$, é a densidade de fluxo no topo da atmosfera da Terra. [15]

I_t pode ser medida sem dificuldade, de forma que I_s e T_s podem ser calculadas:

$$I_s = \frac{I_t}{f_s} \text{ e } T_s = \left(\frac{I_t}{\sigma f_s} \right)^2 \quad (4.4)$$

sendo f_s a razão $\left(\frac{R_s}{R_{TS}} \right)^2 = 2,165 \cdot 10^{-5}$

Assim $I_s = 63,2 \text{ MWm}^{-2}$ e $T_s = 5.777\text{K}$

É interessante observar que o modelo do espectro de radiação solar cumpre com as equações antes mencionadas para o caso fictício do Sol sendo considerado como um emissor tipo corpo negro a $T=5.777\text{K}$. A Fig. 4.1, mostra a comparação dos espectros solares, real e fictício a esta temperatura em função do comprimento de onda.

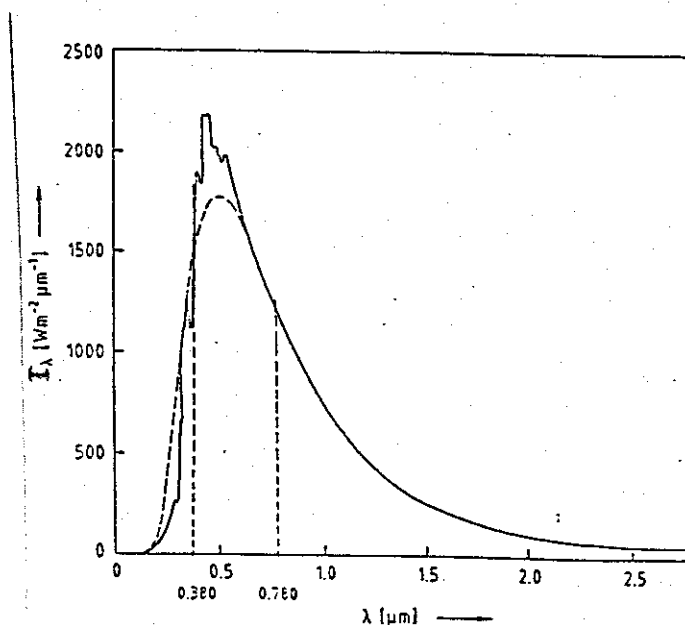


Fig. 4.1 Espectro solar extraterrestre (linha contínua) observado junto com o espectro de Planck para corpo negro (linha descontinua) suavizado a $T = 5.777\text{K}$, reduzido em altura pelo fator $f_s = 2,17 \cdot 10^{-5}$. A faixa mostrada no intervalo de $0,380$ e $0,780 \mu\text{m}$ aproximadamente corresponde à faixa de luz visível [22].

4.1.1 Algumas relações Terra-Sol

A Fig. 4.2 mostra as principais grandezas que determinam a posição relativa Terra-Sol. Aqui os vetores $\mathbf{n}_s$ e $\mathbf{n}_h$ indicam as direções de posição do plano receptor e a posição do Sol com referência ao centro da Terra respectivamente.

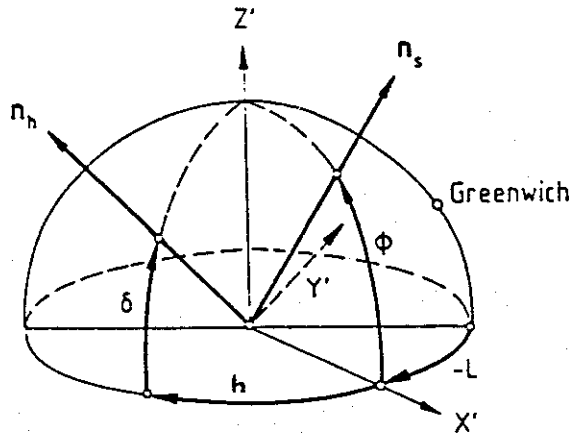


Fig.4.2 Sistema de coordenadas geocêntrico $X'Y'Z'$ com vetores direcionais $\mathbf{n}_s$ e $\mathbf{n}_h$ para as posições do plano receptor e o Sol. São mostrados os ângulos de declinação δ , latitude geográfica ϕ , horário ω contando desde o eixo X' e L que é a longitude geográfica desde o meridiano de Greenwich. O eixo X' está localizado em L ; o eixo Z' é paralelo ao eixo polar terrestre. [19]

Latitude (ϕ): É o ângulo que a normal à superfície em um lugar da Terra faz com a linha do equador (Fig. 4.2). É positiva no hemisfério norte e tem valores entre 0 e 90°.

Declinação (δ): É o ângulo que a linha que liga o centro da Terra ao centro do Sol faz com o plano do equador. (Fig. 4.2). Tem valores entre +23°27' em junho e -23°27' em dezembro.

Zênite (Z): Se juntarmos um ponto da superfície da Terra com o centro do Sol através de uma linha, o ângulo que esta fará com a vertical (normal) do lugar é o ângulo de zênite (ver Fig. 4.3).

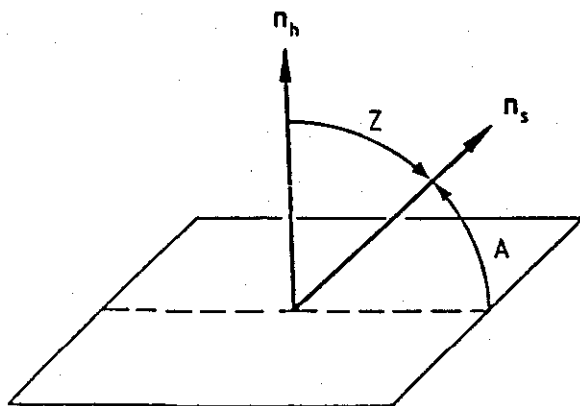


Fig. 4.3 Ângulo Zenital (Z) da posição do Sol; n_h é o vetor orientação do plano horizontal em consideração [19].

Ângulo horário de um astro (h): O ângulo horário do Sol expressa o instante do dia t , onde t é expresso como fração de hora com a origem $t=0$, correspondendo ao meio-dia (instante que o Sol passa pelo meridiano do local), é aquele formado entre o meridiano do local e o plano meridiano que contém o Sol (Fig. 4.2).

Assim:

$$h = \frac{2\pi}{T} \quad (T=24\text{h, período do dia}) \quad (4.5)$$

sendo $t=12-H$, onde H é a hora do dia, correspondendo $t=0$, para $H=12$ (meio-dia), ou seja, considerando π em graus (180°)

$$h = (12 - H)15^\circ \quad (4.6)$$

Longitude Geográfica (L): É a longitude de qualquer ponto na Terra, medida a partir do meridiano de Greenwich. (ver Fig. 4.2).

4.1.2 Relações entre φ , δ , h e Z :

Para o cálculo da quantidade de energia que atinge determinado local na Terra, é necessário determinar-se o ângulo Z em função de φ , δ e ω .

Na Fig. 4.2 o vetor n_h no sistema $X'Y'Z'$ é

$$\mathbf{n}_h = (\cos \delta \cos h, -\cos \delta \sin h \sin \delta) \quad (4.7)$$

e $\mathbf{n}_s$ é

$$\mathbf{n}_s = (\cos \varphi, 0, \sin \varphi) \quad (4.8)$$

Assim:

$$\cos Z = \mathbf{n}_h \cdot \mathbf{n}_s = \cos \delta \cos \varphi \cosh + \sin \delta \sin \varphi \quad (4.9)$$

4.1.3 Radiação Sobre Superfícies Inclinadas

Para descrever a posição de um plano inclinado sobre a superfície da Terra é necessário o conhecimento de dois parâmetros, no mínimo. Estes podem ser:

a) A *inclinação superficial* β : é o ângulo formado pelos vetores direcionais $\mathbf{n}_h$ e $\mathbf{n}_\beta$ da posição vertical no ponto de interesse e da posição inclinada do plano, respectivamente (Fig. 4.4). Considera-se a inclinação para o Equador positiva, variando de 0 a 90°.

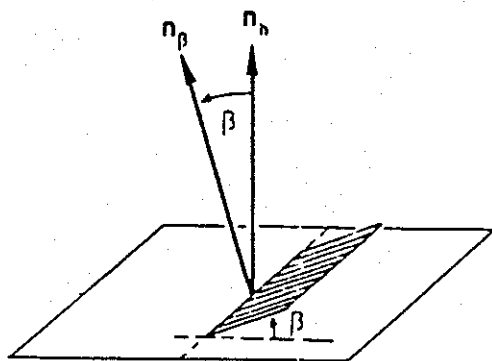


Fig. 4.4 Superfície inclinada num ângulo β : a direção do plano horizontal é $\mathbf{n}_h$, a direção do plano de recepção (superfície inclinada) é $\mathbf{n}_\beta$. A inclinação para o Equador é considerada positiva [19].

b) O *azimute superficial* γ : é o ângulo entre o plano formado pelos vetores $\mathbf{n}_h$ e $\mathbf{n}_\beta$, e o plano meridiano local. Este ângulo é positivo se é medido desde o norte ao este, e varia de 0 até 360° (Fig. 4.5).

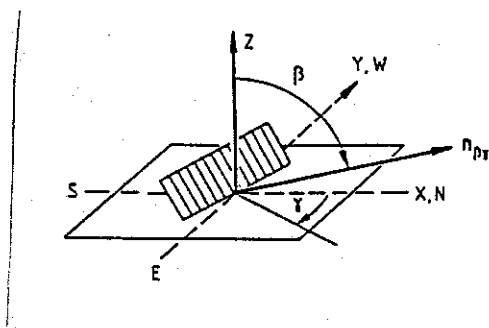


Fig. 4.5 Definição do ângulo azimutal superficial γ , e do vetor direcional do plano receptor $\mathbf{n}_{pT}$. A rotação γ do norte para o este é considerada positiva [19].

O sistema XYZ da Fig.4.5 corresponde a uma rotação determinada do sistema $X'Y'Z'$ da Fig. 4.2 que o eixo X aponta ao Norte, o eixo Y ao Oeste e o eixo Z ao longo de $\mathbf{n}_h$. Usando esta transformação, o vetor $\mathbf{n}_s$ fica:

$$\mathbf{n}_s = (-\cos\delta \sin\varphi \cos h + \sin\delta \cos\varphi, \cos\delta \sin h, \cos\delta \cos\varphi \cos h + \sin\delta \sin\varphi) \quad (4.10)$$

e $\mathbf{n}_{pT}$ neste mesmo sistema é:

$$\mathbf{n}_{pT} = (\sin\beta \cos\gamma, -\sin\beta \sin\gamma, \cos\beta) \quad (4.11)$$

Então o ângulo de inclinação " Θ " de uma radiação solar sobre o plano inclinado pode ser calculado assim:

$$\cos\Theta = \mathbf{n}_{pT} \cdot \mathbf{n}_s \quad (4.12)$$

Isso implica que

$$\begin{aligned} \cos\Theta = & -\sin\beta \cos\gamma \cos\delta \sin\varphi \cos h + \cos\beta \cos\delta \cos\varphi \cos h - \sin\beta \sin\gamma \cos\varphi \sin h \\ & + \cos\beta \sin\delta \sin\varphi + \sin\beta \cos\gamma \sin\delta \cos\varphi \end{aligned} \quad (4.13)$$

4.1.4 Radiação solar terrestre

A radiação solar, ao passar através da atmosfera, diminui devido a vários fatores, principalmente:

Ry: Dispersão de Rayleigh por moléculas do ar

Oz: Absorção por ozônio

Va: Absorção por vapor de água

Ga: Absorção por gases como CO₂, CO, etc., e outros fatores

Assim a irradiação que chega à Terra no plano receptor é

$$I = I_t \tau_{Ry} \tau_{Oz} \tau_{Va} \tau_{Ga} \quad (4.14)$$

onde τ_i (sendo i cada parâmetro de dispersão como Ry, Oz, Va, etc.) é o coeficiente de transmissão que se refere algum dos processos de redução.

Mais adiante estes fatores serão analisados com um pouco mais de detalhe.

4.1.5 Radiação Global e Difusa

A radiação dispersada pelo Sol e que alcança a superfície terrestre é denominada irradiação global I . Esta radiação é medida sobre uma superfície horizontal, sendo composta por uma componente direta I_d e outra difusa I_f na direção de Z .

$$I = I_f + I_d \quad (4.15)$$

onde

$$I = I_i n_h \cdot n_s = I_i \cos Z \quad (4.16)$$

As radiações difusa e direta são refletidas na superfície terrestre e podem retornar dispersas pela atmosfera por segunda, terceira ou múltiplas reflexões.

4.1.6 Irradiação Solar total diária

Outro parâmetro importante a se determinar é a quantidade de irradiação solar total diária, na qual é considerado tão só as horas do Sol do dia, compreendidas entre o nascer e o pôr do mesmo.

Assim considerando a primeira das equações (4.4) e (4.16) tem-se

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{I_t}{f_s} \cos Z \quad (4.17)$$

onde E é a densidade superficial de energia em Jm^{-2} .

Integrando-se esta equação diferencial.

$$E_0 = \int_{t_n}^{t_p} dE = \int_{t_n}^{t_p} \frac{I_t}{f_s} \cos Z dt = \frac{I_t}{f_s} \int_{t_n}^{t_p} \cos Z dt \quad (4.18)$$

Com t_n = horário de nascer do Sol

t_p = horário de por do Sol

Então

$$E_0 = 4.84 * 10^8 [\sin \varphi \sin \delta (h_n - tg h_n)]^{(*)} \quad (4.19)$$

em unidades de W/m^2 , sendo h_n o valor do angulo horário ao nascer do Sol expresso em radianos [11].

4.2 Determinação do Fluxo de Radiação Solar Global em Função do Tempo no Topo da Atmosfera

A intensidade, I, da radiação solar global (em W/m^2), medida num plano receptor horizontal localizado num ponto sobre a superfície terrestre, seguindo uma trajetória determinada pelo ângulo de zênite Z, e estando livre de interação com gases e partículas, seja por absorção ou dispersão, é:

$$I = I_t \cos Z \quad (4.20)$$

sendo I_t a constante solar e

$$\cos Z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h \quad (4.21)$$

(*) No apêndice 1 mostra-se a solução em detalhe desta equação

Com boa aproximação, o ângulo horário no período entre o nascer e o por do Sol (aproximadamente de 6 às 18 horas do dia), pode ser determinado pela seguinte relação empírica.

$$h = (H-12)15 \quad (4.22)$$

onde H: é o tempo solar local em horas e décimos de hora; em nosso caso consideraremos como valor estimado o tempo no dia terrestre,[11].

Então, incorporando-se (4.22) e (4.21) em (4.20) tem-se

$$I = I_t \left[\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \{(H-12)15^\circ\} \right] \quad (4.23)$$

Foram escolhidos três dias do mês de novembro para o cálculo dos valores de I, que correspondem aos dias mais representativos entre os dados experimentais obtidos (ver Capítulo 5, a respeito dos valores experimentais de I).

Então, utilizando a formula (4.23) construiu-se a Tabela 4.1, que mostra os valores obtidos teoricamente da irradiação solar medidos num intervalo de 20 minutos, para os dias 22/06/97, 05/07/97, 02/08/97 e 12/09/97; a Fig. 4.6 mostra os gráficos da irradiação solar nestes três dias. É importante observar a forma da distribuição da irradiação no período de um dia, máxima perto do meio dia e em diminuição no resto do dia. Este cálculo foi realizado só no intervalo das 6 às 18 horas, já que a equação (4.22) só é válida nesse intervalo.

TABELA 4.1

RADIACAO SOLAR TEORICA "I" (NO TOPO DA ATMOSFERA)

LATITUDE: -22°53'21"

LONGITUDE: -47°04'39"

ESTADO: São Paulo

CIDADE: Campinas

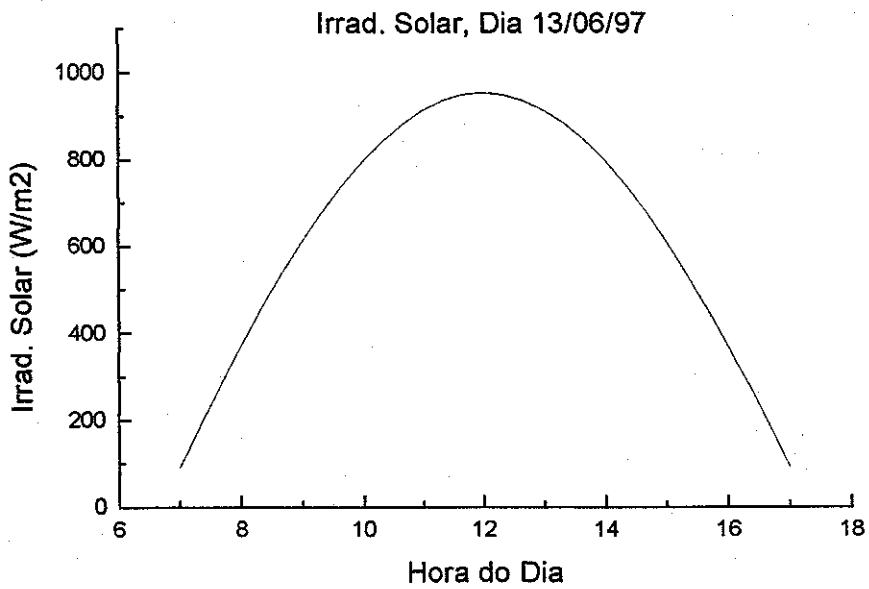
MÊSES: Jun/97, Jul/97, Ago/97, Set/97, Nov/96

INTERVALO DE TEMPO: 20 min.

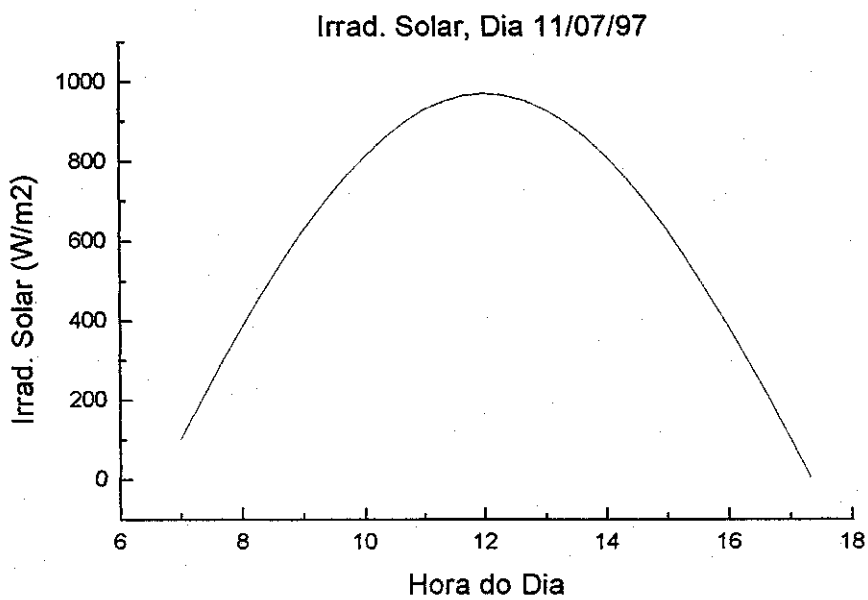
UNIDADES DE I: W/m²

HORÁRIO: Das 6 às 18 horas

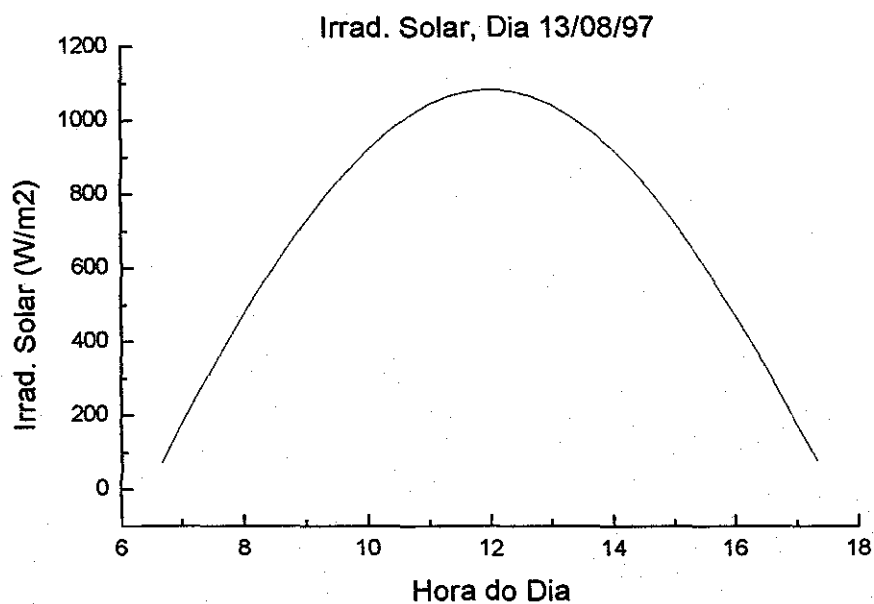
T (h)	13/06/97	11/07/97	13/08/97	15/09/97	27/11/96
6,00	-	-	-	-	19,09
6,33	-	-	-	77,5	292,8
6,66	-	-	72,5	185,7	393,9
7,00	91,1	101,2	178,7	295,3	496,5
7,33	186,9	197,6	279,4	399,3	593,8
7,66	279,8	291,1	376,9	500,1	688,1
8,00	371,6	383,5	473,4	599,8	781,4
8,33	456,3	468,8	562,4	691,8	867,4
8,66	536,1	549,1	646,3	778,4	948,4
9,00	612,4	626,0	726,5	861,3	1026,0
9,33	680,3	694,4	797,8	935,0	1094,9
9,66	741,6	756,0	862,2	1001,5	1157,1
10,00	797,2	812,1	920,7	1061,9	1213,7
10,33	843,6	858,8	969,4	1112,3	1260,8
10,66	882,2	897,6	1010,0	1154,1	1300,0
11,00	913,4	929,0	1042,7	1188,0	1331,7
11,33	935,2	951,0	1065,6	1211,7	1353,8
11,66	948,4	964,3	1079,5	1226,0	1367,2
12,00	953,0	968,9	1084,4	1231,0	1371,9
12,33	948,7	964,6	1079,8	1226,3	1367,5
12,66	935,7	951,5	1066,2	1212,2	1354,3
13,00	913,4	929,0	1042,7	1188,0	1331,7
13,33	883,2	898,7	1011,1	1155,3	1301,0
13,66	844,9	860,1	970,8	1113,7	1262,1
14,00	797,2	812,1	920,7	1061,9	1213,7
14,33	743,3	757,8	864,0	1003,4	1158,9
14,66	682,3	696,3	799,9	937,1	1096,9
15,00	612,4	626,0	726,5	861,3	1026,0
15,33	538,4	551,5	648,7	780,9	950,8
15,66	458,8	471,4	565,1	694,5	870,0
16,00	371,6	383,5	473,4	599,8	781,4
16,33	282,5	293,9	379,8	503,1	690,9
16,66	189,8	200,5	282,4	402,5	596,7
17,00	91,1	101,2	178,7	295,3	496,5
17,33	-	2,5	75,7	188,9	397,0
17,66	-	-	-	80,8	295,9
18,00	-	-	-	-	190,9



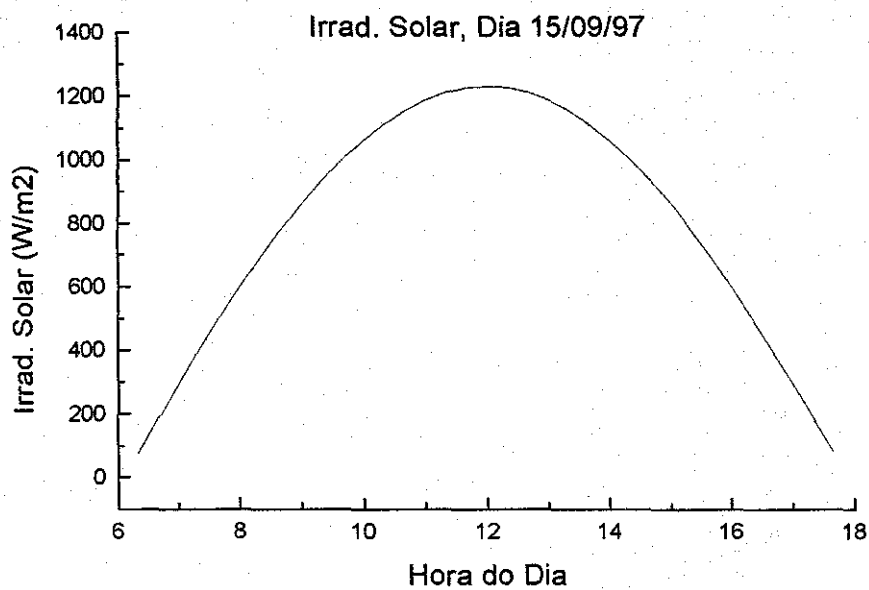
(a)



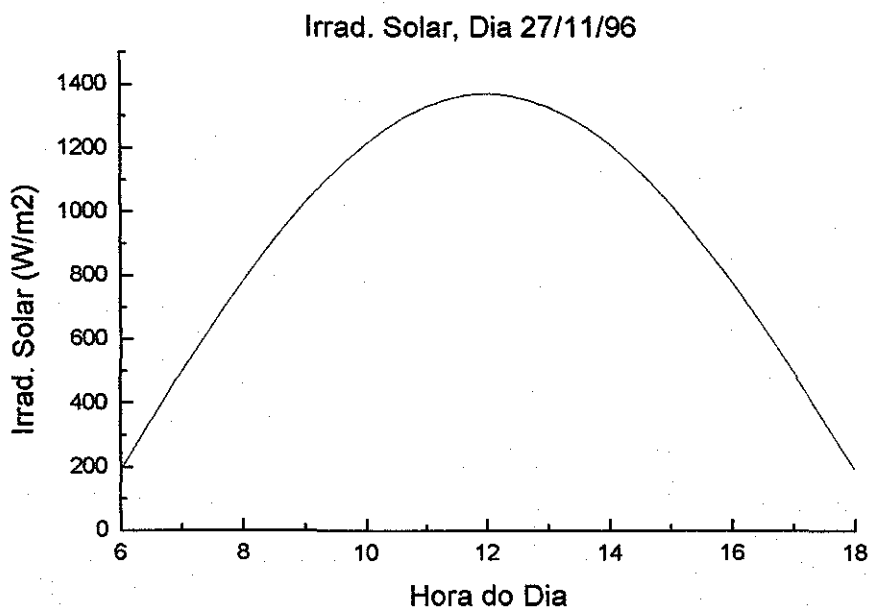
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 4.6 Distribuição teórica da radiação solar no topo da atmosfera, durante os dias: (a) 22/06/97, (b) 05/07/97, (c) 02/08/97 e (d) 12/09/97, (e) 27/11/96 em Campinas SP

4.3 Radiação Solar Medida na Superfície Terrestre e massa de ar

A absorção e dispersão da radiação solar que passa através da atmosfera depende de diferentes fatores de extinção. Se para o i -ésimo fator de extinção for atribuído um coeficiente de transmissão (τ_i), assim qualquer processo de extinção pode ser designado por:

$$I = I_0 \prod_{i=1}^n \tau_i \quad (4.24)$$

sendo os τ_i fatores de extinção correspondentes a diferentes fenômenos de absorção e dispersão como: dispersão de Rayleigh por moléculas de ar, absorção por Ozônio, absorção por gases uniformemente misturados (por exemplo CO_2), absorção por vapor de água, extinção por partículas aerossóis, extinção por nuvens de tipo cirrus, etc. [25]

A absorção e dispersão são fortemente dependentes do comprimento de onda da radiação incidente, excetuando-se a dispersão por nuvens cirrus. Assim por exemplo a dispersão de Rayleigh segue a dependência $1/\lambda^4$, a dispersão por aerossóis uma

dependência aproximada de $1/\lambda$, etc. A absorção também ocorre em diversas faixas de comprimentos de onda e depende também de outros fatores como dos coeficientes de massa de ar, da pressão atmosférica, da largura vertical da camada de ozônio, da camada de vapor de água, etc.

De uma forma genérica, a atenuação e a mudança no espectro da radiação solar dependem da massa de ar atravessada. Esta é designada por AMn (Massa de ar n). AMn está dada por:

$$AM_n = AM \sec Z \quad (4.25)$$

onde AM é a espessura da atmosfera em condições normais quando o Sol se encontra no zênite. Quando o Sol se encontra no zênite, então $Z=0$ e $AM_n = AM_1 = AM$. [17]

Desta maneira o cálculo da radiação solar medida na superfície terrestre é relativamente complexa sendo que o resultado final pode ser de pouca utilidade nas estimativas práticas dos potenciais da energia solar em diferentes localidades. Neste trabalho propõe-se um modelo mais simples correspondendo a um fator geral único, semi-empírico, que pode ser tomado como constante (constante "K") em cada mês ou ano. Este modelo está desenvolvido no próximo item, sendo de grande utilidade para medidas que não requeiram avaliação muito fina das perdas por absorção e dispersão. Outros modelos semi-empíricos já foram propostos (Bernett) [26], tendo sido inclusive utilizados no Brasil [27].

4.4 Determinação das Constantes "K₀" e "K" de Perdas de Energia de Radiação Solar na Atmosfera Terrestre

Examinando-se o processo de absorção e dispersão de radiação em meios fluidos, pode-se concluir que os principais fatores que determinam a redução de intensidade da radiação solar ao atravessar a atmosfera são a espessura da camada de ar percorrida do topo até o solo, a intensidade e natureza (comprimento de onda) da radiação, a densidade do ar e sua composição (umidade, presença de material particulado em suspensão, etc.). Para os cálculos aqui realizados supôs-se uma atmosfera uniforme, com densidade e constituição homogêneas e que o efeito do comprimento de onda, como já exposto anteriormente, será incorporado na eficiência de conversão da célula quando sob ação da

luz solar. Assim sendo os fatores de absorção e dispersão de radiação foram restritos às variáveis espessura (x) da atmosfera, e intensidade e ao comprimento de onda da radiação, ou seja

$$I = I(I, x) \quad (4.26)$$

Então, levando-se em conta o perfil da intensidade que chega no topo da atmosfera, os efeitos individuais esperados para a espessura da atmosfera e para a intensidade da radiação determinam reduções percentuais da intensidade como mostradas na Fig. 4.7. Estes resultados baseiam-se no fato das perdas na atmosfera serem maiores quanto maior for a espessura da atmosfera (nascer e pôr do sol) e maior for a intensidade de radiação (meio dia)

Na prática na cidade de Campinas SP, para o dia 13/06/97 observa-se tipicamente o resultado mostrado na Fig. 4.8.

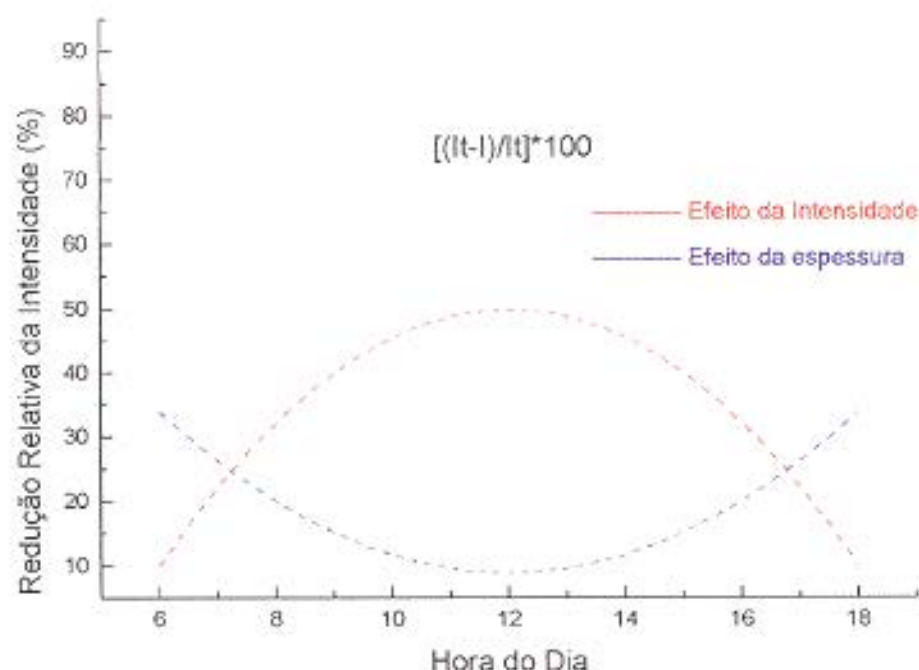


Fig. 4.7 Efeitos de redução da Intensidade em porcentagem devido à espessura de atmosfera atravessada (curva azul) e devido à Intensidade de radiação (curva vermelha)

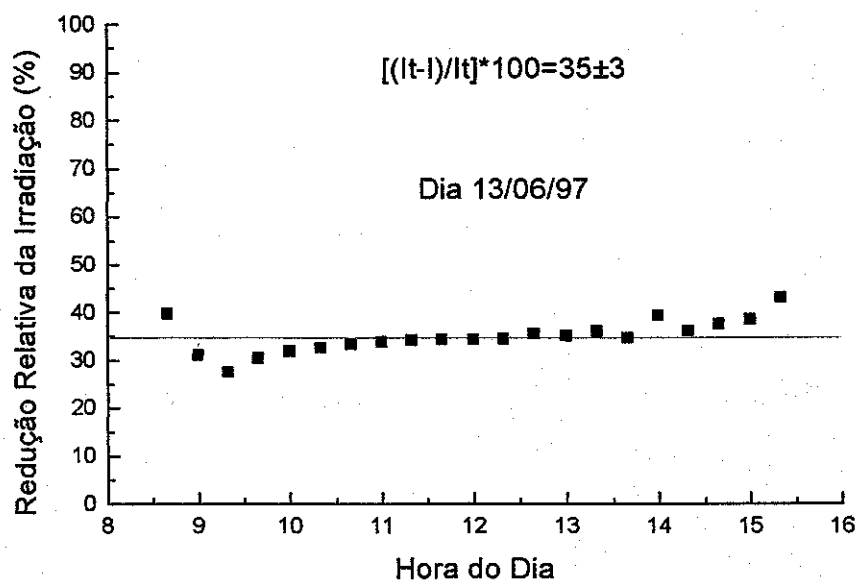


Fig.4.8 Redução percentual real da Intensidade de radiação solar em função das horas do dia para Campinas SP

Examinando-se o gráfico da Fig. 4.8 conclui-se imediatamente que a redução da intensidade da radiação solar ao atravessar a atmosfera terrestre pode ser considerada constante ao longo do dia, ou seja,

$$I = K_0 I_t \quad (4.27)$$

sendo K_0 um fator a ser determinado para cada dia do ano em cada região considerada, podendo-se tomar medias mensais e anuais destes valores diários.

Neste trabalho foi considerado também um outro modelo, um pouco mais sofisticado, baseado na Lei de Beer para absorção de radiação em meios líquidos [28], ou seja,

$$\frac{dI}{dx} = -KI \quad (4.28)$$

que expressa os comportamentos esperados das variáveis x e I descritos anteriormente.

Integrando esta equação temos

$$\int_{I_t}^I \frac{dI}{I} = -K \int_0^x dx \quad (4.29)$$

onde I_t é a irradiação solar o topo da atmosfera

Então

$$\ln\left(\frac{I}{I_t}\right) = -Kx \quad (4.30)$$

ou seja

$$I = I_t e^{-Kx} (*) \quad (4.31)$$

Logo a intensidade da radiação solar terá um comportamento exponencial decrescente ao atravessar a atmosfera, como mostra a Fig. 4.9.

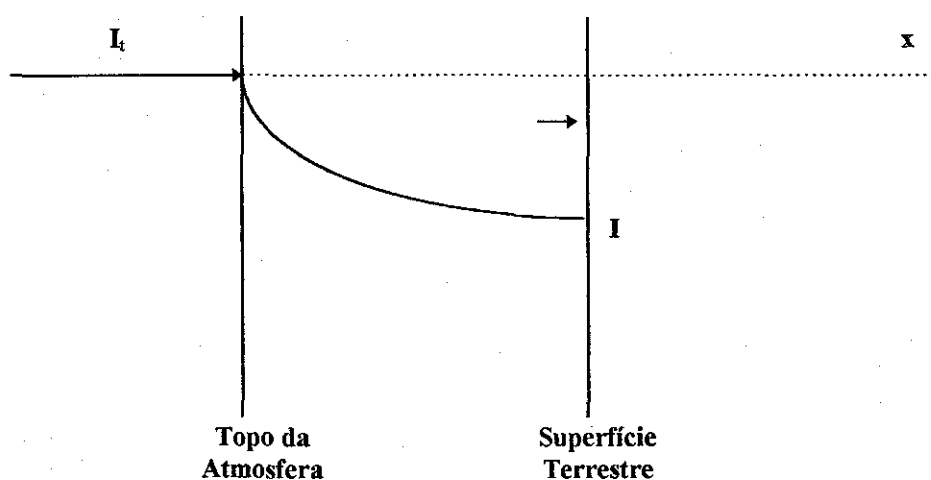


Fig. 4.9 Representação simples para o gradiente do fluxo de radiação solar na atmosfera

Observando a equação (4.30), pode-se deduzir que o valor da constante “K” depende dos seguintes fatores:

- Do fluxo de radiação solar medida na superfície terrestre, que por sua vez depende da altitude do lugar, da densidade atmosférica e presença de absorventes e dispersantes.

(*) K é uma constante a ser determinada experimentalmente e cuja unidade é $(\text{metro})^{-1}$

b) Do ângulo Zenital, que dependerá da orientação dos raios solares incidindo sobre a superfície terrestre, e do tempo (hora) da medição.

Portanto o valor de K não será o mesmo em diferentes meses do ano nem nos dias de um mesmo mês, já que o ângulo Zenital varia com o tempo. Entretanto poderão ser calculados valores médios diários ou mensais, que poderão ser utilizados para cálculos referentes a medições solares que não necessitem de valores muito exatos. Os cálculos foram realizados para alguns dias dos meses de Novembro/96, Junho/97, Julho/97, Agosto/97 e Setembro/97.

Para o cálculo dos valores de “ K ” é necessário conhecer-se a espessura de atmosfera atravessada consideremos então como sendo de 100 km a espessura da atmosfera mínima para a qual a radiação solar sofre perdas tanto pelo fenômeno de absorção como de dispersão, por partículas de vapor de água, CO_2 , ozônio, etc., (Fig. 4.10).

Deve ser considerado que à distancia $e = 100$ km, a medida da radiação solar deve ser $I_t = 1.367 \text{ W/m}^2$ (Constante Solar).

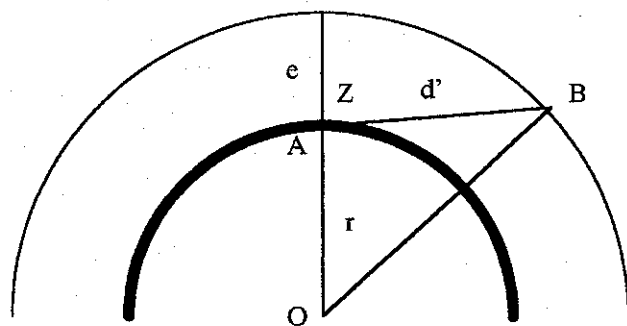


Fig. 4.10 Distancia percorrida pelos raios solares seguindo a direção Zenital “Z”.

Para o caso em que os vetores direcionais do Sol e do plano receptor (Fig.4.2) estão situados num mesmo plano (Fig. 4.10), tem-se um triângulo AOB tal que

$$(r+e)^2 = r^2 + d'^2 - 2rd' \cos (180-Z) \quad (4.32)$$

onde $r = 6.368$ km é o raio médio da Terra

$e = 100$ km é a distancia mínima coberta pelos raios solares que podem atingir um ponto "A" na superfície terrestre.

Então

$$d'^2 + 2rd'\cos Z - [(r+e)^2 - r^2] = 0$$

Assim

$$d' = -r \cos Z \pm \{r^2 \cos^2 Z + [(r+e)^2 - r^2]\}^{1/2}$$

Considerando $-90 \leq Z < 90$, isto implica que $-r \cos Z - \{r^2 \cos^2 Z + [(r+e)^2 - r^2]\}^{1/2} < 0$.

Então a única raiz aceitável é

$$d' = -r \cos Z + \{r^2 \cos^2 Z + [(r+e)^2 - r^2]\}^{1/2} \quad (4.33)$$

Para o caso geral, onde os vetores direcionais não estão contidos em um mesmo plano, estão a distância "d" percorrida pelos raios solares é

$$d = \frac{d'}{\cos \alpha} \quad (4.34)$$

onde

$$\alpha = \varphi - \delta \quad (4.35)$$

Observar Fig. 4.2.

Agora sendo "x" o valor de "d" na equação (4.34), substituindo este valor na equação (4.30), tem-se

$$K = \frac{\ln\left(\frac{I_t}{I}\right) \cos(\varphi - \delta)}{-r \cos Z + \left\{r^2 \cos^2 Z + \left[(r + 10^5)^2 - r^2\right]\right\}^{1/2}} \quad (4.36)$$

Este resultado é bastante mais complexo do que aquele obtido no caso de um redutor constante, ou seja,

$$K_0 = \frac{I}{I_t} \quad (4.37)$$

devendo portanto mostrar uma utilidade maior para que valha a pena ser considerado. Os resultados experimentais apresentados no próximo capítulo permitirão comparar o desempenho destes dois modelos.

CAPITULO 5

ARRANJO E MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS DA IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA EM CAMPINAS

5.1 Medidas Experimentais da Irradiação Solar em Campinas

Foram realizadas medidas da irradiação solar direta em Campinas SP correspondentes aos meses de Junho, Julho, Agosto, Setembro de 1997 e Novembro de 1996. Com estas medidas elaborou-se tabelas de irradiação solar diária e mensal, sendo que naqueles meses foram escolhidos alguns dias para os quais a distribuição de irradiação solar direta experimental é a mais próxima (em forma) à distribuição de irradiação teórica no topo da atmosfera e tomado um dia representativo para cada mês nos quais o regime da curva de irradiação solar é regular e sem picos pronunciados, para efeito de apresentação neste trabalho.

Os dados teóricos da irradiação solar foram comparados com os dados obtidos experimentalmente, de forma a obter-se a constante "K" diária e mensal para os dois modelos considerados. A determinação destas constantes serão de utilidade em medidas solares em geral.

5.2 Montagem do Sistema

A montagem utilizada esta mostrada na Fig. 5.1, sendo colocado o Eppley num local de exposição livre aos raios solares, sem nenhuma perturbação de sombra, e os componentes restantes do sistema num recinto apropriado para as medições correspondentes.

Nesta montagem as medições foram realizadas nos meses antes indicados em Campinas

5.3 Descrição do Equipamento

5.3.1 Baterias:

Bateria 1: Marca: DELCO; Modelo 2000; Ampere-Hora: 105

Bateria 2: Marca: DYNASTY; Modelo GC12V100; Ampere-Hora: 105 [29]

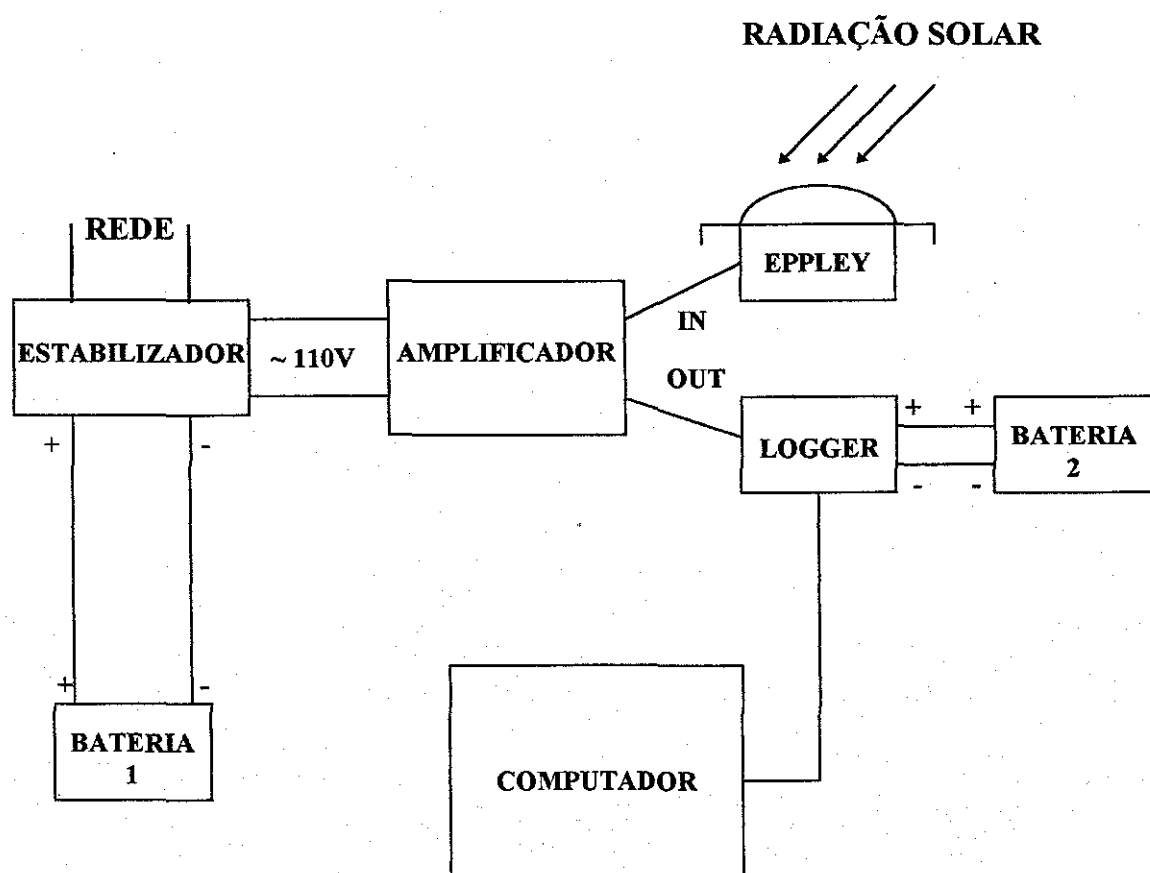


Fig. 5.1 Montagem do Sistema para medição da Irradiação Solar em Campinas

5.3.2 Estabilizador: (No-Break): Marca: LARK; Modelo NB-400; Potência: 270W (400VA)

5.3.3 Amplificador: Construído no Laboratório de Hidrogênio; Tipo: Linear; Ganho: 40x-400x; Entrada: em mV.

Este equipamento foi utilizado para multiplicar o milivoltagem proveniente do medidor da radiação solar (Eppley) e assim obter dados possíveis de medição no Energy-Logger (Volts).

5.3.4 Piranômetro espectral de precisão (Eppley)

Este medidor de radiação solar direta recebe a incidência da radiação solar num ângulo sólido de 2π sr. e é usado geralmente para medir a radiação do espectro solar na faixa de 0,13 a $3\mu\text{m}$ de comprimento de onda.

O piranômetro consiste dos seguintes componentes básicos:

- (1) Um elemento detetor ou sensor protegido por uma campana de vidro
- (2) Um corpo principal com um nivelador ajustável com parafusos na base do corpo
- (3) Uma saída de conexão elétrica [30].

O funcionamento do sensor está baseado no mesmo princípio dos termopares, o qual compara o efeito calorífico da radiação vinda do Sol sobre dois filamentos metálicos com aquela produzida nos mesmos filamentos por meio de uma corrente elétrica. A Fig. 5.2 mostra sua instalação.



Fig. 5.2 Fotografia que mostra a instalação do Eppley para medição da radiação solar em Campinas.

5.3.5 Energy Logger: Marca: PACIFIC SCIENCE & TECHNOLOGY, INC; Modelo: Energy Logger. Entradas: 4 analógicas/ 1 até 48V AC; Saída: RS-232 [31].

O Energy Logger é um sistema eletrônico de aquisição de dados que pode ser acoplado a um microcomputador.

5.4 Testes dos Sistemas e Resultados Preliminares da Operação

Foram realizadas medidas de irradiação solar em Campinas para os meses de Jun/97, Jul/97, Agos/97, Set/97 e Nov/96.

Obteve-se dados da irradiação solar para alguns dias destes meses sem chuva e sem muitas nuvens nos quais as condições climáticas foram boas (de distribuição regular), medidos num intervalo de 20 minutos.

Os resultados de um dia representativo* de cada mês são mostrados na Tabela 5.1, onde também estão especificados alguns dados complementares à respeito da cidade de Campinas. Os gráficos referentes a estes dados estão mostrados na Fig. 5.3.

É importante observar o fato das diferenças horárias reais a partir das longitudes geográficas no estado de Brasília (capital, cujo horário é o oficial no Brasil) e a cidade de Campinas, o qual produz uma correção na distribuição de irradiação solar deslocando as curvas na diferença horária respectiva.

Sendo o fuso de longitudes geográficas em Brasília de $-47^{\circ}20'$ para $-48^{\circ}15'$ e a longitude em Campinas de $-47^{\circ}04'39''$, convertendo estes ângulos de graus em horas (dividindo entre 15) e fazendo as diferenças correspondentes encontramos os desfases de $1^{\circ}1,4''$ e $4^{\circ}41,4''$ o qual justifica o deslocamento das distribuições de irradiação solar a partir dos dados originais os quais encontravam-se desfasados do ponto máximo no meio dia.

* Com o termo “representativo”, referimo-nos aos dias nos quais as curvas diárias de irradiação solar vs. tempo são de regime regular.

TABELA 5.1

IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA EXPERIMENTAL (COM PERDAS)^(*)

ESTADO: São Paulo

CIDADE: Campinas

LATITUDE: -22°53'21'' LONGITUDE: -47°04'39''

ALTITUDE: 693 m

MESES: Jun., Jul., Ago., e Set., 1997

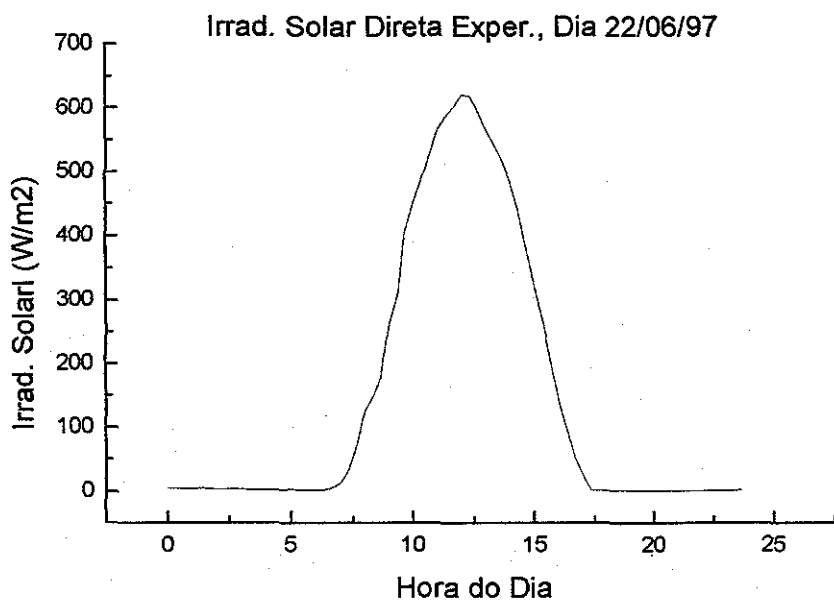
INTERVALO DE MEDIÇÃO: 20 min.

UNIDADES DE MEDIÇÃO: W/m²

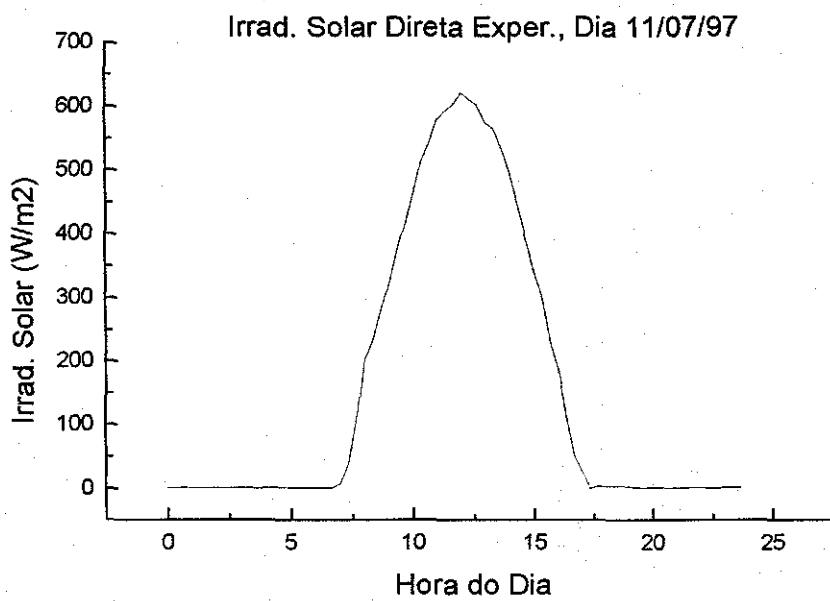
HORARIO DE MEDIÇÃO: as 24 horas do dia

T (h)	22/06/97	11/07/97	13/08/97	15/09/97	27/11/96	T (h)	22/06/97	11/07/97	13/08/97	15/09/97	27/11/96
0	4,4	0,3	3,3	3,7	11,9	12	620,2	620,6	626,8	774,6	905,0
0.33	4,0	0,6	3,5	4,1	10,6	12.33	619,5	611,7	625,4	766,3	895,5
0.66	3,5	1,5	3,9	5,3	11,1	12.66	597,3	601,9	620,0	750,0	885,0
1	3,7	0,6	3,8	4,3	11,4	13	566,4	573,5	600,6	722,6	875,0
1.33	4,3	0,3	3,9	4,1	10,8	13.33	544,2	564,7	564,5	701,0	860,0
1.66	3,7	0,6	3,4	3,5	11,9	13.66	516,6	531,9	539,5	664,0	840,2
2	2,8	0,8	3,2	3,4	11,3	14	487,8	494,6	508,4	614,9	820,9
2.33	3,0	0,6	3,2	3,5	12,8	14.33	443,6	443,3	463,6	571,6	803,7
2.66	3,3	0,3	3,9	3,8	13,3	14.66	379,4	391,8	412,5	511,0	780,0
3	2,7	0,6	4,2	4,9	14,1	15	323,0	341,3	365,6	457,9	735,0
3.33	1,3	0,3	3,9	4,8	13,1	15.33	269,0	303,2	310,5	392,6	677,1
3.66	1,9	0	3,5	5,1	13,3	15.66	205,8	228,7	250,7	325,9	591,3
4	2,0	0,2	3,4	5,4	13,6	16	138,3	182,7	200,9	251,7	542,2
4.33	2,2	0,4	4,9	5,9	13,7	16.33	95,1	112,6	140,4	175,9	473,1
4.66	2,2	0	4,5	4,9	13,3	16.66	52,0	52,3	84,5	105,4	385,1
5	2,4	0,6	3,4	3,9	14,3	17	23,1	25,2	36,1	50,4	271,0
5.33	1,2	0,4	2,4	4,3	17,9	17.33	2,1	2,2	6,3	4,3	210,6
5.66	1,9	0,3	1,4	5,1	32,5	17.66	1,1	4,4	5,5	13,9	146,7
6	1,8	0,8	1,2	4,6	106,9	18	0,6	4,1	5,5	13,6	102,2
6.33	1,4	0,6	1,7	1,5	176,7	18.33	0,9	3,2	5,1	10,7	64,9
6.66	5,8	0,4	1,1	10,5	241,9	18.66	1,4	3,2	4,6	13,1	19,7
7	12,7	7,5	16,9	75,2	319,8	19	0,4	2,3	4,5	11,2	10,9
7.33	34,0	38,8	51,8	118,4	417,2	19.33	0,7	1,9	4,6	9,2	10,6
7.66	72,8	108,2	58,6	177,8	511,5	19.66	0,4	1,3	4,6	7,6	11,3
8	124,9	201,3	161,2	249,8	573,4	20	0,6	2,1	4,3	5,8	10,9
8.33	148,5	234,1	227,5	338,9	623,6	20.33	0,4	1,9	4,4	4,1	11,7
8.66	179,1	280,2	290,6	402,5	676,2	20.66	0,8	1,3	4,0	3,7	11,2
9	262,1	317,4	343,8	462,8	719,4	21	0,8	1,3	4,0	4,2	11,4
9.33	305,3	373,0	404,1	517,8	762,8	21.33	0,9	1,3	3,9	4,6	11,7
9.66	407,1	415,7	493,8	569,6	796,6	21.66	0,8	1,8	3,9	5,8	12,4
10	449,1	461,8	507,4	614,0	824,8	22	0,8	1,5	3,8	4,4	12,6
10.33	485,6	513,3	564,3	660,1	842,4	22.33	0,6	0,8	3,8	7,2	13,0
10.66	526,5	541,6	555,3	690,3	866,7	22.66	0,4	0,7	3,8	8,6	12,0
11	566,7	578,8	580,9	732,1	881,3	23	0,8	1,7	3,8	8,0	12,4
11.33	586,3	592,2	597,2	756,9	890,1	23.33	1,3	1,9	3,7	7,2	12,6
11.66	600,7	601,9	622,3	758,5	900,1	23.66	1,8	0,9	3,4	6,9	13,0

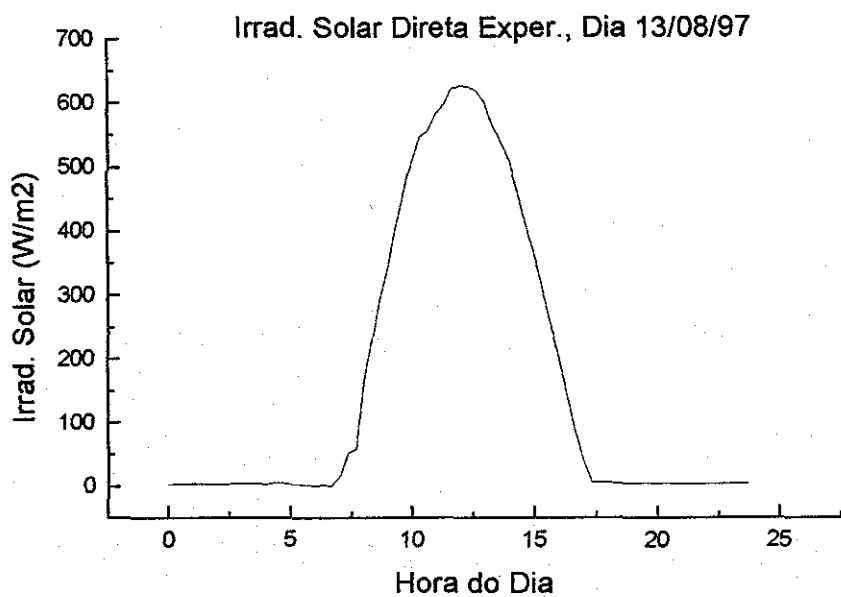
(*) No apêndice 2 mostra-se os dados correspondentes a todos os dias durante os quais se fez as medições



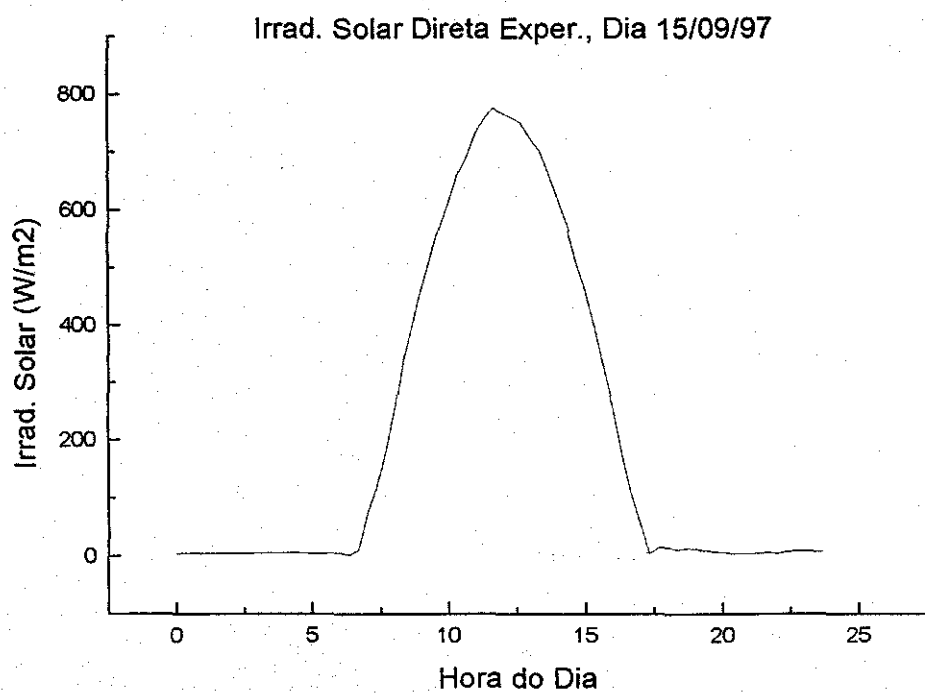
(a)



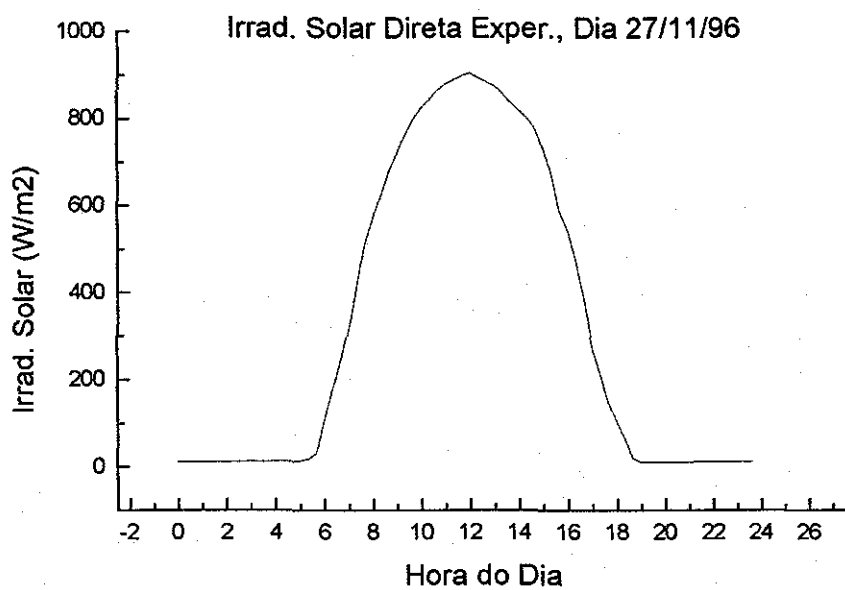
(b)



(c)



(d)



(e)

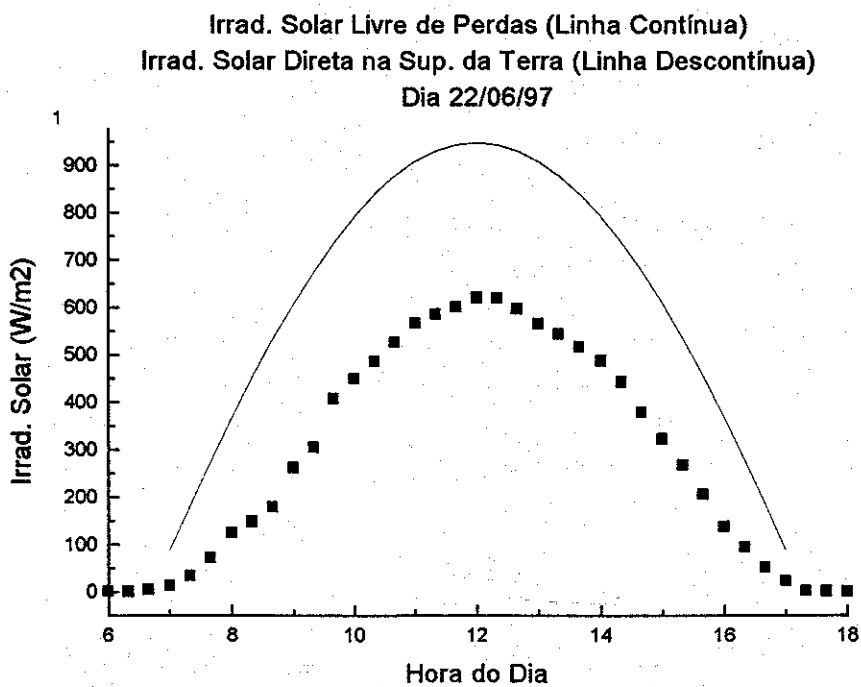
Fig. 5.3 Distribuição temporal, experimental da Irradiação solar direta em Campinas SP durante os dias (a) 22/06/97, (b) 11/07/97, (c) 13/08/97, (d) 15/09/97 e (e) 27/11/96

CAPITULO 6

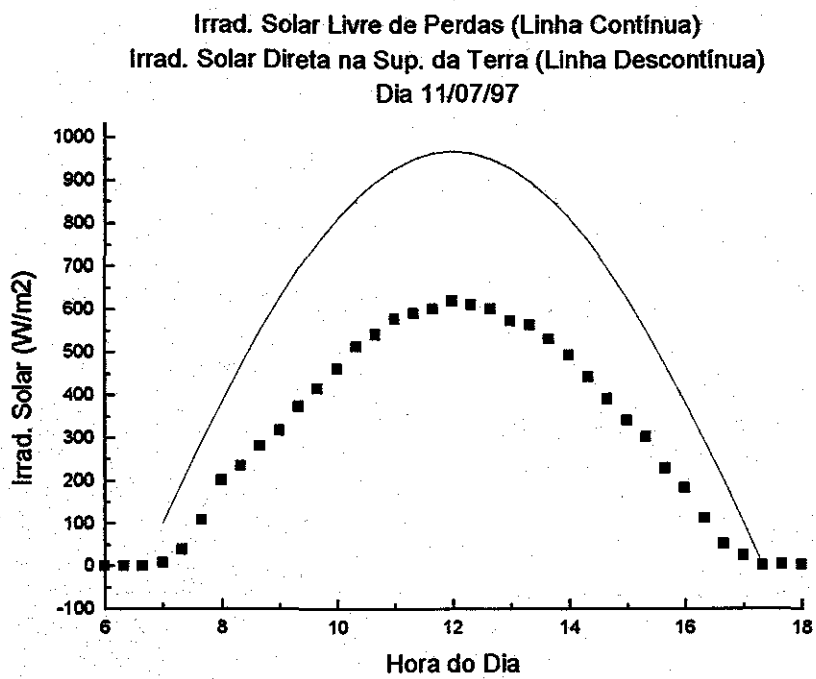
ANÁLISE DOS TESTES E RESULTADOS

6.1 Comparação da irradiação Solar Livre de Perdas por Absorção e Dispersão e a Radiação Solar Direta com Perdas na Superfície da Terra

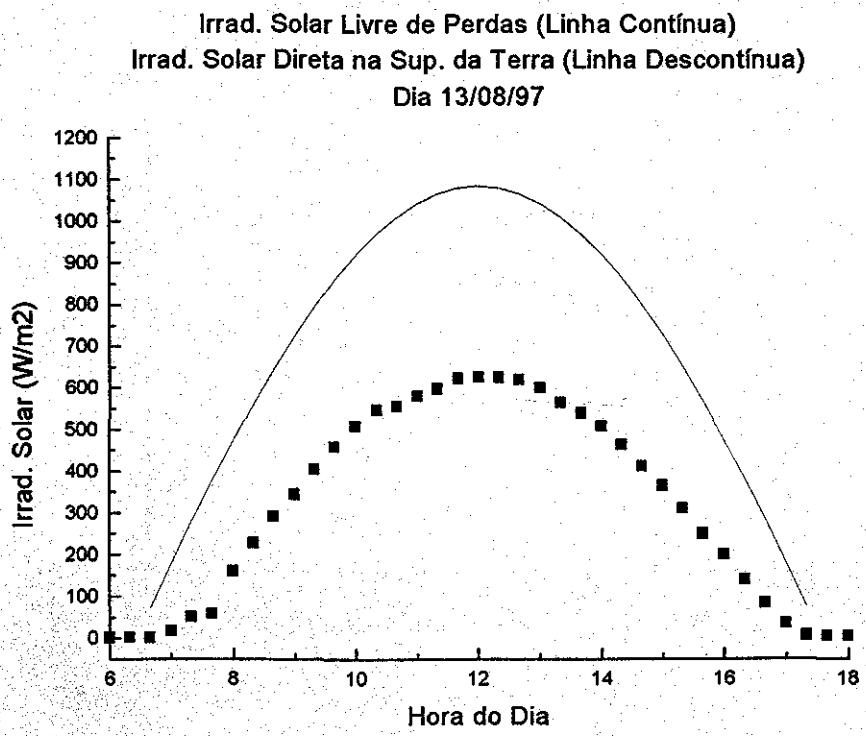
Na Fig. 6.1 observa-se a superposição da irradiação solar livre de perdas (obtida do modo teórico) e a irradiação direta obtida na superfície da Terra (medida com o Eppley).



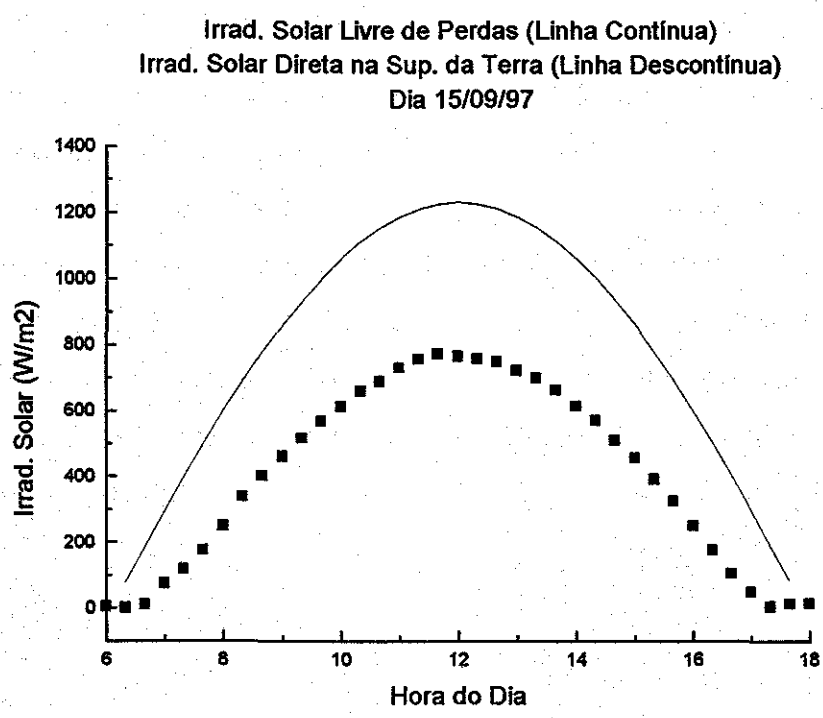
(a)



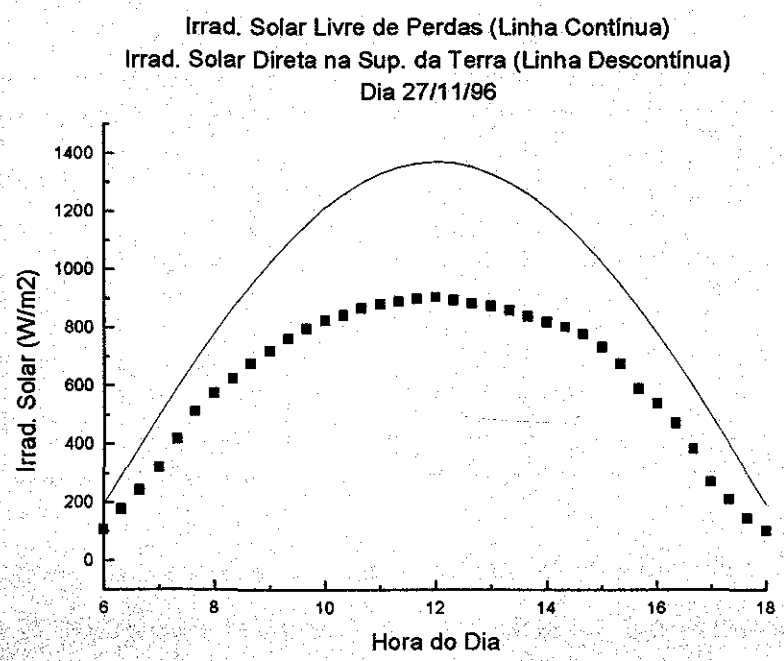
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 6.1 Comparação da irradiação solar livre de perdas e a medida na superfície terrestre em quatro dias representativos dos meses de Jun/97, Jul/97, Agos/97, Set/97 e Nov/96.

6.2 Irradiação Solar Media Diária e Mensal

Com os dados da irradiação solar diária obtidos mediante o arranjo experimental mostrado no Capítulo 4, obteve-se os valores médios diários da mesma para os meses de Jun-Set/97 e Nov/96, que estão mostrados na Tabela 6.1, para alguns dias destes meses (de céu claro), mostram-se também nesta tabela os desvios padrões nos diferentes meses.

É importante notar que a média calculada pela integral da área da distribuição de irradiação é a mesma que a calculada mediante o valor médio aritmético das intensidades de radiação uma vez que nossas medidas foram tomadas em intervalos iguais de 20 minutos, como é mostrado na seguinte expressão:

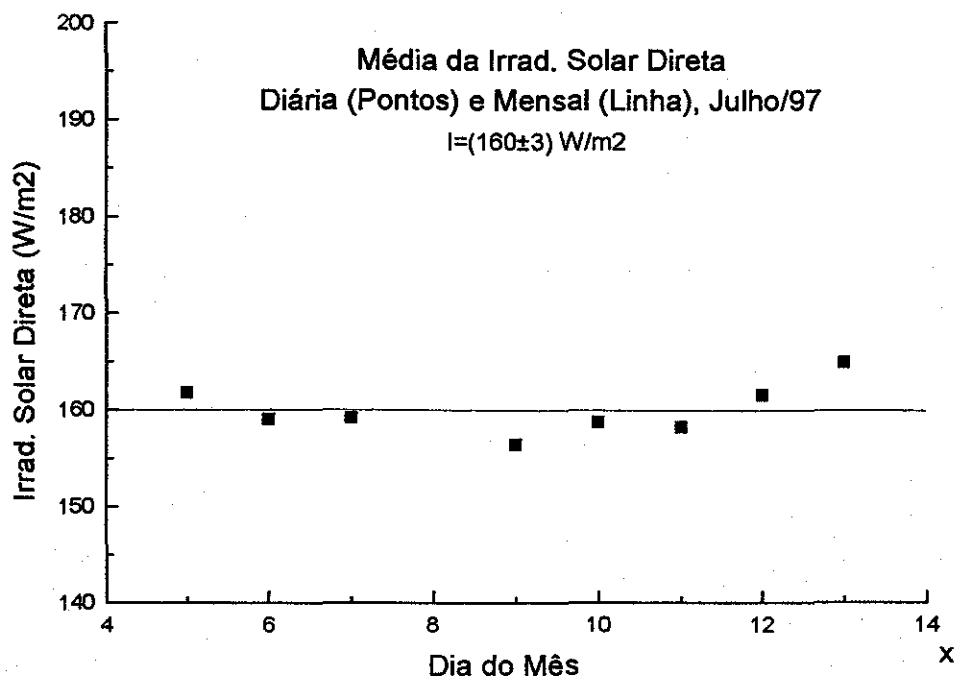
$$\bar{I} = \frac{\int_6^{6+n(\Delta t)} I dt}{\Delta T} = \frac{\sum_{i=6}^{6+n(\Delta t)} I_i(\Delta t_i)}{n(\Delta t)} = \frac{\Delta t \sum_{i=6}^{6+n(\Delta t)} I_i}{n(\Delta t)} = \frac{\sum_{i=6}^{6+n(\Delta t)} I_i}{n}$$

TABELA 6.1

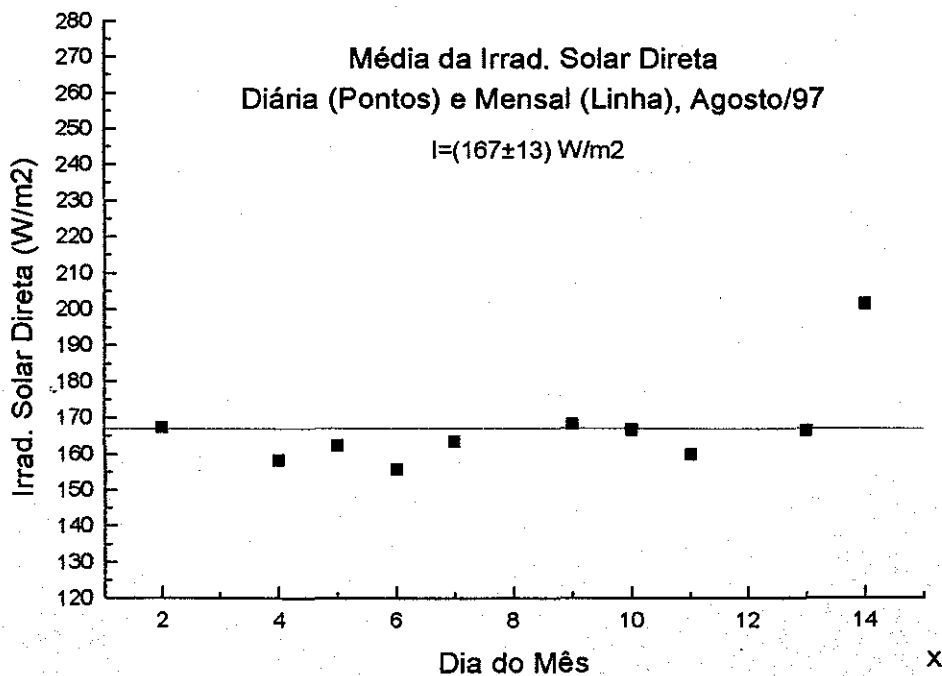
Valores médios diários e valor mensal da Irradiação solar direta em W/m², nos meses de Junho-Setembro/97 e Novembro/96

JUN/97	$\bar{I}$ diário	JUL/97	$\bar{I}$ diário	AGO/97	$\bar{I}$ diário	SET/97	$\bar{I}$ diário	NOV/96	$\bar{I}$ diário
22	148,8	5	161,8	2	167,4	3	188,8	10	293,8
23	140,9	6	159,0	4	158,3	7	184,2	24	312,3
		7	159,2	5	162,3	8	182,3	27	321,3
		9	156,5	6	155,7	11	211,1		
		10	158,8	7	163,5	12	206,9		
		11	158,3	9	168,1	13	199,7		
		12	161,6	10	166,7	14	196,4		
		13	165,0	11	160,0	15	211,3		
				13	166,4				
				14	201,7				
$\bar{I}$ mensal	145±6		160±3		167±13		198±12		309±14

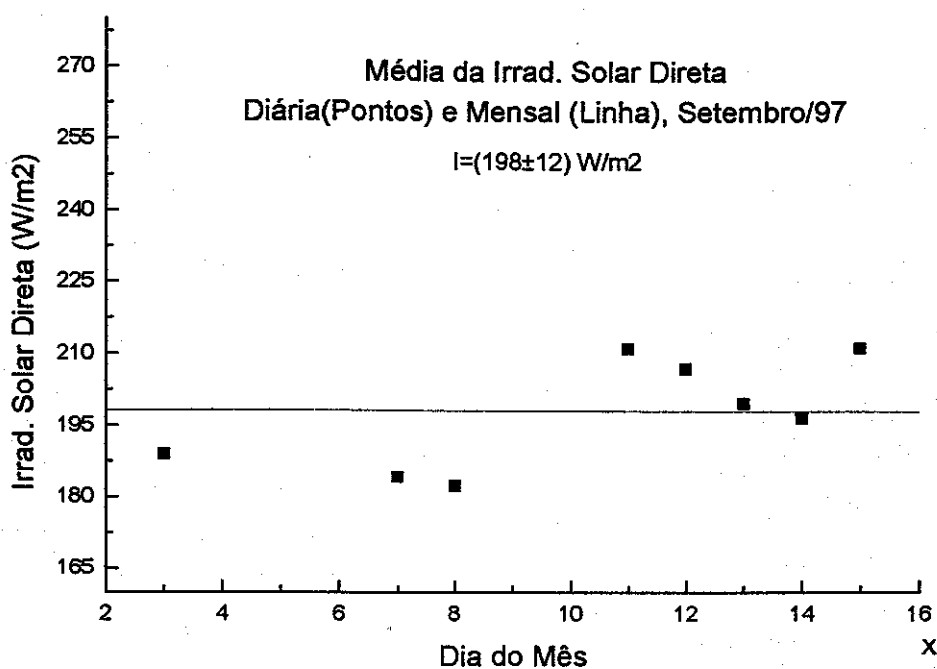
Os dados diários são representados num gráfico da irradiação solar direta vs. dia para estes meses (Fig. 6.2). Nos meses de Junho (com só dois dados aproveitáveis) e Novembro (no qual se tem só três dados de céu claro) não foram feitas as análises devido à insuficiência de dados.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6.2 Média diária e mensal da Irradiação solar direta nos meses Julho, Agosto e Setembro de 1997

Observando a Tabela 6.1 comprova-se o aumento do valor médio mensal de irradiação solar ao longo dos meses de Junho à Novembro, observando-se neste fato a mudança de estação de Inverno para Primavera. Este comportamento acompanha as mudanças de estação durante o ano como está mostrado no apêndice A .

6.3 Média Mensal de Radiação Total Diária em Plano Horizontal, Comparação Teórica e Experimental

Os dados obtidos na Tabela 6.1 são comparados com dados experimentais tirados da referência bibliográfica [32], para radiação solar no Estado de São Paulo editado em 1981 pela CESP (Companhia Energética de São Paulo). Os dados são mostrados na Tabela 6.2 em unidades $\text{kWh/m}^2\cdot\text{dia}$ por ser esta a unidade de medição na referência bibliográfica. A Tabela também mostra os desvios em porcentagem de erro respeito aqueles valores experimentais.

Tabela 6.2

Energia em Plano Horizontal, kWh/m².dia, Campinas

Mês	(A) Valores Experimentais	(B) Valores Experimentais/81	Diferença (A)-(B)	(A)-(B) / A *100
6	3,47	3,38	0,09	2,6%
7	3,84	3,62	0,22	5,7%
8	4,01	4,09	-0,08	2,0%
9	4,74	4,27	0,47	9,9%
11	7,32	5,29	2,03	27,7%

Os resultados dos meses de Jun.-Set/97. indicam um desvio médio de 5%, sendo o máximo de 9,9% correspondente ao mês de Setembro. Estes resultados são bons, garantindo a eficácia do método experimental utilizado. O desvio no mês de Nov./96 indica para um valor de apreciável diferença com o valor obtido no ano 1981, isto pode ser devido a variações climáticas no meio ambiente.

6.4 Determinação dos valores de “K” Diários e Interpretações

6.4.1 Determinação de K₀

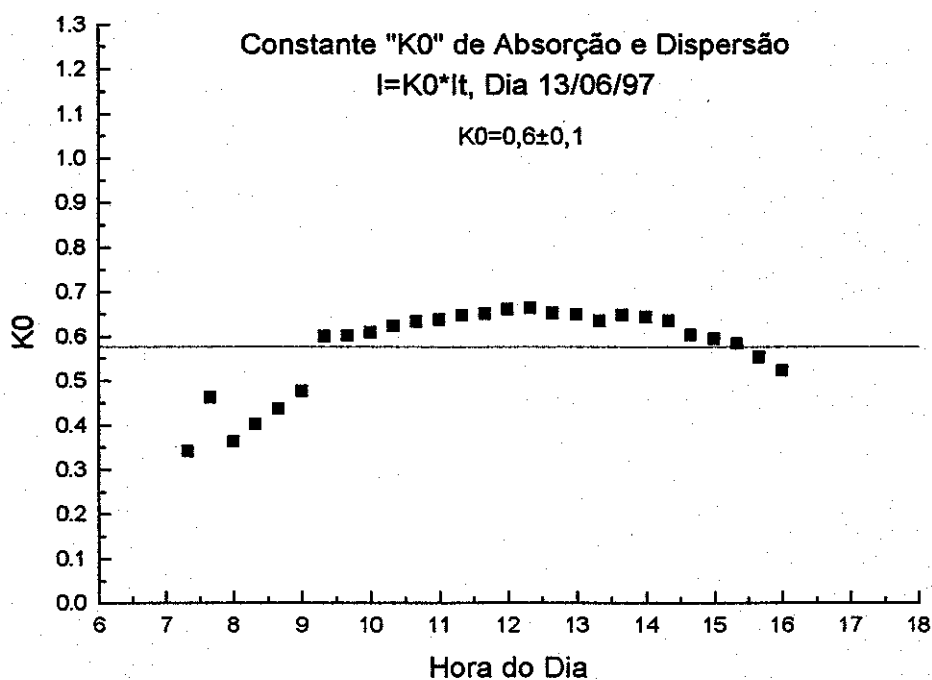
Com o auxílio da equação (4.27) do Capítulo 4, determinou-se os valores do parâmetro “K₀” de perdas da irradiação solar na atmosfera e analisou-se a dependência horária e diária deste parâmetro para cada um dos meses de Jun.-Set/97 e Nov./96, dando interpretações das diferenças e das dependências físicas deste parâmetro.

A partir da equação (4.27)

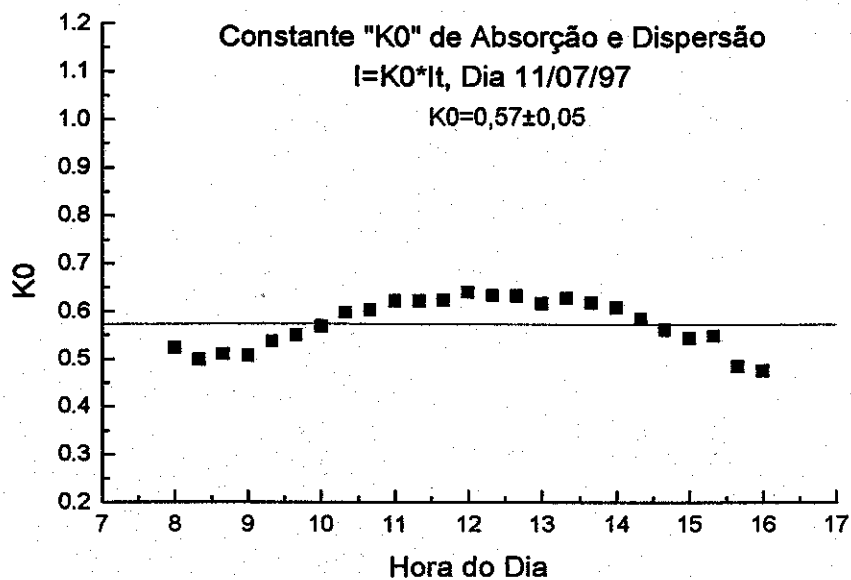
$$I = K_0 I_t$$

para cada valor de I medido com intervalo de 20 minutos de cada dia durante os dias úteis dos meses acima indicados, correspondentes a céu claro, se realizou o cálculo dos valores de “K₀”, considerando-se os correspondentes valores da irradiação solar teórica, livre de perdas, I_t, chegando-se aos resultados mostrados na Fig. 6.3 para cinco dias dos 5 meses selecionados e na

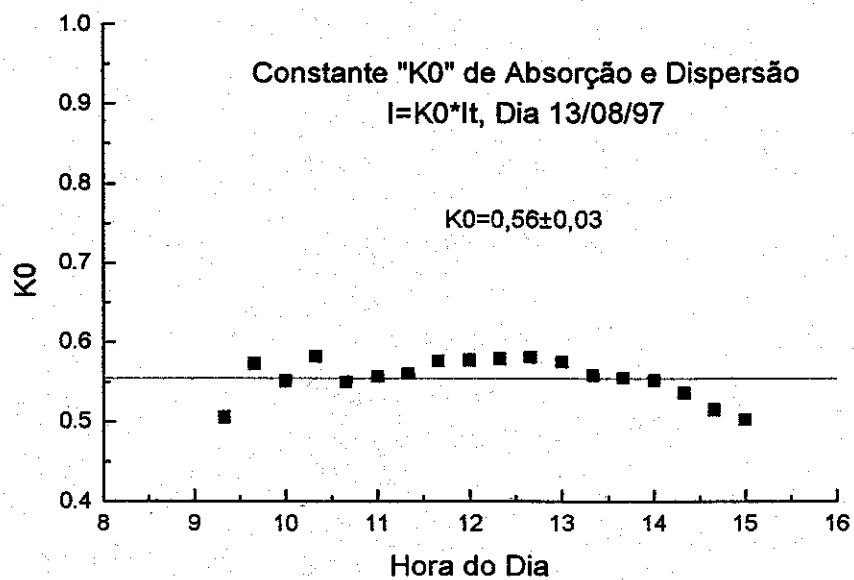
Fig. 6.4 para três meses, sendo que nos meses de Junho/97 e Novembro/96 se tem insuficiência de dados para realizar o cálculo de valor médio. O valor de " K_0 " pode ser considerado quase constante ao longo do dia e do mês, como pode-se observar nos gráficos. Assim este modelo é aceitável sempre que as aplicações assim o permitirem (maior ou menor precisão requerida). Mais adiante, neste mesmo capítulo, utilizaremos outro modelo de melhores resultados. Logo determinou-se as medias diárias para todos os dias considerados, cujos valores são os mostrados na Tabela 6.3



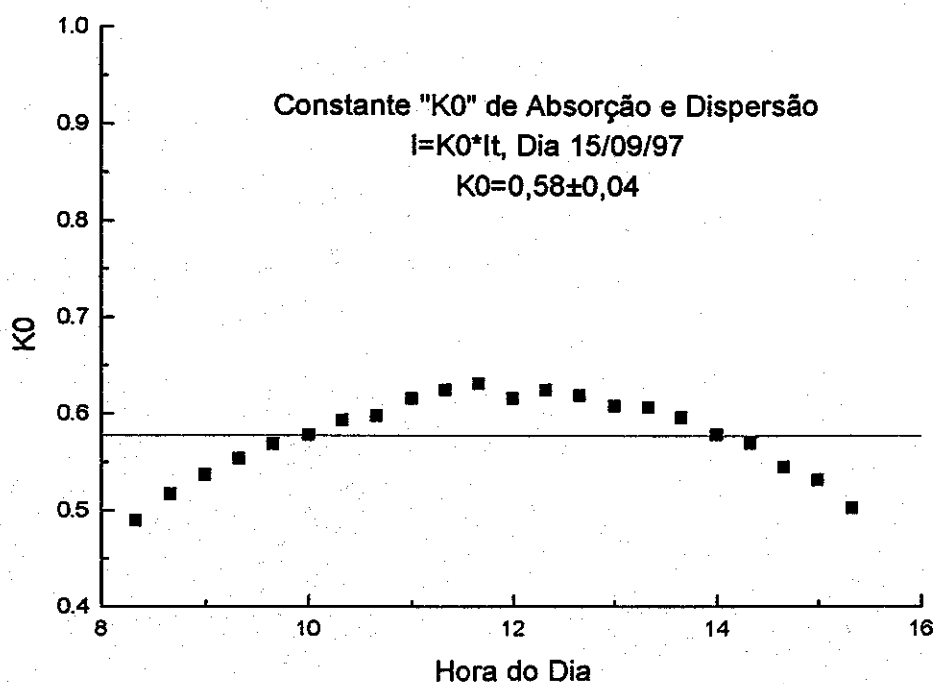
(a)



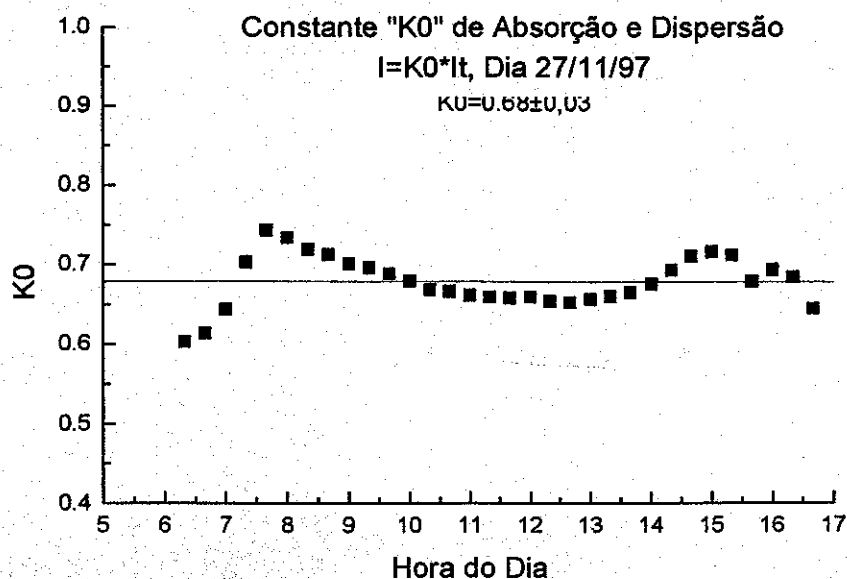
(b)



(c)

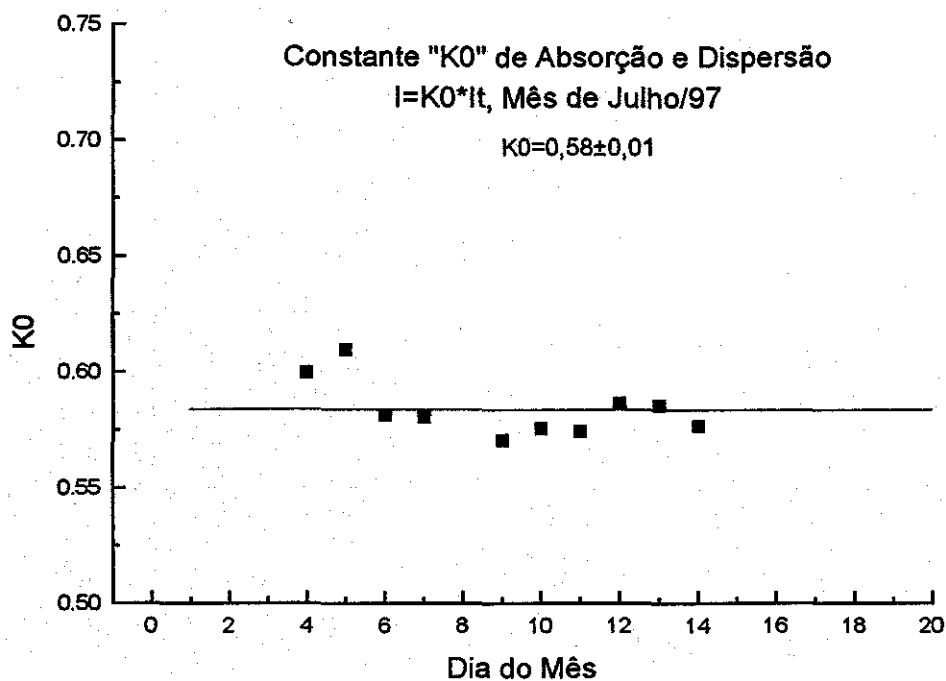


(d)

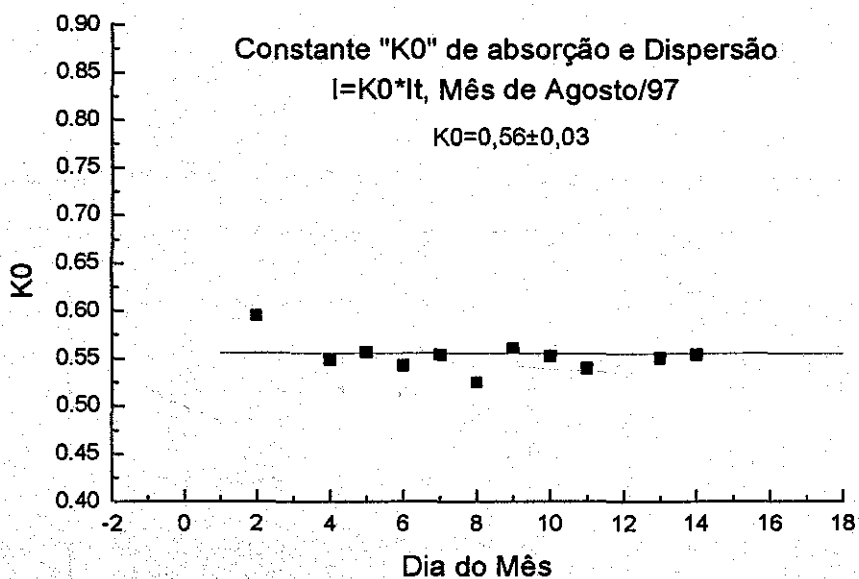


(e)

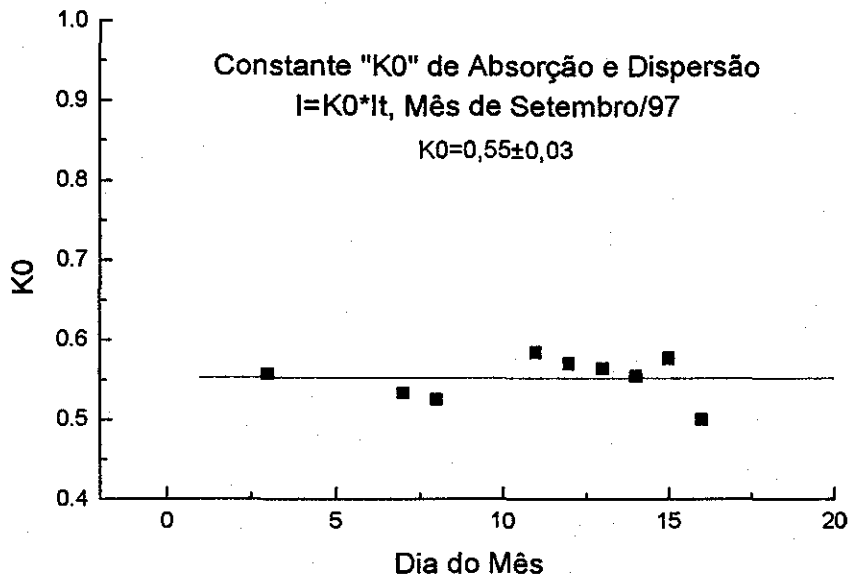
Fig. 6.3 Valores da constante "K₀" para 5 dias dos meses Jun./97, Jul./97, Agos./97, Set./97 e Nov./96 (pontos pretos) e valores médios diários (linha vermelha)



(a)



(b)



(c)

Fig. 6.4 Valores da Constante K_0 para os meses Jul/97, Agos/97 e Set/97 (pontos pretos) e valores médios mensais (linha vermelha).

TABELA 6.3

Determinação da constante " K_0 " de perdas da radiação solar por absorção e dispersão

JUN/97 (dia)	K_0	JUL/97 (dia)	K_0	AGO/97 (dia)	K_0	SET/97 (dia)	K_0	Nov/96	K_0
13	0,58	4	0.60	2	0.60	3	0.56	10	0.65
22	0,57	5	0.61	4	0.55	7	0.53	24	0.66
23	0,56	6	0.58	5	0.56	8	0.53	27	0.68
24	0,53	7	0.58	6	0.54	11	0.59		
		9	0.57	7	0.55	12	0.57		
		10	0.58	8	0.53	13	0.57		
		11	0.57	9	0.56	14	0.56		
		12	0.59	10	0.55	15	0.58		
		13	0.59	11	0.54	16	0.51		
		14	0.58	13	0.55				
				14	0.55				
— mensal	$0.55 \pm 0,02$		$0.58 \pm 0,01$		$0.55 \pm 0,02$		$0.55 \pm 0,03$		$0.67 \pm 0,01$

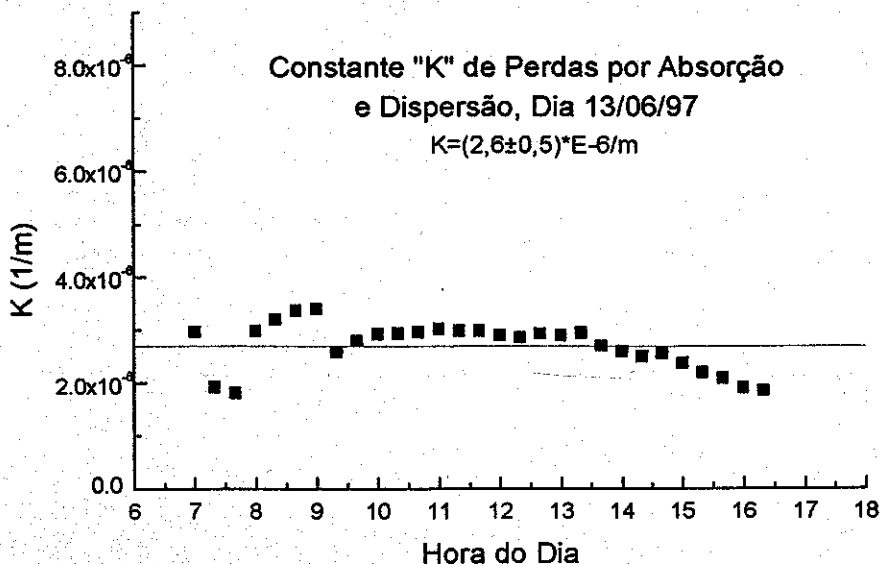
O valor de K_0 é aproximadamente constante ao longo dos dias no mês e ao longo dos meses no ano, o qual é satisfatório na aplicação de um modelo teórico para determinar as curvas características teóricas da irradiação direta que atinge a superfície terrestre. Este modelo não é muito preciso devido a que não considera a dependência com a espessura da camada de atmosfera, das perdas da radiação solar ao atravessar a mesma, como veremos no modelo seguinte.

6.4.2 Determinação de K

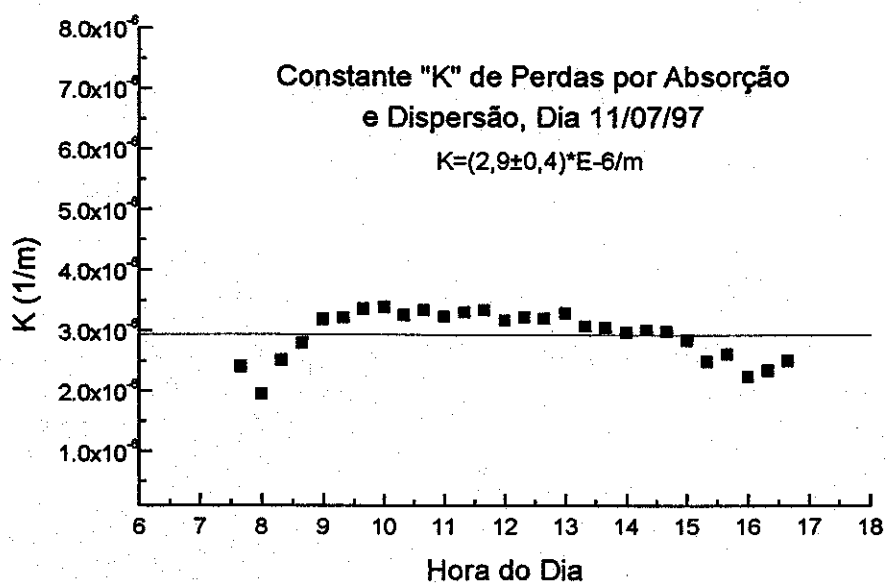
Da mesma maneira que no cálculo de K_0 a partir da equação (4.36)

$$K = \frac{\ln\left(\frac{I_t}{I}\right) \cos(\varphi - \delta)}{-r \cos Z + \left\{ r^2 \cos^2 Z + \left[(r + 10^5)^2 - r^2 \right]^{1/2} \right\}}$$

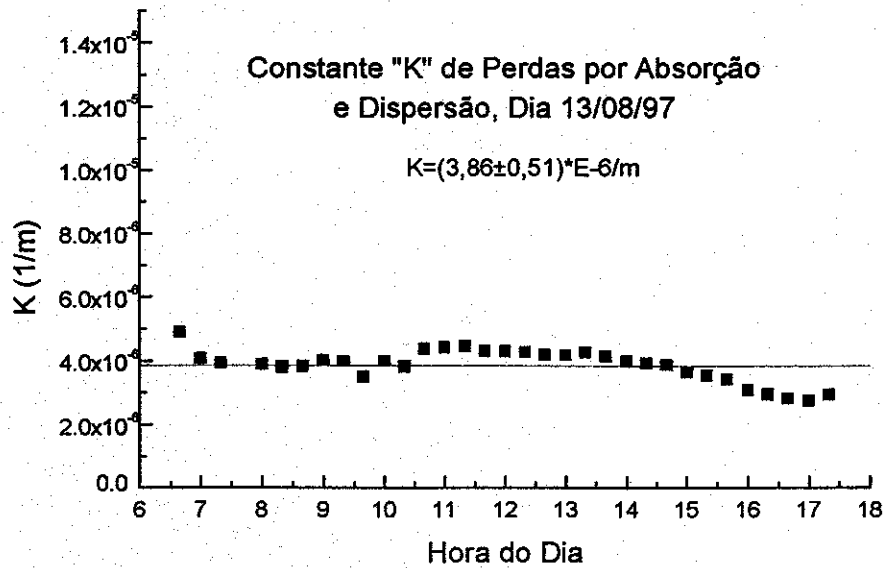
determinaremos os mesmos gráficos e tabela obtidos no cálculo de K_0 . Observar as figuras 6.5 e 6.6 e a Tabela 6.4.



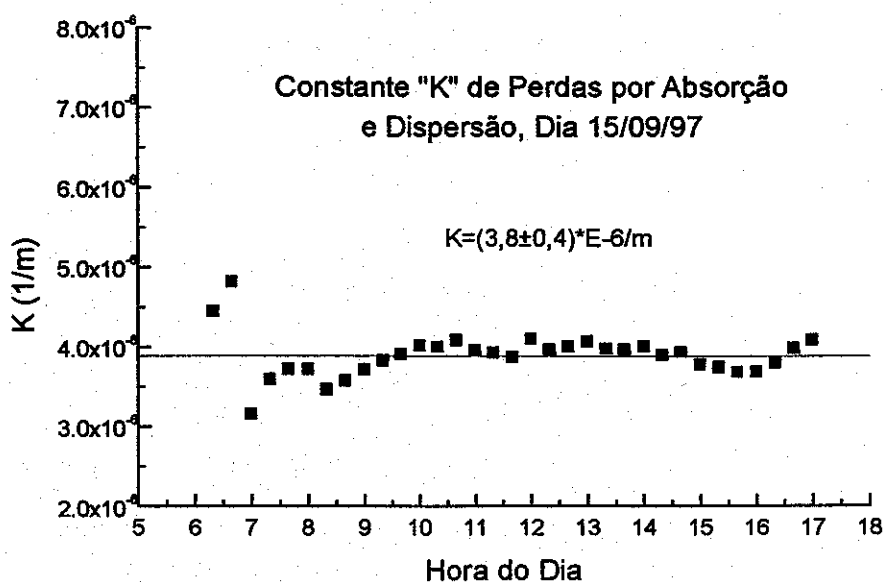
(a)



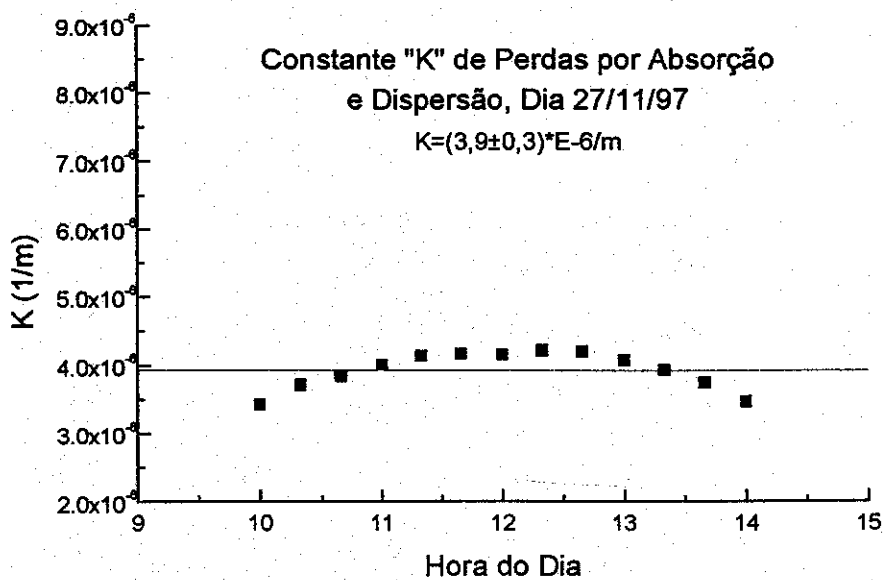
(b)



(c)

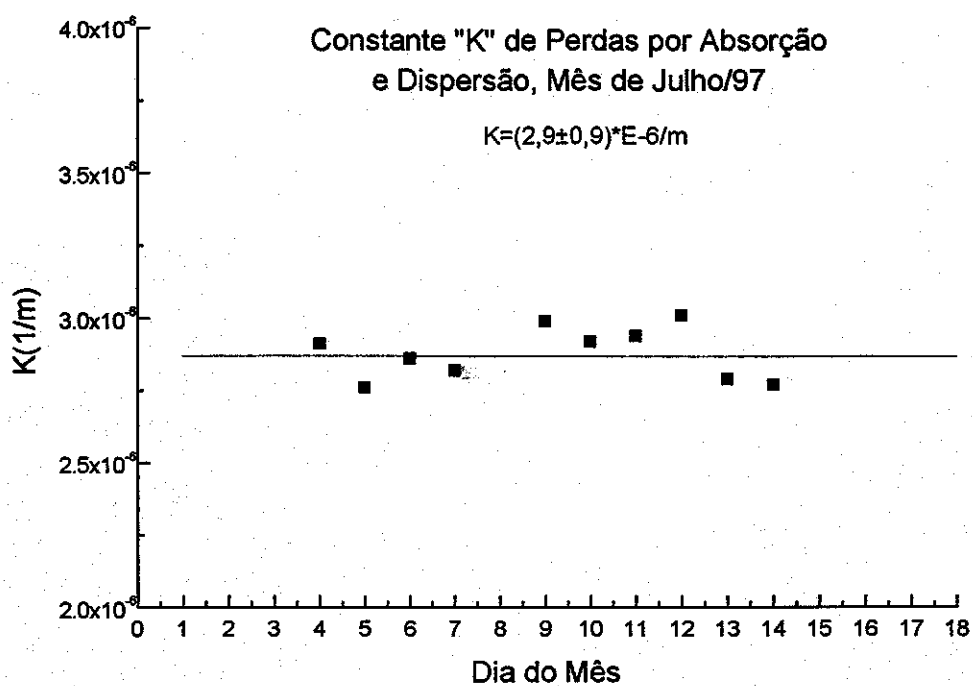


(d)

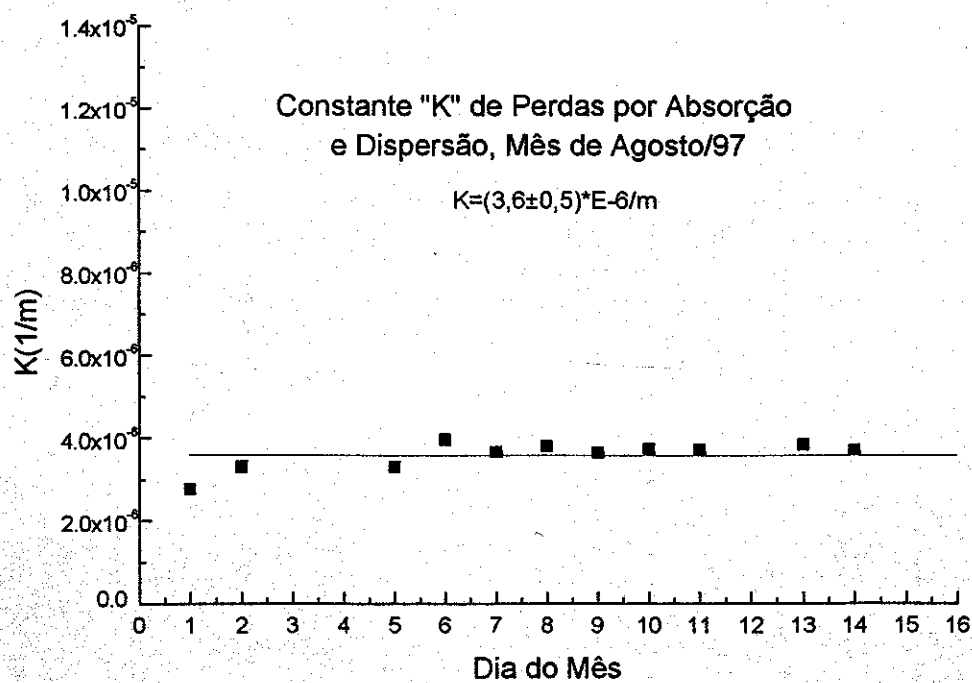


(e)

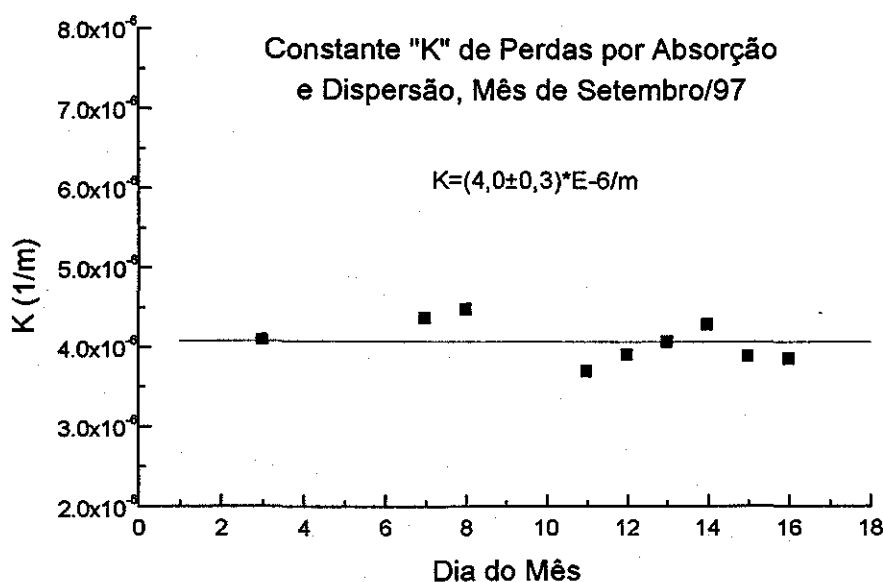
Fig. 6.5 Valores da constante "K" para 5 dias dos meses Jun./97, Jul./97, Agos./97, Set./97 e Nov./96 (pontos pretos) e valores médios diários (linha vermelha)



(a)



(b)



(c)

Fig. 6.6 Valores da Constante K para os meses Jul/97, Agos/97 e Set/97 (pontos pretos) e valores médios mensais (linha vermelha).

TABELA 6.4

Determinação da constante "K" de perdas da radiação solar por absorção e dispersão

JUN/97 (dia)	$\bar{K}(m^{-1})$ $\cdot 10^{-6}$	JUL/97 (dia)	$\bar{K}(m^{-1})$ $\cdot 10^{-6}$	AGO/97 (dia)	$\bar{K}(m^{-1})$ $\cdot 10^{-6}$	SET/97 (dia)	$\bar{K}(m^{-1})$ $\cdot 10^{-6}$	NOV/96 (dia)	$\bar{K}(m^{-1})$ $\cdot 10^{-6}$
13	2,7	4	2,9	1	2,8	3	4,1	10	4,02
23	3,4	5	2,8	2	3,3	7	4,4	24	3,97
24	2,6	6	2,9	5	3,3	8	4,5	27	3,93
		7	2,8	6	4,0	11	3,7		
		9	3,0	7	3,7	12	3,9		
		10	2,9	8	3,8	13	4,1		
		11	2,9	9	3,7	14	4,3		
		12	3,0	10	3,8	15	3,9		
		13	2,8	11	3,7	16	3,9		
		14	2,8	13	3,9				
				14	3,7				
— mensal	2,9±0,4		2,9±0,9		3,6±0,5		4,1±0,3		4,0±0,5

Embora o modelo não tenha considerado a dependência da absorção e dispersão com o comprimento de onda da radiação eletromagnética luminosa, o que é válido especialmente para fluidos líquidos e não para estados gasosos como é o caso da atmosfera terrestre, este modelo bate relativamente bem como mostra a Fig. 6.6 e a Tabela 6.4 a qual mostra a constância bastante aceitável do parâmetro K ao longo dos dias de um mês e dos meses de um ano.

É importante observar que as perdas da radiação solar ao atravessar a atmosfera dependem não só da espessura desta, senão também da intensidade de irradiação como já foi comentado no Capítulo 4 ao se desenvolver o modelo matemático.

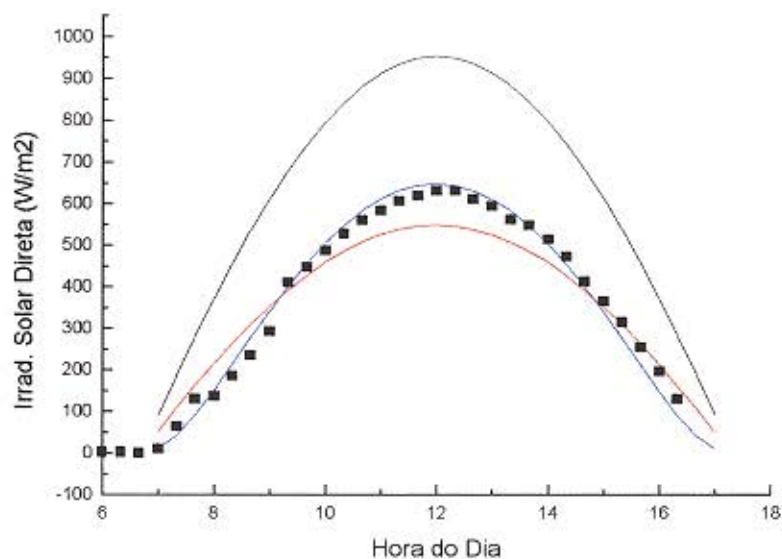
Como é de observar este modelo considera dependências físicas, de fato reais, que o modelo anterior (para determinação de K_0) não leva em conta, o que é a grande vantagem deste modelo sobre o anterior.

Posteriormente serão feitas medidas da irradiação solar aproveitada por sistemas fotovoltaicos, que serão comparadas com os gráficos de irradiação solar tanto com perdas por absorção e dispersão na atmosfera terrestre, como sem elas.

6.5 Distribuições Teóricas da Irradiação Solar Direta na Superfície Terrestre

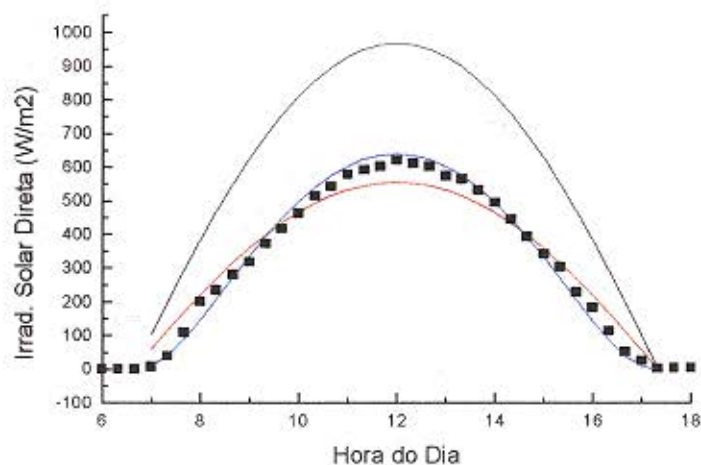
Chegamos ao ponto no qual determinaremos o cálculo teórico das distribuições de irradiação solar direta que atinge a superfície terrestre, calculadas mediante os dois modelos propostos, utilizando K_0 e K , fazendo uso das equações 4.27 e 4.31 respectivamente. A Fig. 6.7 mostra a sobreposição das curvas calculadas mediante estes dois métodos (azul e vermelho respectivamente), a curva experimental (linha preta descontínua) e a curva de irradiação solar livre de perdas (linha preta contínua) para 5 dias representativos dos meses Jun.-Set./97 e Nov/96.

Irrad. Solar Livre de Perdas (Linha Contínua)
 Irrad. Solar Direta na Sup. da Terra (Linha Descontínua)
 Irrad. Solar Direta na Sup. da Terra K (Linha Azul)
 Irrad. Solar Direta na Sup. da Terra K0 (Linha Vermelha)
 Dia 13/06/97



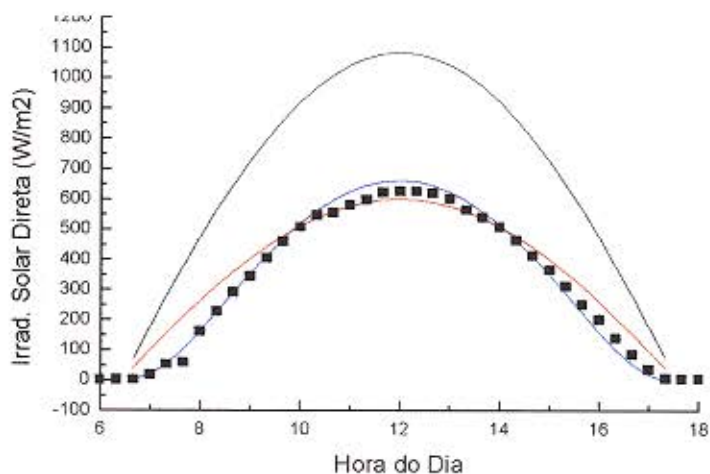
(a)

Irrad. Solar Livre de Perdas (Linha Preta Contínua)
 Irrad. Solar Direta na Sup. Terr. (Linha Preta Descontínua)
 Irrad. Solar Direta na Sup. Terr. Calculada K (Linha Azul)
 Irrad. Solar Direta na Sup. Terr. Calculada K0 (Linha Vermelha)
 Dia 11/07/97



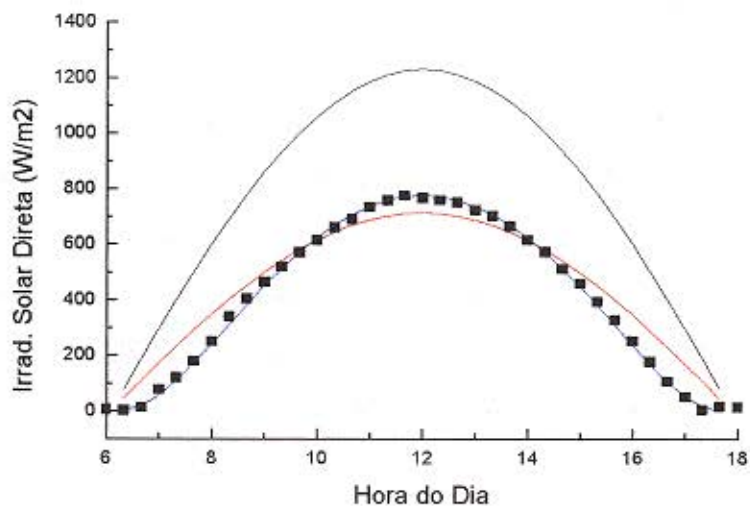
(b)

Irrad. Solar Livre de Perdas (Linha Preta Contínua)
 Irrad. Solar Direta na Sup. Terr. (Linha Preta Descontínua)
 Irrad. Solar Direta na Sup. Terr. Calculada K (Linha Azul)
 Irrad. Solar Direta na Sup. Terr. Calculada K0 (Linha Vermelha)
 Dia 13/08/97

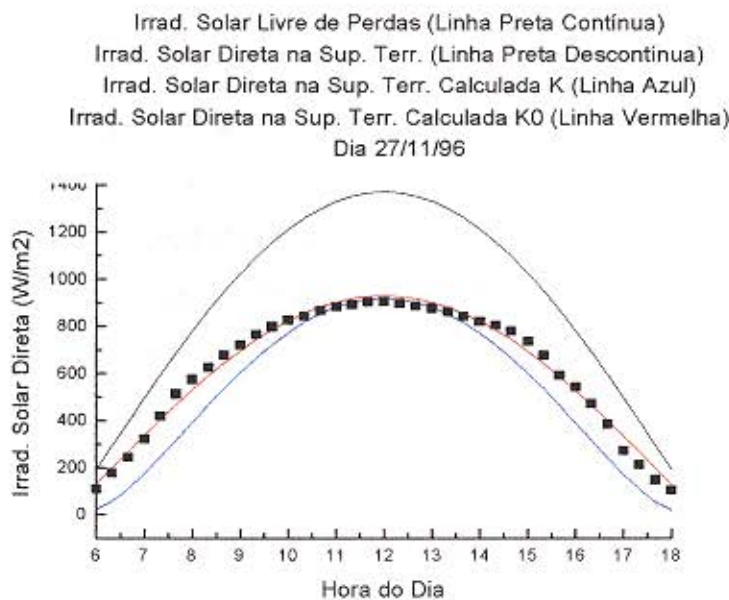


(c)

Irrad. Solar Livre de Perdas (Linha Preta Contínua)
 Irrad. Solar Direta na Sup. Terr. (Linha Preta Descontínua)
 Irrad. Solar Direta na Sup. Terr. Calculada K (Linha Azul)
 Irrad. Solar Direta na Sup. Terr. Calculada K0 (Linha Vermelha)
 Dia 15/09/97



(d)



(e)

Fig.6.7 Distribuições teóricas, experimental e livre de perdas da radiação solar para um dia representativo dos meses Jun/97, Jul/97, Agos/97, Set/97 e Nov/96

Os gráficos da Fig. 6.7 mostram a vantagem da utilização de K para a determinação das distribuições teóricas da radiação solar direta que atinge a superfície terrestre (em horas de qualquer dia e dias de qualquer mês com a condição do dia ser de céu claro) perante o método simples mediante o parâmetro K_0 , sendo que as curvas de linha azul (mediante o uso de K) batem de maneira mais precisa com os valores experimentais (linha preta descontínua) que as curvas de linha vermelha (mediante o uso de K_0). A utilização de um ou outro modelo para aplicações solarimétricas vai depender da precisão a se obter, lembrando-se que qualquer dos dois métodos só devem ser utilizados nos cálculos nos quais os dados não sejam de muita precisão. Vale observar que para o cálculo da constante K utilizou-se uma espessura da atmosfera fixa, não levando-se em conta a latitude do local. A introdução deste fator poderá melhorar ainda mais a precisão do modelo.

No caso da Fig. 6.7e tem-se uma melhor aproximação teórica segundo o modelo do redutor constante de radiação (K_0), mas trata-se de uma curva atípica de dia claro (mais achatado em relação aos demais), com boa possibilidade de ter acontecido uma nebulosidade entre as 10 e

15 horas, provocando assim um padrão de distribuição achatado o qual ilusoriamente bate muito bem com o modelo do redutor constante e não com o modelo de Beer.

6.6 Irradiação Média Diária e Valores Máximos da Irradiação Solar

Outro parâmetro de utilidade é a Irradiação total diária (soma integral das curvas de irradiação solar diária) e o valor médio diário da mesma, estas operações foram realizadas para cada dia e cada mês de céu claro dos meses Jun.-Set./97 e Nov./96.

Os cálculos foram feitos mediante as seguintes relações:

$$\bar{I}_{t, \text{diário}} = \frac{1}{24} \int_6^{18} I_t dt \quad (6.1)$$

$$\bar{I}_{e, \text{diário}} = \frac{1}{24} \int_0^{24} I_e dt \quad (6.2)$$

onde:

$\bar{I}_{t, \text{diário}}$: é o valor médio diário da irradiação no topo da atmosfera para um dia qualquer com irradiação I_t em algum instante t do dia no intervalo de horas de Sol (6-18 hs.)

$\bar{I}_{e, \text{diário}}$: é o valor médio diário da irradiação direta que atinge o solo terrestre para um dia qualquer com irradiação I_e em algum instante t do dia (0-24 hs.)

Na equação 6.1 são utilizados limites de integração de 0 à 18 devido a que I_t foi calculado nesse intervalo, considerando os valores fora deste limite muito próximos a zero. Por outro lado as duas integrações foram realizadas utilizando métodos numéricos.

Os resultados podem ser observados na Tabela 6.4, onde se mostram os valores no topo da atmosfera e na superfície terrestre da irradiação total diária (E_t e E_e na Tabela 6.5,) nos quatro meses estudados, os seus valores médios diários (eqs. 6.1 e 6.2) e os valores máximos de irradiação solar registrados diariamente.

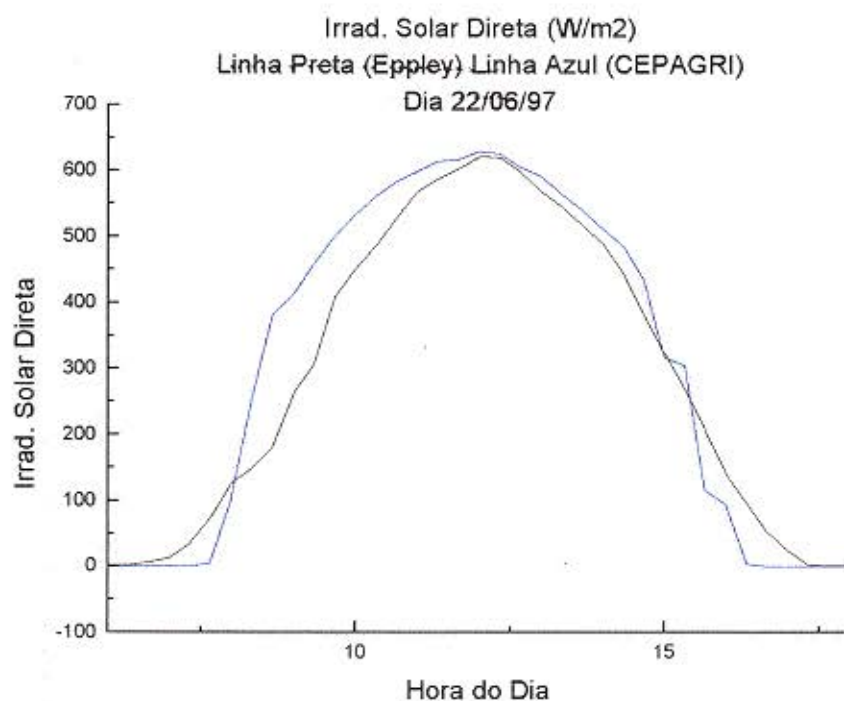
TABELA 6.4

Valores de I Total Diários no Topo da Atmosfera, na Superfície Terrestres, Valores Médios e Valores Máximos Experimentais de Irradiação

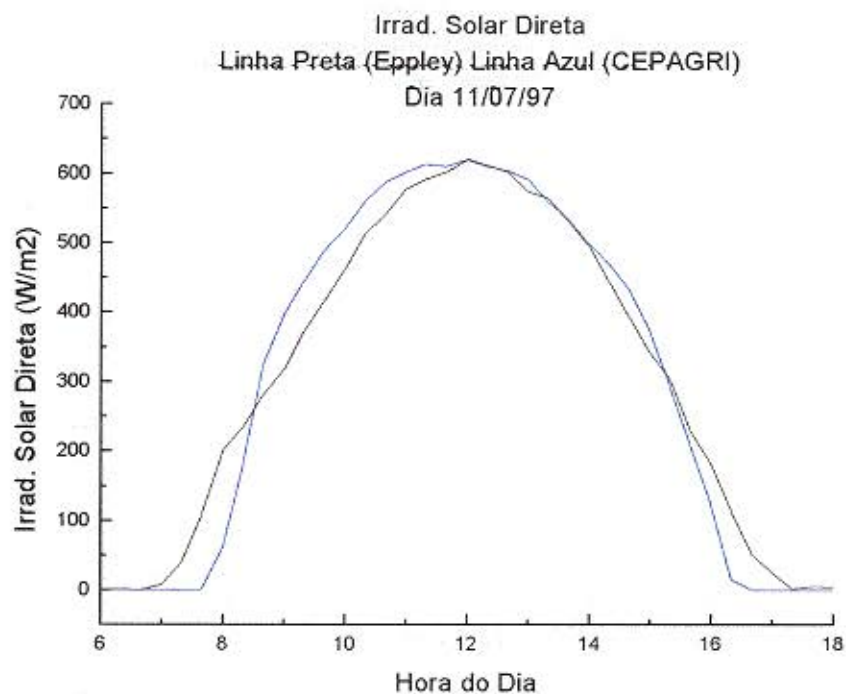
Data	E_t	$\bar{I}_{t,diário}$	E_e	$\bar{I}_{e,diário}$	Máx.Exp.
22/06/97	6434,8	268,1	3572,0	148,8	620,2
23/06/97	6432,2	268,0	3381,1	140,9	608,4
Valor Médio	6434±2	268,11±0,08	3477±135	145±6	614±8
05/07/97	6517,5	271,6	3881,4	161,7	623,5
06/07/97	6533,0	272,2	3815,2	159,0	621,1
07/07/97	6548,7	272,9	3819,1	159,1	621,4
09/07/97	6596,0	274,8	3755,0	156,5	621,4
10/07/97	6611,7	275,5	3809,7	158,7	620,6
11/07/97	6632,4	276,4	3798,4	158,3	620,6
12/07/97	6670,6	277,9	3876,9	161,5	617,8
13/07/97	6691,6	278,8	3957,8	164,9	627,1
Valor Médio	6600±64	275±3	3839±63	160±3	622±3
02/08/97	7287,4	303,6	4015,4	167,3	635,1
04/08/97	7360,5	306,7	3798,4	158,3	620,6
05/08/97	7396,9	308,2	3894,9	162,3	623,2
06/08/97	7436,8	309,9	3734,8	155,6	598,8
07/08/97	7476,6	311,5	3923,2	163,5	630,0
09/08/97	7555,6	314,8	4031,8	168,0	621,3
10/08/97	7594,8	316,5	4000,5	166,7	635,7
11/08/97	7636,8	318,2	3838,5	159,9	643,9
13/08/97	7720,2	321,7	3992,5	166,4	626,8
14/08/97	7761,6	323,4	4098,6	170,8	643,5
Valor Médio	7523±157	313±7	3933±115	164±5	628±13
03/09/97	8698,9	362,5	4530,1	188,8	698,1
07/09/97	8883,9	370,1	4419,0	184,1	680,3
08/09/97	8929,8	372,1	4373,5	182,2	683,4
11/09/97	9066,4	377,8	5066,0	211,1	768,8
12/09/97	9111,8	379,7	4694,6	206,9	756,3
13/09/97	8156,7	381,5	4791,7	199,7	761,5
14/09/97	9201,2	383,4	4715,0	196,5	735,5
15/09/97	9245,4	385,2	5068,7	211,2	774,6
Valor Médio	9037±185	377±8	4741±280	198±12	732±39
10/11/97	11101,0	462,5	7140,0	297,5	872,9
24/11/97	11280,6	470,0	7490,4	312,1	910,0
27/11/97	11307,2	471,1	7810,3	325,4	905
Valor Médio	11230±112	468±5	7480±335	312±14	896±20

6.7 Comparação de Dados Obtidos com o Medidor Solar Eppley e os Obtidos pelo CEPAGRI

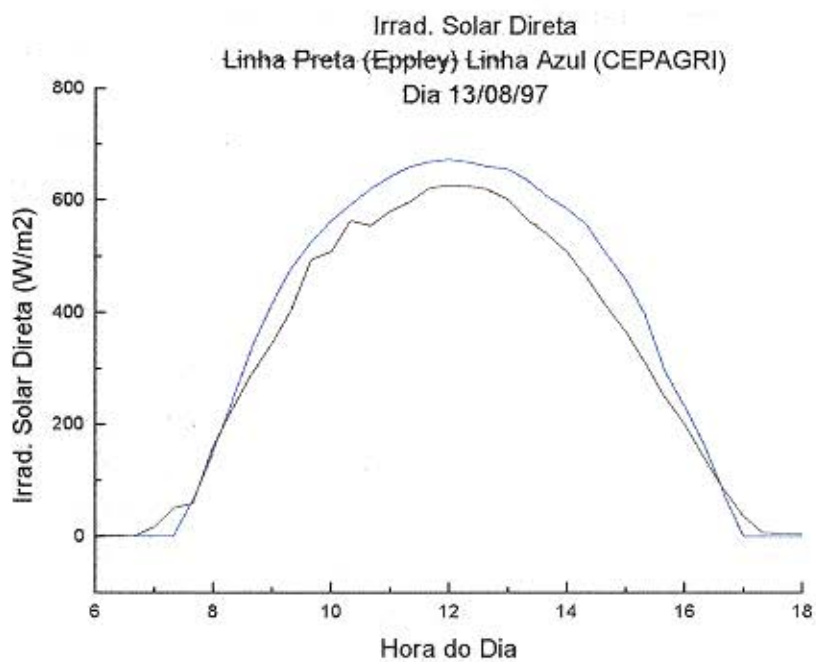
O Centro de Pesquisas para a Agricultura da UNICAMP (CEPAGRI) tem medições de irradiação solar diária obtidas em intervalos de dez minutos. Estas medições foram utilizadas para comparação com os dados de irradiação solar obtidos com o Eppley instalado para nossas medidas. Os gráficos da Fig. 6.8 mostram a comparação destes dados, sendo que a linha preta foi obtida com os dados do Eppley e a azul pelo CEPAGRI. Vê-se boa concordância dos gráficos, havendo pequenas variações as quais podem ser devidas às diferenças climáticas pontuais das localizações de medição. A Tabela 6.5 mostra as medições obtidas pelo CEPAGRI, podendo-se ver a concordância com os dados da tabela 5.1.



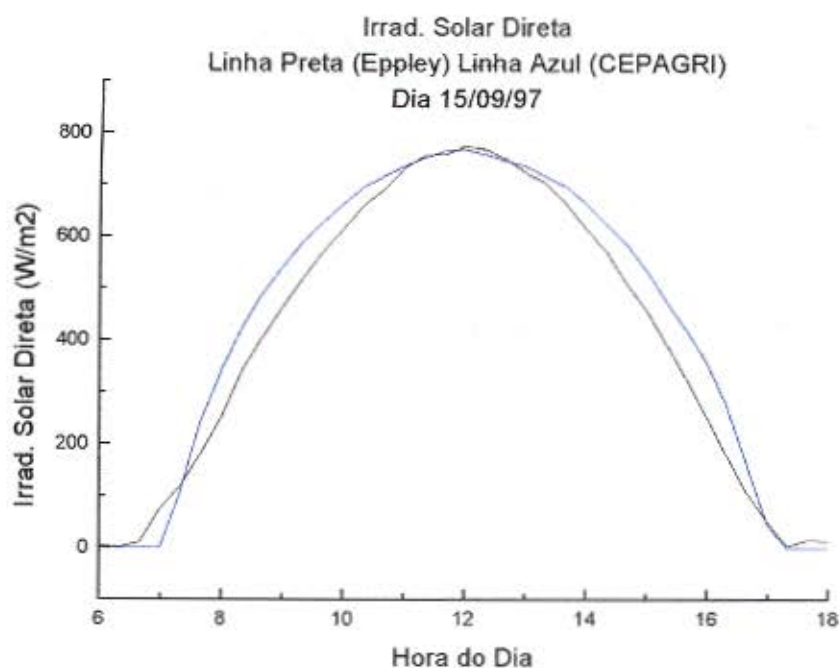
(a)



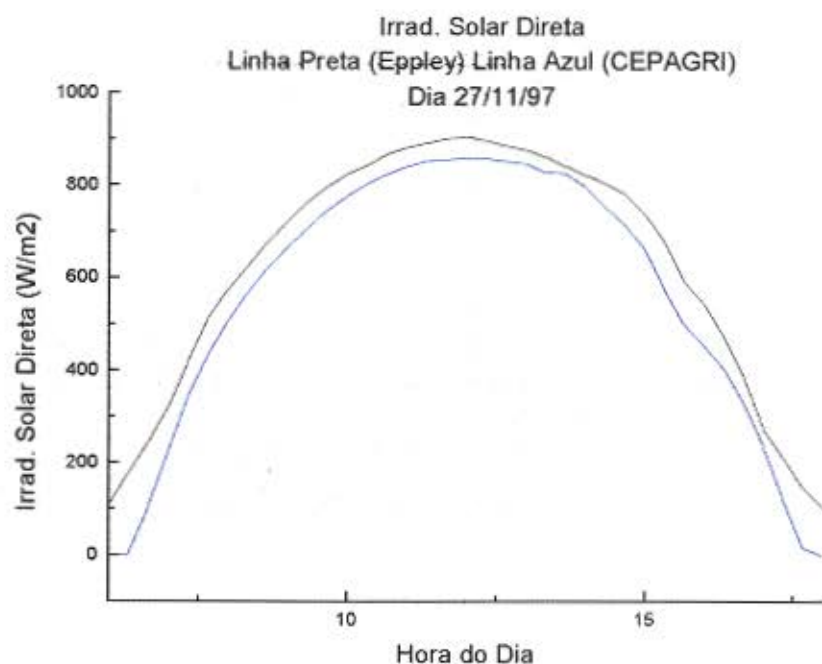
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 6.8 Comparação dos dados obtidos com o Eppley e do CEPAGRI, para alguns dias dos meses de Jun-Set/97 e Nov/96

TABELA 6.5

IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EXPERIMENTAL (COM PERDAS)-CEPAGRI

ESTADO: São Paulo

CIDADE: Campinas

LATITUDE: -22°53'21" LONGITUDE: -47°04'39"

ALTITUDE: 693 m

MESES: Jun., Jul., Ago., e Set., 1997

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 20 min.

UNIDADES DE MEDIÇÃO: W/m² HORARIO DE MEDIÇÃO: as 24 horas do dia

T (h)	22/06/97	11/07/97	13/08/97	15/09/97	27/11/96	T (h)	22/06/97	11/07/97	13/08/97	15/09/97	27/11/96
0	0	0	0	0	0	12	628,1	619,8	674,0	768,0	859,0
0.33	0	0	0	0	0	12.33	625,2	611,1	668,8	759,0	858,0
0.66	0	0	0	0	0	12.66	605,0	604,6	661,3	746,0	852,0
1	0	0	0	0	0	13	591,4	574,1	656,8	736,0	846,0
1.33	0	0	0	0	0	13.33	564,0	515,7	635,9	715,0	829,0
1.66	0	0	0	0	0	13.66	540,0	534,6	608,2	698,0	825,0
2	0	0	0	0	0	14	510,9	498,8	585,3	664,2	797,0
2.33	0	0	0	0	0	14.33	485,1	469,4	558,4	625,4	753,0
2.66	0	0	0	0	0	14.66	434,6	433,3	507,2	587,0	714,6
3	0	0	0	0	0	15	316,5	372,9	460,6	535,7	661,6
3.33	0	0	0	0	0	15.33	605,0	293,5	398,9	475,7	573,3
3.66	0	0	0	0	0	15.66	115,5	210,4	299,4	420,7	501,4
4	0	0	0	0	0	16	93,5	125,4	235,7	357,2	454,0
4.33	0	0	0	0	0	16.33	3,2	16,0	167,2	273,7	403,8
4.66	0	0	0	0	0	16.66	0	0	78,7	161,3	331,6
5	0	0	0	0	0	17	0	0	0,2	45,0	235,6
5.33	0	0	0	0	0	17.33	0	0	0	0	123,4
5.66	0	0	0	0	0	17.66	0	0	0	0	16,1
6	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0
6.33	0	0	0	0	1,4	18.33	0	0	0	0	0
6.66	0	0	0	0	98,5	18.66	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	224,4	19	0	0	0	0	0
7.33	0	0	0	108,0	340,9	19.33	0	0	0	0	0
7.66	3,6	0	62,6	236,4	430,8	19.66	0	0	0	0	0
8	103,0	59,0	149,2	339,0	503,4	20	0	0	0	0	0
8.33	250,7	179,3	240,7	420,1	564,8	20.33	0	0	0	0	0
8.66	380,1	324,1	336,4	485,6	619,7	20.66	0	0	0	0	0
9	411,8	396,6	415,2	540,2	665,4	21	0	0	0	0	0
9.33	457,1	445,0	477,8	588,6	706,0	21.33	0	0	0	0	0
9.66	499,1	489,5	523,3	626,6	745,0	21.66	0	0	0	0	0
10	531,8	520,1	562,8	662,1	775,0	22	0	0	0	0	0
10.33	559,9	560,6	592,1	695,0	803,0	22.33	0	0	0	0	0
10.66	582,5	587,3	620,2	716,0	823,0	22.66	0	0	0	0	0
11	598,1	602,2	642,5	736,0	839,0	23	0	0	0	0	0
11.33	613,8	613,6	660,4	752,0	852,0	23.33	0	0	0	0	0
11.66	615,7	611,1	668,8	766,0	855,0	23.66	0	0	0	0	0

Os dados provenientes do CEPAGRI são dados de radiação direta, assim como também podem ser considerados os nossos que foram obtidos com o Eppley instalado.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A motivação maior deste trabalho está na crescente utilização da energia solar fotovoltaica, que tem encontrado nichos de competitividade, principalmente em regiões afastadas das grandes malhas de linhas de transmissão de eletricidade. O estudo de viabilidade do uso de painéis fotovoltaicos nestas regiões exige o conhecimento da efetiva radiação solar incidente ao longo do ano, o que na maioria dos casos não está disponível.

Este trabalho procurou contribuir nas estimativas que podem ser feitas para se obter estes dados regionalizados, mesmo dispondo-se de poucas ou nenhuma medidas de insolação local.

De acordo com os objetivos propostos foram obtidos e analisados os dados de insolação na cidade de Campinas, SP, os quais foram inclusive confrontados com medições de outros autores. Ainda seguindo os objetivos iniciais foram propostos e testados dois modelos de cálculo da radiação solar que atinge o solo em dia claro.

Da análise dos resultados fornecidos por estes modelos foi possível concluir que:

1. O modelo do fator redutor constante da radiação que atravessa a atmosfera terrestre (K_0), que em seu cálculo não considera explicitamente a espessura da massa de ar atravessada, é de pouca precisão. Assim este modelo poderá ser utilizado só em aplicações solarimétricas que não necessitem de dados muito precisos.
2. Já o modelo baseado na Lei de Beer é uma melhor aproximação para se obter dados de irradiação solar na superfície terrestre, sendo que este considera além da variação diária da irradiação solar também a espessura da atmosfera atravessada, com vantagem neste aspecto em relação ao modelo do fator redutor constante. Assim este modelo pode ser utilizado com mais confiabilidade e com melhor precisão do que o anterior.
3. Os métodos de cálculo dos parâmetros de absorção e dispersão da radiação pela atmosfera terrestre (K_0 e K) podem ser facilmente automatizados fazendo-se uso das

equações (4.36) e (4.37) e desta maneira serem aplicados a diferentes regiões e não exclusivamente só para Campinas.

Evidentemente que este trabalho deixou de abordar muitos aspectos relevantes, e abriu novas questões que poderão e deverão ser objeto de estudos posteriores. Algumas destas questões estão citadas abaixo:

1. Para completar os resultados obtidos com os dados do Eppley deve-se analisar os dados do CEPAGRI/UNICAMP e compatibiliza-los com as medidas feitas.
2. Os cálculos da constante K de perdas por absorção e dispersão de irradiação na atmosfera terrestre podem ser melhorados se se levar em conta a altitude do local de medição e não considerar uma espessura de atmosfera fixa como neste trabalho.
3. Como próximo estudo sugere-se aplicar esta análise de dados no estudo da eficiência de células fotovoltaicas, que depende da intensidade da radiação incidente.
4. Como desenvolvimento de trabalhos complementares propõe-se analisar as distribuições de radiação solar na superfície terrestres para dias nublados (não claros).

ANEXO 1

Determinação da Irradiação Solar Total Diária

A partir da equação (4.17)

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = \frac{I_t}{f_s} \cos Z \quad (a1)$$

sendo $\cos Z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h$

Supondo as variações de δ e φ pequenas em comparação à variação de h e integrando a equação (a1) no período entre o nascer e o pôr do sol temos

$$E_0 = \int_{t_n}^{t_p} \frac{I_t}{f_s} \cos Z dt = \int_{t_n}^{t_p} \frac{I_t}{f_s} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h) d\left(\frac{24h}{2\pi}\right)$$

aqui se fez a conversão do ângulo horário de ângulo para tempo.

$$E_0 = \frac{24I_t}{2\pi f_s} \int_{t_n}^{t_p} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h) dh \quad (b1)$$

$$E_0 = \frac{24I_t}{2\pi f_s} (h \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin h)_{h_n}^{h_p} \quad (c1)$$

como $h_p = -h_n$, então

$$E_0 = \frac{24I_t}{\pi f_s} (h_n \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin h_n) \quad (d1)$$

para h_p implica um valor de $Z=90^\circ$ tal que $\cos Z=0$, assim

$$\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h_n = 0$$

$$\text{ou} \quad \cos h_n = -\tan \varphi \tan \delta \quad (e1)$$

Em (d1) no termo $\cos \varphi \cos \delta \sin h_n$ substituindo $\sin h_n$ por $\cos h_n \tan h_n$ e utilizando a equação (e.1) temos:

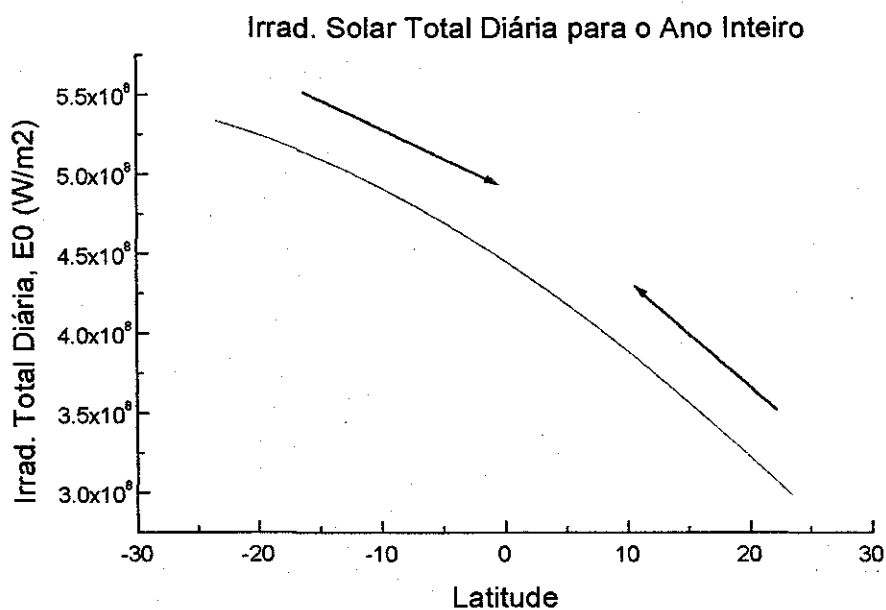
$$E_0 = \frac{24I_t}{\pi f_s} \sin \varphi \sin \delta (h_n - \tan h_n) \quad (f.1)$$

Sendo

$I_t=1372,7 \text{ W/m}^2$ e $f_s=2,165 \cdot 10^{-5}$ (segundo a seção 4.1), então

$$E_0 = 4,84 \cdot 10^8 \sin \varphi \sin \delta (h_n - \tan h_n) \quad (g.1)$$

A representação gráfica da equação (g.1) é mostrada na Fig. (a.1) onde as setas mostram o comportamento da irradiação solar ao longo do ano, máxima no começo do solstício de verão (entre 21 e 24 de Dezembro) e mínima no começo do solstício de inverno (entre 20 e 24 de Junho), oscilando em valores meios para os equinócios de primavera e outono.



ANEXO 2

IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA EXPERIMENTAL, JUNHO/97

ESTADO: São Paulo

CIDADE: Campinas

LATITUDE: -22°53'21" LONGITUDE: -47°04'39"

ALTITUDE: 693 m

MÊS: Jun, 1997

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 20 min.

UNIDADES DE MEDIÇÃO: W/m²

HORARIO DE MEDIÇÃO: as 24 horas do dia

T (h)	13/06/97	22/06/97	23/06/97	24/06/97	T (h)	13/06/97	22/06/97	23/06/97	24/06/97
0,00	3,3	4,4	1,4	0,9	12,00	628,8	616,2	553,1	614,5
0,33	3,3	4,0	2,1	0,6	12,33	629,9	619,5	531,0	619,5
0,66	3,0	3,5	1,7	1,0	12,66	611,0	597,3	497,8	545,8
1,00	2,0	3,7	1,4	1,5	13,00	593,6	566,4	475,7	529,0
1,33	3,2	4,3	1,2	2,4	13,33	561,4	544,2	431,4	481,6
1,66	1,8	3,7	1,5	2,2	13,66	548,2	516,6	365,0	441,7
2,00	2,8	2,8	1,5	2,3	14,00	513,4	487,8	309,7	390,4
2,33	2,4	3,0	1,8	1,8	14,33	472,8	443,6	254,4	330,3
2,66	2,4	3,3	1,7	0,8	14,66	412,3	379,4	188,1	270,8
3,00	2,3	2,7	1,7	0,8	15,00	364,7	323,0	121,7	212,6
3,33	2,7	1,3	1,2	0,3	15,33	314,6	269,0	77,4	117,8
3,66	2,3	1,9	1,2	0,9	15,66	254,1	205,8	33,2	86,8
4,00	2,7	2,0	1,4	0,3	16,00	194,7	138,3	11,1	40,3
4,33	2,2	2,2	1,2	0,8	16,33	129,4	95,1	1,3	2,5
4,66	1,6	2,2	0,6	1,0	16,66		52,0	1,3	6,2
5,00	2,0	2,4	0,8	1,2	17,00		23,1	0,7	7,3
5,33	2,1	1,2	1,7	1,4	17,33		2,1	1,3	6,2
5,66	2,3	1,9	1,5	1,9	17,66		1,1	1,3	7,3
6,00	2,4	1,8	1,7	12,7	18,00		0,6	1,3	6,2
6,33	2,3	1,4	1,5	34,8	18,33		0,9	2,0	5,6
6,66	0,3	5,8	2,1	64,0	18,66		1,4	1,4	5,6
7,00	8,5	12,7	7,6	124,7	19,00		0,4	2,5	4,2
7,33	63,9	34,0	13,1	185,6	19,33		0,7	3,5	3,9
7,66	129,6	72,8	31,1	213,1	19,66		0,5	3,7	4,1
8,00	135,1	124,9	67,0	283,5	20,00		0,6	3,3	3,7
8,33	183,8	148,5	94,9	420,1	20,33		0,4	3,5	4,1
8,66	233,8	179,1	180,8		20,66		0,8	3,3	4,0
9,00	292,5	262,1	243,4		21,00		0,8	3,5	4,6
9,33	409,1	305,3	287,6		21,33		0,9	3,3	3,5
9,66	446,5	407,1	387,2		21,66		0,8	2,9	3,7
10,00	485,5	449,1	431,4		22,00		0,8	2,3	4,3
10,33	526,7	485,6	464,6		22,33		0,6	1,9	3,7
10,66	560,0	526,5	508,8		22,66		0,4	2,0	4,1
11,00	582,9	566,7	553,1		23,00		0,8	0,7	2,7
11,33	605,9	586,3	575,2		23,33		1,3	0,7	3,8
11,66	618,1	600,7	586,3		23,66		1,2	1,0	2,0

Os espaços em branco são devido a ausência de medição de dados ou devido a que eles fulgem do regime regular da distribuição normal.

IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA EXPERIMENTAL, JULHO/97

ESTADO: São Paulo

CIDADE: Campinas

LATITUDE: -22°53'21" LONGITUDE: -47°04'39"

ALTITUDE: 693 m

MÊS: Jul, 1997

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 20 min.

UNIDADES DE MEDIÇÃO: W/m²

HORARIO DE MEDIÇÃO: as 24 horas do dia

T (h)	04/07/97	05/07/97	06/07/97	07/07/97	T (h)	04/07/97	05/07/97	06/07/97	07/07/97
0,00		4,4	4,6	4,1	12,00	622,2	585,5	609,0	621,4
0,33		4,5	4,2	4,2	12,33		562,2	560,6	612,6
0,66		4,2	4,9	4,8	12,66		538,3	532,3	602,8
1,00		4,2	4,2	4,2	13,00		496,1	517,7	574,4
1,33		3,9	4,4	3,7	13,33		443,7	491,2	565,6
1,66		4,0	4,2	4,0	13,66		392,5	435,8	532,7
2,00		3,8	4,1	3,8	14,00	503,5	347,6	418,5	495,5
2,33		3,9	4,1	3,0	14,33	463,7	304,8	380,9	444,3
2,66		3,7	3,4	2,9	14,66	410,2	236,5	353,5	392,4
3,00		3,7	4,1	1,4	15,00	361,3	180,0	315,3	342,2
3,33		3,7	3,9	2,7	15,33	311,7	113,3	252,0	304,1
3,66		3,0	3,5	3,0	15,66	249,9	62,2	192,6	229,6
4,00		3,0	4,3	3,1	16,00	193,0	21,1	112,6	183,5
4,33		2,7	3,8	3,0	16,33	129,0	3,8	61,9	113,5
4,66		2,7	3,1	1,5	16,66	71,9	11,7	22,0	53,3
5,00		2,9	3,5	3,1	17,00	31,0	11,8	2,1	17,0
5,33		2,7	3,4	1,5	17,33	2,8	10,5	11,7	1,9
5,66		1,7	4,0	1,9	17,66	12,2	8,6	11,2	2,2
6,00		7,7	3,5	2,5	18,00	11,3	8,0	9,6	3,1
6,33		51,3	2,3	0,0	18,33	9,3	6,5	8,1	2,9
6,66		111,2	6,1	1,8	18,66	7,7	6,3	6,9	3,9
7,00		198,0	50,4	4,9	19,00	6,7	6,1	7,2	2,9
7,33		240,0	105,8	39,1	19,33	5,9	5,8	6,1	0,9
7,66		275,7	191,3	108,2	19,66	5,4	6,1	6,9	1,5
8,00		319,9	221,1	202,2	20,00	4,6	5,6	5,3	3,7
8,33		373,2	281,1	235,1	20,33	5,2	5,6	4,3	3,4
8,66		420,5	346,1	281,2	20,66	5,0	5,9	5,1	2,4
9,00		475,0	385,5	318,3	21,00	5,6	5,3	5,4	1,9
9,33	410,7	516,8	431,5	373,9	21,33	5,3	5,5	4,5	1,3
9,66	430,6	547,3	482,5	416,6	21,66	5,0	4,4	4,0	1,2
10,00	484,2	582,2	525,7	462,7	22,00	4,8	4,8	4,2	1,1
10,33	521,5	596,2	555,8	514,2	22,33	5,1	4,8	3,2	1,1
10,66	554,1	606,3	576,3	542,6	22,66	4,9	5,0	2,9	1,0
11,00	580,1	623,5	612,1	579,7	23,00	4,8	4,3	4,9	1,7
11,33	601,2	610,5	621,1	593,1	23,33	4,5	4,7	3,8	1,3
11,66	618,3	606,5	604,3	602,8	23,66	4,5	4,2	4,2	1,2

IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA EXPERIMENTAL, JULHO/97

ESTADO: São Paulo

CIDADE: Campinas

LATITUDE: -22°53'21" LONGITUDE: -47°04'39"

ALTITUDE: 693 m

MÊS: Jul, 1997

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 20 min.

UNIDADES DE MEDIÇÃO: W/m²

HORARIO DE MEDIÇÃO: as 24 horas do dia

T (h)	09/07/97	10/07/97	11/07/97	12/07/97	T (h)	09/07/97	10/07/97	11/07/97	12/07/97
0,00	0,4	3,7	0,3	2,0	12,00	602,7	573,5	620,6	617,8
0,33	0,2	3,4	0,6	1,8	12,33	621,4	564,7	611,7	608,3
0,66	0,7	1,0	1,5	2,4	12,66	612,5	531,9	601,9	606,2
1,00	0,4	1,5	0,6	2,5	13,00	602,7	494,6	573,5	602,1
1,33	0,4	1,5	0,3	2,9	13,33	599,6	443,3	564,7	587,6
1,66	0,4	1,0	0,6	2,3	13,66	541,6	391,8	531,9	565,3
2,00	0,6	1,2	0,8	1,9	14,00	526,3	341,3	494,6	532,2
2,33	0,3	1,0	0,6	2,2	14,33	521,7	303,2	443,3	443,3
2,66	0,6	1,8	0,3	2,2	14,66	414,4	228,7	391,8	391,7
3,00	0,6	2,7	0,6	2,8	15,00	363,9	182,7	341,3	341,2
3,33	0,6	2,8	0,3	2,4	15,33	320,9	112,6	303,2	310,5
3,66	0,4	2,4	0,0	1,7	15,66	272,2	52,3	228,7	246,0
4,00	0,4	2,2	0,2	1,0	16,00	219,4	24,3	182,7	201,1
4,33	0,2	1,9	0,4	0,6	16,33	172,6	4,3	112,6	135,1
4,66	0,4	0,3	0,0	0,9	16,66	79,1	2,9	52,3	80,4
5,00	0,4	2,5	0,6	1,4	17,00	24,6	4,6	25,2	35,3
5,33	0,3	3,5	0,4	0,6	17,33	18,7	4,8	2,2	4,2
5,66	0,4	0,6	0,3	0,7	17,66	4,8	4,1	4,4	8,1
6,00	0,0	3,1	0,8	1,0	18,00	6,2	3,5	4,1	8,3
6,33	0,3	3,7	0,6	1,7	18,33	4,8	0,9	3,2	8,4
6,66	0,2	0,6	0,4	1,1	18,66	6,2	1,8	3,2	7,9
7,00	1,1	7,1	7,5	7,3	19,00	4,8	1,0	2,3	6,5
7,33	6,7	38,8	38,8	21,9	19,33	4,1	1,5	1,9	6,4
7,66	39,1	108,2	108,2	91,0	19,66	3,2	2,4	1,3	7,2
8,00	108,1	201,3	201,5	140,5	20,00	2,0	3,0	2,1	5,5
8,33	202,1	234,1	234,1	198,8	20,33	1,9	2,3	1,9	6,2
8,66	235,0	280,2	280,2	301,9	20,66	1,4	2,0	1,3	4,8
9,00	280,2	317,4	317,4	347,2	21,00	1,2	2,4	1,3	4,9
9,33	318,4	373,0	373,0	382,3	21,33	1,5	1,3	1,3	4,8
9,66	374,0	415,7	415,7	415,6	21,66	1,9	0,4	1,8	3,3
10,00	416,5	461,8	461,8	461,7	22,00	1,5	0,0	1,5	3,1
10,33	462,5	513,3	513,3	513,3	22,33	1,9	1,1	0,8	3,3
10,66	514,1	541,6	541,6	541,5	22,66	2,3	1,8	0,7	2,1
11,00	555,6	578,8	578,8	576,4	23,00	2,4	2,3	1,7	3,7
11,33	579,6	592,2	592,2	591,7	23,33	3,8	1,1	1,9	2,7
11,66	593,0	601,9	601,9	597,0	23,66	4,0	1,0	0,9	2,9

IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA EXPERIMENTAL, JULHO/97

ESTADO: São Paulo

CIDADE: Campinas

LATITUDE: -22°53'21" LONGITUDE: -47°04'39"

ALTITUDE: 693 m

MÊS: Jul, 1997

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 20 min.

UNIDADES DE MEDIÇÃO: W/m²

HORARIO DE MEDIÇÃO: as 24 horas do dia

T (h)	13/06/97	14/07/97	T (h)	13/06/97	14/07/97
0,00	4,3	3,2	12,00	627,1	417,6
0,33	3,3	2,8	12,33	618,7	489,8
0,66	4,4	2,5	12,66	615,7	633,2
1,00	2,9	3,5	13,00	573,3	728,0
1,33	3,1	5,6	13,33	564,5	504,0
1,66	4,1	5,0	13,66	531,6	539,7
2,00	2,8	4,6	14,00	534,7	570,1
2,33	3,5	3,4	14,33	499,8	229,1
2,66	4,0	3,2	14,66	391,5	474,1
3,00	0,2	3,1	15,00	414,4	477,4
3,33	0,3	3,3	15,33	345,5	271,1
3,66	2,3	3,7	15,66	249,6	246,3
4,00	3,1	3,9	16,00	181,0	116,9
4,33	2,3	2,2	16,33	137,5	100,2
4,66	2,3	2,8	16,66	64,4	87,9
5,00	3,0	2,0	17,00	39,3	44,1
5,33	2,8	1,2	17,33	3,5	
5,66	2,9	0,6	17,66	11,5	
6,00	3,1	2,3	18,00	11,2	
6,33	3,0	3,2	18,33	9,3	
6,66	1,8	1,1	18,66	7,7	
7,00	7,2	11,5	19,00	6,5	
7,33	39,8	24,6	19,33	5,9	
7,66	76,8	51,5	19,66	5,5	
8,00	201,1	78,4	20,00	6,0	
8,33	239,0	243,6	20,33	6,2	
8,66	296,6	302,2	20,66	6,0	
9,00	330,6	304,6	21,00	5,1	
9,33	380,1	509,5	21,33	4,5	
9,66	430,4	423,7	21,66	4,8	
10,00	475,6	413,2	22,00	4,5	
10,33	521,3	548,7	22,33	4,3	
10,66	557,5	422,1	22,66	0,4	
11,00	583,4	554,4	23,00	0,2	
11,33	596,1	604,6	23,33	1,7	
11,66	615,5	614,3	23,66	3,5	

IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA EXPERIMENTAL, AGOSTO/97

ESTADO: São Paulo

CIDADE: Campinas

LATITUDE: -22°53'21" LONGITUDE: -47°04'39"

ALTITUDE: 693 m

MÊS: Ago, 1997

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 20 min.

UNIDADES DE MEDIÇÃO: W/m²

HORARIO DE MEDIÇÃO: as 24 horas do dia

T (h)	02/08/97	04/08/97	05/08/97	06/08/97	T (h)	02/08/97	04/08/97	05/08/97	06/08/97
0,00	5,0	0,3	1,3	4,1	12,00	633,4	620,6	623,0	597,1
0,33	4,8	0,6	1,7	4,1	12,33	635,1	611,7	619,7	598,8
0,66	4,4	1,5	1,4	4,2	12,66	625,8	573,5	595,4	593,2
1,00	4,3	0,6	2,0	4,1	13,00	612,3	564,7	587,6	579,9
1,33	3,7	0,3	1,2	4,0	13,33	587,6	531,9	524,0	579,0
1,66	1,7	0,6	1,4	3,8	13,66	562,8	494,6	527,1	561,3
2,00	2,4	0,8	1,4	3,7	14,00	528,4	443,3	486,7	528,5
2,33	3,5	0,6	1,3	3,9	14,33	483,1	391,8	432,6	500,1
2,66	3,2	0,3	1,4	4,2	14,66	434,2	341,3	386,1	439,2
3,00	3,2	0,6	1,1	4,1	15,00	384,3	303,2	319,3	402,6
3,33	3,1	0,3	1,8	3,7	15,33	330,3	228,7	269,5	385,1
3,66	3,2	0,0	1,4	3,3	15,66	267,7	182,7	209,5	246,0
4,00	3,1	0,2	1,5	3,7	16,00	196,7	112,6	154,2	174,6
4,33	3,5	0,4	2,2	4,3	16,33	149,9	52,3	87,7	159,7
4,66	3,4	0,0	2,7	5,0	16,66	91,3	25,2	45,1	125,4
5,00	3,7	0,6	5,2	5,0	17,00	45,2	2,2	1,4	76,0
5,33	3,4	0,4	5,0	5,5	17,33	9,2	4,4	11,4	25,2
5,66	3,9	0,3	2,1	4,9	17,66	4,0	4,1	12,3	0,9
6,00	3,2	0,8	4,1	4,5	18,00	5,6	3,2	10,1	9,4
6,33	3,5	0,6	3,2	4,3	18,33	5,2	3,2	8,1	11,0
6,66	2,4	0,4	2,9	2,0	18,66	4,8	2,3	4,5	9,6
7,00	6,1	7,5	7,4	9,8	19,00	4,2	1,9	4,0	8,3
7,33	22,2	38,8	27,7	37,8	19,33	4,1	1,3	3,3	7,9
7,66	92,4	108,2	133,2	86,3	19,66	4,1	2,1	3,7	6,6
8,00	150,7	201,3	196,1	128,9	20,00	4,1	1,9	3,5	5,3
8,33	216,3	234,1	257,1	208,8	20,33	3,9	1,3	4,3	7,3
8,66	281,4	280,2	327,9	256,4	20,66	3,5	1,3	2,9	6,2
9,00	344,5	317,4	359,7	317,7	21,00	3,4	1,3	2,3	6,4
9,33	390,6	373,0	418,3	375,0	21,33	3,4	1,8	3,3	3,0
9,66	444,4	415,7	462,2	423,6	21,66	3,2	1,5	3,3	5,5
10,00	489,3	461,8	520,9	443,6	22,00	3,1	0,8	2,2	4,9
10,33	529,8	513,3	531,6	443,6	22,33	3,2	0,7	2,7	4,4
10,66	559,0	541,6	562,2	496,1	22,66	3,0	1,7	2,5	3,3
11,00	583,4	578,8	574,7	514,3	23,00	3,0	1,9	2,7	5,3
11,33	601,3	592,2	602,5	560,5	23,33	2,9	0,9	3,0	5,6
11,66	619,5	601,9	619,2	571,5	23,66	3,1	0,8	3,8	5,3

IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA EXPERIMENTAL, AGOSTO/97

ESTADO: São Paulo

CIDADE: Campinas

LATITUDE: -22°53'21" LONGITUDE: -47°04'39"

ALTITUDE: 693 m

MÊS: Ago, 1997

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 20 min.

UNIDADES DE MEDIÇÃO: W/m²

HORARIO DE MEDIÇÃO: as 24 horas do dia

T (h)	07/08/97	08/08/97	09/08/97	10/08/97	T (h)	07/08/97	08/08/97	09/08/97	10/08/97
0,00	5,3	4,9	4,6	3,0	12,00	611,2	581,4	615,9	623,1
0,33	5,2	4,4	4,8	3,8	12,33	626,8	575,3	621,3	635,7
0,66	5,0	3,9	4,2	5,2	12,66	611,9	588,4	615,9	625,7
1,00	4,6	4,0	4,0	6,1	13,00	630,0	549,4	621,3	599,7
1,33	5,0	4,9	4,0	5,4	13,33	593,5	534,4	615,0	561,4
1,66	4,5	4,3	4,3	6,0	13,66	572,3	490,5	618,1	521,6
2,00	4,4	4,2	4,4	4,6	14,00	545,3	479,9	603,0	488,2
2,33	4,4	4,1	4,3	4,6	14,33	511,8	446,7	579,9	451,3
2,66	4,3	4,6	4,4	4,6	14,66	464,4	399,3	555,2	392,0
3,00	3,5	4,5	4,3	4,9	15,00	428,7	365,6	537,2	345,6
3,33	4,5	4,1	4,0	4,5	15,33	634,3	305,2	507,0	304,2
3,66	3,3	3,5	4,3	4,2	15,66	307,4	242,8	412,1	240,7
4,00	4,5	3,8	3,7	4,9	16,00	249,2	189,7	372,1	169,6
4,33	4,1	3,5	4,5	4,6	16,33	194,9	140,5	327,3	133,7
4,66	4,1	3,7	4,5	3,9	16,66	140,9	86,2	248,3	65,7
5,00	3,7	4,4	4,6	4,1	17,00	87,9	37,6	146,4	11,6
5,33	3,5	4,1	4,5	3,9	17,33	38,5	9,2	104,6	6,7
5,66	4,2	3,8	4,8	3,5	17,66	3,9	7,9	43,7	11,9
6,00	3,7	3,3	4,3	3,2	18,00	12,7	10,1	18,9	10,7
6,33	3,1	3,1	4,1	3,7	18,33	13,3	9,1	4,3	9,3
6,66	3,5	2,2	4,1	2,2	18,66	10,8	6,7	9,2	9,6
7,00	6,6	6,2	4,2	25,6	19,00	9,0	7,5	7,6	7,5
7,33	27,8	29,3	2,0	56,7	19,33	8,0	6,5	6,9	8,1
7,66	95,3	88,3	6,3	142,1	19,66	6,9	6,4	6,4	5,2
8,00	149,0	136,0	79,2	173,9	20,00	6,5	6,4	6,2	7,0
8,33	204,1	182,1	142,7	240,5	20,33	5,9	4,2	6,3	6,3
8,66	265,3	238,5	206,6	304,2	20,66	7,0	2,3	6,6	5,0
9,00	323,6	296,2	244,1	346,8	21,00	5,6	1,0	6,5	5,9
9,33	368,4	344,0	303,3	406,0	21,33	5,4	1,3	5,9	5,6
9,66	424,3	397,3	351,5	477,1	21,66	5,1	1,2	5,0	6,4
10,00	471,0	443,1	406,9	508,7	22,00	6,5	1,2	4,3	6,1
10,33	516,0	476,3	555,0	546,7	22,33	6,1	1,4	4,0	5,6
10,66	548,8	523,6	495,9	573,5	22,66	6,0	2,2	4,2	5,3
11,00	574,0	551,9	530,4	589,7	23,00	5,4	4,9	3,8	3,7
11,33	591,4	564,9	561,8	605,1	23,33	5,2	5,3	3,2	5,1
11,66	611,2	577,3	584,1	612,7	23,66	5,3	5,0	3,7	3,1

IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA EXPERIMENTAL, AGOSTO/97

ESTADO: São Paulo

CIDADE: Campinas

LATITUDE: -22°53'21" LONGITUDE: -47°04'39"

ALTITUDE: 693 m

MÊS: Ago, 1997

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 20 min.

UNIDADES DE MEDIÇÃO: W/m²

HORARIO DE MEDIÇÃO: as 24 horas do dia

T (h)	11/08/97	13/08/97	14/08/97	T (h)	11/08/97	13/08/97	14/08/97
0,00	5,5	3,3	3,4	12,00	640,5	626,8	640,0
0,33	5,1	3,5	3,2	12,33	643,9	625,4	643,5
0,66	5,3	3,9	3,3	12,66	586,9	620,0	625,1
1,00	5,5	3,8	3,7	13,00	604,1	600,6	628,5
1,33	4,8	3,9	3,5	13,33	549,2	564,5	586,4
1,66	4,4	3,4	3,4	13,66	520,2	539,5	546,3
2,00	4,6	3,2	3,7	14,00	511,6	508,4	525,7
2,33	4,4	3,2	3,5	14,33	477,1	463,6	484,8
2,66	5,2	3,9	3,4	14,66	347,1	412,5	433,2
3,00	4,3	4,2	3,5	15,00	295,7	365,6	391,0
3,33	2,9	3,9	3,9	15,33	183,8	310,5	335,3
3,66	1,8	3,5	3,2	15,66	221,2	250,7	274,9
4,00	4,6	3,9	3,4	16,00	198,6	200,9	219,9
4,33	4,9	4,9	5,2	16,33	134,8	140,4	157,6
4,66	4,8	4,5	4,8	16,66	53,5	84,5	95,6
5,00	4,1	3,4	4,9	17,00	24,7	36,1	41,4
5,33	4,8	2,4	4,1	17,33	5,2	6,3	4,8
5,66	4,5	1,4	4,2	17,66	8,6	5,5	10,6
6,00	4,0	1,2	3,9	18,00	8,2	5,5	11,7
6,33	3,9	1,7	3,0	18,33	7,2	5,1	9,7
6,66	1,9	1,1	0,4	18,66	6,7	4,6	8,3
7,00	17,1	16,9	12,1	19,00	6,1	4,5	6,7
7,33	57,4	51,8	66,8	19,33	6,1	4,6	6,2
7,66	109,8	58,6	119,7	19,66	6,5	4,5	6,2
8,00	168,6	161,2	173,5	20,00	5,3	4,3	7,0
8,33	232,7	227,5	225,7	20,33	5,9	4,4	6,4
8,66	307,4	290,6	299,2	20,66	3,7	4,0	6,2
9,00	349,8	343,8	251,3	21,00	3,1	3,9	5,4
9,33	426,7	404,1	400,8	21,33	3,1	3,9	4,8
9,66	461,2	493,8	449,9	21,66	3,4	3,8	3,9
10,00	446,5	507,4	501,7	22,00	5,0	3,8	3,8
10,33	499,0	564,3	530,3	22,33	4,4	3,8	3,9
10,66	522,3	555,3	559,1	22,66	3,8	3,8	3,7
11,00	556,9	580,9	586,1	23,00	5,5	3,7	3,5
11,33	537,6	597,2	620,0	23,33	5,2	3,4	3,4
11,66	634,8	622,3	628,3	23,66	5,3	3,5	3,1

IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA EXPERIMENTAL, SETEMBRO/97

ESTADO: São Paulo

CIDADE: Campinas

LATITUDE: -22°53'21" LONGITUDE: -47°04'39"

ALTITUDE: 693 m

MÊS: Set, 1997

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 20 min.

UNIDADES DE MEDIÇÃO: W/m²

HORARIO DE MEDIÇÃO: as 24 horas do dia

T (h)	03/09/97	07/09/97	08/09/97	11/09/97	T (h)	03/09/97	07/09/97	08/09/97	11/09/97
0,00	6,0	2,1	4,1	3,8	12,00	698,1	674,1	683,4	768,8
0,33	4,8	2,4	4,1	3,5	12,33	692,7	674,3	663,1	763,2
0,66	5,9	2,8	4,4	3,7	12,66	672,2	658,5	654,4	750,8
1,00	5,5	2,2	3,1	3,5	13,00	666,2	641,7	630,8	727,9
1,33	4,5	1,8	3,5	4,0	13,33	632,1	615,4	608,6	697,0
1,66	4,8	2,8	3,9	3,7	13,66	602,8	585,4	574,8	662,7
2,00	5,1	2,5	4,1	3,8	14,00	561,2	559,0	541,8	615,2
2,33	5,0	2,7	4,1	3,8	14,33	515,8	525,8	494,8	567,1
2,66	4,2	2,5	4,4	4,0	14,66	463,2	452,1	438,3	521,6
3,00	4,5	2,4	4,8	4,0	15,00	410,4	396,6	388,3	454,2
3,33	4,6	2,5	4,6	3,1	15,33	351,0	341,5	308,8	398,3
3,66	4,1	2,3	4,8	3,4	15,66	281,0	289,8	262,4	330,3
4,00	4,5	2,4	3,9	4,2	16,00	223,6	225,0	194,8	256,6
4,33	4,4	2,8	4,1	4,4	16,33	127,1	155,0	140,6	177,3
4,66	4,4	2,8	3,9	3,8	16,66	98,7	92,6	80,6	113,3
5,00	3,7	2,9	3,5	4,0	17,00	39,9	41,4	29,5	61,4
5,33	4,6	2,3	3,5	4,8	17,33	0,0	3,4	3,4	15,3
5,66	4,5	2,4	3,8	2,9	17,66	13,8	11,5	11,5	5,6
6,00	3,1	2,9	4,2	4,0	18,00	12,8	9,8	11,5	7,3
6,33	2,1	1,3	2,2	1,9	18,33	10,5	6,5	9,2	6,5
6,66	6,3	8,5	9,4	8,6	18,66	9,1	4,0	8,0	5,9
7,00	42,7	28,4	49,0	62,5	19,00	7,1	5,0	7,0	5,3
7,33	94,1	40,0	98,0	107,7	19,33	6,4	5,1	6,6	4,5
7,66	151,2	153,0	153,9	175,4	19,66	6,4	6,4	5,9	4,8
8,00	214,4	216,3	215,4	245,8	20,00	7,5	5,6	4,6	4,5
8,33	283,2	285,3	287,7	342,4	20,33	7,0	6,1	4,6	4,0
8,66	342,6	337,2	338,6	404,6	20,66	6,9	5,3	5,2	3,7
9,00	406,0	391,8	391,9	466,0	21,00	7,1	5,0	5,3	3,9
9,33	465,4	454,9	447,2	527,3	21,33	6,7	4,5	6,1	4,0
9,66	512,8	506,0	507,9	575,6	21,66	6,0	4,4	3,8	4,1
10,00	558,0	551,0	549,0	623,2	22,00	5,5	4,0	4,5	3,9
10,33	597,6	592,7	592,9	666,9	22,33	5,4	4,0	5,1	3,7
10,66	627,7	614,5	617,9	699,6	22,66	5,2	4,0	2,8	3,9
11,00	655,9	642,1	633,1	732,3	23,00	5,3	4,2	2,3	3,8
11,33	682,0	668,6	671,6	758,3	23,33	6,0	4,2	2,3	3,8
11,66	692,0	680,3	674,1	763,9	23,66	5,5	4,0	2,4	3,5

IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA EXPERIMENTAL, SETEMBRO/97

ESTADO: São Paulo

CIDADE: Campinas

LATITUDE: -22°53'21" **LONGITUDE:** -47°04'39"

ALTITUDE: 693 m

MÊS: Set, 1997

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 20 min.

UNIDADES DE MEDIÇÃO: W/m²

HORARIO DE MEDIÇÃO: as 24 horas do dia

T (h)	12/09/97	13/09/97	14/09/97	15/09/97	T (h)	12/09/97	13/09/97	14/09/97	15/09/97
0,00	3,7	4,6	5,1	3,7	12,00	756,3	734,4	728,5	758,5
0,33	4,0	5,1	5,2	4,1	12,33	753,3	756,0	722,5	766,3
0,66	3,7	4,8	4,5	5,3	12,66	748,6	724,6	717,6	750,0
1,00	3,7	4,3	3,8	4,3	13,00	739,4	713,9	688,6	722,6
1,33	3,7	4,6	4,1	4,3	13,33	708,6	647,0	657,2	701,0
1,66	3,4	4,4	4,4	3,5	13,66	666,6	614,3	593,1	664,0
2,00	3,2	4,1	4,1	3,4	14,00	636,2	566,7	584,7	614,9
2,33	3,3	3,9	4,3	3,5	14,33	599,2	504,4	531,2	571,6
2,66	3,3	4,4	5,1	3,8	14,66	549,3	445,9	475,2	511,0
3,00	3,3	4,6	5,3	4,9	15,00	499,4	412,9	405,3	457,9
3,33	3,3	4,4	6,1	4,8	15,33	447,0	323,9	342,0	392,6
3,66	3,2	3,9	6,4	5,1	15,66	385,0	304,4	258,8	325,9
4,00	3,2	4,1	4,9	5,4	16,00	320,9	275,6	200,6	251,7
4,33	3,5	3,8	4,4	5,9	16,33	249,2	162,5	140,3	175,9
4,66	3,3	4,1	4,1	4,9	16,66	163,9	105,5	84,0	105,4
5,00	3,1	3,0	3,4	3,9	17,00	96,6	61,1	38,7	50,4
5,33	3,3	3,2	2,5	4,3	17,33	44,2	15,5	7,0	4,3
5,66	3,2	3,4	2,3	5,1	17,66	0,8	7,4	9,0	13,9
6,00	3,7	3,3	3,8	4,6	18,00	13,9	11,8	9,0	13,6
6,33	3,8	2,7	2,2	1,5	18,33	13,7	10,0	7,9	10,7
6,66	1,2	22,9	12,3	10,5	18,66	11,5	8,5	5,8	13,1
7,00	9,5	51,0	57,3	75,2	19,00	9,7	8,2	5,6	11,2
7,33	64,2	71,5	100,2	118,4	19,33	7,7	7,7	5,9	9,2
7,66	106,6	110,8	164,6	177,8	19,66	6,1	7,1	5,6	7,6
8,00	175,3	184,8	234,3	249,8	20,00	7,0	7,0	6,1	5,8
8,33	246,8	304,0	321,3	338,9	20,33	6,7	6,7	5,1	4,1
8,66	373,4	377,4	377,1	402,5	20,66	6,7	4,4	4,8	3,7
9,00	399,3	443,9	441,5	462,8	21,00	5,0	2,4	4,6	4,2
9,33	462,4	512,2	496,1	517,8	21,33	7,2	3,5	4,4	4,6
9,66	520,7	550,0	544,8	569,6	21,66	6,4	3,0	4,4	5,8
10,00	568,8	604,7	590,7	614,0	22,00	6,2	3,7	4,4	4,4
10,33	619,5	659,5	625,0	660,1	22,33	5,6	4,3	4,3	7,2
10,66	654,9	688,9	657,2	690,3	22,66	5,3	4,2	4,1	8,6
11,00	688,7	718,3	702,9	732,1	23,00	5,0	4,8	3,9	8,0
11,33	723,2	761,5	724,0	756,9	23,33	4,9	4,1	3,7	7,2
11,66	750,9	755,5	730,1	774,6	23,66	5,2	4,2	3,4	6,9

IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA EXPERIMENTAL, NOVEMBRO/96

ESTADO: São Paulo

CIDADE: Campinas

LATITUDE: -22°53'21" LONGITUDE: -47°04'39"

ALTITUDE: 693 m

MÊS: Nov, 1996

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 20 min.

UNIDADES DE MEDIÇÃO: W/m²

HORARIO DE MEDIÇÃO: as 24 horas do dia

T (h)	10/11/96	24/11/96	27/11/96	T (h)	10/11/96	24/11/96	27/11/96
0,00	10,6	11,7	11,9	12,00	867,2	910,0	905,0
0,33	12,0	11,7	10,6	12,33	863,8	909,7	895,5
0,66	11,5	10,6	11,1	12,66	844,2	890,9	885,0
1,00	11,6	12,1	11,4	13,00	835,4	858,5	875,0
1,33	10,7	11,3	10,8	13,33	798,9	838,1	860,0
1,66	13,2	12,0	11,9	13,66	770,2	810,0	840,2
2,00	12,1	11,8	11,3	14,00	739,1	786,2	820,9
2,33	11,8	11,2	12,8	14,33	705,2	760,2	803,7
2,66	12,3	12,1	13,3	14,66	675,3	720,6	780,8
3,00	12,8	12,6	14,1	15,00	611,2	669,3	735,0
3,33	14,7	12,2	13,1	15,33	570,2	609,0	677,1
3,66	14,8	12,4	13,3	15,66	515,1	577,3	591,3
4,00	13,7	14,4	13,6	16,00	430,0	467,2	542,2
4,33	14,7	12,8	13,7	16,33	340,1	398,5	473,1
4,66	15,0	13,2	113,3	16,66	197,7	349,5	385,1
5,00	16,8	16,0	14,3	17,00	137,9	225,8	271,0
5,33	19,9	23,4	17,9	17,33	145,7	158,5	210,6
5,66	35,0	77,1	32,5	17,66	99,9	109,1	146,7
6,00	64,1	100,3	106,9	18,00	30,6	68,7	102,2
6,33	162,2	150,2	176,7	18,33	9,8	20,5	64,9
6,66	219,9	200,1	241,9	18,66	8,8	9,2	19,7
7,00	303,0	250,4	319,8	19,00	10,6	6,4	10,9
7,33	393,9	400,4	417,2	19,33	10,0	8,1	10,6
7,66	488,6	527,1	511,5	19,66	10,6	8,9	11,3
8,00	555,2	582,1	573,4	20,00	11,6	9,1	10,9
8,33	610,8	628,0	623,6	20,33	11,3	9,3	11,7
8,66	661,1	669,8	676,2	20,66	10,8	12,0	11,2
9,00	710,3	712,1	719,4	21,00	11,5	10,5	11,4
9,33	748,7	752,2	762,8	21,33	12,7	10,4	11,7
9,66	785,9	789,1	796,6	21,66	11,7	11,2	12,4
10,00	802,5	811,7	824,8	22,00	13,0	10,3	12,6
10,33	834,9	833,0	842,4	22,33	11,6	11,5	13,0
10,66	848,0	853,6	866,7	22,66	15,7	10,4	12,0
11,00	872,8	867,8	881,3	23,00	11,7	11,2	12,4
11,33	872,9	877,4	890,1	23,33	13,0	10,3	12,6
11,66	860,7	881,2	900,1	23,66	11,6	11,5	13,0

REFERÊNCIAS

1. D. R. Inglis, "Wind Power and others Energy Options", (University Michigan Press, 1978)
2. D. M. Considine, "Energy Technology, Handbook", (Mc. Graw-Hill, 1977)
3. Projeto Temático FAPESP 93/3510-4, "Qualidade Ambiental e Desenvolvimento Regional", 1993
4. Scientific American, Special Issue: Energy for Planet Earth, September 1990
5. B. M. Cormac, "Introduction to the Scientific Study of Atmospheric Pollution", 1990
6. G. Ware, "Reviews of Environmental Contamination and Toxicology", Vol. 146, 1985
7. Energy Policy, Vol. 24, Número 1, pp. 185-193, 1996
8. C. Swan, "Suncell Energy Economy & Photovoltaics", (Sierra Club books, 1986)
9. Energy Sources, Vol. 16, pp. 185-193, 1994
10. Energy Sources, Número 18, pp. 407-418, 1996
11. Energy Policy, Vol. 24, Número 2, pp. 177-185, 1996
12. Energy World, Número 245, January 1997
13. CEPEL, "CRESESB Informe", N° 1 Setembro-1995
14. Anais do Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 1995
15. Anais do Congresso Brasileiro de Energia, 1996
16. C. Greacen, "How Photovoltaic Cells Work", (July, 1991)
17. H. Rodríguez y S. Hurry, "Manual de Entrenamiento en Sistemas Fotovoltaicos para Electrificación Rural", (Colombia, PNVO. 1985)
18. N. Fraindenraich e F. Lyra, "Energia Solar", (Edit. Universitária, 1995)
19. J. Winter, R. L. Sizmann, L. L. Vant-Hull, "Solar Power Plants", Berlin, Ed. Springer-Verlag
20. Appl. Phys., Vol. 27, pp. 777-784, July 1956
21. Energy Convers., Vol. 36, Number 4, (November 1995)
22. R. Hill, "Solar Energy, "Prospects for Photovoltaics", (May, 1993)
23. Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 40, Number 2, (April, 1996)
24. Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 40, Number 3, (July, 1996)
25. Solar Energy, Vol. 56, N° 6

26. Bennett, I. Monthly Maps of Mean Daily Insolation for the United States, Solar Energy, 1975
27. Nunes, G.S.S. et al. Estudo da Distribuição de Radiação Solar Incidente sobre o Brasil, INPE, Jan/78
28. W. Ewing, "Métodos Instrumentais de Análise Química", Ed. Edgard Blucher, Villa Nova e J. dos Santos, "Introdução ao Estudo da Radiação Solar", Departamento de Física e Meteorologia da USP
29. Delco Remy, Battery Catalogue, F Section Trace Engineering Company, Inc.,
30. R. Stewart, P. Spencer, "The Measurement of Solar Radiation", 1992. Siemens,
31. Ltda., 1972PROMB0000.103., "Energy Logger Manual", Version 2.0, January 1,
32. CESP, "Radiação Solar no Estado de São Paulo", Copyright © 1981 por CESP
33. "Solar Charge Controller Model C30A", owner's manual
34. "Instalation guide for the Siemens Solar Industries", Modelo M-75, Solar Electric Modules, 1990
35. 1996Trace Engineering, "Catalogue for Standard Inverter", Model U2512C.