

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE E CONSTRUÇÃO DE UM PIRANÔMETRO FOTOVOLTAICO

Izete Zanesco

**Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia**

Porto Alegre

1991

ANÁLISE E CONSTRUÇÃO DE UM PIRANÔMETRO FOTOVOLTAICO

Izete Zanesco
Licenciada em Física

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

Área de concentração - Geração de Energia

Aprovado por:

Prof. Arno Krenzinger, Dr. - Orientador (PROMEC-UFRGS)
Prof. Oscar Daniel Corbella, Dr. (FAU-UFRJ)
Prof. Ricardo Eugênio Francke, Dr. (IF-UFRGS)

Coordenador do PROMEC:

Prof. Sérgio Viçosa Moller, Dr.

Porto Alegre, 16 de Julho de 1991

A ciência é a alma da prosperidade das nações e a fonte de vida do progresso.

Louis Pasteur

AGRADECIMENTOS

Foram várias as pessoas que de alguma forma colaboraram para o desenvolvimento desta dissertação. Gostaria de expressar meus agradecimentos:

- Ao Adriano pelo apoio, compreensão e amor em todos os momentos.
- Ao Prof. Arno Krenzinger pela compreensão, apoio e orientação desta dissertação.
- A minha família que de alguma forma sempre me estimulou.
- Ao Fernando e à Liliâne pela amizade e incentivo.
- Aos bolsistas Arlis e Dércio pela colaboração.
- A todos do Grupo de Energia Solar e aos colegas do PROMEC.

Também quero agradecer:

- Ao Laboratório de Ótica do IF da UFRGS, por possibilitar o uso do espectrofotômetro Cary 14.
- A Intercâmbio Eletro Mecânico LTDA, pela cedência do piranômetro fotovoltaico Haenni Solar 118.
- Ao Laboratório de Ensino do IF da UFRGS, pelo empréstimo de vários equipamentos.
- A Arform Plásticos LTDA, pelo fornecimento de amostras de acrílico.
- Ao CNPq, pela bolsa de estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE SIMBOLOS.....	XIV
RESUMO.....	XVII
ABSTRACT.....	XIX
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. CARACTERÍSTICAS DOS PIRANÔMETROS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO....	4
2.1. Introdução.....	4
2.2. Comparação entre um sensor de silício e um sensor térnico.....	5
2.3. Resposta cosseno.....	7
2.4. Resposta espectral da célula de silício.....	8
3. SIMULAÇÃO DO ESPECTRO SOLAR E INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS SOBRE A RESPOSTA DA CÉLULA DE SILÍCIO.....	9
3.1. Introdução.....	9
3.2. Atmosfera terrestre.....	10
3.2.1. Moléculas de ar seco.....	11
3.2.2. Vapor de água.....	12
3.2.3. Aerosóis.....	13
3.3. Massa ótica relativa.....	14
3.4. Irradiância espectral solar direta.....	18
3.4.1. Transmitância devido ao espalhamento Rayleigh de moléculas de ar.....	20
3.4.2. Espalhamento Mie.....	21
3.4.3. Transmitância devido aos aerosóis.....	22
3.4.4. Transmitância devido a uma mistura uniforme de gases e vapor de água.....	24
3.4.5. Transmitância devido ao ozônio.....	26
3.4.6. Transmitância devido a massa ótica relativa de ar.....	28
3.5. Irradiância espectral solar difusa.....	29

3.5.1.	Irradiância espectral solar difusa devido ao espalhamento Rayleigh.....	31
3.5.2.	Irradiância espectral solar difusa devido ao espalhamento por aerossóis.....	32
3.5.3.	Irradiância espectral solar difusa devido às múltiplas reflexões.....	34
3.6.	Irradiância espectral solar global.....	40
4.	CORREÇÃO DA RESPOSTA ESPECTRAL.....	51
4.1.	Introdução.....	51
4.2.	Corantes orgânicos luminescentes.....	52
4.2.1.	Derivados da coumarina.....	55
4.2.2.	Rodaminas.....	57
4.2.3.	Outros corantes orgânicos luminescentes.....	60
4.2.3.1.	Uvitex OB.....	60
4.2.3.2.	KF241.....	60
4.2.3.3.	Fluorescina.....	61
4.3.	Eficiência ótica.....	62
4.3.1.	Região onde não ocorre absorção do corante orgânico luminescente.....	62
4.3.2.	Região de absorção do corante orgânico luminescente.....	64
4.4.	Filtros óticos de absorção.....	66
4.5.	Influência de corantes orgânicos luminescentes na correção da resposta espectral.....	67
4.6.	Medidas experimentais da resposta espectral de uma célula de silício com correção.....	73
5.	ANÁLISE DA SELETIVIDADE ESPECTRAL DA CÉLULA DE SILÍCIO.....	80
5.1.	Relação entre irradiância espectral incidente e corrente de curto-circuito da célula de silício.....	80
5.2.	Desvio nas medidas da irradiância solar devido a dependência espectral da resposta da célula de silício...	81
5.3.	Desvio das medidas da irradiância solar devido a banda de sensibilidade da célula de silício.....	90
6.	MEDIDAS EXPERIMENTAIS.....	93
6.1.	Comparação teórica e experimental da influência da	

seletividade espectral da célula de silício.....	93
6.2. Construção de um piranômetro fotovoltaico.....	103
6.3. Resposta cosseno.....	105
6.4. Análise experimental do protótipo construído.....	108
7. CONCLUSÕES.....	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117
PUBLICAÇÕES GERADAS POR ESTA DISSERTAÇÃO.....	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Tempo de resposta de piranômetros térmicos e fotovoltaicos.....	5
Figura 2.2. Variação da corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto em função da temperatura para uma célula de silício.....	7
Figura 3.1. Trajetória dos raios solares na atmosfera terrestre.....	15
Figura 3.2. Atenuação de um raio solar pela atmosfera terrestre.....	19
Figura 3.3. Variação da irradiância espectral solar direta numa superfície horizontal em função do coeficiente de turbidez de Angström.....	23
Figura 3.4. Variação da irradiância espectral solar direta numa superfície horizontal em função do AL.....	24
Figura 3.5. Variação da irradiância espectral solar direta numa superfície horizontal em função da quantidade de água precipitável.....	26
Figura 3.6. Variação da irradiância espectral solar direta numa superfície horizontal em função da quantidade de ozônio.....	27
Figura 3.7. Variação da irradiância espectral solar direta numa superfície horizontal em função da massa ótica relativa de ar.....	28
Figura 3.8. Variação da irradiância espectral solar difusa devido ao espalhamento Rayleigh numa superfície horizontal em função da massa ótica relativa de ar.....	31
Figura 3.9. Variação da irradiância espectral solar difusa devido ao espalhamento por aerossóis numa superfície horizontal em função da massa ótica relativa de ar.....	33
Figura 3.10. Processo de múltiplas reflexões.....	35
Figura 3.11. Variação da irradiância espectral solar difusa devido às múltiplas reflexões numa superfície horizontal em função do albedo terrestre e coeficiente de turbidez de Angström.....	36

Figura 3.12. Variação da irradiância espectral solar difusa numa superfície horizontal em função da massa ótica de ar.....	37
Figura 3.13. Variação da irradiância espectral solar difusa numa superfície horizontal em função do coeficiente de Angstrom.....	37
Figura 3.14. Variação da irradiância espectral solar difusa numa superfície horizontal em função do AL.....	38
Figura 3.15. Variação da irradiância espectral solar difusa numa superfície horizontal em função do albedo terrestre.....	39
Figura 3.16. Irradiância espectral solar difusa numa superfície horizontal.....	39
Figura 3.17. Variação da irradiância espectral solar global em função da massa ótica relativa de ar.....	41
Figura 3.18. Influência da variação da massa ótica relativa de ar sobre a resposta relativa da célula de silício.....	42
Figura 3.19. Variação da irradiância espectral solar global em função da quantidade de água precipitável.....	42
Figura 3.20. Influência da variação da quantidade de água precipitável sobre a resposta relativa da célula de silício.....	43
Figura 3.21. Variação da irradiância espectral solar global em função do coeficiente de turbidez de Angström.....	44
Figura 3.22. Variação da irradiância espectral solar global em função do AL.....	45
Figura 3.23. Influência da variação do coeficiente de turbidez, de Angström sobre a resposta relativa da célula de silício.....	45
Figura 3.24. Influência da variação AL sobre a resposta relativa da célula de silício.....	46
Figura 3.25. Variação da irradiância espectral solar global em função do albedo terrestre.....	46
Figura 3.26. Influência da variação do albedo terrestre sobre a resposta relativa da célula de silício.....	47
Figura 3.27. Variação da irradiância espectral solar global em função da quantidade de ozônio.....	48

Figura 3.28. Influência da variação da quantidade de ozônio sobre a resposta relativa da célula de silício.....	49
Figura 3.29. Irradiância espectral solar numa superfície horizontal.....	49
Figura 4.1. Coeficiente de extinção monocromático e espectro de emissão da coumarina 1.....	55
Figura 4.2. Coeficiente de extinção monocromático e espectro de emissão da coumarina 6.....	56
Figura 4.3. Estrutura molecular da coumarina 6, coumarina 2, coumarina 120, coumarina 102, coumarina 30 e coumarina 1.....	57
Figura 4.4. Estrutura molecular da coumarina 153.....	57
Figura 4.5. Espectro de absorção da coumarina 153.....	58
Figura 4.6. Estrutura molecular da rodamina 6G, rodamina 101, rodamina 110, rodamina B e fluorescina.....	58
Figura 4.7. Coeficiente de extinção monocromático e espectro de emissão da rodamina 6G.....	59
Figura 4.8. Espectro de absorção e emissão do uvitex OB.....	60
Figura 4.9. Espectro emissão e de absorção do KF241 em uma amostra de 0,30 de PMMA.....	61
Figura 4.10. Espectro de emissão e absorção da fluorescina sódica.....	62
Figura 4.11. Refração de um raio solar.....	64
Figura 4.12. Transmitância do filtro FG6 da Melles Griot.....	66
Figura 4.13. Transmitância de um vidro comum de 7 mm de espessura.....	67
Figura 4.14. Resposta da célula de silício e resposta da célula de silício mais um vidro comum de 7 mm.....	68
Figura 4.15. Dimensões para obter o fator de visão entre a superfície 1 e 2.....	69
Figura 4.16. Resposta espectral de uma célula de silício com uma cobertura de coumarina 6 dissolvida em PMMA.....	70
Figura 4.17. Resposta da célula de silício com uma cobertura de KF241 dissolvido em PMMA.....	71
Figura 4.18. Resposta espectral da célula de silício com uma cobertura constituída por coumarina 6 dissolvida em PMMA e colocada sobre o KF421 também dissolvido em PMMA.....	72
Figura 4.19. Resposta espectral da célula de silício com	

uma cobertura constituída por um vidro comum de 7 mm, coumarina 6 dissolvida em PMMA e colocada sobre a placa de KF241 mais PMMA.....	72
Figura 4.20. Esquema da célula de silício mais a cobertura.....	73
Figura 4.21. Resposta espectral medida da célula de silício com uma cobertura composta por uvitex OB e KF241.....	75
Figura 4.22. Resposta espectral simulada da célula de silício com uma cobertura composta por uvitex OB e KF241, comparada com a resposta medida.....	75
Figura 4.23. Resposta espectral medida da célula de silício com uma cobertura composta por uvitex OB e coumarina 153.....	76
Figura 4.24. Resposta espectral da célula de silício com uma cobertura composta por uvitex OB, coumarina 153 e um vidro comum de 6,15 mm de espessura.....	77
Figura 4.25. Resposta espectral medida do piranômetro fotovoltaico Solar 118 e da célula de silício.....	78
Figura 4.26. Transmissividade do filtro e resposta espectral do fotodiodo usados no piranômetro fotovoltaico Solar 118.....	78
Figura 4.27. Resposta espectral do fotodiodo usado no Solar 118 e da célula de silício.....	79
Figura 5.1. Corrente de curto-circuito versus irradiância solar incidente, ambas simuladas, para uma célula de silício sem correção espectral.....	83
Figura 5.2. Irradiância solar medida com uma célula de silício versus irradiância solar incidente, ambas simuladas.....	83
Figura 5.3. Desvio percentual da medida da irradiância solar com uma célula de silício sem correção espectral.....	84
Figura 5.4. Simulação da dispersão da irradiância solar medida com uma célula de silício corrigida espectralmente com um vidro de 7 mm de espessura.....	85
Figura 5.5. Desvio percentual da medida da irradiância solar com uma célula de silício corrigida espectralmente com um vidro de 7 mm de espessura.....	85
Figura 5.6. Resposta espectral uniforme da célula de	

silício comparada com a resposta real.....	86
Figura 5.7. Simulação da dispersão da irradiância solar medida com uma célula de silício com resposta espectral uniforme.....	86
Figura 5.8. Desvios percentuais da medida da irradiância solar com uma célula de silício com resposta espectral uniforme.....	87
Figura 5.9. Desvio quadrático médio das medidas da irradiância solar em função do limite da banda de sensibilidade do sensor no infravermelho.....	91
Figura 5.10. Desvio percentual máximo para irradiâncias superiores a 200 W/m^2 em função do limite da banda de sensibilidade do sensor no infravermelho.....	91
Figura 5.11. Maior desvio para irradiâncias inferiores a 200 W/m^2 em função do limite da banda de sensibilidade do sensor no infravermelho.....	92
Figura 6.1. Desvios percentuais da irradiância solar obtida com o Solar 118 e a célula de silício sem correção. (a) Medida. (b) Simulada.....	97
Figura 6.2. Desvios percentuais da irradiância solar usando uma célula com cobertura composta por Uvitex OB e coumarina 153 dissolvidos em resina <i>poliéster</i> e com a célula sem correção. (a) Irradiância medida. (b) Irradiância simulada.....	98
Figura 6.3. Desvios percentuais da irradiância solar usando uma célula com cobertura composta por Uvitex OB e coumarina 153 dissolvidos em resina <i>poliéster</i> e um vidro de 6,15 mm e com a célula sem correção. (a) Irradiância medida. (b) Irradiância simulada.....	99
Figura 6.4. Desvios percentuais da irradiância solar usando uma célula com cobertura composta por Uvitex OB dissolvido em resina <i>poliéster</i> e KF241 dissolvido em PMMA e com a célula sem correção. (a) Irradiância medida. (b) Irradiância simulada.....	100
Figura 6.5. Desvios percentuais das medidas da irradiância solar usando uma célula sob um vidro de 4,15 mm e com a célula sem correção.....	101
Figura 6.6. Curva I x V característica de boas células e	

de um fotodiodo de silício.....	101
Figura 6.7. Projeto do piranômetro. a) Estrutura. b) Base. c) Geometria do difusor.....	104
Figura 6.8. Protótipo construído.....	105
Figura 6.9. Montagem para obter a resposta cosseno dos piranômetros fotovoltaicos.....	106
Figura 6.10. Resposta cosseno do protótipo construído.....	107
Figura 6.11. Resposta cosseno do Solar 118.....	107
Figura 6.12. Desvio percentual das medidas da irradiância realizadas com o Solar 118 e com o Protótipo construído.....	110
Figura 6.13. Média da irradiância solar em cinco minutos medida com o protótipo construído e com o Eppley PSP durante um dia limpo.....	111
Figura 6.14. Média da irradiância solar em cinco minutos medida com o Solar 118 e com o Eppley PSP durante um dia limpo.....	112
Figura 6.15. Média da irradiância solar em cinco minutos medida com o protótipo construído e com o Eppley PSP em um dia nublado.....	112
Figura 6.16. Média da irradiância solar em cinco minutos medida com o Solar 118 e com o Eppley PSP em um dia nublado.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Degradação da constante de calibração de piranômetros e pireliômetros.....	6
Tabela 3.1. Principais componentes da atmosfera terrestre.....	11
Tabela 5.1. Parâmetros atmosféricos usados para simular 648 irradiâncias espectrais solar.....	82
Tabela 5.2. Desvios das medidas simuladas da irradiância solar utilizando células de silício com várias correções espectrais e um piranômetro fotovoltaico com e sem correção espectral.....	88
Tabela 6.1. Análise dos desvios nas medidas da irradiância solar durante um dia limpo.....	95
Tabela 6.2. Análise do desvio das medidas da irradiância solar sobre um plano horizontal, durante um dia limpo, onde os desvio 1, 2, 3, 4 e 5 correspondem aos desvios da Tabela 5.2.....	109
Tabela 6.3. Desvios da média da irradiância solar em cinco minutos.....	113
Tabela 6.4. Desvio máximo da radiação total horária e diária para diferentes classes de piranômetros.....	114

LISTA DE SÍMBOLOS

- A → Fração da radiação transmitida considerando apenas a absorção
- AL → Relação entre os tamanhos dos aerossóis
- $ab(\lambda)$ → Coeficiente monocromático de absorção
- CTE → Constante de calibração
- D → Diâmetro
- d_{cc} → Densidade de corrente de curto-circuito da célula
- $em(\lambda)$ → Espectro de luminescência normalizado
- E → Energia de um fóton
- $EC(\lambda)$ → Irradiância espectral solar incidente na célula
- $ESC(\lambda)$ → Irradiância espectral da lâmpada
- F_{A1-A2} → Fator de visão
- h → Constante de Planck
- $I(\lambda)$ → Corrente monocromática da célula
- I_{cc} → Corrente de curto-circuito
- I_{λ} → Irradiância espectral solar global
- $I_{h\lambda}$ → Irradiância espectral solar direta em uma superfície horizontal
- $I_{d\lambda}$ → Irradiância espectral solar difusa numa superfície horizontal
- $I_{dr\lambda}$ → Irradiância espectral solar difusa devido ao espalhamento Rayleigh
- $I_{da\lambda}$ → Irradiância espectral solar difusa devido aos aerossóis
- $I_{dm\lambda}$ → Irradiância espectral solar difusa devido às múltiplas reflexões
- $I_{on\lambda}$ → Irradiância solar monocromática extraterrestre
- $I_{n\lambda}$ → Irradiância solar monocromática terrestre em um plano perpendicular aos raios solares
- k → Coeficiente de absorção
- k_{λ} → Coeficiente de atenuação monocromático
- $k_{ar\lambda}$ → Coeficiente de atenuação devido ao espalhamento do ar seco
- $k_{a\lambda}$ → Coeficiente de atenuação devido ao espalhamento e absorção dos aerossóis

$k_{v\lambda}$	→ Coeficiente de absorção monocromático devido ao vapor de água
$k_{o\lambda}$	→ Coeficiente de atenuação devido a absorção do ozônio
L	→ Quantidade de ozônio total ou espessura do material
L_{esc}	→ Perda de fótons devido ao escape na superfície superior
Lx	→ Caminho do fóton
m	→ Massa ótica relativa
ma	→ Massa ótica relativa para todos os componentes da atmosfera
ma'	→ Massa ótica real da substância
mo	→ Massa ótica relativa de ozônio
mr	→ Massa ótica relativa de ar sem correção
mv	→ Massa ótica real na direção vertical
mw	→ Massa ótica relativa de vapor de água
MA	→ Massa ótica relativa de ar
Mr	→ Taxa de mistura
n	→ Índice de refração
n_s	→ Índice de refração do material dopado
P	→ Pressão atmosférica
PE	→ Perda energética dos fótons emitidos
Po	→ Pressão padrão ao nível do mar
PG	→ Albedo terrestre
Ps	→ Pressão parcial do vapor de água
Q_{λ}	→ Irradiância direta e difusa numa superfície horizontal desconsiderando as múltiplas reflexões
R	→ Perda da radiação devido a reflexão
Ro	→ Probabilidade de reabsorção dos fótons
RS(λ)	→ Resposta espectral da célula
r_e	→ Raio da Terra
T	→ Temperatura
TC(λ)	→ Transmitância de filtros de absorção
UR	→ Umidade relativa
vis	→ Visibilidade na horizontal
W	→ Quantidade de água precipitável
Za	→ Altitude
Ze	→ Altura em que se encontra concentrada a camada de ozônio
β	→ Coeficiente de turbidez de Angström
θ_1	→ Ângulo de incidência

- θ_2 → Ângulo de refração
- θ_c → Ângulo crítico
- θ_z → Ângulo de zênite
- λ → Comprimento de onda
- λ_a → Comprimento de onda central da banda de absorção dos corantes orgânicos luminescentes
- λ_e → Comprimento de onda central da banda de emissão dos corantes orgânicos luminescentes
- ν → Freqüência do fóton
- $\rho_{a\lambda}$ → Albedo da atmosfera terrestre
- $\tau_{ma\lambda}$ → Transmitância monocromática devido a absorção molecular
- τ_{λ} → Transmitância da atmosfera terrestre
- $\tau_{a\lambda}$ → Transmitância devido a absorção molecular para uma mistura uniforme de gases
- $\tau_{r\lambda}$ → Transmitância espectral devido a absorção molecular para uma mistura uniforme de gases
- $\tau_{o\lambda}$ → Transmitância espectral devido ao ozônio
- $\tau_{r\lambda}$ → Transmitância espectral devido ao espalhamento Rayleigh
- $\tau_{va\lambda}$ → Transmitância espectral devido a absorção pelo vapor de água

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento de uma célula de silício como sensor em um piranômetro e construir um protótipo deste instrumento.

Inicialmente foi analisada a possibilidade de usar uma célula de silício como sensor, enfatizando a influência da seletividade espectral de sua resposta e a possibilidade de uma correção na mesma. Para verificar a influência das variações da irradiância espectral solar na corrente de curto-circuito da célula de silício foram realizadas simulações da variações da irradiância espectral solar em função dos parâmetros atmosféricos.

Analisou-se a possibilidade de fazer correções espectrais usando corantes orgânicos luminescentes para realçar a resposta da célula na região de menor sensibilidade e filtros de absorção para diminuí-la na região de maior sensibilidade. Através de um estudo dos corantes verificou-se, por meio da resposta espectral simulada, que com eles não é possível realçar significativamente a resposta espectral da célula.

Conhecendo a resposta espectral da célula com ou sem correção e a irradiância espectral solar global segundo a variação dos parâmetros atmosféricos, simularam-se desvios de medidas em diversas condições. Concluiu-se que uma correção espectral na célula de silício, embora tornando a resposta uniforme em toda a banda de sensibilidade, não diminui significativamente os desvios. Considerou-se, então, uma resposta uniforme para a célula de silício que se estende em direção ao infravermelho e verificou-se que os desvios das medidas simuladas diminuem exponencialmente com o aumento da resposta da célula em direção ao infravermelho.

Constatou-se experimentalmente que nenhuma correção espectral na resposta da célula diminui os desvios das medidas da irradiância solar e projetou-se um piranômetro usando como sensor uma célula de silício sem correção. O protótipo construído foi calibrado utilizando um piranômetro Eppley PSP e compararam-se os

desvios das medidas da irradiância com os desvios das medidas usando um piranômetro Kipp & Zonen e um piranômetro fotovoltaico Haenni (Solar 118). Se o protótipo for usado para medir a radiação solar total horária ou diária, o desvio máximo torna-se de 4,3% e 0,7% respectivamente.

O protótipo construído é indicado principalmente para medidas da radiação total horária e diária, que são as de maior uso no dimensionamento de sistemas solares, tanto fotovoltaicos como térmicos. Também é indicado para medidas instantâneas, quando não é necessária alta precisão.

ABSTRACT

The aim of this work is to analyze the behavior of a silicon cell as a sensor in a pyranometer and to construct a prototype of this instrument.

Firstly it was analyzed the possibility of using a silicon cell as a sensor, emphasizing the influence of its spectral response and the possibility of correcting it. In order to verify the influence of the changes of solar spectral irradiance in the short circuit current, simulations of these changes were performed in function of atmospheric parameters.

It was analyzed the possibility of providing spectral corrections using luminescent organic dyes to enhance the cell response in the lower sensitivity band and absorption filters to decrease this response in the greater sensitivity band. Studing the dyes it was verified, by mean of the simulated spectral response, that using them it is not possible to enhance substantially the spectral response of the cell. Knowing the cell spectral response with or without correction and the global solar spectral irradiance as a function of atmospheric parameters, measure deviations were simulated at several conditions. The conclusion was that a spectral correction in a silicon cell, although making the response uniform in all of its sensitivity band, do not produce significant decrease in the deviation. Considering a silicon cell with an uniform response extended in direction of infrared, it was verified that the deviation of simulated measures decreases exponentially with the increase of the cell response towards infrared.

Experimentally it was observed that any spectral correction in the cell response does not decrease the measured solar irradiance deviation. Then a pyranometer using non-corrected silicon cell as a sensor was designed. The prototype was calibrated using an Eppley Radiometer (PSP model) and the deviation of the irradiance measures was compared with the deviation of measures using Kipp & Zonen pyranometer and a Haenni (solar 118) photovoltaic pyranometer. When the prototype

is used to measure the total hourly or daily solar radiation, the maximum deviation becomes 4,3% and 0,7% respectively.

The prototype is mainly indicated for total hourly or daily solar radiation measures, which are the most used in the sizing of solar photovoltaic and thermal systems. It is also indicated for instantaneous measures, when high precision is not required.

1. INTRODUÇÃO

A irradiância solar recebida em uma superfície plana é referenciada como irradiância solar total, quando esta inclui a irradiância recebida diretamente do ângulo sólido do disco solar e a irradiância difusa que foi espalhada pela atmosfera e por nuvens. Se a irradiância total for medida em um plano inclinado existe uma terceira componente que é a irradiância refletida pelo solo, edifícios, árvores, etc.

O instrumento usado para medir a irradiância total é o piranômetro. Pode ser usado na posição invertida para medir a irradiância refletida pelo solo ou para medir a componente difusa da irradiância total, com o auxílio de um anel que evita a incidência da componente direta no piranômetro. Em geral, é usado para medir a irradiância solar global, isto é, a irradiância solar total em uma superfície horizontal.

Piranômetros normalmente usam sensores termoelétricos, fotoelétricos, piroelétricos e elementos bimetálicos. Devem resistir a efeitos corrosivos e serem hermeticamente fechados, pois são expostos a todas as condições do tempo.

Hoje, o Brasil importa piranômetros de boa precisão, que apresentam elevados custos. A idéia de construir um piranômetro de razoável precisão e baixo custo é muito atrativa. Além do mais, com o aumento da crise energética, a energia solar ganha cada vez mais espaço. Para dimensionar sistemas térmicos e fotovoltaicos necessita-se conhecer a radiação solar da região. Surge aqui a necessidade de piranômetros com boa precisão e de custo acessível. Em geral os piranômetros fotovoltaicos são de menor valor do que os piranômetros térmicos, mais fáceis de manusear e serem construídos.

O presente trabalho tem por objetivo analisar e construir um piranômetro fotovoltaico de silício. Inicialmente

fim de verificar a validade da simulação, realizaram-se medidas experimentais da resposta espectral das células com cobertura composta por corantes orgânicos luminescentes dissolvidos em resina *poliester* ou PMMA e filtros de absorção.

No capítulo 5 faz-se uma análise da influência da seletividade espectral da resposta da célula de silício no desvio das medidas da irradiância solar, através de uma simulação com as irradiâncias obtidas no capítulo 3. Numa primeira etapa compara-se o desvio das medidas simuladas da irradiância solar usando as células com as correções espectrais obtidas na capítulo 4, uma célula sem correção e uma célula com resposta espectral uniforme em toda banda de sensibilidade. Na segunda etapa, repete-se a mesma simulação usando uma resposta espectral uniforme para a célula que se expande em direção ao infravermelho.

Medidas experimentais da irradiância solar com as células encapsuladas com as coberturas descritas no capítulo 4 e que foi medida a resposta espectral são analisadas no capítulo 6. Para isso utiliza-se um sistema de aquisição de dados composto por um microcomputador PC-XT e uma placa conversora analógico-digital. Construiu-se um piranômetro fotovoltaico usando como sensor uma célula de silício. A calibração foi feita usando como referência um piranômetro Eppley PSP e compara-se o desvio das medidas da irradiância solar com o referência, um piranômetro Kipp & Zonen e um piranômetro fotovoltaico Haenni (Solar 118). Experimentalmente foi obtida a resposta cosseno do protótipo construído e do Solar 118 e ambas resultaram muito boas. Por fim, analisam-se os resultados experimentais da radiação solar total horária e diária com o protótipo construído comparando-as com as medidas obtidas com o Eppley PSP. Repete-se o mesmo procedimento para o Kipp & Zonen e Solar 118 e compara-se a precisão destes com o protótipo construído. Conclui-se que para medidas de radiação solar total horária e diária o protótipo construído é classificado, segundo Kasten, como um piranômetro de primeira classe.

As principais conclusões obtidas neste trabalho estão apresentadas no capítulo 7.

2. CARACTERÍSTICAS DOS PIRANÔMETROS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO

2.1. Introdução

Ao se pensar em construir um piranômetro é preciso ter em mente que o instrumento deve apresentar uma série de características e que um desvio significativo de uma delas impossibilita o funcionamento do mesmo ou pelo menos, limita sua utilização. Neste capítulo, a partir das principais propriedades de um piranômetro, analisa-se a possibilidade de usar uma célula de silício como sensor. Para isso faz-se uma comparação entre a célula de silício e os sensores usados nos piranômetros térmicos de precisão. Também verifica-se a possibilidade de substituir a cúpula (hemisférica) usada nos piranômetros térmicos por um material difusor.

As principais características que deve apresentar um piranômetro são:

- constante de calibração independente das variações do espectro solar;
- pouca dependência com as variações da temperatura ambiente;
- resposta angular segundo o cosseno do ângulo de zênite (ângulo entre o zênite e a direção dos raios solares), chamada resposta cosseno;
- resposta independente do ângulo azimutal, a resposta azimutal;
- resposta linear com a intensidade de radiação solar incidente;
- constante de calibração independente da inclinação do piranômetro;
- boa sensibilidade;
- o sensor não deve degradar com o uso do instrumento, para que a constante de calibração não varie.
- tempo de resposta, isto é, tempo para chegar em um certo percentual do valor final da medida, curto.

2.2. Comparação entre um sensor de silício e um sensor térmico

A célula de silício apresenta uma corrente de curto-circuito que cresce linearmente com a intensidade de radiação incidente, o que incentiva seu estudo a fim de usá-la como sensor de um medidor de radiação solar. Além disto, a célula de silício apresenta um tempo de resposta da ordem de 10 microssegundos [1], que é bem menor do que o tempo de resposta dos piranômetros térmicos, como se pode notar na Figura 2.1 [2] e alta sensibilidade.

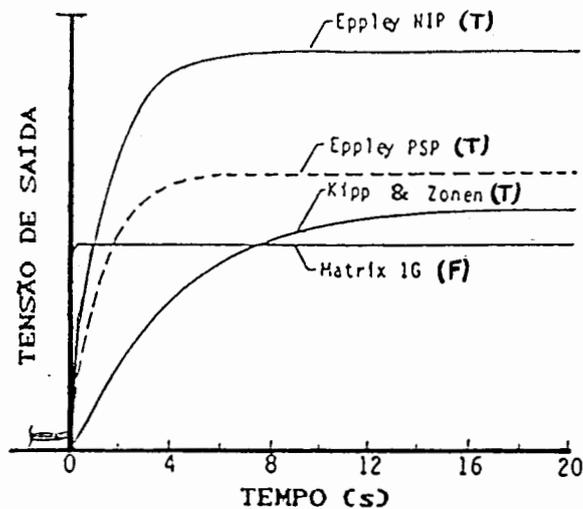


Figura 2.1. Tempo de resposta de piranômetros térmicos (T) e fotovoltaicos (F).

As possíveis variações da constante de calibração com o ângulo de inclinação são desprezíveis em um piranômetro fotovoltaico. Esta é outra vantagem em relação aos piranômetros térmicos, os quais sempre apresentam variações da constante de calibração segundo o ângulo de inclinação, devido a efeitos convectivos. Este fato é importante quando é usado para medir a irradiância incidente em uma superfície inclinada ou para medir a irradiância refletida pelo solo, isto é, o albedo do local, em que o piranômetro é utilizado na posição inversa.

A constante de calibração de um piranômetro, que usa uma célula de silício como sensor não varia significativamente, pois a célula quase não degrada com o uso. A Tabela 2.1 [3] apresenta a degradação de sensores térmicos e de silício, baseada

em dados obtidos num intervalo de 5 anos.

Tabela 2.1. Degradação da constante de calibração de piranômetros e pireliômetros.

SENSOR		DEGRADAÇÃO
T E R M O P I L H A	EPPLEY NIP*	0,57% A 0,86% AO ANO
	EPPLEY PSP	0,75% AO ANO
	EPPLEY TUVR**	6,35% AO ANO
S I L I C I O	LICOR 200SB	NÃO DETECTADA EM UM ANO
	MATRIX, MARK IG	NÃO DETECTADA EM 36 MESES
	MATRIX, MARK III*	NÃO DETECTADA EM 67 MESES

* Pireliômetros

** Piranômetro ultravioleta

A corrente de curto-circuito da célula de silício não varia muito com a variação da temperatura, porém a tensão de circuito aberto apresenta uma maior variação. A Figura 2.2 [4] mostra estas variações para uma célula iluminada com uma lâmpada de tungstênio. A tensão de circuito aberto torna-se aproximadamente seis vezes menor quando a temperatura é aumentada de -20°C a 180°C , enquanto que a corrente de curto-circuito varia menos de 15% [4]. Para um intervalo de temperatura de -6°C a 40°C a variação da corrente de curto-circuito de uma célula de silício é aproximadamente 0,7% [1], quando o teste é realizado com a luz do Sol. A sensibilidade da célula de silício diminui na região do azul e aumenta na região do vermelho com o aumento de temperatura, mas o acréscimo na região do vermelho é dominante [1].

Quando uma célula de silício é usada como medidor de

radiação solar, em geral, mede-se a queda de tensão sobre um pequeno resistor. Este poderá apresentar uma resistência que diminui com o aumento da temperatura, para compensar o aumento da corrente de curto-circuito.

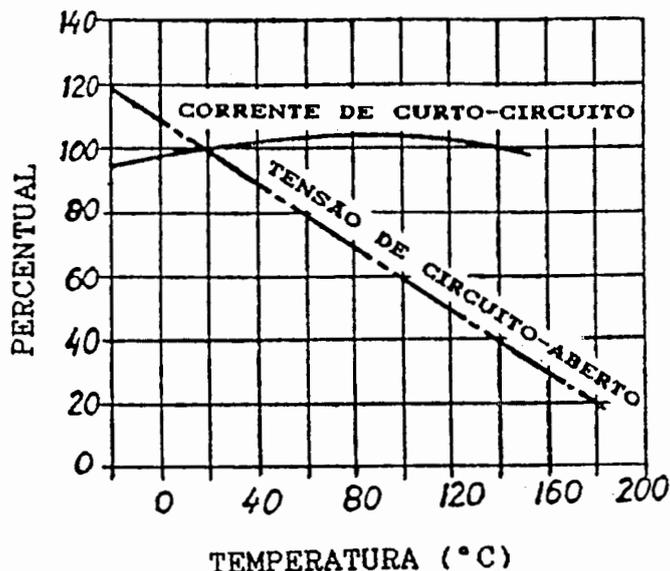


Figura 2.2. Variação da corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto em função da temperatura para uma célula de silício.

2.3. Resposta cosseno

Quando a radiação solar incide em uma superfície, pode ser refletida de duas maneiras: especularmente e difusamente. A reflexão especular é idêntica à reflexão de um espelho plano, isto é, o ângulo entre os raios solares incidentes e a normal da superfície é igual ao ângulo entre os raios solares refletidos e a normal; o ângulo azimutal varia de 180°. No caso de uma reflexão difusa, a radiação é refletida uniformemente em todas as direções, independente das características da radiação incidente. Em geral, a reflexão de uma superfície não é especular nem difusa, mas uma mistura das duas. Quando a superfície em que a radiação solar incide não é totalmente difusora, a quantidade de radiação refletida depende do ângulo de incidência. Para elevados ângulos de zênite, a reflexão é maior.

Um piranômetro deve apresentar uma resposta que varia

segundo o cosseno do ângulo de zênite e que não varie para qualquer ângulo azimutal. Entende-se por resposta cosseno o desvio produzido pela resposta do piranômetro em função do ângulo de zênite, quando comparada com uma curva cosseno ideal [5]. No caso de um piranômetro térmico é usada uma cúpula (hemisfério) de um material (em geral vidro), cuja transmissividade não varia para qualquer ângulo de incidência da radiação solar e tem uma larga banda de transmissividade de 0,20 μm a 3,00 μm . Esta cúpula é muito difícil de ser construída, tornando-se de elevado custo. Em um piranômetro fotovoltaico de silício é possível usar um material difusor, pois o sensor apresenta alta sensibilidade. Este material não é de custo elevado e pode ser encontrado no mercado brasileiro. Um material difusor reflete a mesma quantidade de radiação para qualquer ângulo de incidência. Caso o material a ser utilizado não seja um bom difusor, por exemplo, reflete uma quantidade maior de radiação para elevados ângulos de incidência, seu efeito pode ser melhorado através de uma geometria que corrija este fato.

2.4. Resposta espectral da célula de silício

Os piranômetros térmicos possuem a vantagem de que a absorção da tinta utilizada é independente do comprimento de onda da luz solar incidente. Qualquer luz monocromática de mesma intensidade será transformada em um sinal de mesmo valor. No entanto, os piranômetros fotovoltaicos de silício apresentam uma seletividade espectral da resposta da célula, isto é, a resposta não é sensível em todo o espectro solar e não é uniforme em toda banda de sensibilidade.

A fim de conhecer o desvio devido às variações do espectro solar, em medidas da irradiância solar com um piranômetro fotovoltaico de silício é necessário uma análise mais detalhada, que será apresentada nos próximos capítulos.

3. SIMULAÇÃO DO ESPECTRO SOLAR E INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS SOBRE A RESPOSTA DA CÉLULA DE SILÍCIO

3.1. Introdução

O espectro solar incidente na superfície terrestre é variável e depende principalmente da espessura e composição da atmosfera e do ângulo entre os raios solares e o zênite do ponto de referência, chamado ângulo de zênite. Também varia devido às atividades das manchas solares, no entanto estas variações não são muito importantes e podem ser desprezadas.

Existem modelos de simulação da radiação solar para vários conjuntos de dados atmosféricos, que permitem chegar a resultados de maior ou menor precisão. Estes modelos vão desde os que precisam de dados muito gerais como altitude, tipo de clima até os que descrevem detalhes quantitativos da composição instantânea da atmosfera, como vapor de água, gases poluentes, poeira, temperatura, umidade relativa, albedo terrestre e quantidade de ozônio. O uso de uns ou outros é função não só de se dispôr de dados da atmosfera, mas também do fim a que eles se destinam. Por exemplo, para determinar um dado instantâneo de um sistema ou equipamento, é necessário um modelo baseado nas condições do momento. Porém, tratando-se de dados médios relativos a longos períodos, métodos estatísticos são necessários.

Os sistemas de conversão fotovoltaica são altamente sensíveis a distribuição espectral da radiação solar, de tal forma que cada material fotovoltaico converte uma banda típica de radiação solar em corrente elétrica e com maior ou menor rendimento. Então, conhecer o espectro solar e como varia em função dos parâmetros atmosféricos, torna-se importante quando se trabalha com sistemas fotovoltaicos. Especial importância deve

ser dada no desenvolvimento de instrumentos de medição de radiação solar com células fotovoltaicas, que para apresentarem boa precisão, devem ser sensíveis na maior parte do espectro solar e possuírem praticamente a mesma resposta em qualquer banda espectral. Neste caso torna-se essencial usar um modelo da radiação solar espectral que descreva os efeitos atmosféricos instantâneos.

3.2. Atmosfera terrestre

A radiação solar pode ser atenuada antes de chegar na superfície terrestre por uma atmosfera com nuvens ou sem nuvens. Neste estudo será considerada uma atmosfera sem nuvens, pois dados sobre os efeitos das nuvens na radiação solar e principalmente sobre sua distribuição espectral são muito difíceis de se conhecer, devido a quantidade e dificuldade de obtenção dos fatores que influem, como: tipo, altura e espessura das nuvens, fração de céu coberto, interposição ou não das nuvens na radiação direta, etc.

Os principais componentes da atmosfera terrestre são o nitrogênio e o oxigênio molecular. A Tabela 3.1 apresenta os principais componentes e os respectivos pesos.

Outros componentes, com pesos menores que $1 \times 10^{-5}\%$ são: xenônio (Xe), dióxido de enxofre (SO_2), dióxido de nitrogênio (NO_2), amônia (NH_3), vapor de água (H_2O), óxido nítrico (NO), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e vapor de ácido nítrico. Também é composta de partículas, chamadas aerossóis, como poeira, gotas de água, cristais de gelo, fuligem, etc. que são altamente variáveis com o tempo e local.

A densidade e o índice de refração do ar são progressivamente crescentes na direção da superfície terrestre. A pressão atmosférica também cresce com o decréscimo da altitude. A atmosfera padrão para o nível do mar, é:

$$P = 1013,25 \text{ mbars ou } 101,325 \text{ KPa}$$

$$T = 288 \text{ K} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$$

Para determinar a irradiância espectral solar que chega

numa superfície terrestre, a atmosfera terrestre é dividida em três grupos: moléculas de ar seco, vapor de água e aerossóis.

Tabela 3.1. Principais componentes da atmosfera terrestre.

GAS CONSTITUINTE	% POR VOLUME
Nitrogénio (N ₂)	78,084
Oxigénio (O ₂)	20,948
Argónio (Ar)	0,934
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,333
Neónio (Ne)	18,18 x 10 ⁻⁴
Hélio (He)	5,24 x 10 ⁻⁴
Kriptónio (Kr)	1,14 x 10 ⁻⁴
Metano (CH ₄)	1,5 x 10 ⁻⁴
Hidrogénio (H ₂)	0,5 x 10 ⁻⁴
Óxido nitroso (N ₂ O)	0,27 x 10 ⁻⁴
Monóxido de carbono (CO)	0,19 x 10 ⁻⁴
Ozónio (O ₃)	0 a 12 x 10 ⁻⁴

3.2.1. Moléculas de ar seco

A localização geográfica, altitude e estação do ano influem na concentração dos gases que compõem o ar seco. Alguns gases como CO₂, O₃, CO e CH₄ não são distribuídos homogeneamente no tempo e espaço, variando de acordo com as atividades agrícolas e industriais da região e da vizinhança.

Os principais componentes para uma altitude de até 500 km são O₂, O e N₂, mas acima de 500 km, hélio é o principal componente e acima de 2000 km encontra-se hélio ionizado, hidrogénio ionizado e elétrons.

As moléculas que fazem parte do ar seco que mais absorvem radiação solar e em determinados comprimentos de onda característicos são: ozônio, CO_2 , O_2 , N, óxidos de nitrogênio e combinações de hidrocarbonatos.

A quantidade de O_2 decresce com a altitude, enquanto que a concentração de oxigênio atômico cresce por causa da dissociação do O_2 pelos raios ultravioleta para uma altitude maior que 90 km. No entanto, a concentração de nitrogênio atômico é baixa para altas altitudes porque o N_2 não se dissocia.

O ozônio absorve na região do ultravioleta, visível e na região do infravermelho para comprimentos de onda maiores que $4 \mu\text{m}$. Próximo a superfície terrestre é formado pela decomposição de óxido de nitrogênio, devido à queima de florestas, fumaça, etc. e na parte superior da atmosfera absorve os raios ultravioleta e dissocia-se. A quantidade de ozônio total (L) é a altura de ozônio gasoso, se todo o ozônio em uma coluna vertical de área unitária fosse trazido para a temperatura e pressão de superfície, expressa em cm(CNTP) (centímetros nas condições normais de temperatura e pressão). A quantidade de ozônio aumenta do Equador em direção aos pólos. Nas regiões polares o ozônio total pode chegar a 0,46 cm(CNTP), enquanto que no Equador a média é de 0,24 cm(CNTP), em latitudes médias o valor médio usado é 0,35 cm(CNTP). A quantidade de ozônio varia também com as estações do ano nas altas latitudes, tendo um máximo na primavera e um mínimo no outono. Próximo ao Equador é praticamente constante durante o ano todo. O ozônio encontra-se concentrado numa camada entre 10 a 35 km de altitude, com uma altura média de 23 km.

3.2.2. Vapor de água

O vapor de água absorve em bandas na região do infravermelho, sendo que a maior banda de absorção fica entre $1,32$ e $1,54 \mu\text{m}$, com o máximo de absorção centrado em $1,40 \mu\text{m}$. Há duas outras bandas: uma entre $0,85$ e $0,98 \mu\text{m}$ e outra entre $1,10$ e $1,18 \mu\text{m}$. A região do visível é praticamente inafetada.

Para determinar a quantidade de água existente na atmosfera é necessário definir as seguintes grandezas: água

precipitável (W) e taxa de mistura (Mr).

A taxa de mistura é a razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco presente por unidade de volume. É maior nos dois primeiros quilômetros de altitude, decresce rapidamente até um valor mínimo a uma altura de 16 km e torna a aumentar lentamente.

Água precipitável é a espessura de água líquida que poderia ser formada se todo o vapor de água na direção do zênite fosse condensado em uma coluna de área unitária. Nos dois primeiros quilômetros da atmosfera concentra-se aproximadamente metade da água precipitável e acima de 12 km de altitude quase não existe. A quantidade total de água precipitável varia com a estação do ano e localização geográfica. O valor médio é de 2 cm, mas pode ser de 1 mm para uma atmosfera seca e de até 4 cm para uma atmosfera úmida.

Alguns pesquisadores provaram a existência da correlação entre água precipitável e pressão parcial de vapor de água, ou temperatura de ponto de orvalho, ou umidade relativa. Entre estes, Leckner, segundo referência [6] apresentou um modelo com razoável precisão e que utiliza dados fáceis de obter, como umidade relativa, temperatura e pressão parcial:

$$W = 0,493 \text{ UR } P_s / T \quad (3.1)$$

onde UR é a umidade relativa com valores entre 0 e 1, T é a temperatura ambiente em Kelvin e P_s é a pressão parcial do vapor de água no ar saturado em mbars.

A pressão parcial do vapor de água é dada por:

$$P_s = \exp (26,23 - 5416 / T) \quad (3.2)$$

3.2.3. Aerosóis

São partículas suspensas no ar e que seguem seu movimento dentro de certos limites. São formados, por exemplo, da fumaça industrial, poeira, fuligem, erupções vulcânicas, tempestades de areia, queima de florestas, cristais de sal, núcleos de sal higroscópicos em que água é condensada e

aglomerados de moléculas de vapor de água que seguem o movimento do ar. Porém chuva, neve e granizo não são considerados aerossóis. As maiores fontes naturais de aerossóis são os oceanos, os desertos e as erupções vulcânicas [7].

Apresentam considerável diversidade no volume, tamanho, distribuição, forma e composição material. O raio dos aerossóis varia de 10^{-3} até 10^2 μm . A quantidade é especificada em termos do número de partículas por m^3 . A densidade decresce exponencialmente até 5 km de altitude e permanece praticamente constante entre 10 e 15 km de altitude. Torna a aumentar levemente em uma camada centrada em torno de 20 km de altitude, devido a natureza dinâmica e térmica da atmosfera.

A turbidez da atmosfera é diretamente proporcional à quantidade de aerossóis por cm^3 , que é uma medida difícil de ser obtida. Por isso geralmente é relacionada com a visibilidade horizontal, a qual é mais fácil de ser obtida, embora não seja muito exata.

3.3. Massa ótica relativa

Quando a radiação solar monocromática atravessa a atmosfera terrestre, cada molécula ou partícula atenua energia. A atenuação é uma função do tipo e número de moléculas ou partículas no caminho do raio solar.

A trajetória dos raios solares é ligeiramente curva, devido a refração nas sucessivas camadas de ar de densidade e índice de refração progressivamente crescente na direção da superfície terrestre. Supondo-se que a atmosfera é composta de finas camadas, um raio solar ao penetrar obliquamente na atmosfera é sempre desviado levemente na direção vertical ao passar de uma camada de menor densidade para outra de maior. Sendo que a densidade do ar aumenta de cima para baixo, o desvio aumenta progressivamente, de tal forma que o raio solar descreve uma trajetória curva com concavidade voltada para baixo. Por causa disso é possível ver o Sol, embora achatado, quando está abaixo do horizonte, como mostra a Figura 3.1, onde o desvio chega a ser de 35 minutos.

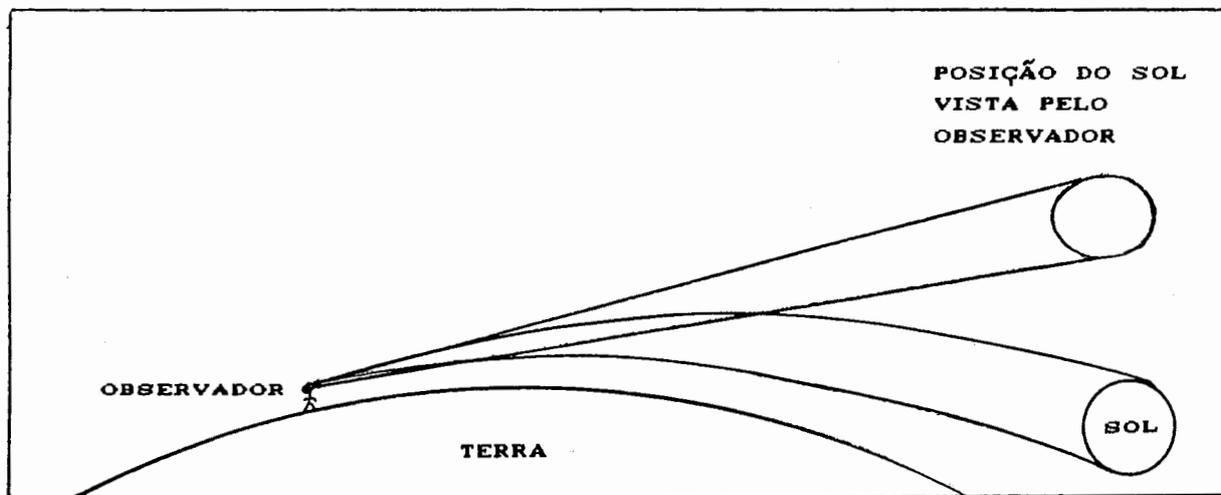


Figura 3.1. Trajetória dos raios solares na atmosfera terrestre.

A massa ótica relativa de ar é definida como a razão entre o caminho ótico do raio solar, ao longo de uma trajetória oblíqua e o caminho ótico vertical, isto é, na direção do zênite e ao nível do mar. O termo relativa significa que é relativa à direção do zênite do ponto de observação. A massa ótica relativa de ar é uma função da distribuição dos componentes com a altitude, densidade atmosférica e índice de refração. Por exemplo, a massa ótica relativa de ar, no topo de uma montanha será diferente daquela ao nível do mar.

Assumindo que a atmosfera é homogênea e não refletiva e desconsiderando a curvatura dos raios solares, pode-se calcular a massa ótica relativa para todos os componentes da atmosfera, como:

$$m_a = \sec \theta_z \quad (3.3)$$

onde θ_z é o ângulo de zênite, que é o ângulo formado entre a direção dos raios solares e o zênite do ponto de observação. O erro introduzido pela Equação 3.3 é de aproximadamente 0,25% até $\theta_z = 60^\circ$ e aumenta para 10 % para $\theta_z = 85^\circ$. Se a massa ótica relativa obtida da Equação 3.3 for usada para os diversos componentes da atmosfera, como vapor de água, aerossóis e o ar seco, o erro aumenta. É aconselhado usar massas óticas relativas

para os diversos componentes as quais consideram a variação e a distribuição de cada componente.

A densidade multiplicada pelo comprimento do caminho dos raios solares representa a massa ótica real da substância em uma coluna de área unitária:

$$m_a' = \int \rho \, ds \quad (3.4)$$

onde ds é uma fração do comprimento do caminho dos raios solares e ρ é a densidade da substância para ds . O limite superior da integral é o topo da atmosfera e o inferior é a superfície terrestre.

Quando o Sol está no zênite, o caminho dos raios solares é vertical e ds é igual a altura de um elemento dz , onde z é a distância do topo da atmosfera até a superfície terrestre na direção vertical. Assim, a massa ótica real, para uma coluna de área unitária, na direção vertical é:

$$m_v = \int \rho \, dz \quad (3.5)$$

A massa ótica relativa, para um determinado componente da atmosfera, também pode ser definida como a razão entre a massa ótica real ao longo de uma trajetória oblíqua e a massa ótica real na direção vertical:

$$m_a = \frac{\int \rho \, ds}{\int \rho \, dz} \quad (3.6)$$

Para calcular a massa ótica relativa de ar, usando a Equação 3.6 é necessário a variação da densidade do ar na atmosfera. Kasten, segundo referência [6], usando o perfil da densidade do ar da atmosfera modelo ARDC de 1959 e índice de refração para $\lambda = 0,70 \, \mu\text{m}$, apresentou a seguinte solução para a Equação 3.6:

$$m_r = (\cos \theta_z + 0,15 (93,885 - \theta_z)^{-1,253})^{-1} \quad (3.7)$$

Esta equação apresenta um erro de aproximadamente 0,1% para $\theta_z < 86^\circ$ e aumenta para 1,25% para $\theta_z = 89,5^\circ$, ao nível do mar. Este erro é levemente maior para altitudes elevadas, mas pode ser corrigida pela seguinte equação:

$$MA = m_r (P / 1013,25) \quad (3.8)$$

onde P é a pressão local em milibar. Esta correção deve ser aplicada para locais acima de 2000 m de altitude, ou para locais em que a diferença entre a pressão padrão e a local seja maior que 20 mbars.

Acima do nível do mar a pressão local é obtida por:

$$P = P_0 \exp (- 0,0001184 Z_0) \quad (3.9)$$

onde Z_0 é a altitude em metros e P_0 é a pressão padrão ao nível do mar em mbars. A Equação 3.8 é usada para determinar a atenuação da radiação solar pelas moléculas de ar seco.

Para calcular a atenuação da radiação solar devido ao vapor de água, é necessário definir a massa ótica relativa de vapor de água, que difere ligeiramente da Equação 3.8, pois o perfil de densidade do vapor de água na direção vertical é muito diferente daquele do ar seco. O vapor de água está concentrado principalmente nas baixas camadas da atmosfera e o limite de integração não é necessário ser o limite superior da atmosfera.

Baseado em estudos de Schnaidt, Kasten, segundo a referência [6], obteve a seguinte fórmula:

$$m_w = (\cos \theta_z + 0,0548 (92,650 - \theta_z)^{-1,452})^{-1} \quad (3.10)$$

Esta equação apresenta boa precisão. A imprecisão na determinação de W é maior que aquela da massa ótica relativa de vapor de água calculada através da Equação 3.10. W é uma quantidade corrigida em relação a pressão, por isso não é necessário multiplicar a Equação 3.10 por 1013,25 mbar, quando a

pressão local é diferente da pressão padrão.

O perfil de concentração de ozônio na atmosfera é diferente do perfil de concentração do ar seco ou vapor de água, o que leva a uma equação para a massa ótica relativa de ozônio diferente das anteriormente estudadas.

Para determinar a massa ótica relativa de ozônio considera-se que o ozônio está concentrado em uma fina camada centrada a uma altura Z_e e r_e é o raio da Terra. Robinson in [6] apresentou a seguinte equação:

$$m_o = (1 + Z_e / r_e) / (\cos^2 \theta_z + 2(Z_e / r_e))^{0,5} \quad (3.11)$$

Quando θ_z for maior que 80° , m_o torna-se razoavelmente diferente das outras massas óticas relativas. O erro na determinação da espessura da camada de ozônio é maior que na determinação da m_o .

Os aerossóis são altamente variáveis no tamanho, distribuição, composição e propriedades óticas. Por falta de maiores informações, a massa ótica relativa de ar dada pela Equação 3.8 é empregada para calcular a atenuação da radiação solar devido aos aerossóis.

3.4. Irradiância espectral solar direta

Quando a radiação solar penetra na atmosfera terrestre, pode ser espalhada e absorvida. Uma parte da radiação espalhada é refletida de volta para o espaço e a outra parte que chega na superfície terrestre é conhecida como radiação solar difusa. A radiação solar direta é a parte da radiação solar que chega na superfície diretamente do disco solar sem ser espalhada, mas é atenuada devido a absorção dos vários componentes da atmosfera.

Quando um raio solar monocromático $I_{0\lambda}$ entra na atmosfera, como na Figura 3.2, emergirá depois de atravessá-la com um valor I_{λ} , numa superfície normal ao raio solar, menor que $I_{0\lambda}$. Esta quantidade atenuada pode ser obtida pela lei de Bouguer ou lei de Beer:

$$I_{n\lambda} = I_{0n\lambda} \exp(-k_{\lambda} m) \quad (3.12)$$

onde k_{λ} é o coeficiente de atenuação monocromático e tem a unidade de $(\text{comprimento})^{-1}$, m é a massa ótica relativa e $I_{0n\lambda}$ é a irradiância extraterrestre monocromática para uma distância média Terra-Sol.

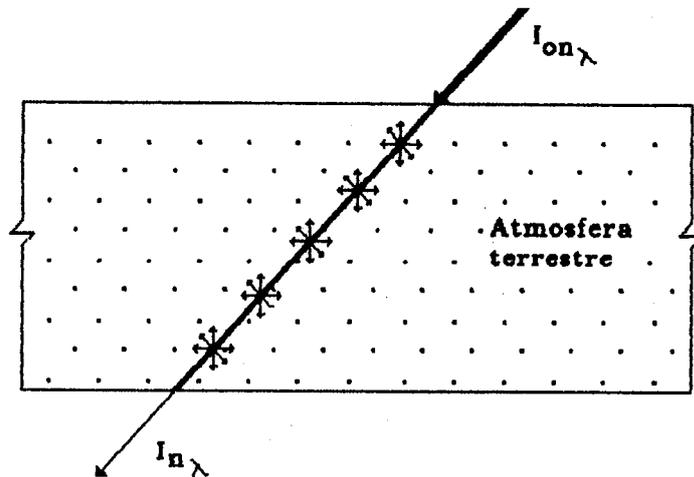


Figura 3.2. Atenuação de um raio solar pela atmosfera terrestre.

A irradiância espectral direta em uma superfície horizontal é:

$$I_{h\lambda} = I_{n\lambda} \cos \theta_z \quad (3.13)$$

onde θ_z é o ângulo de zênite e $I_{n\lambda}$ é a irradiância espectral solar direta incidente em um plano perpendicular aos raios solares.

A radiação solar é atenuada por vários processos de extinção, com diferentes coeficientes de atenuação $k_{i\lambda}$ e praticamente independentes entre si. A transmitância da atmosfera é a fração de radiação que chega na superfície terrestre em relação a radiação extraterrestre incidente:

$$\tau_{\lambda} = \frac{I_{n\lambda}}{I_{0n\lambda}} = \prod_{i=1}^{i=j} \tau_{i\lambda} \quad (3.14)$$

onde τ_λ é a transmitância da atmosfera terrestre devido a todos os processos de atenuação e $\tau_{i\lambda}$ é a transmitância para um dos j processos de atenuação da radiação solar, que é dada por:

$$\tau_{i\lambda} = \exp(-k_{i\lambda} m_i) \quad (3.15)$$

A lei de Bouguer determina a atenuação devido ao espalhamento e absorção por aerossóis e ao espalhamento por gases, mas não é muito válida para a absorção por gases. Outras fórmulas são mais precisas como veremos mais adiante.

3.4.1. Transmitância devido ao Espalhamento Rayleigh de moléculas de ar

A teoria de Rayleigh soluciona o espalhamento devido as moléculas de ar, quando a partícula é esférica e muito menor que o comprimento de onda da radiação incidente ou mais especificamente quando $\pi D/\lambda < 0,08n$, onde D é o diâmetro da partícula em micrometros, n o índice de refração e λ o comprimento de onda em micrometros.

É considerado que as moléculas de ar são partículas esféricas com um diâmetro menor que $0,2\lambda$ e que espalham independentemente umas das outras. A teoria de Rayleigh mostra que o coeficiente de atenuação monocromático varia aproximadamente com λ^{-4} e pode ser comprovado experimentalmente. Também varia com a altitude, pois o número de moléculas de ar por unidade de volume e o índice de refração varia com a altitude.

O espalhamento Rayleigh é o mesmo na direção do raio solar e no sentido contrário deste e é máximo para estas direções. O espalhamento mínimo ocorre a 90° do raio incidente. Um maior espalhamento acontece quando o comprimento de onda da radiação solar incidente é mais curto.

Uma fórmula aproximada para o coeficiente de atenuação devido ao espalhamento do ar seco é:

$$k_{ar\lambda} = 0,008735 \lambda^{-4,08} \quad (3.16)$$

Esta fórmula foi obtida por Leckner, in [6], e mostra

alguma diferença comparada com dados experimentais na região do ultravioleta, o que não é de grande importância, pois grande parte desta radiação é absorvida pela camada de ozônio.

A transmitância espectral devido ao espalhamento das moléculas de ar seco, isto é, devido ao espalhamento Rayleigh é:

$$\tau_{r\lambda} = \exp \left[- 0,008735 \lambda^{-4,08} MA \right] \quad (3.17)$$

onde MA é a massa ótica relativa de ar à pressão atual. Por causa da variação do coeficiente de atenuação devido ao espalhamento Rayleigh com λ^{-4} , a transmitância das moléculas de ar seco cresce rapidamente com o comprimento de onda e decresce com o acréscimo da massa ótica relativa de ar. Para comprimentos de onda maiores que 1,00 μm o espalhamento Rayleigh pode ser desprezado.

3.4.2. Espalhamento Mie

O espalhamento Mie ocorre quando o tamanho das partículas é da ordem do comprimento de onda da radiação incidente. Mais especificamente quando $0,6n < \pi D/\lambda < 5$. Na atmosfera é aplicado para o espalhamento de partículas maiores que 10 Å, como os aerossóis.

No espalhamento Mie mais radiação é espalhada no sentido do raio solar que no sentido contrário. O espalhamento mínimo ocorre a 90° da direção do raio incidente, quando o tamanho da partícula é proporcional a um quarto do comprimento de onda da radiação incidente. Quando o tamanho da partícula é maior que o comprimento de onda da radiação incidente o espalhamento máximo continua sendo no sentido da radiação incidente e é maior que no caso anterior. No entanto ocorrem vários mínimos, intercalados por máximos secundários. Em uma atmosfera que contém maior quantidade de aerossóis de tamanho relativamente grande, mais radiação solar difusa chega na superfície terrestre, porque mais energia é espalhada na direção dos raios solares.

O número e o tamanho de partículas na atmosfera são influenciados pela presença de vapor de água, pois em algumas

condições de umidade, partículas de pó aumentam de tamanho por causa da condensação de água. Também podem ocorrer coagulações de algumas moléculas de vapor de água. Portanto a forma, tamanho, distribuição e natureza dos aerossóis existentes na atmosfera são variáveis e difíceis de se conhecer.

3.4.3. Transmitância devido aos aerossóis

A atenuação da radiação solar por aerossóis é maior por espalhamento que por absorção. É uma função do comprimento de onda sem bandas seletivas, embora que a absorção mostre alguma seletividade espectral.

Angström sugeriu a seguinte fórmula para o coeficiente de atenuação devido ao espalhamento e absorção dos aerossóis:

$$k_{\alpha\lambda} = \beta \lambda^{-AL} \quad (3.18)$$

onde β é o coeficiente de turbidez de Angstrom e λ é o comprimento de onda em micrometros. AL (alfa) representa uma relação dos tamanhos dos aerossóis, por exemplo, altos valores de AL indicam uma taxa maior de pequenas partículas em relação a partículas grandes. Quando os aerossóis na atmosfera são muito pequenos, da ordem das moléculas de ar, AL pode aproximar-se de 4,00. O valor médio é de $1,30 \pm 0,50$.

O valor de β varia de aproximadamente 0,01 até 0,50 e representa a quantidade de aerossóis presentes na atmosfera na direção vertical. β e AL podem variar durante um dia, por causa da mudança na temperatura que causa evaporação ou condensação da mistura na atmosfera.

β pode ser determinado através da medida da visibilidade na direção horizontal. Para visibilidade maior que 5 km, McClatchey, Selby e outros, segundo a referência [6], determinaram a seguinte equação para calcular β :

$$\beta = 0,55^{AL} (3,912 / \text{vis} - 0,01162) \\ (0,02472 (\text{vis} - 5) + 1,132) \quad (3.19)$$

onde vis é a visibilidade em km. A Equação 3.19 não é muito

exata, pois é necessário conhecer AL e a medida da visibilidade é subjetiva. É possível medir AL e β com um fotômetro de duplo λ , medindo a atenuação devido aos aerossóis para dois comprimentos de onda onde a absorção molecular é nula ou mínima.

A transmitância devido aos aerossóis é:

$$\tau_{a\lambda} = \exp(-\beta \lambda^{-AL} MA) \quad (3.20)$$

onde MA é a massa ótica relativa de ar.

A transmitância devido aos aerossóis é mínima para comprimentos de onda curtos e aumenta lentamente em direção a comprimentos de onda mais longos. No entanto a taxa de atenuação devido aos aerossóis muda quando os parâmetros de turbidez mudam.

A Figura 3.3 mostra o efeito da variação do coeficiente

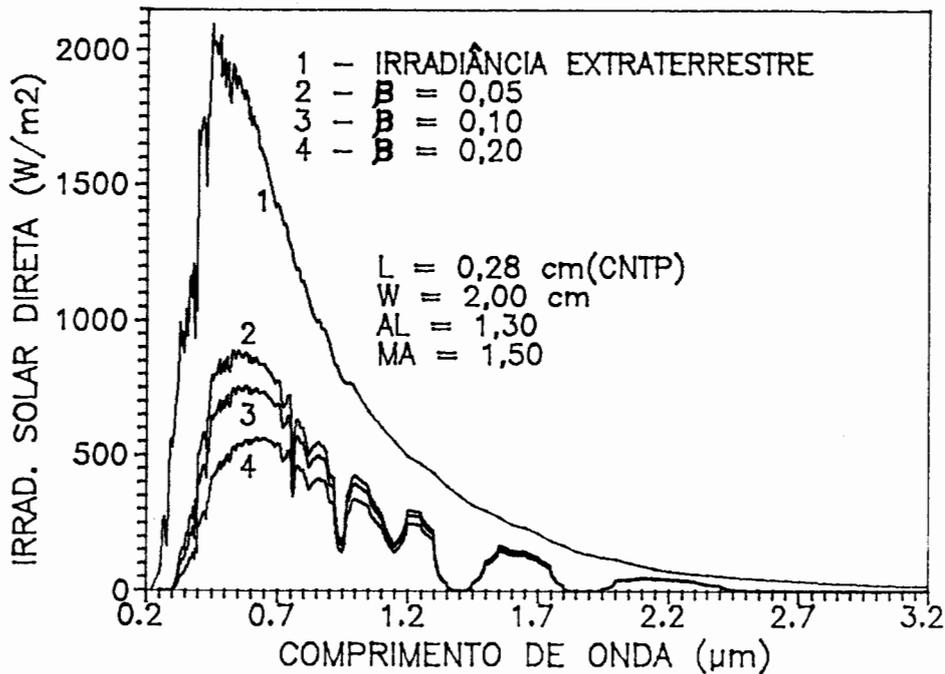


Figura 3.3. Variação da irradiância espectral solar direta numa superfície horizontal em função do coeficiente de turbidez de Angström.

de turbidez de Angström sobre a irradiância espectral solar direta numa superfície horizontal e nota-se que ocorre principalmente na região do visível e ultravioleta. Existe uma forte diminuição da irradiância solar com o aumento do β , pois β

representa a quantidade de aerossóis existentes e quanto maior for a turbidez na atmosfera, mais radiação solar é espalhada.

Na Figura 3.4 aparece o efeito do AL sobre a irradiância espectral solar direta numa superfície horizontal. Também nota-se uma diminuição da irradiância solar com o aumento do AL, concentrada na região do ultravioleta e visível. Isto ocorre porque quanto maior o AL, existe uma quantidade maior de aerossóis pequenos e estes espalham mais que aerossóis maiores. A irradiância espectral solar direta, para $\lambda > 1 \mu\text{m}$, permanece constante com a variação do alfa.

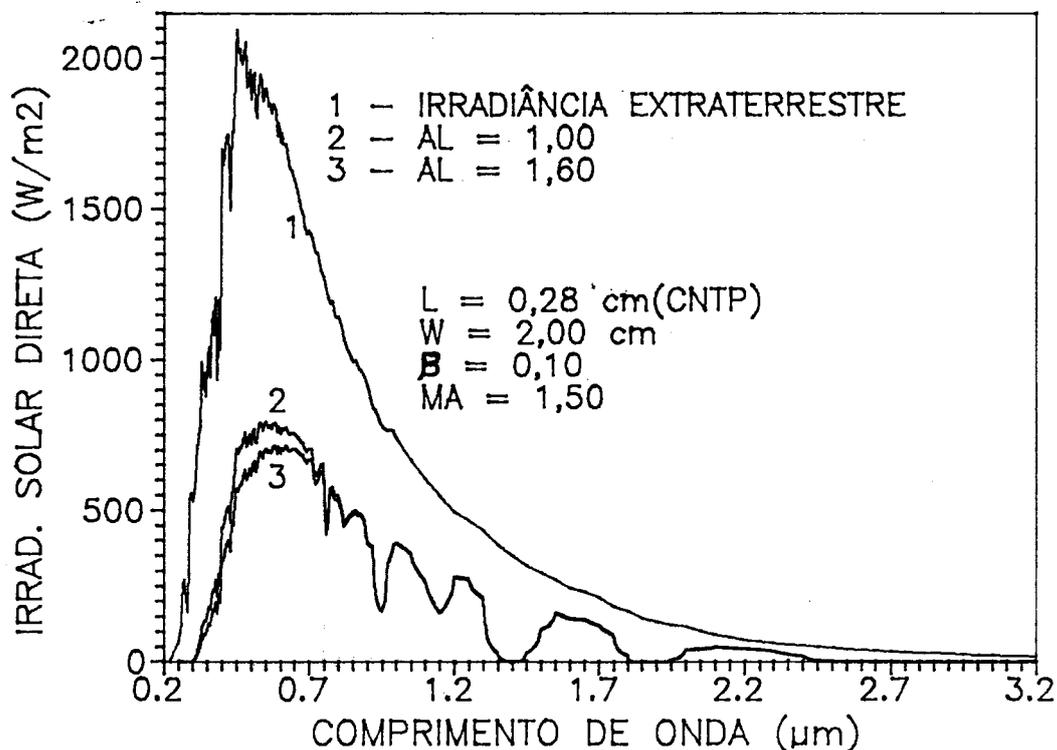


Figura 3.4. Variação da irradiância espectral solar direta numa superfície horizontal em função do AL.

3.4.4 Transmittância devido a uma mistura uniforme de gases e vapor de água

O processo de absorção depende do estado de energia da molécula. A radiação é absorvida durante a transição de um estado de energia para outro. A absorção molecular por gases (moléculas de ar seco e vapor de água) ocorre somente para comprimentos de onda discretos e é chamada de absorção seletiva. Em geral ocorre

para um número de comprimentos de onda muito próximos, isto é, numa banda de absorção.

Os cinco principais absorvedores moleculares do ar seco no ultravioleta e visível são: O_2 , N_2 , O , N e O_3 . O e N absorvem os raios X e em comprimentos de onda próximos a $0,085 \mu m$. O_2 e N_2 absorvem em bandas sobrepostas para comprimentos de onda menores do que $0,20 \mu m$. O oxigênio diatômico tem três fracas bandas de absorção no visível centradas em $0,63$, $0,69$ e $0,76 \mu m$, havendo algumas sobreposições com as bandas de ozônio. O ozônio tem uma forte banda de $0,20$ a $0,30 \mu m$, bandas mais fracas de $0,30$ a $0,35 \mu m$ e bandas mais fortes na região do visível de $0,45$ a $0,77 \mu m$. Também absorve abaixo de $0,20 \mu m$, no entanto toda radiação para comprimentos de onda menores que este, é totalmente absorvida pelo O , N , O_2 e N_2 antes de chegar na estratosfera onde existe o ozônio.

Os principais gases que absorvem no infravermelho são H_2O , CO_2 , N_2O , CO , O_2 , CH_4 e N_2 . As bandas de vapor da água importantes são centradas em $0,72$, $0,82$, $0,94$, $1,10$, $1,38$, $1,87$, $2,70$ e $3,20 \mu m$; para o CO_2 são $1,45$, $1,60$, $2,00$ e $2,70 \mu m$ e para o O_2 são $0,69$ e $0,76 \mu m$. Este estudo está concentrado para comprimentos de onda menores que $4 \mu m$ e portanto bandas de absorção centradas em λ maiores que este são ignoradas. A concentração de N_2O , CO e CH_4 na atmosfera é pequena e seus efeitos sobre a irradiância solar são mínimos. Para calcular a transmitância monocromática devido aos absorvedores moleculares, precisa-se conhecer a frequência, a intensidade, a forma e a largura das bandas de absorção. A lei de Bouguer (Equação 3.12) não é aplicada para este caso e é usado um modelo no qual estes gases formam uma mistura uniforme.

A transmitância espectral devido a absorção molecular para a mistura uniforme de gases é:

$$\tau_{g_\lambda} = \exp \left[-1,41 k_{g_\lambda} MA / (1 + 118,93 k_{g_\lambda} MA)^{0,45} \right] \quad (3.21)$$

onde k_{g_λ} é o coeficiente de absorção monocromático para uma mistura uniforme de gases e MA é a massa ótica relativa de ar.

A transmitância espectral devido a absorção pelo vapor de água é:

$$\tau_{v\lambda} = \exp \left[-0,2385 k_{v\lambda} W \text{ mv} / (1 + 20,07 k_{v\lambda} W \text{ mv})^{0,45} \right] \quad (3.22)$$

onde $k_{v\lambda}$ é o coeficiente de absorção monocromático devido ao vapor de água, mv é a massa ótica relativa de vapor de água, W é a quantidade de água precipitável em cm. Na equação 3.21 foi considerado a variação de pressão e temperatura na direção vertical.

Na figura 3.5 aparece o efeito da variação da água precipitável sobre a irradiância espectral solar direta numa

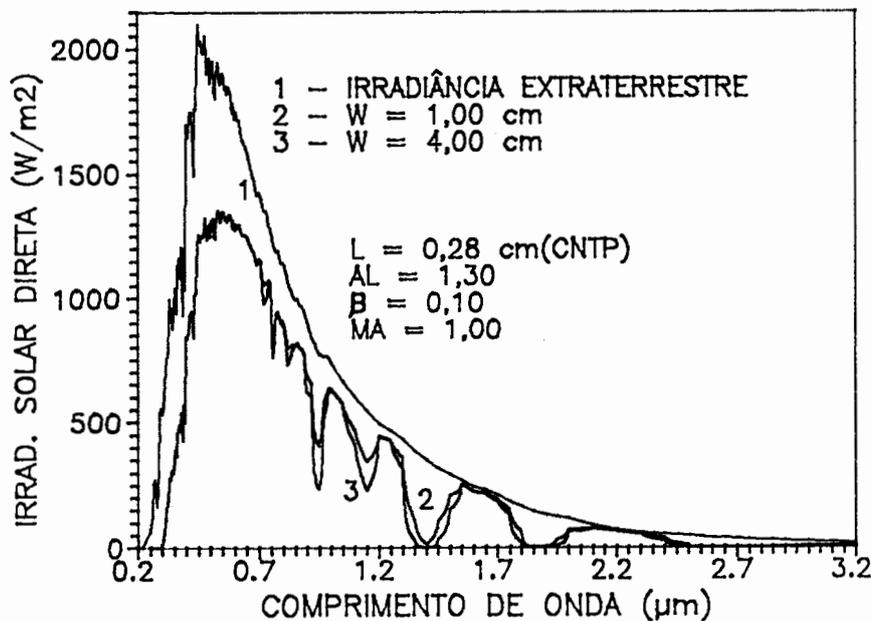


Figura 3.5. Variação da irradiância espectral solar direta numa superfície horizontal em função da quantidade de água precipitável.

superfície horizontal. As principais bandas de absorção ocorrem na região do infravermelho e algumas bem mais fracas aparecem no visível, portanto a maior influência da água precipitável ocorre na região do infravermelho. O azul esverdeado do mar é devido a fraca absorção da água na banda do vermelho.

3.4.5. Transmittância devido ao ozônio

Os coeficientes de atenuação monocromáticos para o

ozônio na região do ultravioleta e visível foram medidos por Vigroux in [8] de tal forma que pudessem ser usados na lei de Bouguer:

$$\tau_{o_\lambda} = \exp(-k_{o_\lambda} L m_o) \quad (3.23)$$

onde k_{o_λ} é o coeficiente de atenuação devido a absorção do ozônio, L é a quantidade de ozônio em $\text{cm}(\text{CNTP})$ e m_o é a massa ótica relativa de ozônio.

Os coeficientes de atenuação foram obtidos para 18°C . No entanto o ozônio se encontra na estratosfera, onde a temperatura pode ser menor que -40°C . Por causa da diferença

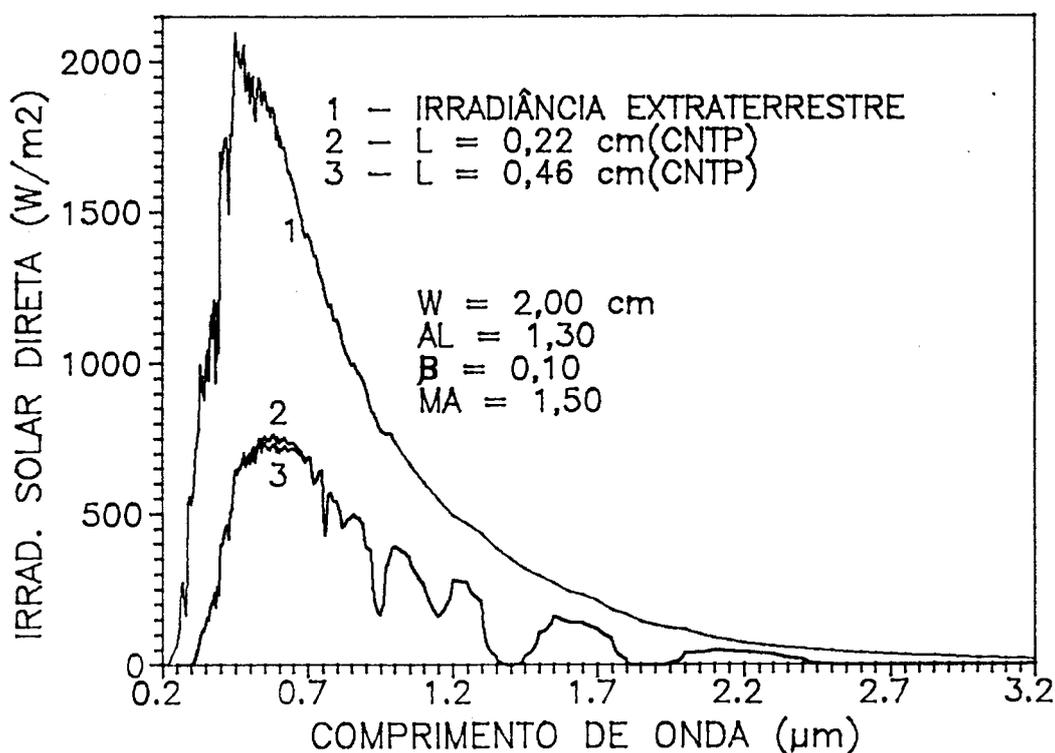


Figura 3.6. Variação da irradiância espectral solar direta numa superfície horizontal em função da quantidade de ozônio.

entre as temperaturas há um erro de aproximadamente 3% na medida dos coeficientes de atenuação.

A Figura 3.6 mostra a influência da variação da quantidade de ozônio sobre a irradiância espectral solar direta numa superfície horizontal e esta está confinada na região do

visível e ultravioleta. Nota-se que quanto maior a espessura da camada de ozônio mais radiação solar é atenuada.

3.4.6. Transmissão devido a massa ótica relativa de ar

Na Figura 3.7 apresenta-se a variação da irradiância espectral solar direta numa superfície horizontal em função da variação da massa ótica relativa de ar. Com o acréscimo da massa ótica relativa de ar ocorre um decréscimo da irradiância solar, este decréscimo é relativamente maior na região do ultravioleta e visível, fazendo com que o pico se desloque em direção a comprimentos de onda mais longos. Por causa disto é que o Sol aparece avermelhado quando está próximo ao horizonte. Também nota-se que a massa ótica relativa de ar é o parâmetro atmosférico que mais influencia a irradiância solar direta.

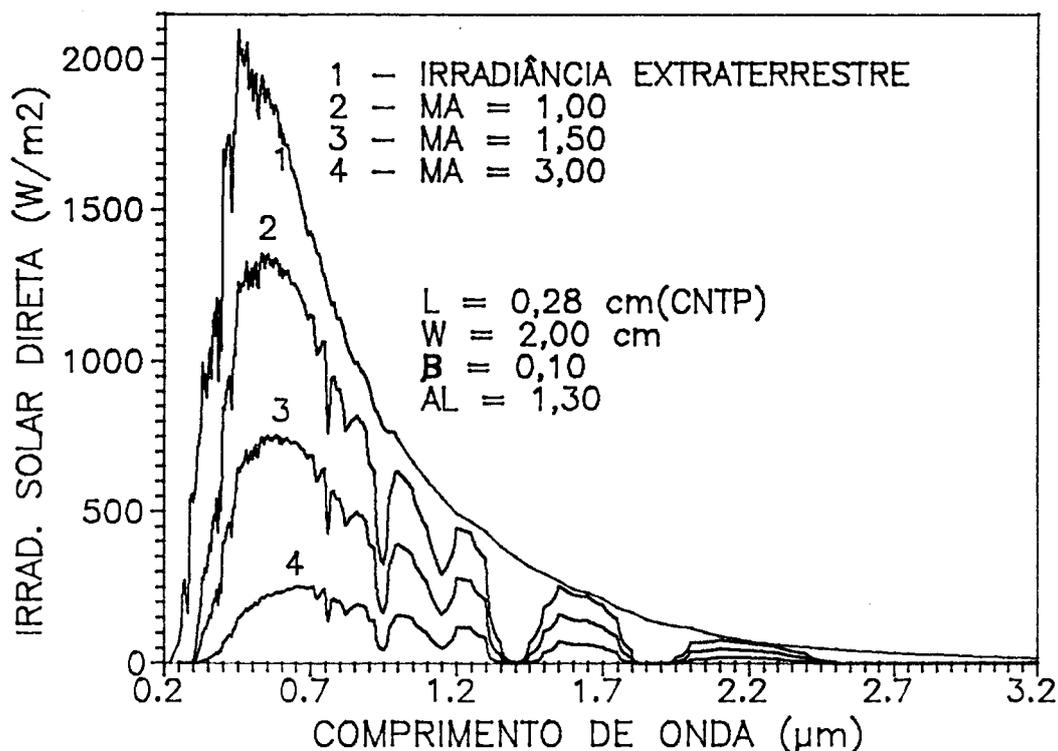


Figura 3.7. Variação da irradiância espectral solar direta numa superfície horizontal em função da massa ótica relativa de ar.

A transmissão monocromática devido a todos os componentes da atmosfera é:

$$\tau_{\lambda} = \tau_{r\lambda} \tau_{a\lambda} \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{v\lambda} \quad (3.24)$$

e

$$I_{n\lambda} = I_{0n\lambda} \tau_{\lambda} \quad (3.25)$$

onde $I_{0n\lambda}$ é a irradiância espectral solar extraterrestre obtida pelo World Radiation Center (WRC) [6] para uma distância média Terra-Sol.

A absorção na região do infravermelho é devido principalmente ao vapor de água e mistura uniforme de gases. Na região do ultravioleta e visível, o ozônio, espalhamento Rayleigh e aerossóis controlam a atenuação da radiação direta.

3.5 Irradiância espectral solar difusa

Quando a radiação solar penetra na atmosfera terrestre, incidindo numa partícula ou molécula, uma parte é espalhada e outra absorvida. A quantidade da radiação solar espalhada forma a radiação solar difusa, que é parcialmente refletida de volta para o espaço. Isto se processa da seguinte forma: a radiação direta incide numa partícula ou molécula, uma parte é espalhada e outra absorvida, a parte restante incide novamente em outras moléculas ou partículas ocorrendo assim um espalhamento contínuo. Em geral, metade da radiação espalhada chega na terra. A maior quantidade da radiação difusa é gerada no primeiro espalhamento, podendo-se fazer a análise somente no primeiro espalhamento e obter resultados satisfatórios.

No primeiro espalhamento Rayleigh a radiação difusa é dada por:

$$1 - \tau_{r\lambda}$$

e por aerossóis é:

$$1 - \tau_{a\lambda}$$

onde $\tau_{a\lambda}$ é a transmitância devido ao espalhamento e absorção. Por ser difícil separar a quantidade espalhada da absorvida pelos aerossóis é definido o albedo de espalhamento simples, W_0 , que é a

razão entre a radiação espalhada pelos aerossóis e a atenuação total devido aos aerossóis para o primeiro espalhamento. Com esta definição, a radiação solar espalhada pelos aerossóis é:

$$W_0 (1 - \tau_{a\lambda})$$

O albedo de espalhamento simples depende da forma, tamanho e propriedades óticas dos aerossóis, por causa disso a determinação de W_0 é muito difícil. É comum usar um valor independente do comprimento de onda da radiação solar, usualmente entre 0,70 e 1,00. Para áreas industriais ou urbanas $W_0 \approx 0,6$ e para áreas agrícolas $W_0 \approx 0,9$, pois partículas pequenas encontradas nos meios rurais espalham mais que aquelas nas áreas industriais. Em geral, a absorção por aerossóis é desconsiderada e W_0 torna-se igual a 1.

Assumindo $W_0 = 1$ e considerando uma atmosfera onde o espalhamento Rayleigh e os aerossóis influem homogeneamente, a quantidade atenuada é:

$$\tau_{ma\lambda} (1 - \tau_{r\lambda} \tau_{a\lambda})$$

onde $\tau_{ma\lambda}$ é a transmitância monocromática devido a absorção molecular.

Por terem diferentes características de espalhamento é conveniente separar o espalhamento Rayleigh do espalhamento por aerossóis.

A radiação difusa chegando na superfície da Terra e a radiação direta são parcialmente refletidas, num processo contínuo. Estas múltiplas reflexões contribuem na radiação difusa que chega na superfície terrestre.

A irradiância espectral solar difusa numa superfície horizontal é:

$$I_{d\lambda} = I_{dr\lambda} + I_{da\lambda} + I_{dm\lambda} \quad (3.26)$$

onde $I_{dr\lambda}$ é a irradiância espectral solar difusa devido ao espalhamento Rayleigh, $I_{da\lambda}$ é a irradiância espectral solar

difusa devido aos aerossóis e I_{dm_λ} é a irradiância espectral difusa devido às múltiplas reflexões.

3.5.1. Irradiância espectral solar difusa devido ao espalhamento Rayleigh

A quantidade de radiação difusa devido ao espalhamento Rayleigh da irradiância $I_{0\lambda} \cos \theta_z$ em uma superfície horizontal no topo da atmosfera é:

$$I_{0\lambda} \cos \theta_z \tau_{ma_\lambda} \tau_{a_\lambda} (1 - \tau_{r_\lambda}) \quad (3.27)$$

Assumindo que metade da quantidade acima foi dirigida para a terra, a Equação 3.27 torna-se:

$$I_{dr_\lambda} = I_{0\lambda} \cos \theta_z \tau_{ma_\lambda} \tau_{a_\lambda} (0,5 (1 - \tau_{r_\lambda})) \quad (3.28)$$

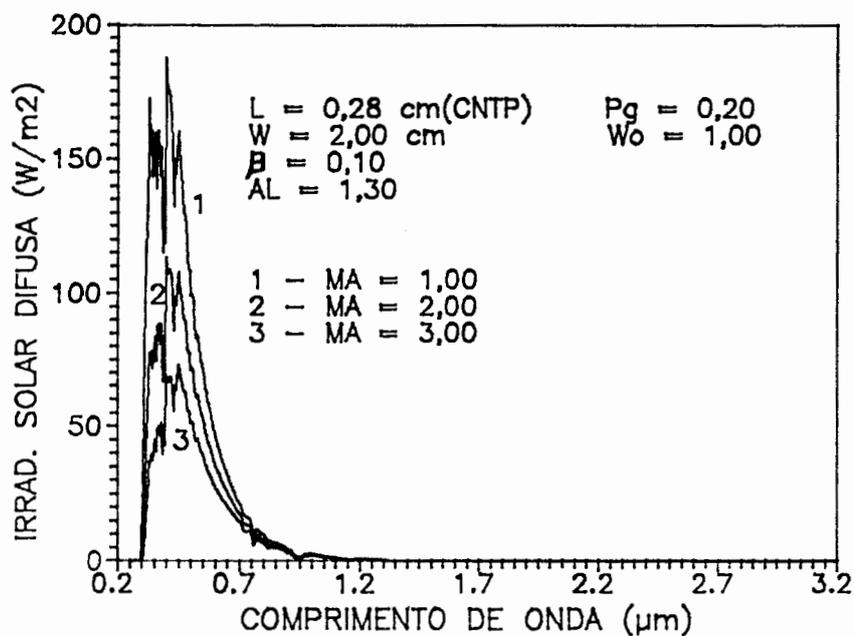


Figura 3.8. Variação da irradiância espectral solar difusa devido ao espalhamento Rayleigh numa superfície horizontal em função da massa ótica relativa de ar.

Estudos indicam que esta aproximação é razoável para

comprimentos de onda maiores que $0,50 \mu\text{m}$ e para comprimentos de onda mais curtos um pouco menos que a metade é dirigida para a superfície terrestre, por causa do espalhamento múltiplo. A Equação 3.28 foi obtida empiricamente e apresenta boa precisão para $\theta_z < 60^\circ$.

O efeito da absorção da luz difusa é pequeno e ocorre principalmente no ultravioleta e parte da região do visível e aumenta com o aumento do ângulo de zênite.

Na Figura 3.8 aparece a variação da irradiância espectral solar difusa devido ao espalhamento Rayleigh em função da massa de ar. Pode-se verificar que o pico da curva desloca-se em direção a comprimentos de onda mais longos e que ocorre um decréscimo da irradiância com o acréscimo da massa de ar. No estudo da irradiância espectral direta o espalhamento Rayleigh podia ser desprezado para $\lambda > 1 \mu\text{m}$ e agora pode ser verificado o mesmo na Figura 3.8.

3.5.2. Irradiância espectral solar difusa devido ao espalhamento por aerossóis

Quando $I_{0\lambda} \cos \theta_z$ é a irradiância incidente numa superfície horizontal no topo da atmosfera, a quantidade total de radiação difusa espectral devido ao espalhamento por aerossóis, é:

$$I_{d\lambda} = I_{0\lambda} \cos \theta_z \tau_{m\lambda} \tau_{r\lambda} (W_0 (1 - \tau_{a\lambda})) \quad (3.29)$$

Somente a porção que é dirigida para a superfície terrestre interessa. Por isso é preciso especificar a taxa de radiação espalhada na direção da superfície terrestre em relação a radiação total espalhada devido aos aerossóis:

$$F_c = \frac{\text{radiação espalhada na direção da terra pelos aerossóis}}{\text{radiação total espalhada pelos aerossóis}}$$

F_c depende do tamanho e forma das partículas e do comprimento de onda, sendo portanto, um fator difícil de se determinar. Robinson [6] determinou os valores de F_c , para a Ilha Britânica, como uma função do ângulo de zênite, os quais podem ser estendidos para

este caso. A Equação 3.29 torna-se:

$$I_{da,\lambda} = I_{on,\lambda} \cos \theta_z \tau_{ma,\lambda} \tau_{r,\lambda} (F_c W_o (1 - \tau_{a,\lambda})) \quad (3.30)$$

A Figura 3.9 mostra que a irradiância espectral solar difusa numa superfície horizontal devido aos aerossóis é mais atenuada para massas óticas relativas de ar maiores e estende-se para comprimentos de onda mais longos do que a irradiância espectral solar difusa gerada pelo espalhamento Rayleigh. A irradiância difusa gerada pelos aerossóis é uma forte componente, pois boa parte desta irradiância vem de uma área anular em torno

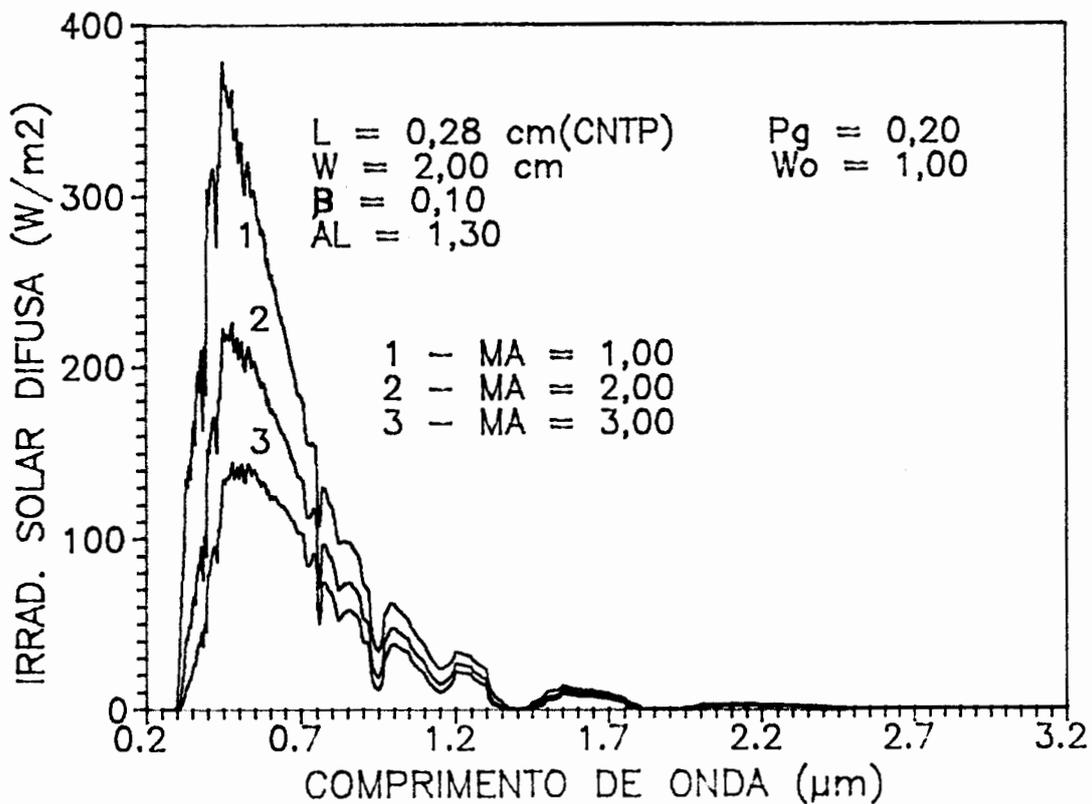


Figura 3.9. Variação da irradiância espectral solar difusa devido ao espalhamento por aerossóis numa superfície horizontal em função da massa ótica relativa de ar.

do Sol, que é chamada de radiação circumsolar. O tamanho da área anular varia com a quantidade e tamanho dos aerossóis existentes na atmosfera.

3.5.3. Irradiância espectral solar difusa devido às múltiplas reflexões

O albedo de uma superfície é a taxa de radiação refletida em relação a radiação incidente. O albedo da atmosfera terrestre é a quantidade de radiação difusa refletida de volta para o espaço em relação a radiação incidente nela. Uma aproximação para uma atmosfera sem nuvens é:

$$\rho_{a\lambda} = \tau_{ma\lambda} (0,5 (1 - \tau_{r\lambda}) \tau_{a\lambda} + (1 - F_c) W_0 (1 - \tau_{a\lambda}) \tau_{r\lambda} \quad (3.31)$$

O primeiro termo do lado direito representa o albedo devido ao espalhamento Rayleigh e o segundo devido ao espalhamento por aerossóis. $1-F_c$ é a fração da radiação difusa devido ao espalhamento por aerossóis refletida de volta para o espaço. O ângulo de incidência da radiação varia de 0° a 90° , tornando a determinação do albedo terrestre difícil. É comum assumir um ângulo de incidência médio de 60° , o qual corresponde a uma massa de ar igual a 1,9.

O albedo da atmosfera é maior para menores comprimentos de onda, porque mais energia é espalhada. Também aumenta com o coeficiente de turbidez de Angström (β) e AL. Maiores valores de AL significam uma quantidade maior de pequenas partículas, as quais espalham mais. O albedo terrestre também é difícil de tratar, principalmente a sua distribuição espectral, devido a diversidade de elementos que podem constituir a região próxima do receptor, como vegetação, tipo de terra, areia, neve, edifícios, etc. e pela desigual refletância destes no solo para diversas posições do Sol. Na falta de melhores modelos, o albedo terrestre pode ser caracterizado por um valor médio que representa a refletância média hemisférica do solo.

Considerando que o albedo terrestre é PG e que produz uma reflexão difusa isotrópica perfeita, isto é, a radiação espalhada tem uma intensidade uniforme em todas as direções e

$$Q_{\lambda} = (I_{dr_{\lambda}} + I_{da_{\lambda}}) + I_{n_{\lambda}} \cos \theta_z \quad (3.32)$$

é a irradiância difusa e direta numa superfície horizontal, a quantidade de radiação difusa $Q_\lambda PG$ é refletida pela terra, parte desta é refletida de volta pela atmosfera, formando-se assim um processo de múltiplas reflexões, como mostra a Figura 3.10. A radiação é continuamente atenuada em cada impacto.

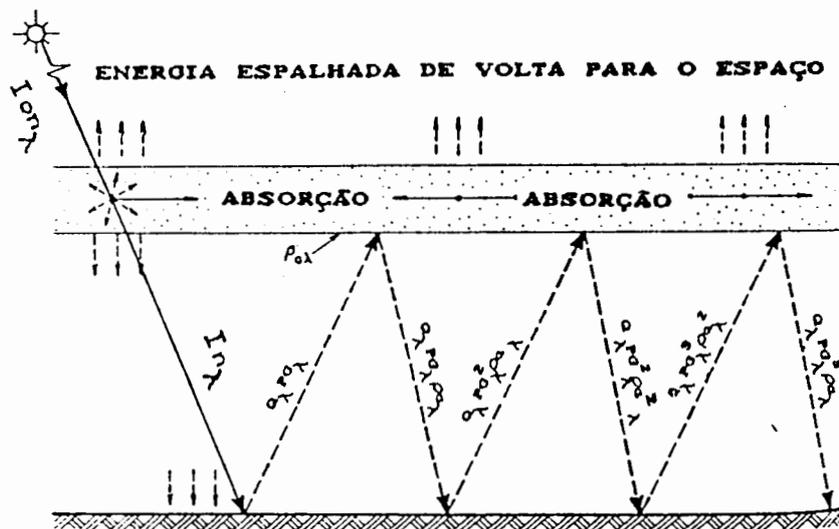


Figura 3.10. Processo de múltiplas reflexões.

A irradiância devido as múltiplas reflexões, como mostra a Figura 3.10, é:

$$I_{dm_\lambda} = Q_\lambda (PG \rho_{a_\lambda} + PG^2 \rho_{a_\lambda}^2 + PG^3 \rho_{a_\lambda}^3 + \dots)$$

ou

$$I_{dm_\lambda} = Q_\lambda PG \rho_{a_\lambda} / (1 - PG \rho_{a_\lambda}) \quad (3.33)$$

O valor de PG geralmente usado é 0,20 (0,70, para um local coberto de neve). A Figura 3.11 mostra como varia a irradiância espectral solar difusa numa superfície horizontal devido às múltiplas reflexões em função do albedo terrestre e coeficiente de turbidez de Angstrom. Para um local com neve a irradiância devido às múltiplas reflexões é bem maior do que para $PG = 0,20$. Também nota-se que para baixos valores de β a I_{dm_λ} é maior para comprimentos de onda menores que $0,50 \mu m$ e para altos valores de β a I_{dm_λ} é maior para comprimentos de onda maiores que $0,50 \mu m$, o que provoca um deslocamento do pico da curva em direção a comprimentos de onda mais longos com o aumento de β .

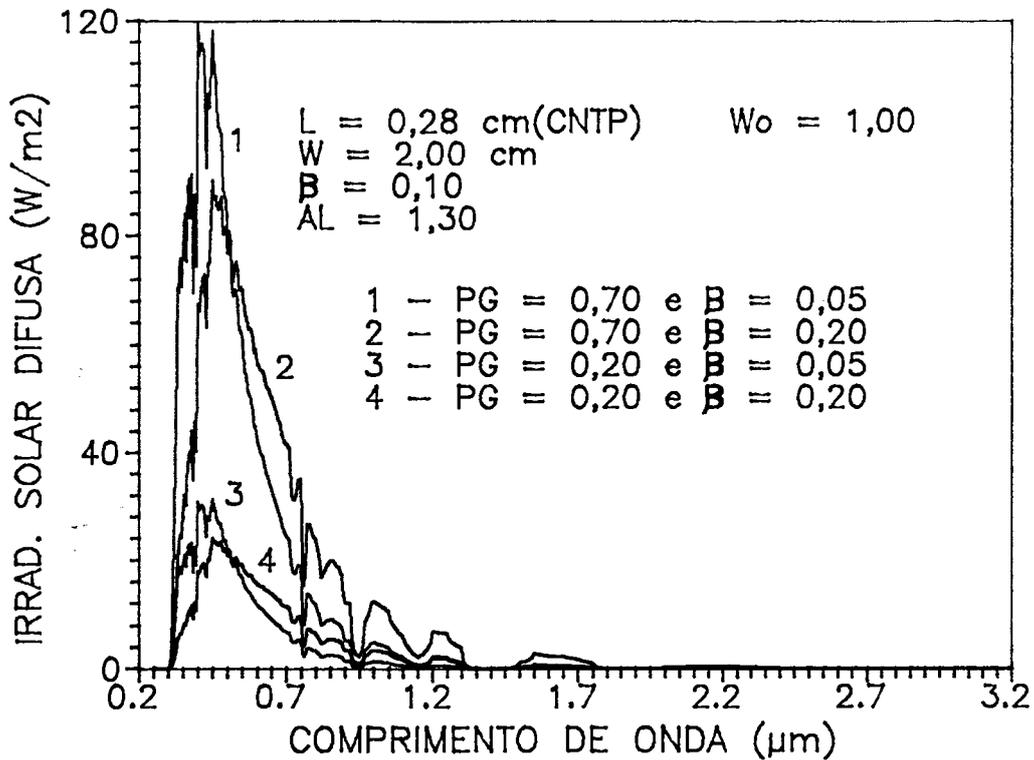


Figura 3.11. Variação da irradiância espectral solar difusa devido às múltiplas reflexões numa superfície horizontal em função do albedo terrestre e coeficiente de turbidez de Angström.

A irradiância espectral difusa numa superfície horizontal é:

$$I_{d\lambda} = I_{dr\lambda} + I_{da\lambda} + I_{dm\lambda}$$

ou

$$I_{d\lambda} = (I_{dr\lambda} + I_{da\lambda}) (1 / (1 - PG \rho_{a\lambda})) + I_{n\lambda} \cos \theta_z (PG \rho_{a\lambda} / (1 - PG \rho_{a\lambda}))$$

$$I_{d\lambda} = (I_{dr\lambda} + I_{da\lambda} + I_{n\lambda} \cos \theta_z PG \rho_{a\lambda}) (1 / (1 - PG \rho_{a\lambda})) \quad (3.34)$$

Podemos examinar o efeito da variação dos parâmetros atmosféricos, como massa ótica relativa de ar, coeficiente de turbidez de Angstrom, AL e albedo terrestre, sobre a irradiância espectral solar difusa. A Figura 3.12 mostra que o acréscimo da massa ótica relativa de ar provoca um decréscimo da irradiância difusa, pois quanto maior for o ângulo de zênite menor será a irradiância. Também verifica-se um deslocamento do pico da curva

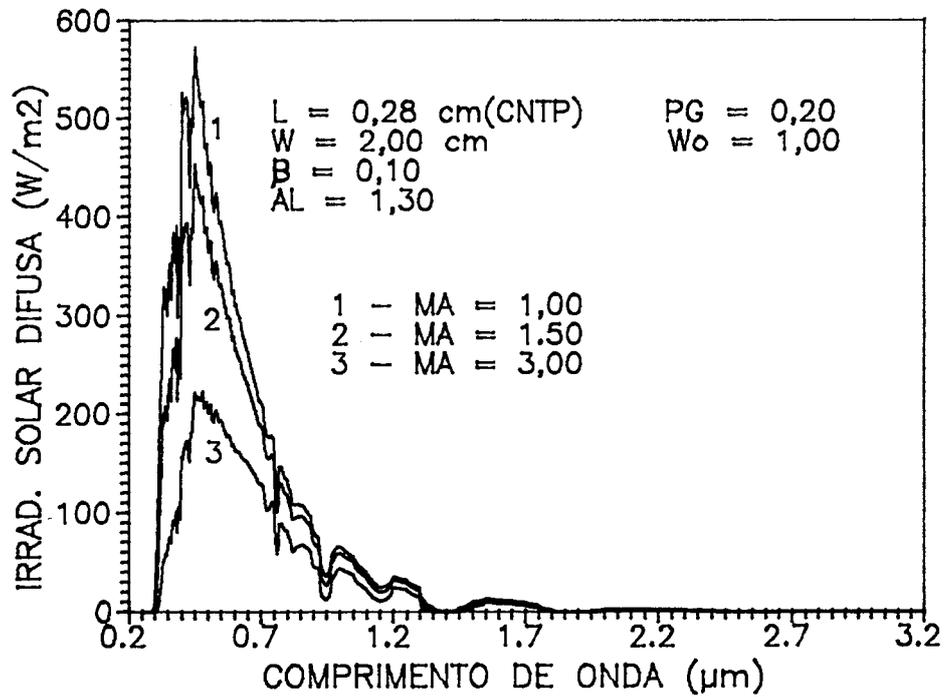


Figura 3.12. Variação da irradiância espectral solar difusa numa superfície horizontal em função da massa ótica de ar.

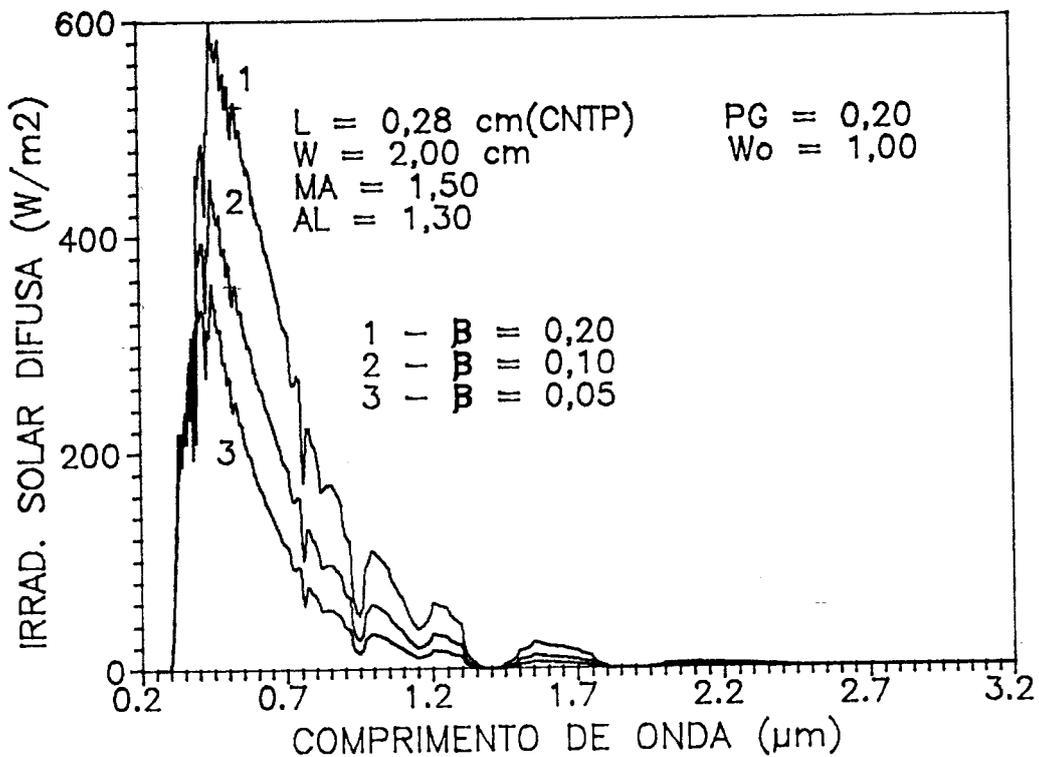


Figura 3.13. Variação da irradiância espectral solar difusa numa superfície horizontal em função do coeficiente de Angström.

em direção a comprimentos de onda mais longos. O efeito da variação do β sobre a irradiância difusa é mostrado na Figura 3.13. Nota-se que quanto menor o valor de β , menor é a irradiância, porque quanto menor for a quantidade de aerossóis presentes na atmosfera, menor será a quantidade de radiação espalhada. Também verifica-se uma maior atenuação na região do visível e infravermelho com o decréscimo do valor de β . Um decréscimo no valor de AL provoca maior atenuação da irradiância espectral solar difusa, como mostra a Figura 3.14. Isto ocorre porque quanto maior for o valor de AL maior será a quantidade de aerossóis pequenos em relação aos de tamanho maior e estes espalham mais radiação. Novamente nota-se uma maior influência na região do visível.

O efeito da variação do albedo terrestre sobre a irradiância espectral solar difusa é mostrado na Figura 3.15. Nota-se um essencial acréscimo da irradiância com o acréscimo do albedo terrestre. Na Figura 3.16 pode-se comparar a $I_{dr\lambda}$, $I_{da\lambda}$ e $I_{dm\lambda}$. A componente devido às múltiplas reflexões é a menor e a irradiância solar difusa devido aos aerossóis é a maior. A $I_{dm\lambda}$ depende de β e PG, enquanto que a $I_{da\lambda}$ depende somente de β .

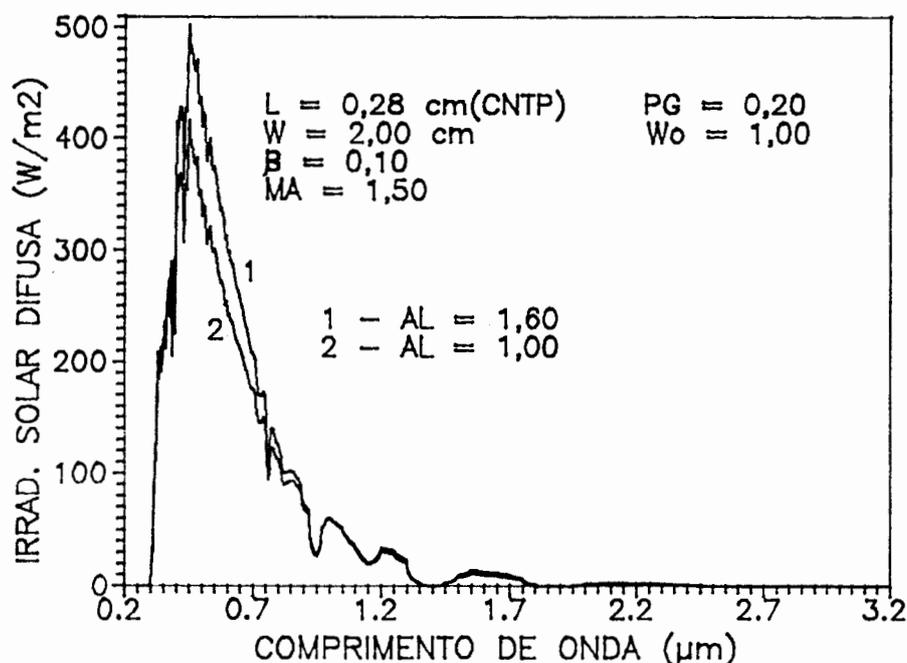


Figura 3.14. Variação da irradiância espectral solar difusa numa superfície horizontal em função do AL.

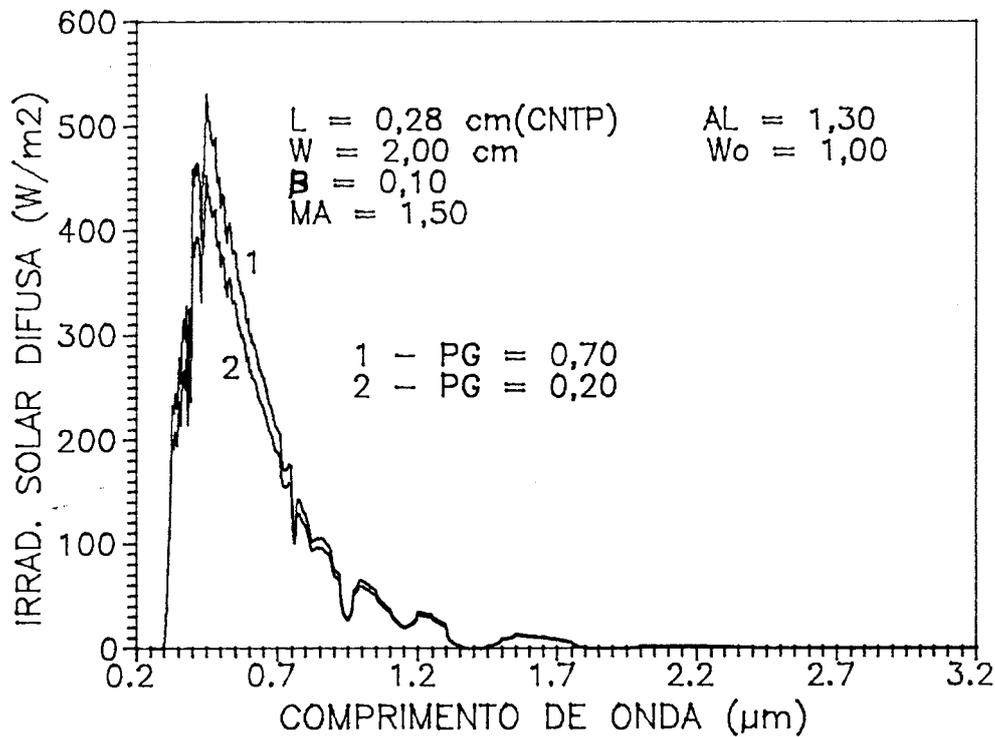


Figura 3.15. Variação da irradiância espectral solar difusa numa superfície horizontal em função do albedo terrestre.

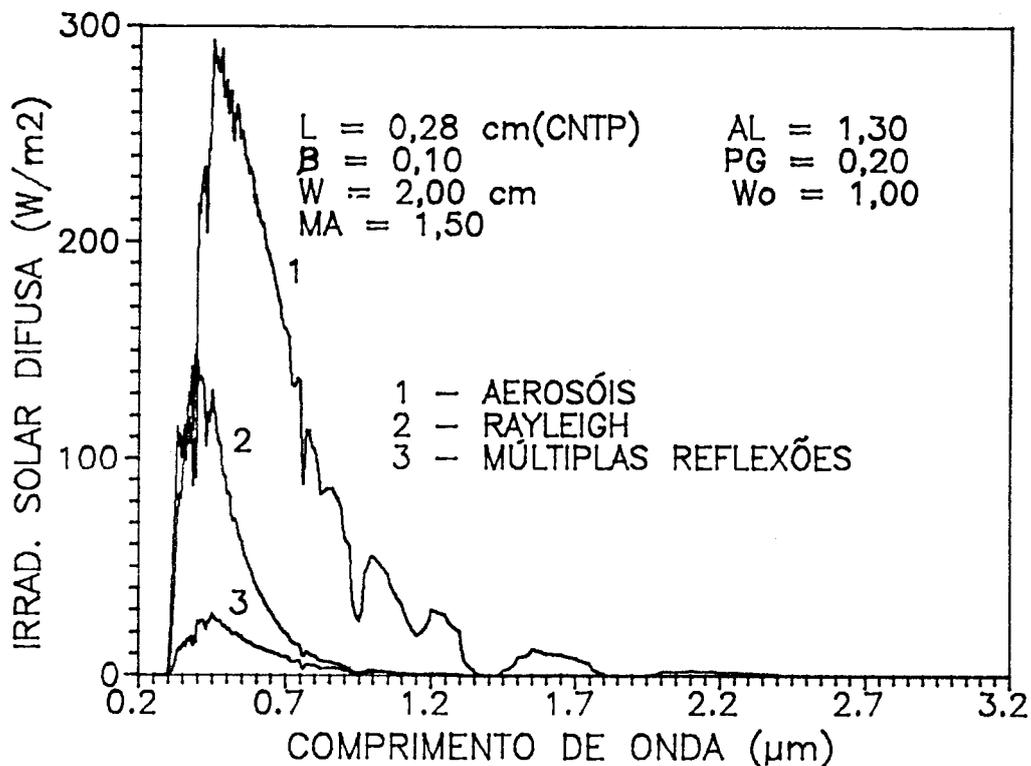


Figura 3.16. Irradiância espectral solar difusa numa superfície horizontal.

3.6. Irradiância espectral solar global

A irradiância espectral solar global é a irradiância total (direta mais difusa) em uma superfície horizontal:

$$I_{\lambda} = I_{n_{\lambda}} \cos \theta_z + I_{d_{\lambda}}$$

ou

$$I_{\lambda} = (I_{dr_{\lambda}} + I_{da_{\lambda}} + I_n \cos \theta_z) (1 / (1 - PG \rho_{a_{\lambda}})) \quad (3.35)$$

A seguir, se analisa o efeito da variação dos parâmetros atmosféricos na irradiância espectral solar global e como esta influencia a resposta da célula de silício. Esta análise torna-se importante no desenvolvimento de medidores de radiação solar com células fotovoltaicas. A fim de construir os gráficos para poder analisar a influência dos parâmetros atmosféricos sobre a resposta da célula de silício, calculou-se a densidade espectral de corrente elétrica da célula, multiplicando a irradiância espectral solar global pela resposta espectral da célula de silício, como será mostrado mais adiante. Integrou-se a densidade espectral de corrente elétrica e a irradiância espectral solar, usando o método de integração de Simpson, a fim de conhecer qual a densidade de corrente total da célula de silício e a irradiância para determinados parâmetros atmosféricos. Repetiu-se as etapas acima variando um dos parâmetros e mantendo fixos os demais; construíram-se gráficos tendo como abscissa os parâmetros atmosféricos e como ordenada a razão entre a densidade de corrente da célula de silício e a irradiância solar incidente, que será denominada de resposta relativa da célula de silício. Considerou-se a resposta relativa da célula de silício igual a 100 para o menor valor do parâmetro atmosférico em questão e os demais em relação a este, por causa disto é que surge o termo relativa.

A Figura 3.17 mostra a influência da massa ótica relativa de ar sobre a irradiância espectral solar global e a resposta espectral da célula de silício. Com o decréscimo da massa ótica relativa de ar ocorre um decréscimo da irradiância solar, o que é obvio, pois quanto maior for a espessura da atmosfera, uma maior quantidade de irradiância é atenuada.

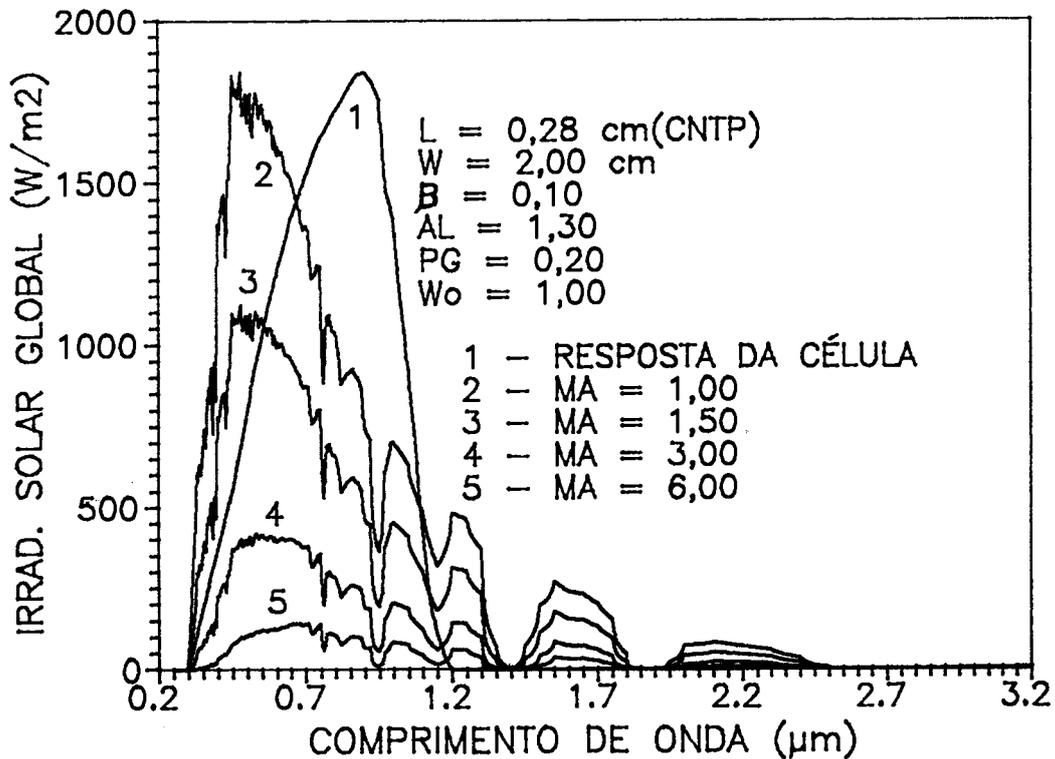


Figura 3.17. Variação da irradiância espectral solar global em função da massa ótica relativa de ar.

Nota-se um deslocamento do pico da curva em direção a comprimentos de onda mais longos, porque ocorre relativamente uma maior atenuação para comprimentos de onda mais curtos. É por causa disto que o pôr-do-sol torna-se avermelhado. Também é um fenômeno similar o amarelado das montanhas com neve vistas a uma certa distância. O efeito da variação da massa ótica relativa de ar sobre a resposta relativa da célula de silício pode ser verificada na Figura 3.18. Nota-se que a resposta relativa da célula cresce com o aumento da massa ótica relativa de ar. O acréscimo ocorre porque o pico da irradiância espectral solar se desloca em direção a comprimentos de onda mais longos, onde a sensibilidade da célula de silício é maior, quando a massa ótica relativa de ar cresce.

O efeito da variação da quantidade de água precipitável sobre a irradiância espectral solar global e a resposta espectral da célula de silício aparecem na Figura 3.19. Verifica-se que ocorre um decréscimo da irradiância solar com o acréscimo de W , principalmente concentrado na região do infravermelho. Na

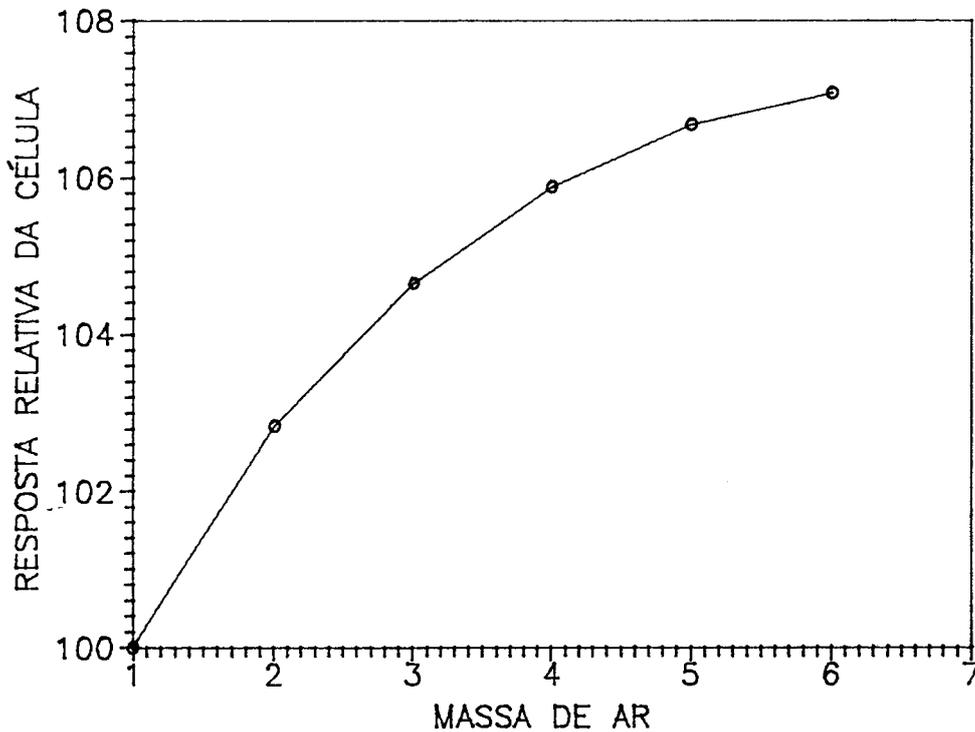


Figura 3.18. Influência da variação da massa ótica relativa de ar sobre a resposta relativa da célula de silício.

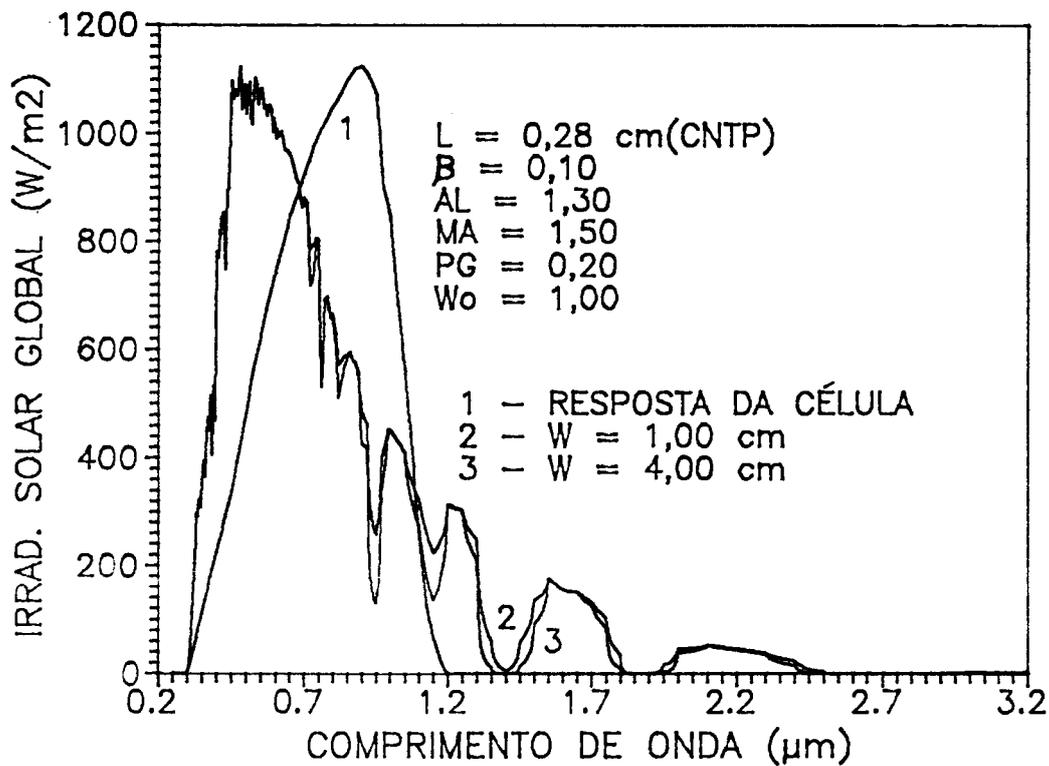


Figura 3.19. Variação da irradiância espectral solar global em função da quantidade de água precipitável.

Figura 3.20 aparece o efeito da variação da quantidade de água precipitável sobre a resposta relativa da célula de silício. O aumento da quantidade de água precipitável provoca um acréscimo na resposta relativa da célula de silício. Isto ocorre porque as maiores bandas de absorção da água se encontram onde a célula de silício possui baixa sensibilidade ou não é sensível.

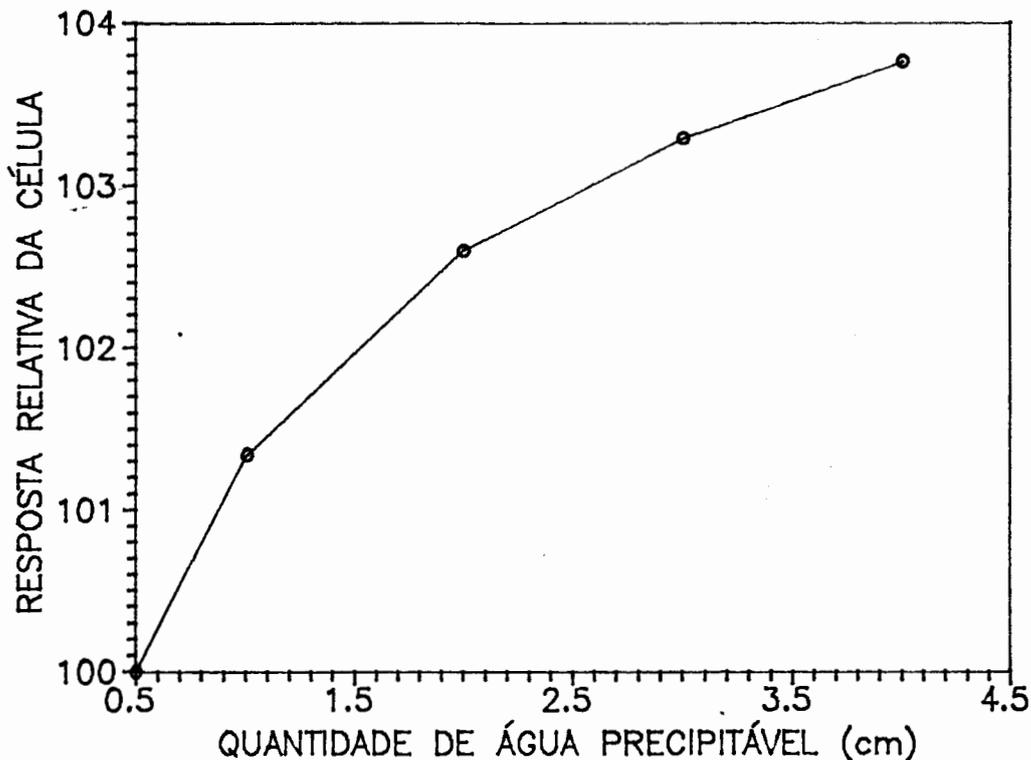


Figura 3.20. Influência da variação da quantidade de água precipitável sobre a resposta relativa da célula de silício.

A variação da irradiância espectral solar global em função do coeficiente de turbidez de Angstrom e a resposta espectral da célula de silício são mostradas na Figura 3.21. Observou-se que a irradiância espectral solar direta decresce com o acréscimo de β . Por outro lado, a irradiância espectral solar difusa cresce. O decréscimo na irradiância solar direta é bem maior que o acréscimo na irradiância solar difusa e a quantidade de irradiância direta é também maior. Conseqüentemente a irradiância espectral solar global decresce com o acréscimo de β . Na Figura 3.22 pode-se verificar o efeito da variação do AL sobre a irradiância espectral solar global. Nota-se que é muito pequeno

e principalmente confinado na região do ultravioleta e parte do visível. Um acréscimo de AL acarreta num acréscimo na irradiância solar difusa e um decréscimo na irradiância solar direta. Da mesma forma que o β , a irradiância espectral solar global apresenta um pequeno decréscimo com o acréscimo de AL.

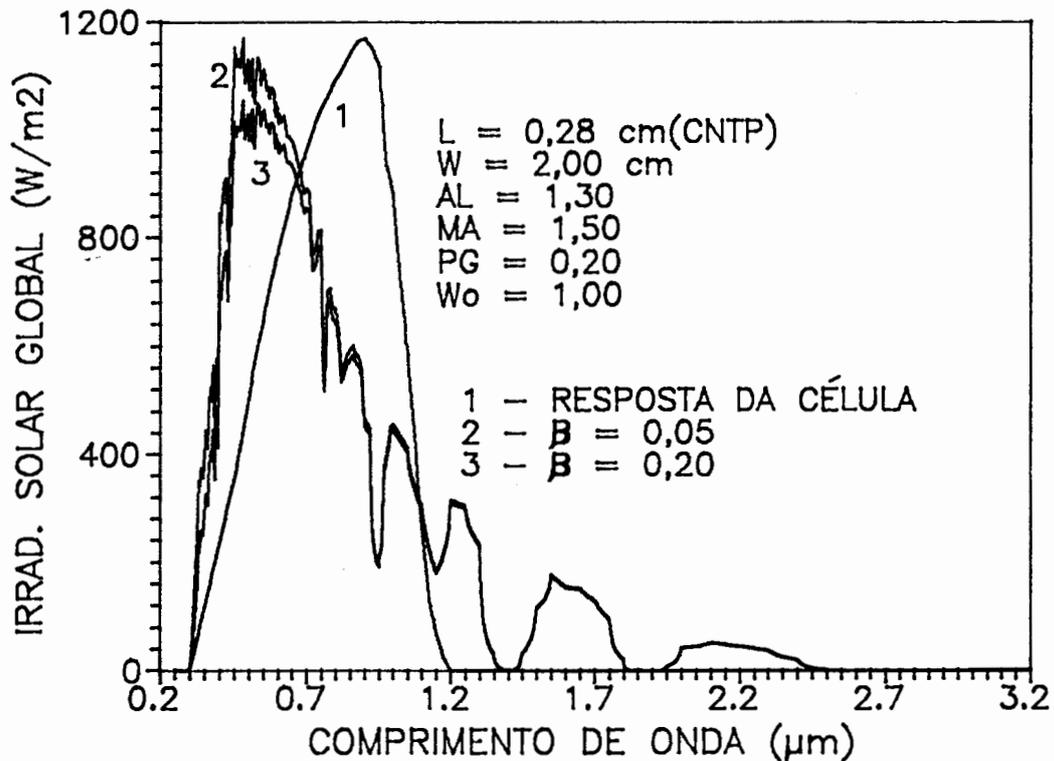


Figura 3.21. Variação da irradiância espectral solar global em função do coeficiente de turbidez de Angström.

Analisando a influência de β sobre a célula de silício, nota-se um acréscimo da resposta relativa da célula com o acréscimo do coeficiente de turbidez de Angström, como mostra a Figura 3.23. Este acréscimo ocorre porque β atenua principalmente na região do ultravioleta e parte do visível. A atenuação na região do ultravioleta e azul faz com que o pico do espectro solar sofra um pequeno deslocamento em direção a comprimentos de onda mais longos, onde a célula de silício é mais sensível. O mesmo ocorre com o acréscimo de AL, como aparece na Figura 3.24. Um maior valor de AL significa uma quantidade maior de aerossóis pequenos em relação aos grandes e como os aerossóis pequenos espalham mais, ocorre uma maior atenuação da irradiância solar na

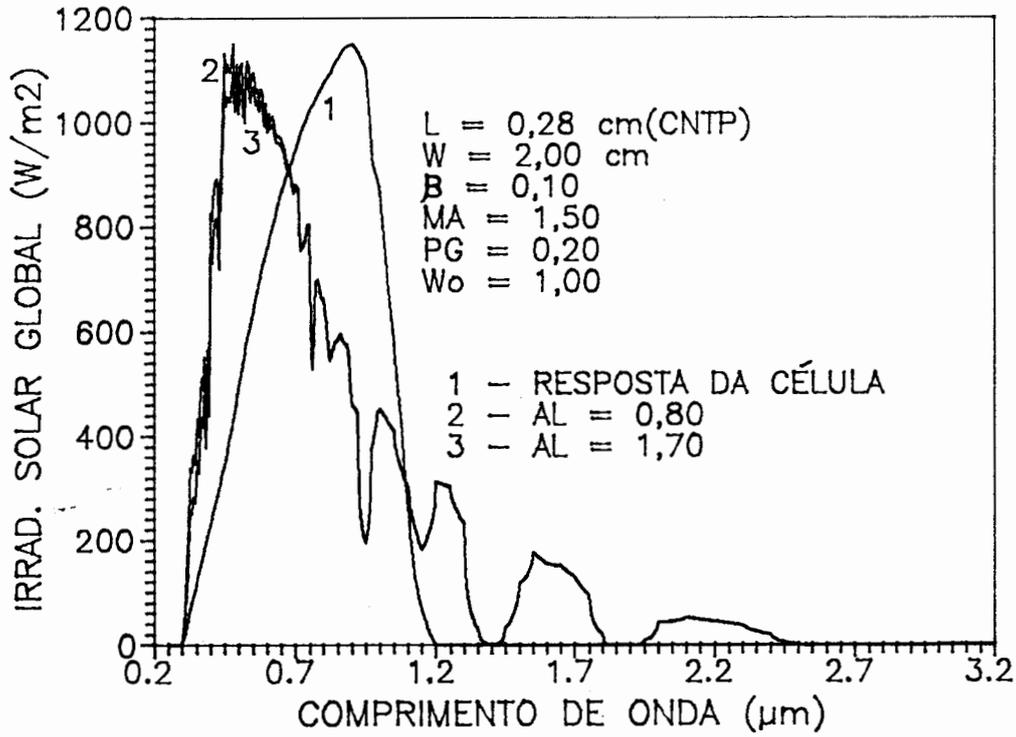


Figura 3.22. Variação da irradiância espectral solar global em função do AL.

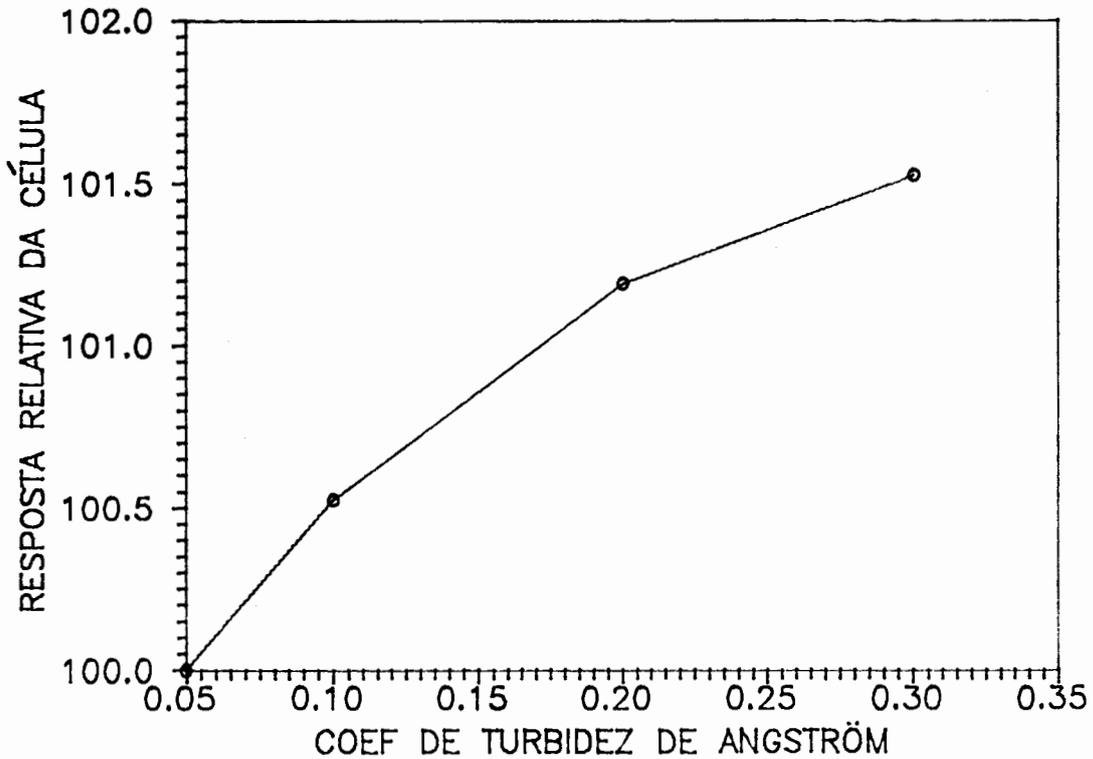


Figura 3.23. Influência da variação do coeficiente de turbidez de Angström sobre a resposta relativa da célula de silício.

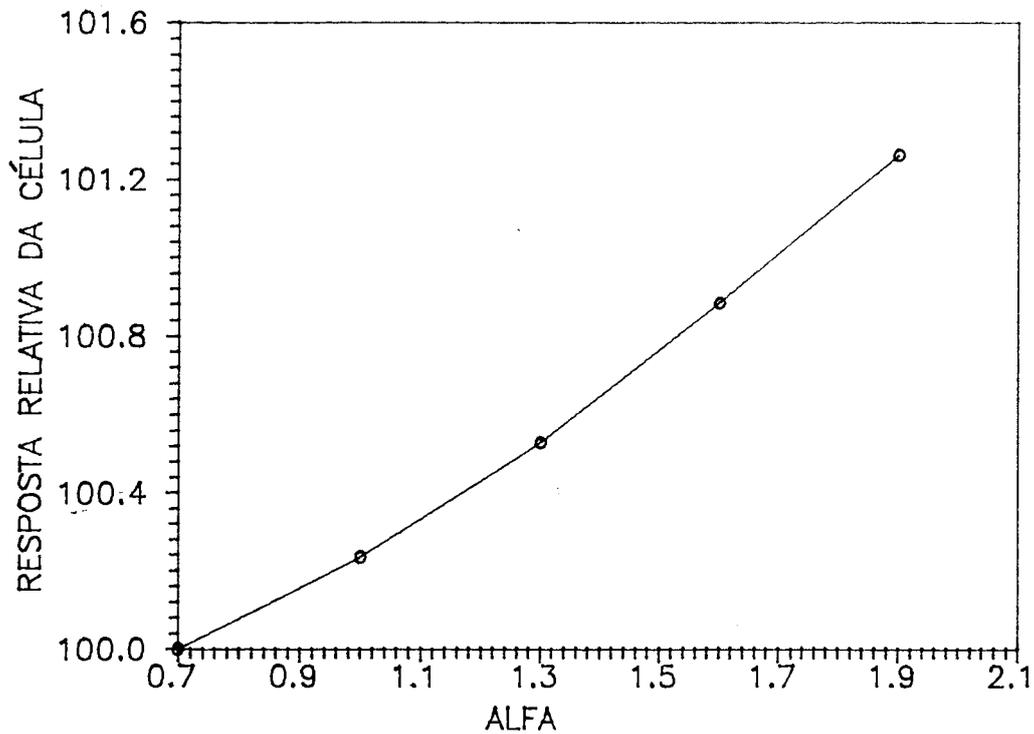


Figura 3.24. Influência da variação AL sobre a resposta relativa da célula de silício.

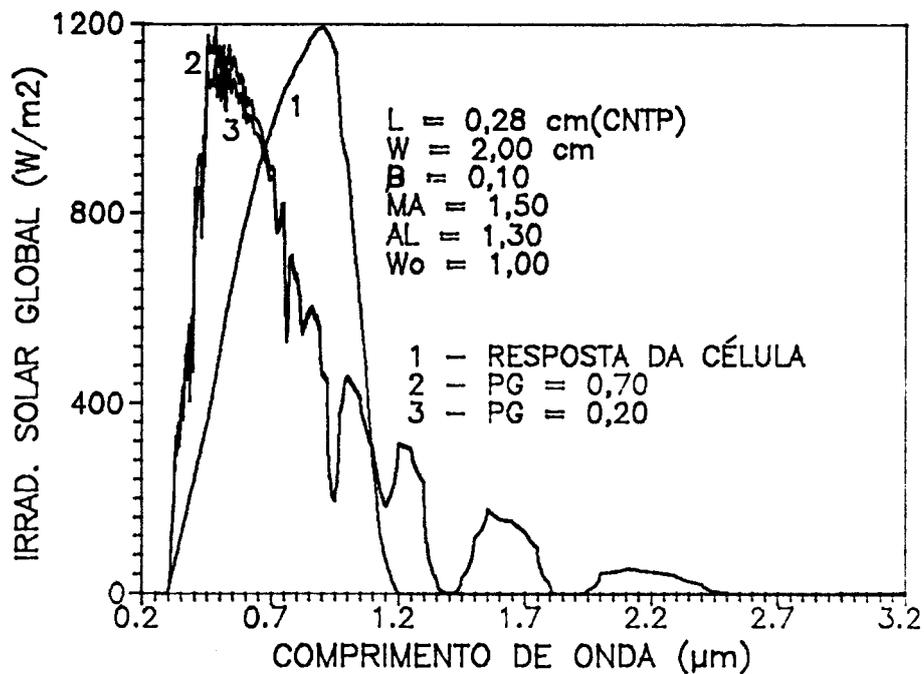


Figura 3.25. Variação da irradiância espectral solar global em função do albedo terrestre.

região do ultravioleta e visível, deslocando o pico do espectro

solar em direção a comprimentos de onda mais longos.

A influência do albedo terrestre sobre a irradiância espectral solar global e a resposta espectral da célula de silício são mostradas na Figura 3.25. Pode ser verificado que um acréscimo no albedo terrestre aumenta a irradiância solar, por causa das múltiplas reflexões. Nota-se que a mudança da irradiância solar é confinada para comprimentos de onda menores que $1 \mu\text{m}$, principalmente na região do ultravioleta e parte do visível. O efeito do albedo terrestre sobre a resposta relativa da célula de silício é muito pequeno, como mostra a Figura 3.26. Nota-se um decréscimo da resposta relativa da célula de silício em função da variação do albedo terrestre. Isso ocorre porque quanto maior for o albedo terrestre, maior será a quantidade de radiação solar na região do ultravioleta e azul, ocorrendo assim, um pequeno deslocamento do pico do espectro solar em direção a comprimentos de onda mais curtos, onde a resposta espectral da célula de silício é baixa.

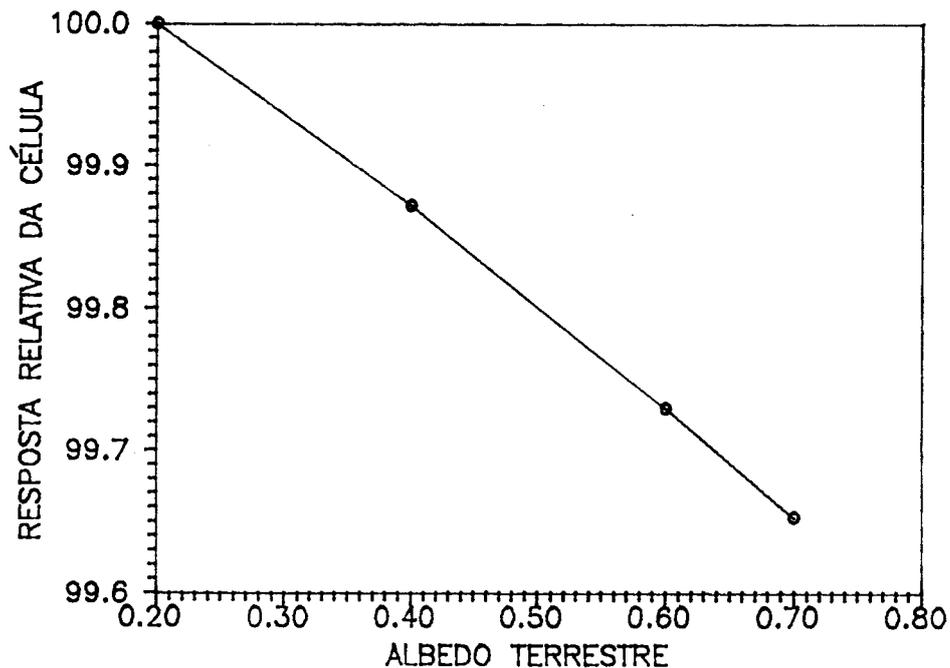


Figura 3.26. Influência da variação do albedo terrestre sobre a resposta relativa da célula de silício.

Um acréscimo na quantidade de ozônio gera um pequeno decréscimo na irradiância espectral solar global, que está

concentrado no ultravioleta e no pico da curva, como mostra a Figura 3.27. A influência da variação da camada de ozônio sobre a resposta relativa da célula de silício também é pequena e apresenta um decréscimo com o aumento da espessura da camada de ozônio, como mostra a Figura 3.28.

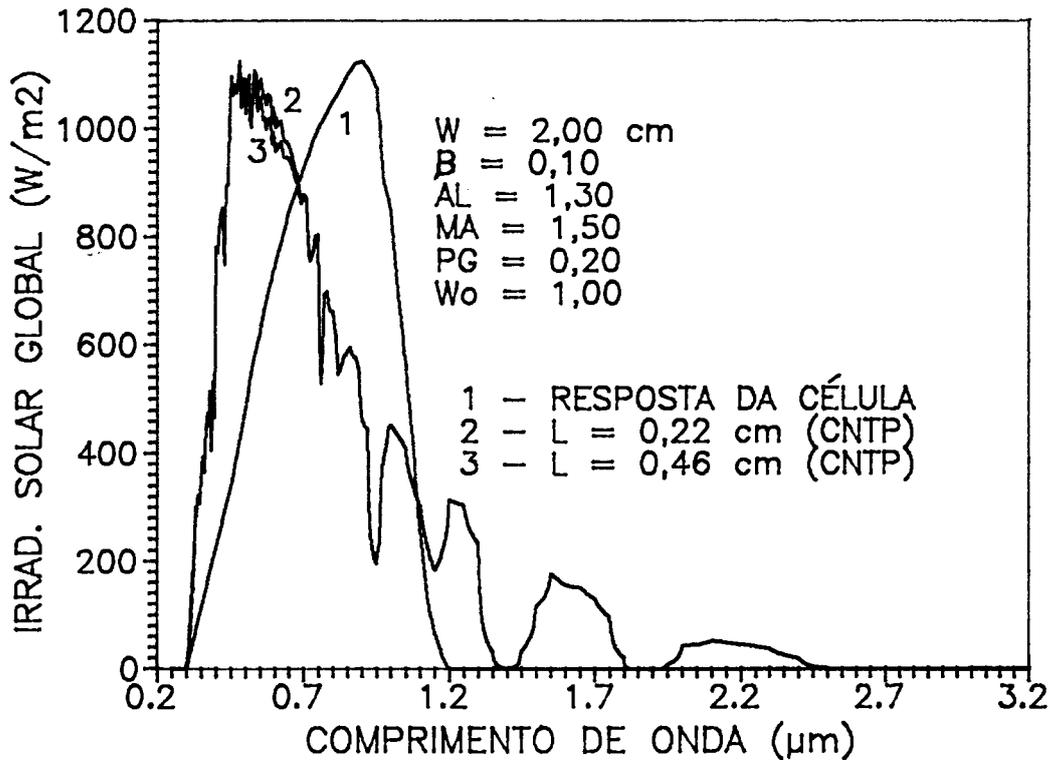


Figura 3.27. Variação da irradiância espectral solar global em função da quantidade de ozônio.

Na Figura 3.29 é feita uma comparação da irradiância espectral solar global, direta e difusa, para um grupo característico de parâmetros atmosféricos. Para comprimentos de onda maiores que $1,25 \mu\text{m}$ a irradiância global é praticamente composta pela componente direta, enquanto que para comprimentos de onda menores que $1,25 \mu\text{m}$ há uma contribuição da componente difusa.

O algoritmo usado para calcular a irradiância direta tem boa precisão. No entanto, a determinação da radiação difusa não é muito exata [6]. A quantidade da radiação direta que chega na superfície da terra é maior que a difusa e portanto a radiação global tem boa precisão.

As figuras que analisam o efeito da variação dos

parâmetros atmosféricos sobre a resposta relativa da célula de

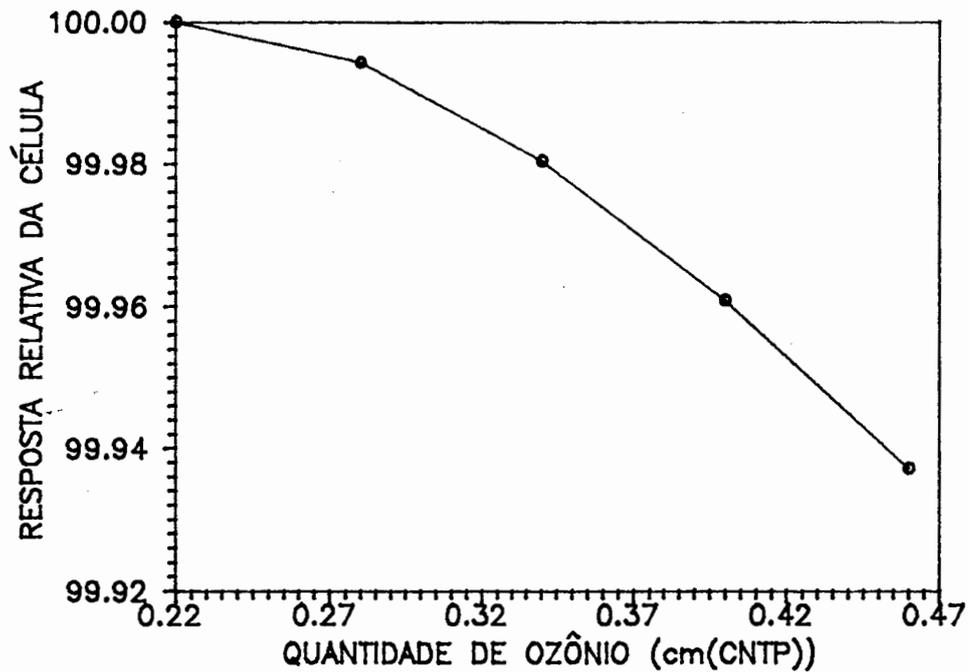


Figura 3.28. Influência da variação da quantidade de ozônio sobre a resposta relativa da célula de silício.

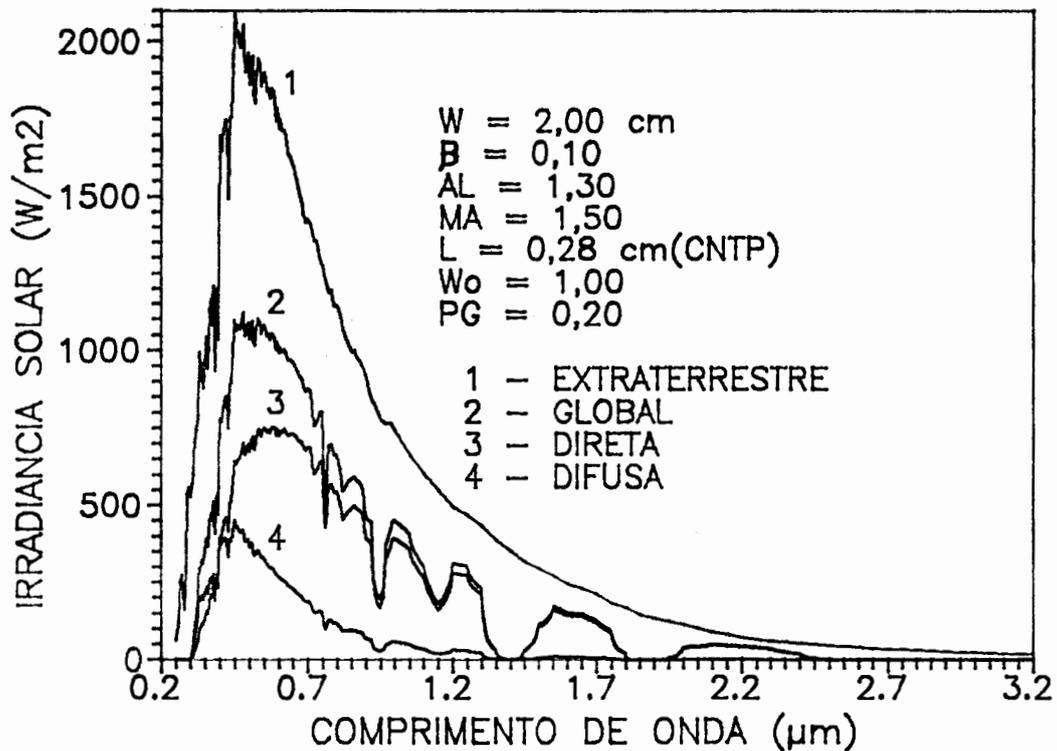


Figura 3.29. Irradiância espectral solar numa superfície horizontal.

silício, mostraram que uma correção espectral na resposta da célula, pode ser necessária para obter medidas da radiação solar com melhor precisão. A correção espectral pode ser feita usando filtros de absorção e corantes orgânicos luminescentes, como será visto no próximo capítulo.

4. CORREÇÃO DA RESPOSTA ESPECTRAL

4.1. Introdução

Um medidor de radiação solar, entre outras características, deve ter uma resposta independente do comprimento de onda da radiação solar incidente, que abranja a maior parte do espectro solar e resposta linear com a intensidade de radiação solar incidente. A corrente de curto-circuito da célula fotovoltaica de silício é linear com a intensidade de radiação incidente, mas a resposta espectral depende do comprimento de onda da radiação solar, de tal forma que a calibração é uma função da distribuição desta [8]. Acredita-se que fazendo uma correção espectral, com o objetivo de tornar a resposta espectral mais uniforme, seja possível usá-la para medir a radiação solar com melhor precisão. Esta correção pode ser feita com filtros óticos, que absorvem na região onde a célula de silício apresenta a maior sensibilidade. Na região onde a sensibilidade da célula de silício é baixa, a resposta desta pode ser realçada através do uso de corantes orgânicos luminescentes, os quais absorvem em uma banda e emitem em outra banda de comprimentos de onda mais longos, onde a célula de silício é mais sensível. Além de apresentar a resposta espectral não uniforme com o comprimento de onda, a banda de sensibilidade da célula de silício não abrange todo o espectro solar.

Portanto, acredita-se que usando corantes orgânicos luminescentes dissolvidos em meios sólidos como PMMA e filtros óticos de absorção colocados sobre a célula de silício de tal forma que haja um bom acoplamento ótico, torna-se possível obter uma resposta com menor dependência do comprimento de onda da radiação solar incidente e assim, construir um piranômetro fotovoltaico com boa precisão.

4.2. Corantes orgânicos luminescentes

Os corantes orgânicos são caracterizados por uma forte banda de absorção, centrada num comprimento de onda λ_a , no intervalo de 0,20 μm a 1,00 μm do espectro eletromagnético [9]. Tal propriedade é encontrada somente em compostos orgânicos que contêm ligações simples e duplas alternadas. A absorção da radiação pelos corantes orgânicos não pode ser obtida rigorosamente de sua própria estrutura molecular, devido a complexidade do problema mecânico-quântico, mas modelos razoavelmente simples foram encontrados, sendo possível explicar muitas absorções experimentais, no mínimo dentro de uma determinada classe de corantes orgânicos [10].

Os corantes orgânicos luminescentes têm a propriedade de emitirem uma parte significativa da radiação absorvida, em uma banda centrada num comprimento de onda λ_e mais longo do que λ_a . Isso ocorre porque após a absorção de um fóton, a molécula do corante orgânico luminescente relaxa vibracionalmente para um estado singlete excitado num tempo da ordem de pico segundos, ou mais lentamente para o estado triplete excitado. A molécula poderá relaxar para seu estado base segundo quatro processos principais: fluorescência do estado singlete excitado; fosforescência do estado triplete excitado; transferência direta ou não radioativa da excitação para uma molécula vizinha e conversão interna da excitação em vibração molecular. Os processos de fluorescência e fosforescência são combinados no termo luminescência e são dominantes [11].

Qualquer corante orgânico luminescente com uma estrutura completamente rígida e planar tem alta eficiência luminescente, isto é, emite quase totalmente a quantidade de radiação absorvida, como no caso da fluorescina. Outro exemplo é a rodamina 101 que apresenta uma eficiência quântica de luminescência de aproximadamente 100%, independente da temperatura [10]. Mas é possível que um corante orgânico luminescente com uma estrutura não rígida tenha também alta eficiência luminescente, como a rodamina 110 e rodamina 6G, as quais possuem os grupos amino móveis. Estes dois corantes orgânicos luminescentes em soluções alcoólicas têm uma eficiência

quântica luminescente de 85% e 95%, respectivamente, independente da temperatura. No entanto, a rodamina B apresenta eficiência luminescente no etanol dependente da temperatura. Para 25°C a eficiência quântica é aproximadamente 40% e aumenta para aproximadamente 100% se a temperatura é diminuída, mas cai somente um pouco se o etanol estiver em ebulição. Este efeito pode ser atribuído para a mobilidade do grupo dietilamino, que está relacionado com o acréscimo de temperatura [10].

A separação entre os comprimentos de onda correspondentes aos picos mais próximos de absorção e emissão é conhecido como deslocamento de Stokes. Na maior parte dos corantes orgânicos luminescentes ocorre uma sobreposição entre as bandas de emissão e absorção. Devido a esta sobreposição um fóton emitido pode ser reabsorvido pelas moléculas do mesmo tipo de corante. A reabsorção apresenta um elevado efeito, quando o caminho dos fótons é longo dentro do material dopado com o corante orgânico luminescente. Enquanto o fóton emitido viaja neste meio, há probabilidade de ser reabsorvido pelas moléculas do próprio corante. Se for reabsorvido pode ser novamente reemitido e assim por diante. Altas concentrações de corante orgânico luminescente também provoca um elevado efeito de reabsorção [11].

Ocorre redução da luminescência por causa da existência de impurezas. Enquanto o átomo está em seu estado de excitação, pode colidir com qualquer outro átomo da impureza. Pode ocorrer que a energia do átomo excitado seja transmitida à partícula com a qual se chocou e seja consumida em qualquer processo que ocorra nesta ou se transforme em calor [12]. Desta forma, parte dos átomos excitados perdem a possibilidade de participar na luminescência.

Idealmente, todos os fótons que são absorvidos poderiam ser emitidos em um comprimento de onda mais longo ou igual. A eficiência quântica interna é definida como o número de fótons emitidos pelo número de fótons absorvidos, ou seja, é a probabilidade de emissão dos fótons absorvidos. Para muitos materiais luminescentes a eficiência quântica pode aproximar-se de 100%, quando estão em baixas concentrações e em meios líquidos. Para concentrações usuais, onde o coeficiente de

absorção é suficientemente alto, a fim de absorver muita da radiação incidente, a eficiência quântica fica entre 70% a 90% [13]. O rubi (safira dopada com cromo) é um material luminescente atrativo por apresentar uma eficiência quântica próxima a 100% e um grande deslocamento de Stokes, quase não havendo sobreposição das bandas de absorção e emissão.

Os corantes orgânicos luminescentes típicos são polares e o limite de suas solubilidades em PMMA, que é apolar, é da ordem de 10^{-9} a 10^{-2} Molar (moles/litro). As concentrações usuais variam de 10^{-5} a 10^{-9} Molar [14]. Aumentando a concentração do corante é verificado um acréscimo na absorção da radiação solar, mas para taxas muito elevadas de concentração, cada molécula perturba a molécula vizinha resultando num acentuado decréscimo da eficiência quântica [11].

O espectro de emissão geralmente é uma imagem especular do espectro de absorção [9], como pode-se notar nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.7. O solvente influi na composição espectral da luminescência, podendo ocorrer um deslocamento do pico de emissão na direção de comprimentos de onda mais longos, da ordem de centenas de Angstroms. A causa disto é o grau de dissociação do corante orgânico luminescente, pois o espectro de emissão da molécula e do íon geralmente se diferenciam. Por exemplo, a molécula de acridina emite luz luminescente lilás e seus íons, luz azul esverdeada. De acordo com isto, a acridina em dissolventes ou em um meio alcalino emite luz azul esverdeada. Então, é possível que um composto seja luminescente no estado neutro e em diferentes estados de ionização, mas cada um destes estados, em geral, será caracterizado por diferentes bandas de absorção e emissão [10].

Cada corante orgânico luminescente apresenta coeficientes de extinção monocromáticos e o espectro de emissão característicos, o que leva a diferentes deslocamentos de Stokes, ocorrendo uma maior ou menor sobreposição destas bandas. A eficiência quântica, a concentração usual, o grau de dissociação no solvente e qual o melhor solvente também variam para cada corante. A seguir serão analisadas algumas classes de corantes orgânicos luminescentes comparando as semelhanças dos corantes que pertencem a cada classe.

4.2.1. Derivados da coumarina

Um grupo muito usado de corantes orgânicos luminescentes, emitindo na região do azul-verde do espectro eletromagnético, são os derivados da coumarina. Uma mudança sucessiva da banda de absorção em direção a comprimentos de onda mais longos para algumas coumarinas é: coumarina 120, coumarina 2, coumarina 1 e coumarina 102. O pico de absorção destes corantes no metanol ocorre para 0,351 μm , 0,364 μm , 0,373 μm , e 0,390 μm , respectivamente. Também é notado que o pico de absorção desloca-se em direção a comprimentos de onda mais longos com o aumento da polaridade do solvente. A eficiência quântica é aproximadamente 70% para a coumarina 120, coumarina 2, coumarina 1, coumarina 102 e coumarina 30. Em geral as coumarinas absorvem fortemente para comprimentos de onda menores que 0,30 μm [10].

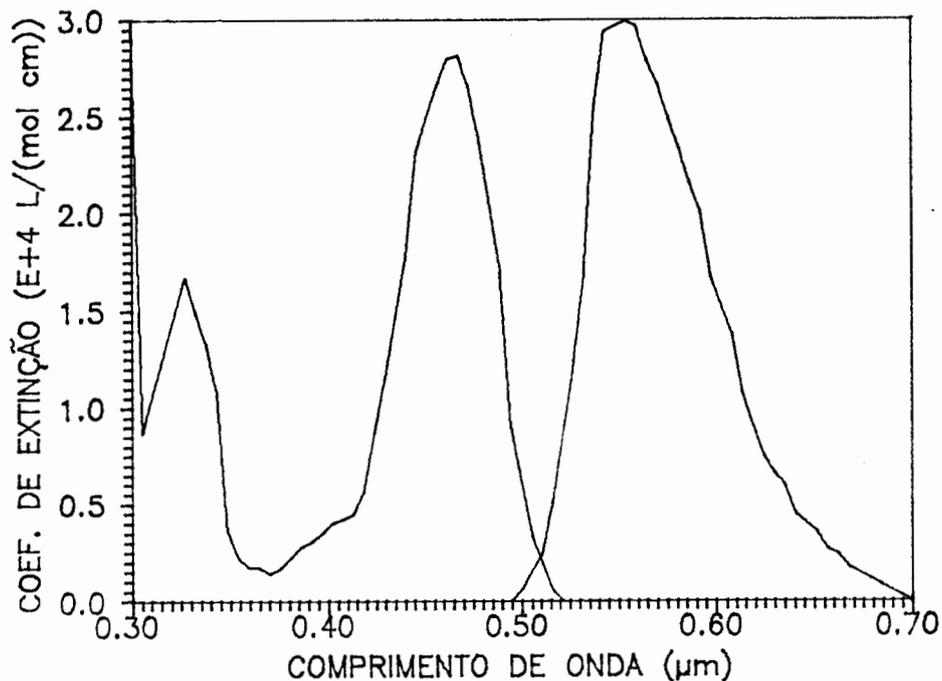


Figura 4.1. Coeficiente de extinção monocromático e espectro de emissão da coumarina 1.

O coeficiente de extinção monocromático, no etanol e o espectro de emissão da coumarina 1 (7-dietilamino4-metilcoumarina) são mostrados na Figura 4.1 [10]. O pico do espectro de emissão corresponde a 1 e os demais valores são

menores que 1. O pico de absorção ocorre para $\lambda_a = 0,373 \mu\text{m}$ e o pico de emissão para $\lambda_e = 0,458 \mu\text{m}$. A Figura 4.2 mostra o coeficiente de extinção monocromático [15] [16] e o espectro de emissão da coumarina 6 [15]. O deslocamento de Stokes é de $0,049 \mu\text{m}$, sendo que o pico de absorção ocorre para $\lambda_a = 0,458 \mu\text{m}$ e o pico de emissão para $\lambda_e = 0,507 \mu\text{m}$. O pico do coeficiente de extinção monocromático, no metanol é de $52200 \text{ litros}/(\text{mol cm})$. A concentração usual no etanol é 2×10^{-4} Molar e a eficiência quântica, também no etanol, é aproximadamente 78% [16]. A Figura 4.3 apresenta a estrutura molecular da coumarina 6, coumarina 2, coumarina 120, coumarina 102 e coumarina 30 e coumarina 1.

A coumarina 153 (2,3,6,7-tetrahidro-9-(trifluorometil)-1H,5H,11H-(1)benzopirano(6,7,8-ij)quinolizin-11-um) é usada em

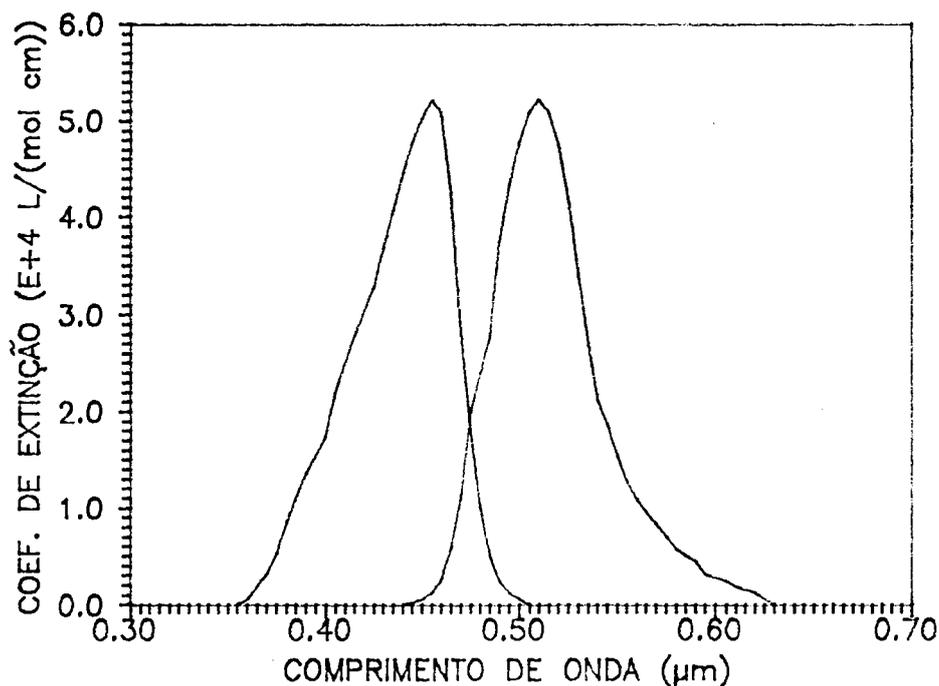
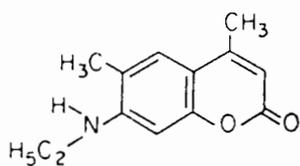


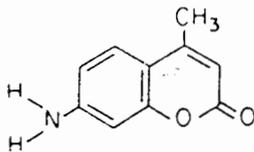
Figura 4.2. Coeficiente de extinção monocromático e espectro de emissão da coumarina 6.

uma concentração de $1,3 \times 10^{-9}$ Molar. O peso molecular é 309 g e a estrutura molecular é apresentada na Figura 4.4 [17]. O pico de absorção ocorre para $\lambda_a = 0,423 \mu\text{m}$ e o de emissão para $\lambda_e = 0,530 \mu\text{m}$. A Figura 4.5 mostra o espectro de absorção da coumarina 153 dissolvido em resina poliéster para uma amostra de

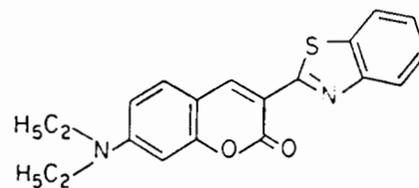
0,21 cm de espessura.



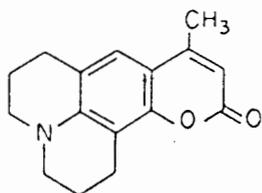
COUMARINA 2



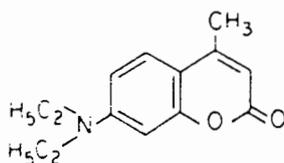
COUMARINA 120



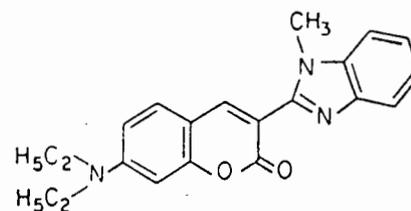
COUMARINA 6



COUMARINA 102



COUMARINA 1



COUMARINA 30

Figura 4.3. Estrutura molecular da coumarina 6, da coumarina 2, coumarina 120, coumarina 102 e coumarina 30 e coumarina 1.

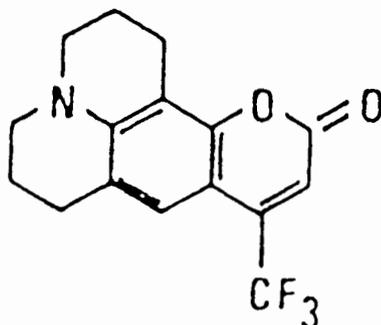


Figura 4.4. Estrutura molecular da coumarina 153.

4.2.2. Rodaminas

O pico de absorção das rodaminas depende do solvente, em particular com aqueles corantes cujo grupo amino não é plenamente alcalinizados, como por exemplo rodamina 110 e rodamina 6G. O pico de luminescência desloca-se aproximadamente 0,02 μm nas rodaminas, em relação ao pico de absorção. A

eficiência quântica da rodamina B é de aproximadamente 40% em

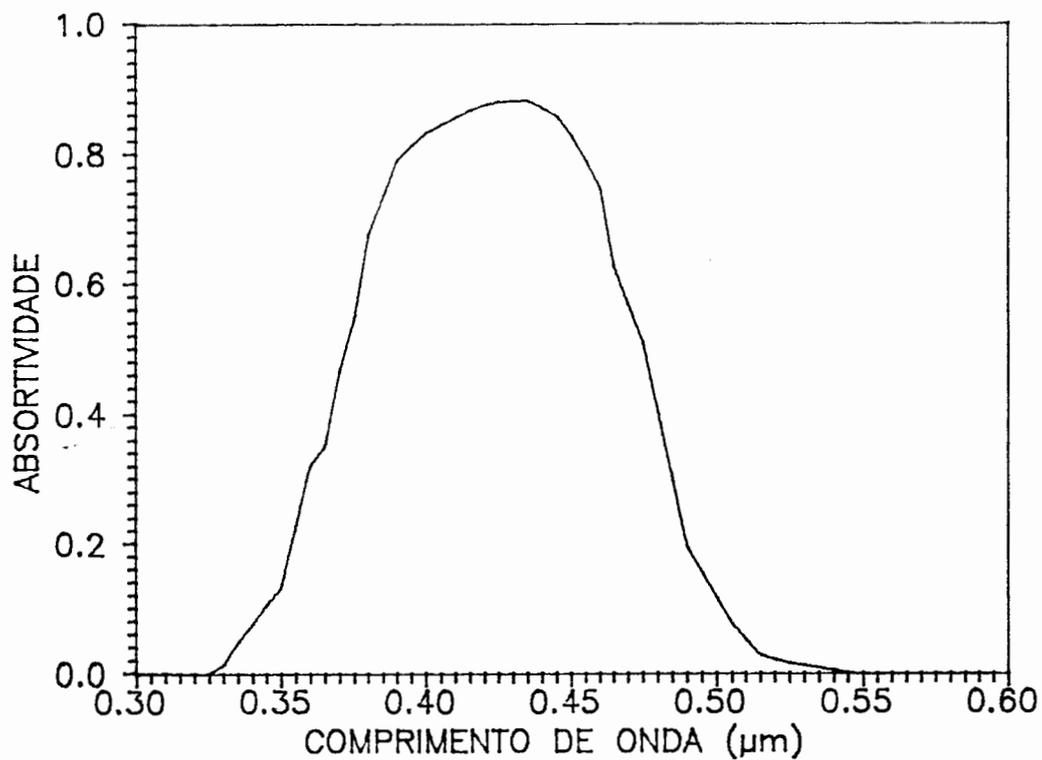


Figura 4.5. Espectro de absorção da coumarina 153.

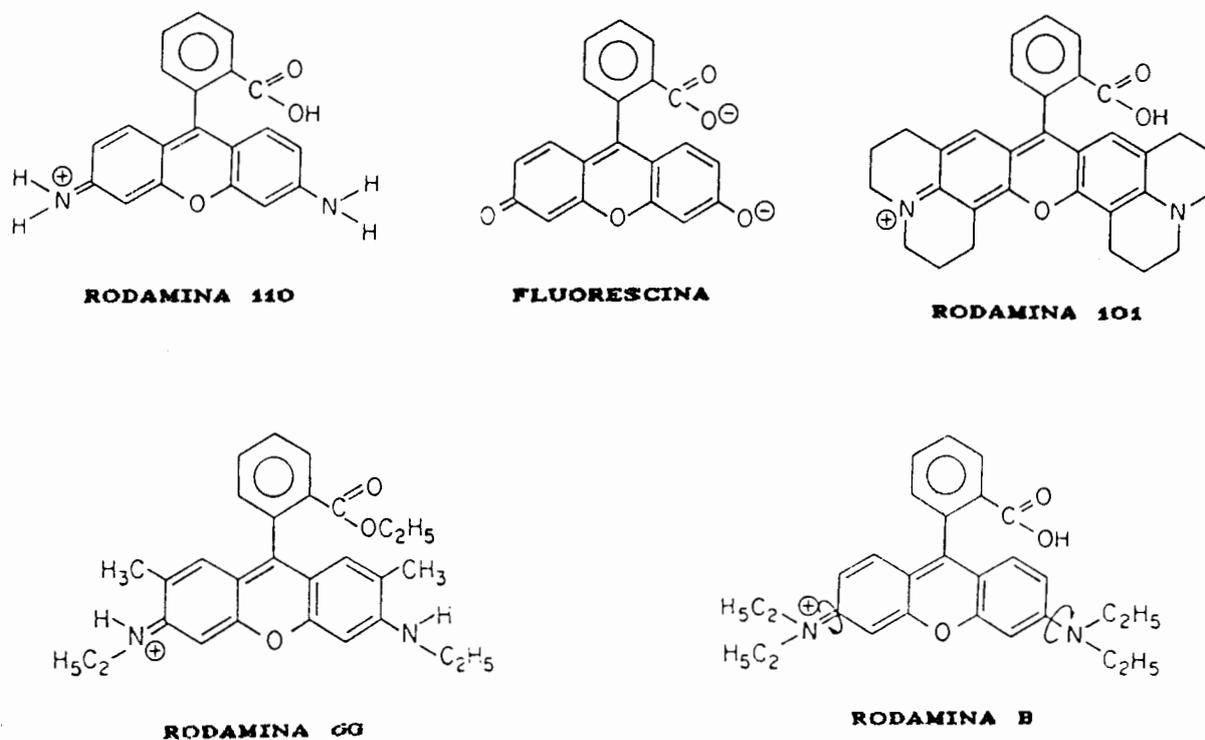


Figura 4.6. Estrutura molecular da rodamina 6G, rodamina 101, rodamina 110, rodamina B e fluorescina.

etanol ácido, mas de aproximadamente 60% em etanol básico, no entanto, a eficiência quântica da rodamina 110, rodamina 19 e rodamina 101 são independentes da acidez. A Figura 4.6 mostra a estrutura molecular da rodamina 6G, rodamina B, rodamina 110 e rodamina 101 e fluorescina.

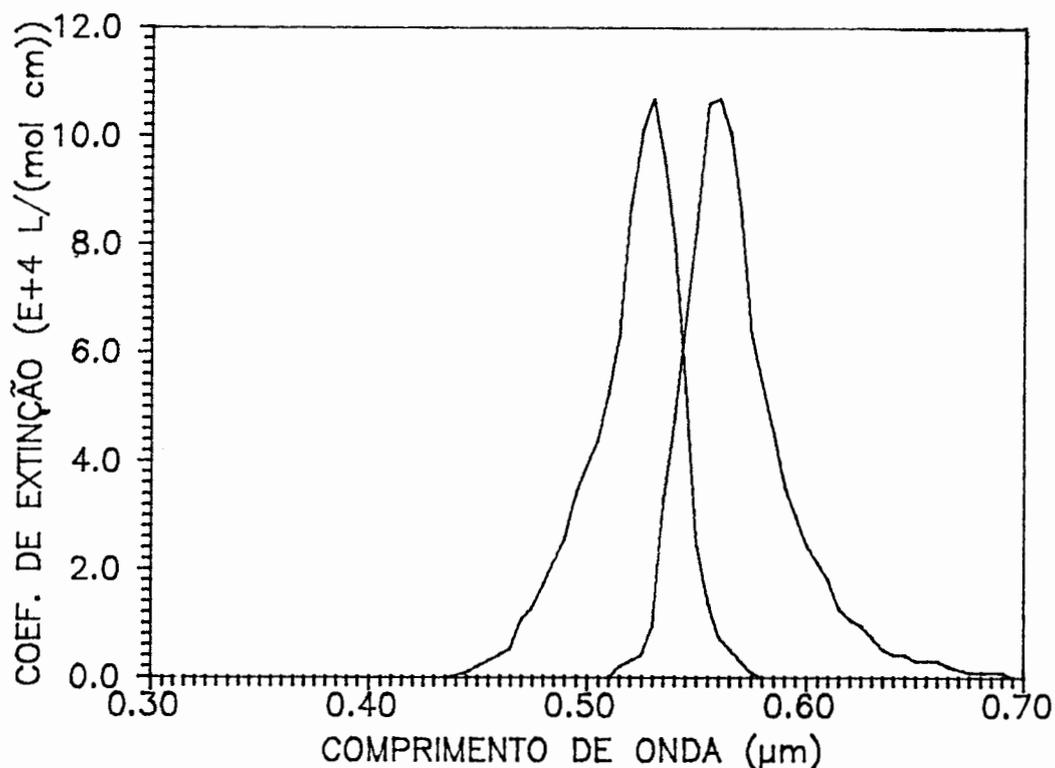


Figura 4.7. Coeficiente de extinção monocromático e espectro de emissão da rodamina 6G.

A Figura 4.7 apresenta o coeficiente de extinção monocromático [18] [16] e o espectro de emissão da rodamina 6G [18]. O pico do coeficiente de extinção monocromático ocorre para $\lambda_a = 0,528 \mu\text{m}$ e o de emissão para $\lambda_e = 0,555 \mu\text{m}$. O deslocamento de Stokes é de $0,027 \mu\text{m}$, ocorrendo uma sobreposição das bandas de emissão e absorção. O pico do coeficiente de extinção monocromática é altamente dependente do solvente, no metanol é $107000 \text{ litros}/(\text{mol cm})$ [16]. A rodamina 6G apresenta uma eficiência quântica de 98% no metanol [16] e o espectro de absorção, no etanol, não varia para concentrações elevadas como 10^{-2} Molar. No entanto, a luminescência para tal concentração é fortemente extingüida por colisões do corante com aquelas no estado eletrônico base.

4.2.3. Outros corantes orgânicos luminescentes

4.2.3.1. Uvitex OB

O espectro de absorção e emissão do uvitex OB para uma

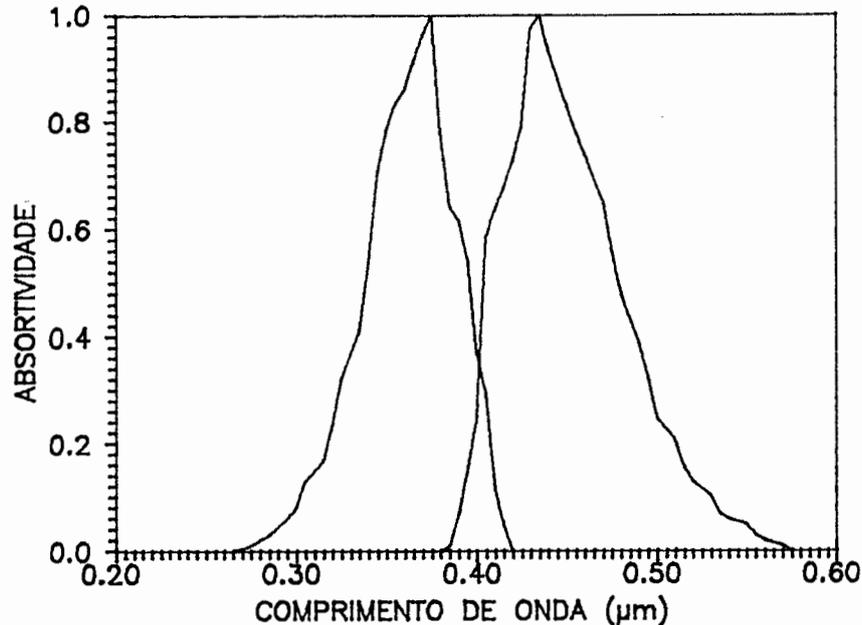


Figura 4.8. Espectro de absorção e emissão do uvitex OB.

amostra de 1 cm de espessura de etanol e o corante em uma concentração de 7 mg/l é apresentado na Figura 4.8. O pico de absorção ocorre para $\lambda_a = 0,375 \mu\text{m}$ e o pico de emissão para $\lambda_e = 0,435 \mu\text{m}$. O uvitex OB apresenta boa resistência à altas temperaturas, como 200 °C, pois o ponto de fusão ocorre entre 200°C e 201°C. A concentração usual no PMMA é de 0,01% a 0,05%, ou seja 10 a 50 g de uvitex OB por 100 Kg de PMMA.

4.2.3.2. KF241

A Figura 4.9 apresenta os espectros de emissão [18] e absorção para uma amostra de PMMA dopado com KF241 de 0,30 cm de espessura. O espectro de absorção do KF241 foi medido no espectrofotômetro Cary 14 do Instituto de Física da UFRGS. É conveniente ressaltar que este corante orgânico luminescente

absorve uma razoável fração do espectro solar e apresenta um grande deslocamento de Stokes, além de uma alta eficiência quântica de aproximadamente 99% [18] em meios líquidos.

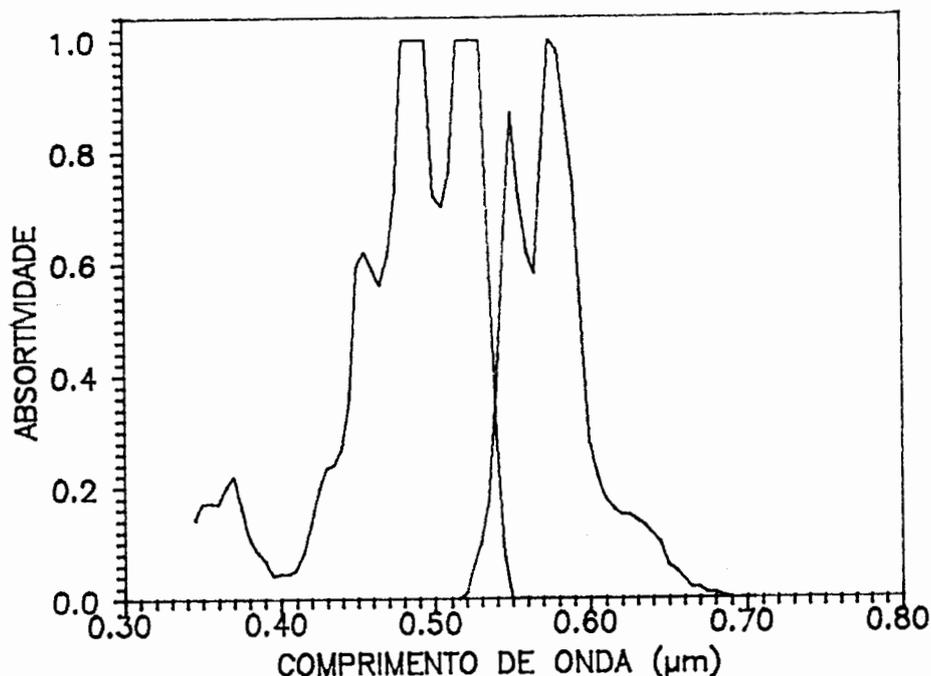


Figura 4.9. Espectro emissão e de absorção do KF241 em uma amostra de 0,30 de PMMA.

4.2.3.3. Fluorescina

A fluorescina é quase insolúvel em água; em soluções alcoólicas é fracamente colorida e levemente luminescente. Adicionando um composto alcalino na solução, sal alcalino é formado, o qual dissolve facilmente na água e verifica-se uma luminescência amarelo-esverdeada, característica dos íons negativos da fluorescina. Uma luminescência azul-esverdeada é observada em soluções ácidas, que é originada pelos íons positivos da fluorescina. O decréscimo da luminescência produzido com o acréscimo da concentração observado em soluções aquosas, pode ser devido ao decréscimo da dissociação das moléculas [10]. A Figura 4.10 mostra o espectro de absorção e emissão da fluorescina sódica [15]; o pico de absorção ocorre para $\lambda_a = 0,490 \mu\text{m}$ e o pico de emissão ocorre para $\lambda_e = 0,540 \mu\text{m}$. No etanol a concentração usual é 2×10^{-4} Molar [15].

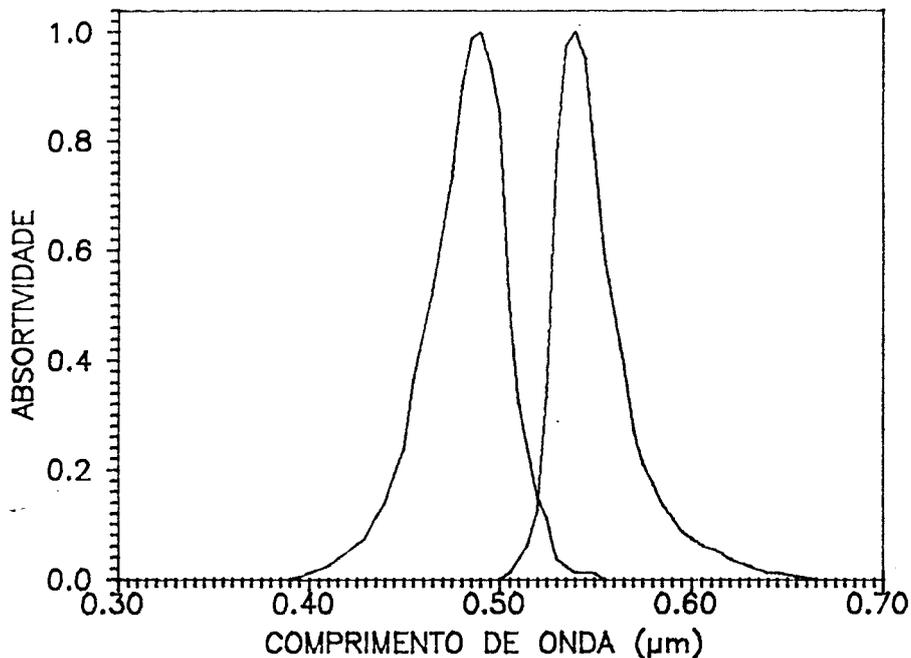


Figura 4.10. Espectro de emissão e absorção da fluorescina sódica.

4.3. Eficiência ótica

A radiação solar com comprimentos de onda fora da banda de absorção do corante orgânico luminescente, passa através do material dopado sem ser afetada por este, enquanto que a radiação solar com comprimentos de onda, dentro da banda de absorção, é absorvida e emitida em comprimentos de onda mais longos.

A eficiência ótica de um material, como PMMA, dopado com corantes orgânicos luminescentes é definida como o número de fótons incidentes na célula fotovoltaica de silício dividido pelo número de fótons que entraram na parte superior do material. Esta eficiência ótica pode ser calculada para a região de absorção do corante orgânico luminescente e para a região em que não ocorre absorção [13].

4.3.1. Região onde não ocorre absorção do corante orgânico luminescente

A radiação solar fora da banda de absorção do corante

orgânico luminescente passa através do material dopado sem ser afetada pelo corante e o sistema comporta-se como uma célula fotovoltaica de silício com uma cobertura transparente. As perdas nesta região são devidas à reflexão na superfície externa da placa e a absorção do próprio material, como o PMMA.

As perdas por reflexão são dadas pela Lei de Fresnel [8]:

$$R_{pe} = \frac{\text{sen}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (4.1)$$

$$R_{pa} = \frac{\text{tan}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{tan}^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (4.2)$$

$$R = \frac{1}{2} [R_{pe} + R_{pa}] \quad (4.3)$$

onde θ_1 é o ângulo de incidência da radiação solar e θ_2 é o ângulo de refração, como mostra a Figura 4.11. Estes ângulos são relacionados com os índices de refração pela lei de Snell:

$$\theta_2 = \text{arc sen} \left[\frac{\text{sen } \theta_1}{n_s} \right] \quad (4.4)$$

onde n_s é o índice de refração do material dopado. A radiação transmitida é igual a $1 - R$.

A fração da radiação transmitida considerando apenas a absorção do material é:

$$A = e^{-k Lx} \quad (4.5)$$

onde k é o coeficiente de absorção do material e Lx é o caminho do fóton dentro do material dopado, dado por:

$$Lx = L / \cos \theta_2 \quad (4.6)$$

onde L é a espessura do material, como por exemplo PMMA.

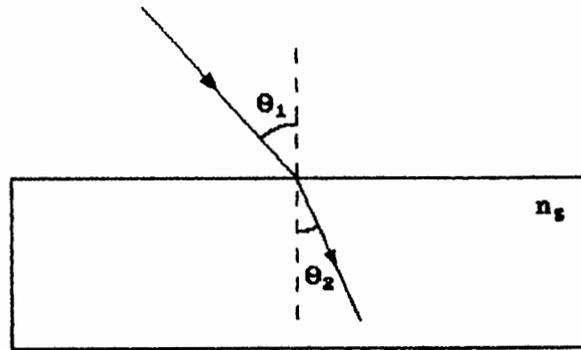


Figura 4.11. Refração de um raio solar.

4.3.2. Região de absorção do corante orgânico luminescente

A eficiência ótica na região de absorção do corante orgânico luminescente é determinada por vários fatores, como reflexão na superfície externa, eficiência quântica do corante orgânico luminescente, o escape de fótons emitidos através da superfície superior e as perdas devido a reabsorção dos fótons pelo próprio corante orgânico luminescente na região de sobreposição das bandas de absorção e emissão.

A reflexão na superfície externa superior é dada pela Equação 4.3 e é da ordem de 4% para materiais plásticos ou vidro [13].

Um fóton depois de absorvido pela molécula do corante orgânico luminescente pode ser emitida com igual probabilidade em qualquer direção. Alguns destes fótons incidem na interface superior interna com um ângulo de incidência maior que o ângulo crítico para a reflexão interna total e são totalmente refletidos. O cone formado por todos os raios originados no ponto de luminescência e limitado por um ângulo θ_c com a normal da superfície é chamado de cone crítico. Integrando sobre todo o cone do ângulo crítico e assumindo que a reabsorção pode ser desprezível para estes ângulos, a perda devido ao escape de fótons na superfície superior é dada por [13]:

$$L_{esc} = \frac{4 n_s}{(n_s + 1)^2} \frac{(1 - \cos \theta_c)}{2} \quad (4.7)$$

onde θ_c é o ângulo crítico dado por:

$$\theta_c = \text{arc sen} (1 / n_s) \quad (4.8)$$

onde n_s é o índice de refração do material, por exemplo PMMA. As perdas por escape dadas pela Equação 4.7 são da ordem de 12,2% para plásticos [13]. A quantidade de radiação transmitida é igual a $1 - L_{\text{esc}}$.

O cálculo das perdas devido a reabsorção do corante é complexo de calcular, mas pode-se obter uma boa aproximação através de relações simples. Se o deslocamento de Stokes é grande, então a sobreposição das bandas de absorção e emissão é pequena e o coeficiente de absorção é baixo para a maioria dos fótons emitidos, se percorrerem um caminho curto até incidirem na célula de silício. Somente os fótons emitidos paralelamente ao plano da célula têm alta probabilidade de serem reabsorvidos. No entanto se o deslocamento de Stokes é pequeno, as perdas devido a reabsorção são maiores. Na região de sobreposição das bandas de absorção e emissão, onde pode ocorrer a reabsorção dos fótons emitidos, pode-se dividir o processo em diferentes gerações de luminescência: a primeira geração é a luminescência devido a absorção inicial do fóton solar; a segunda é a luminescência resultante da reabsorção da primeira geração dos fótons; a terceira geração é a luminescência resultante da reabsorção da segunda geração de fótons e assim por diante. Um fóton pode ser emitido com menor ou igual energia que a energia do fóton original, assim em cada geração o fóton é emitido, progressivamente, em comprimentos de onda mais longos [11].

É usual fazer a seguinte aproximação para calcular a probabilidade de reabsorção R_a da quantidade de radiação fora do cone crítico [11].

$$R_a = \int_0^{\infty} \text{em}(\lambda) \left[1 - \exp(-ab(\lambda)Lx) \right] d\lambda \quad (4.9)$$

onde $ab(\lambda)$ é o coeficiente monocromático de absorção, Lx é o caminho do fóton dentro do material dopado e $\text{em}(\lambda)$ é o espectro de luminescência normalizado:

$$\int_0^{\infty} em(\lambda) d\lambda = 1$$

(4.10)

Esta aproximação é boa em casos onde a concentração é baixa e o caminho no qual pode ocorrer reabsorção é curto. Ocorre também uma reabsorção da radiação dentro do cone crítico antes de atingir a superfície superior, que pode ser reemitida e chegar até à célula fotovoltaica. Esta reabsorção dentro do cone crítico é desprezível.

4.4. Filtros óticos de absorção

Um filtro ótico de absorção apresenta a propriedade de absorver em uma ou várias bandas do espectro solar. Um exemplo de um filtro desse tipo é o FG6, de 3 mm de espessura, da Melles Griot. A transmitância $T(\lambda)$ do FG6 é mostrada na Figura 4.12. Nota-se que inicia um decréscimo da transmitância próximo a $\lambda = 0,47 \mu\text{m}$. O mínimo da $T(\lambda)$ ocorre entre $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$ e $\lambda = 0,87 \mu\text{m}$, a partir deste comprimento de onda a transmitância começa a crescer novamente. Outro exemplo de um filtro de

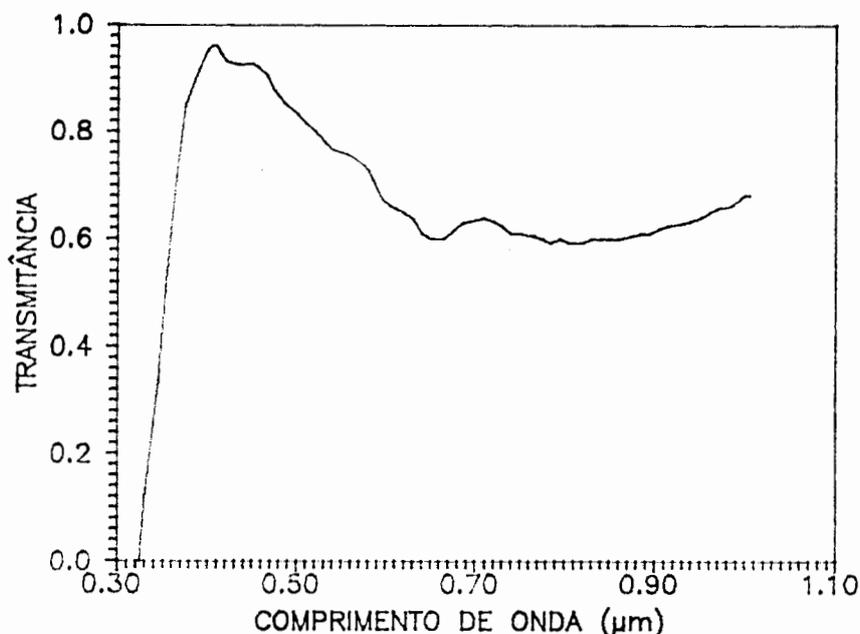


Figura 4.12. Transmitância do filtro FG6 da Melles Griot.

absorção é o vidro comum. A Figura 4.13 mostra a transmitância do vidro comum de 7 mm, medida no espectrofotômetro Cary 14 do Instituto de Física da UFRGS. Um decréscimo na transmitância começa a ocorrer em torno de $\lambda = 0,60 \mu\text{m}$, intensifica-se de $\lambda = 0,90 \mu\text{m}$ a $\lambda = 1,15 \mu\text{m}$ e cresce novamente.

Usando um filtro de absorção, que absorva somente em uma banda na região de sensibilidade da célula de silício e esta esteja centrada no pico da curva da resposta espectral da célula, é possível obter uma resposta espectral do conjunto célula fotovoltaica mais filtro com menor dependência do comprimento de onda da radiação solar incidente. A Figura 4.14 compara a resposta espectral da célula de silício com a resposta espectral da célula de silício coberta por um vidro comum de 7 mm de espessura. Aparentemente, nota-se uma menor dependência da resposta espectral com o comprimento de onda para o segundo caso.

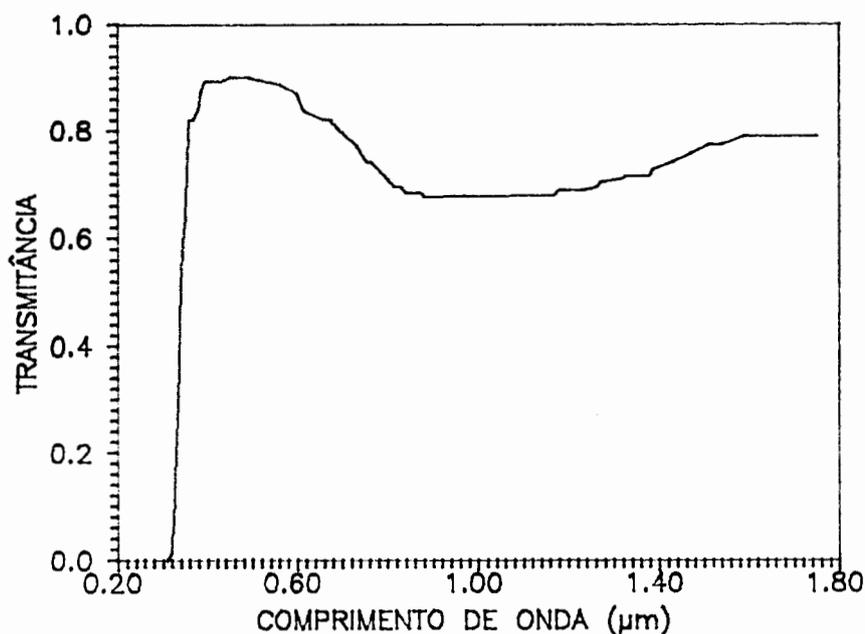


Figura 4.13. Transmitância de um vidro comum de 7 mm de espessura.

4.5. Influência de corantes orgânicos luminescentes na correção da resposta espectral

Supõe-se que seja possível realçar a resposta espectral

da célula de silício, na região de baixa sensibilidade, usando corantes orgânicos luminescentes. Para verificar esta possibilidade, simulou-se uma correção espectral, considerando o corante dissolvido em PMMA e disposto sobre a célula, de tal forma que haja perfeito contato ótico entre a superfície da célula e o PMMA. A resposta da célula com correção espectral é obtida considerando-se a eficiência ótica do PMMA dopado com o corante, o fator de visão e a perda energética da radiação por ser emitida em comprimentos de onda mais longos.

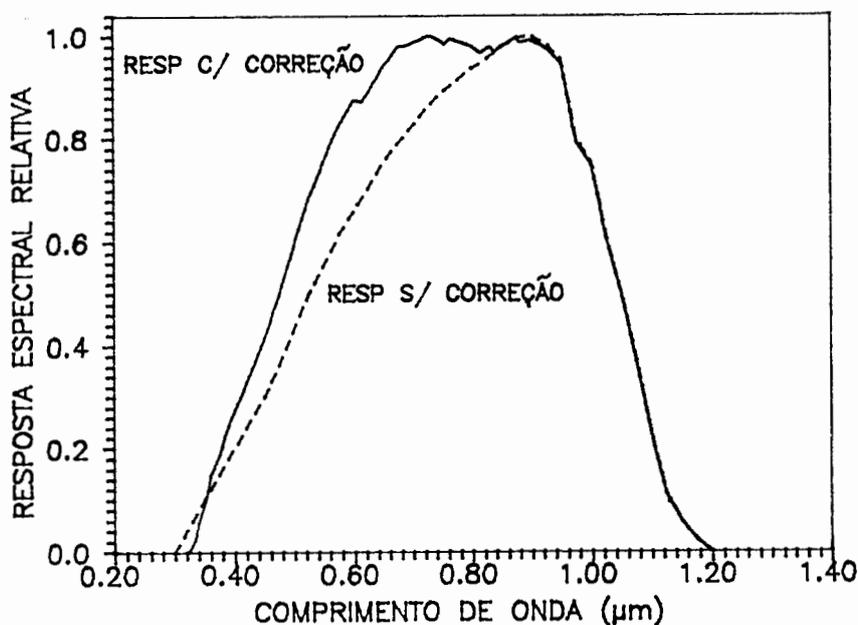


Figura 4.14. Resposta da célula de silício e resposta da célula de silício mais um vidro comum de 7 mm.

O fator de visão é a fração da energia radiante distribuída de forma difusa que deixa uma superfície e chega em outra. Considera-se uma superfície i com área A_i e o fluxo radiante que deixa a superfície i distribuído com intensidade uniforme dentro de um espaço hemisférico. Supondo que a uma certa distância abaixo da superfície i , haja outra superfície j , com área A_j , o fator de visão $F_{A_i-A_j}$ informa a fração da radiação que sai de i e chega em j . O primeiro subíndice denota a superfície emissora e o segundo a superfície receptora da radiação. Para duas superfícies circulares, como mostra a Figura 4.15, o fator de visão é [19]:

$$F_{A1 - A2} = \frac{1}{2} \left[Z - \left[Z^2 - 4 X^2 Y^2 \right]^{0,5} \right] \quad (4.11)$$

onde

$$X = a/c$$

$$Y = a/b$$

$$Z = 1 + \left[1 + X^2 \right] Y^2$$

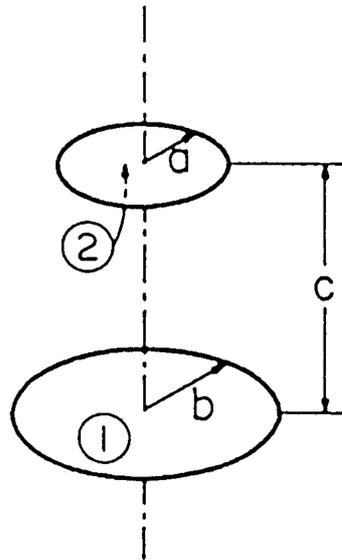


Figura 4.15. Dimensões para obter o fator de visão entre a superfície 1 e 2.

Supõe-se que a superfície 1 é composta por PMMA dopado com um corante orgânico luminescente concentrado numa fina camada na parte superior do PMMA e a superfície 2 seja uma célula de silício. A distância C é a espessura do PMMA dopado. O raio do material dopado foi otimizado, para que uma razoável fração da energia emitida incida na célula.

Considerando-se que a energia de um fóton é:

$$E = h \nu \quad (4.12)$$

onde $h = 6,63 \times 10^{-34}$ Js é a constante de Planck e ν é a frequência do fóton. Uma estimativa para a perda energética dos fótons absorvidos e emitidos é:

$$PE = \frac{\nu_e}{\nu_a} = \frac{\lambda_a}{\lambda_e} \quad (4.13)$$

onde ν_a e ν_e são as frequências da radiação solar para o pico de absorção e emissão, respectivamente.

A Figura 4.16 mostra a influência do corante orgânico luminescente coumarina 6, considerando:

eficiência quântica = 78%

concentração = 2×10^{-4} Molar

espessura do PMMA = 0,50 cm

raio do PMMA = 2,80 cm

raio da célula = 0,80 cm

e os espectros de absorção e emissão apresentados na Figura 4.3. Deve-se lembrar que a coumarina 6 apresenta eficiência quântica de 78% no etanol, mas em materiais sólidos, como no caso PMMA, esta eficiência é menor. Nota-se que não houve uma melhora significativa na resposta espectral.

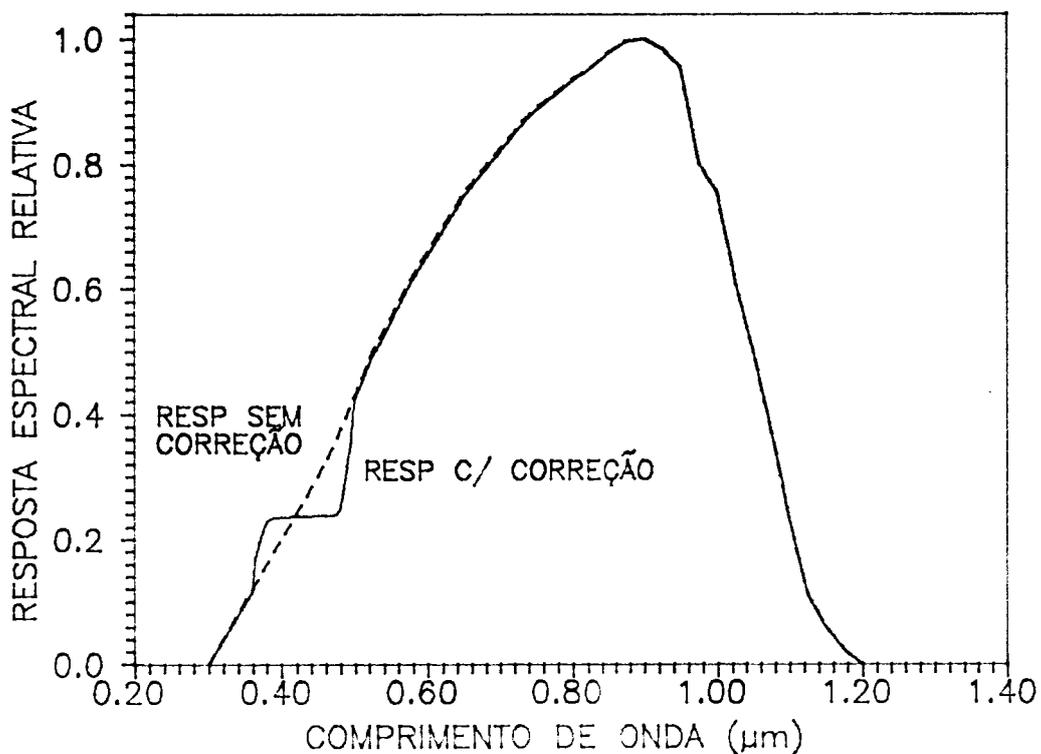


Figura 4.16. Resposta espectral de uma célula de silício com uma cobertura de coumarina 6 dissolvida em PMMA.

Na Figura 4.17 também nota-se que na região de absorção do KF241, a resposta foi levemente realçada. Considerou-se:

eficiência quântica = 95%

raio do PMMA = 2,60 cm

raio da célula = 0,80 cm

e os espectros de absorção e emissão mostrados na Figura 4.9.

Usando dois corantes orgânicos luminescentes de forma que a banda de emissão do primeiro ao receber a radiação solar coincida com a banda de absorção do segundo, é possível realçar mais a resposta nesta região espectral, como mostra a Figura 4.18. Usou-se coumarina 6 e KF241 com as características dos corantes e dimensões utilizadas para obter as Figuras 4.16 e 4.17, a única diferença é o raio da placa com KF241: 2,80 cm.

A melhor resposta espectral foi obtida utilizando-se dois corantes orgânicos luminescentes e um vidro comum de 7 mm de espessura, como pode-se verificar na Figura 4.19. A Figura 4.20

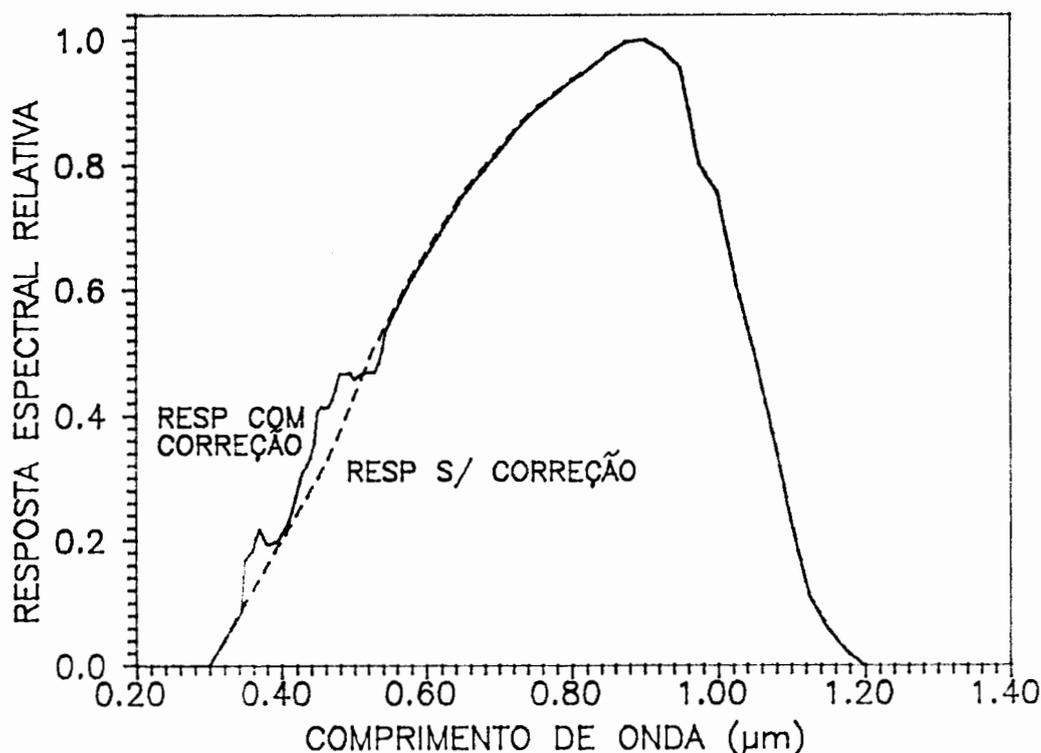


Figura 4.17. Resposta da célula de silício com uma cobertura de KF241 dissolvido em PMMA.

mostra como os materiais são dispostos sobre a célula de silício e as dimensões dos mesmos.

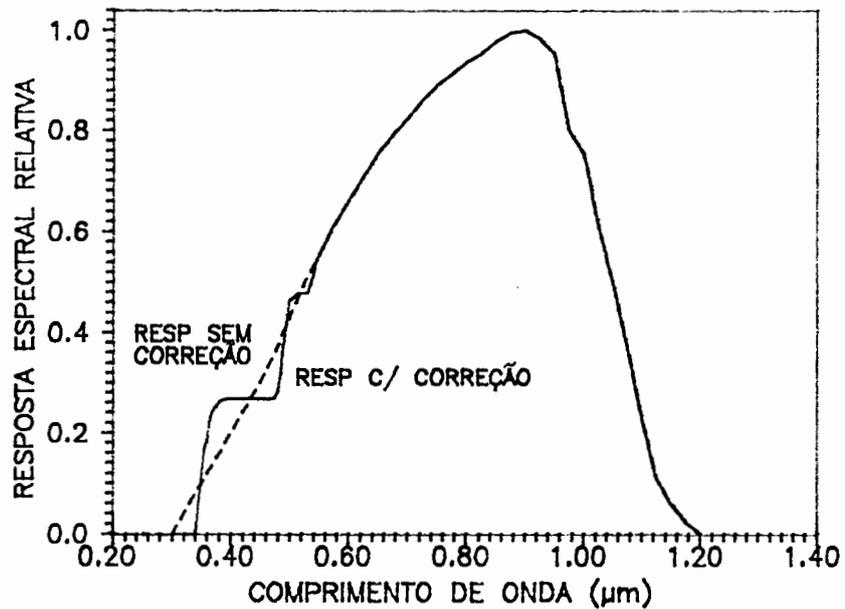


Figura 3.18. Resposta espectral da célula de silício com uma cobertura constituída por coumarina 6 dissolvida em PMMA e colocada sobre o KF421 também dissolvido em PMMA.

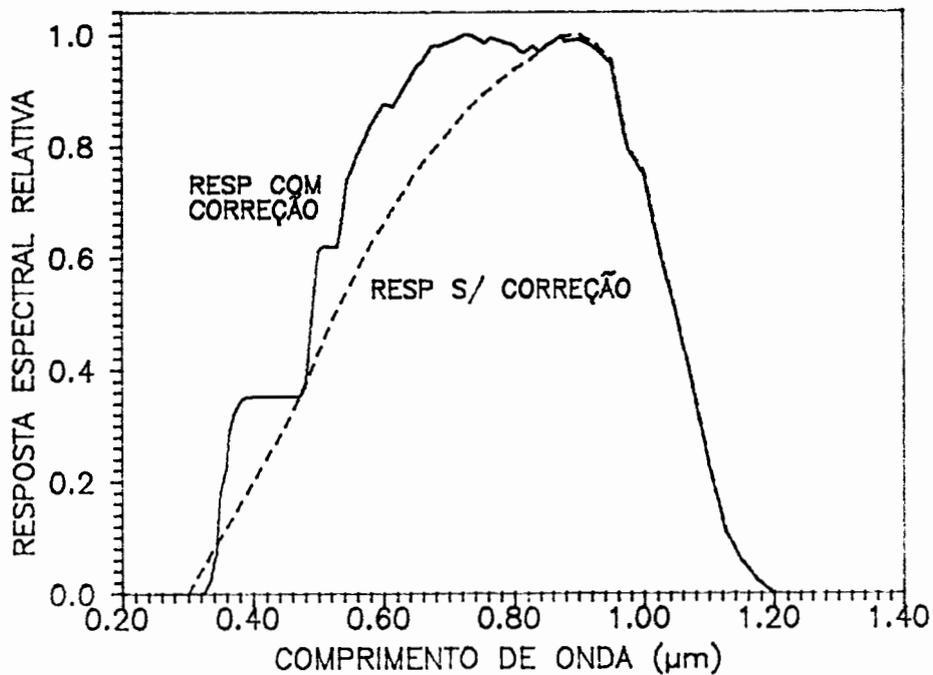


Figura 4.19. Resposta espectral da célula de silício com uma cobertura constituída por um vidro comum de 7 mm, coumarina 6 dissolvida em PMMA e colocada sobre a placa de KF241 mais PMMA.

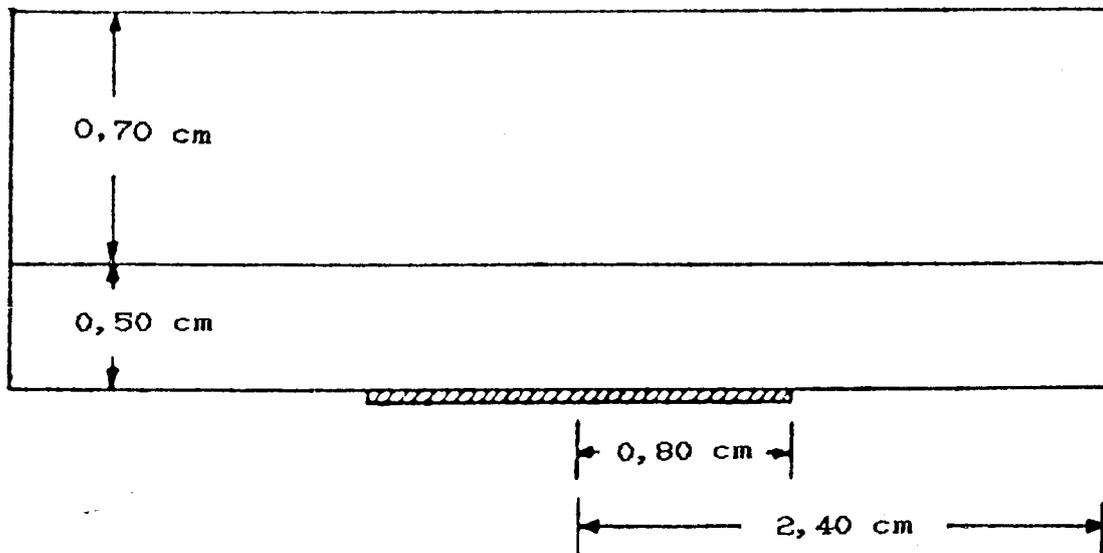


Figura 4.20. Esquema da célula de silício mais a cobertura.

4.6. Medidas experimentais da resposta espectral de uma célula de silício com correção

A fim de comprovar a simulação da resposta espectral montaram-se duas células com coberturas compostas por corantes orgânicos luminescentes e uma célula com um vidro de 4,15 mm de espessura, além dos corantes.

As coberturas foram montadas dentro de um prato de Petry (usado para cultura de bactérias) de 5,50 cm de diâmetro interno e espessura do vidro de aproximadamente 1,30 mm. Uma das coberturas foi construída colocando-se uvitex OB dissolvido em resina *poliester* no prato de Petry. Quando a resina tornou-se sólida, uma placa de PMMA com KF241 dissolvido foi colada com a própria resina na placa que continha uvitex OB e então, colou-se a célula também com resina na placa de PMMA. Desta forma, quase não há reflexão entre as placas, visto que o índice de refração da resina *poliester* e do PMMA são semelhantes. A seguir, a parte oposta à incidência da radiação solar foi pintada de preto fosco, a fim de obter-se uma boa aproximação com a situação simulada.

A resposta espectral da célula com a correção foi obtida experimentalmente, determinando o espectro da lâmpada

depois de passar pelo monocromador, usando uma célula sem correção com resposta espectral conhecida. Com um monocromador e um registrador gráfico de tensão, obteve-se o gráfico da queda de tensão, sobre um resistor ligado à célula, versus o comprimento de onda da radiação incidente. O resistor foi dimensionado de tal forma que a tensão não fosse superior a 10 mV, a fim de que o ponto de trabalho estivesse próximo da corrente de curto-circuito. Estabeleceu-se uma velocidade para a varredura, de 0,20 μm a 1,20 μm , no monocromador e obteve-se o gráfico de $V \times \lambda$ (comprimento de onda) para a célula sem nenhuma cobertura. Sabendo-se que a tensão no resistor é diretamente proporcional a corrente da célula, é possível, construir o gráfico da corrente monocromática para a célula de silício. Conhecida a resposta espectral da célula de silício sem correção, obteve-se o espectro da lâmpada usada no monocromador, através da relação:

$$ESC(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{RSC(\lambda)} \quad (4.14)$$

onde $I(\lambda)$ é a corrente monocromática da célula, $RSC(\lambda)$ é a resposta espectral da célula e $ESC(\lambda)$ é a irradiância monocromática da lâmpada. A lâmpada usada foi uma halógena do tipo HLX de 100 W.

Da mesma forma que a célula sem cobertura obteve-se experimentalmente a corrente monocromática para a célula com a cobertura anteriormente descrita. Conhecendo o espectro da lâmpada usada no monocromador, foi possível conseguir a resposta espectral desta, dividindo a corrente monocromática pela irradiância espectral da lâmpada. A Figura 4.21 compara esta resposta espectral com a resposta da célula de silício sem cobertura. Nota-se que a curva não foi realçada na região de absorção dos corantes, mas pelo contrário a sensibilidade foi diminuída. Uma provável razão para isso, é que a eficiência quântica dos corantes orgânicos luminescentes em meios sólidos é bem menor do que em meios líquidos. Simulou-se a resposta espectral para a cobertura que continha uvitex OB e KF241 descrita anteriormente e ajustou-se a eficiência quântica. A

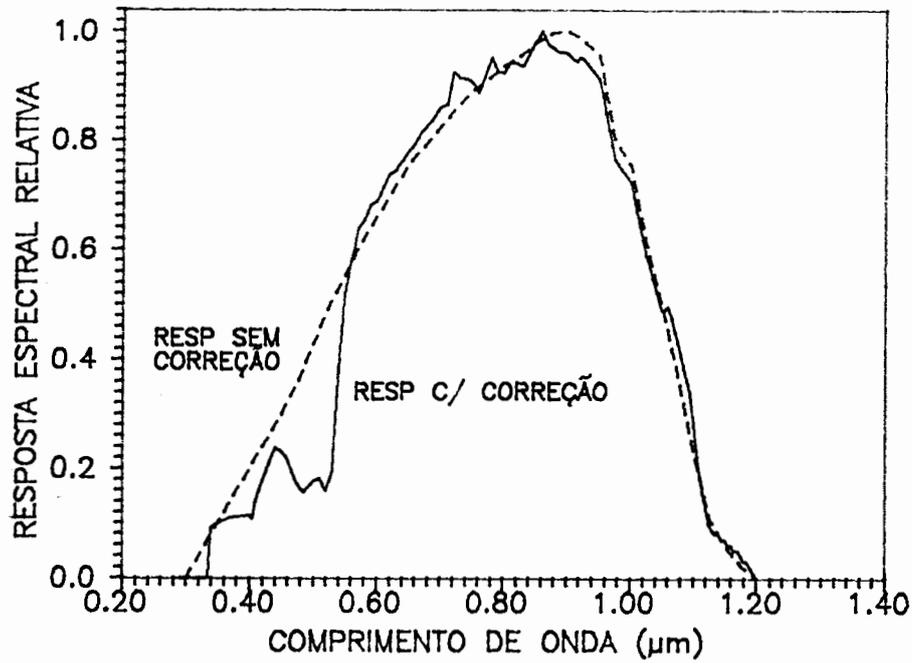


Figura 4.21. Resposta espectral medida da célula de silício com uma cobertura composta por uvitex OB e KF241.

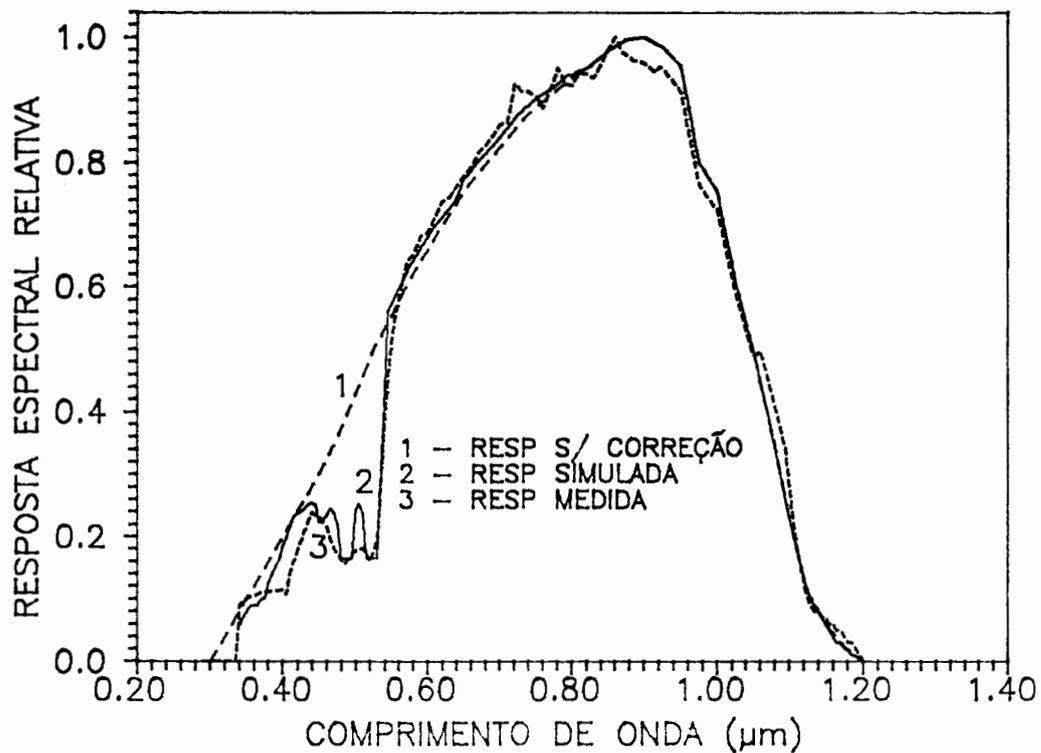


Figura 4.22. Resposta espectral simulada da célula de silício com uma cobertura composta por uvitex OB e KF241, comparada com a resposta medida.

Figura 4.22 compara a resposta espectral simulada e medida para este caso. A eficiência quântica necessária para o ajuste da curva é de 40% para os dois corantes orgânicos luminescentes.

Outra cobertura foi construída usando uvitex OB e coumarina 153. O uvitex OB foi dissolvido em resina poliéster e colocado dentro do prato de Petry, após ter-se solidificado, a coumarina 153, também dissolvida em resina poliéster, foi colocada sobre a placa que continha uvitex OB. Por fim, a célula de silício foi colada na placa de coumarina 153 com a resina poliéster. A parte posterior do disco formado foi pintada de

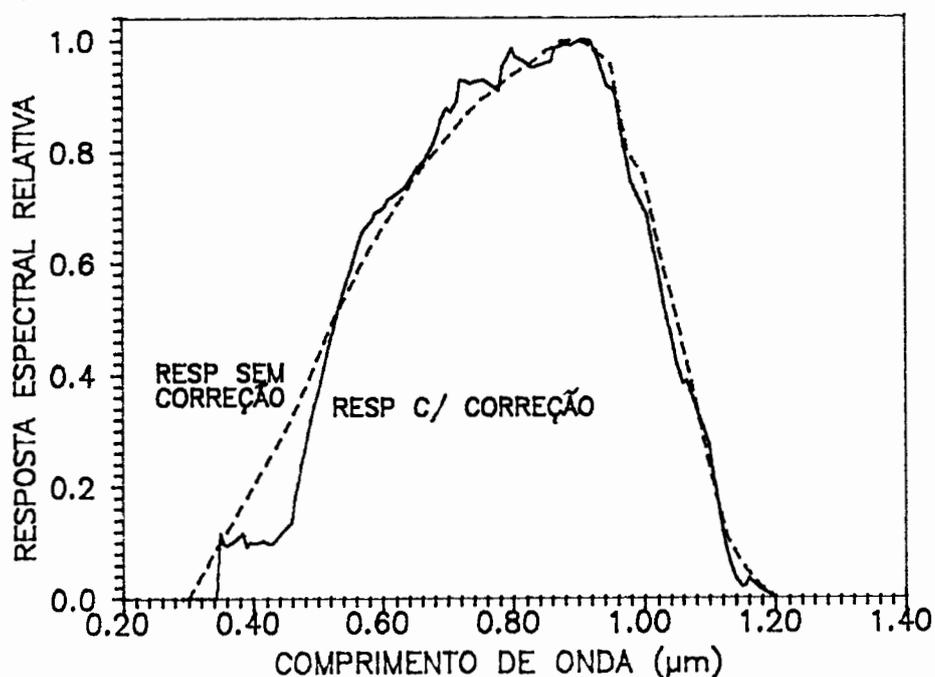


Figura 4.23. Resposta espectral medida da célula de silício com uma cobertura composta por uvitex OB e coumarina 153.

branco para aproveitar a luz refletida que parcialmente é recuperada ao incidir na célula. A resposta espectral foi obtida da forma anteriormente descrita e é comparada com a resposta espectral da célula de silício sem cobertura na Figura 4.23. Nota-se que também neste caso a resposta espectral não foi realçada na região espectral de interesse, mas pelo contrário, a sensibilidade da célula foi diminuída. Novamente atribui-se este efeito à baixa eficiência quântica dos corantes orgânicos

luminescentes em meios sólidos.

Uma terceira cobertura foi construída da forma já descrita, usando uvitex OB e coumarina 153, sendo que neste caso, colocou-se um vidro comum de 6,15 mm de espessura sobre a cobertura. A Figura 4.24 mostra a resposta espectral da célula de silício para esta cobertura. Verifica-se que no pico da resposta espectral da célula, a sensibilidade desta foi diminuída, acarretando uma resposta com menor dependência do comprimento de onda da radiação incidente. A sensibilidade da célula, na região de absorção dos corantes orgânicos luminescentes, novamente foi

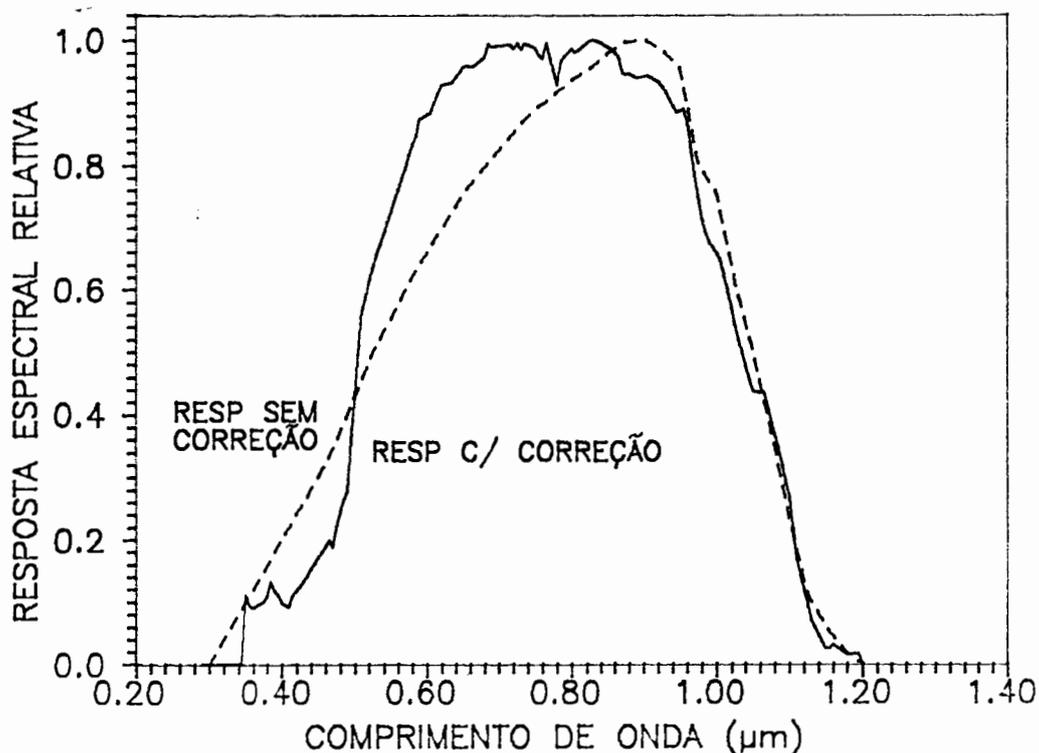


Figura 4.24. Resposta espectral da célula de silício com uma cobertura composta por uvitex OB, coumarina 153 e um vidro comum de 6,15 mm de espessura.

diminuída, devido a provável baixa eficiência quântica destes quando dissolvidos em meios sólidos.

Utilizando o procedimento descrito anteriormente, obteve-se a resposta espectral do piranômetro fotovoltaico Solar 118, fabricado pela Instruments HAENNI Messgerate. Este piranômetro possui como sensor um fotodiodo e apresenta uma correção espectral feita com um filtro que absorve na região de

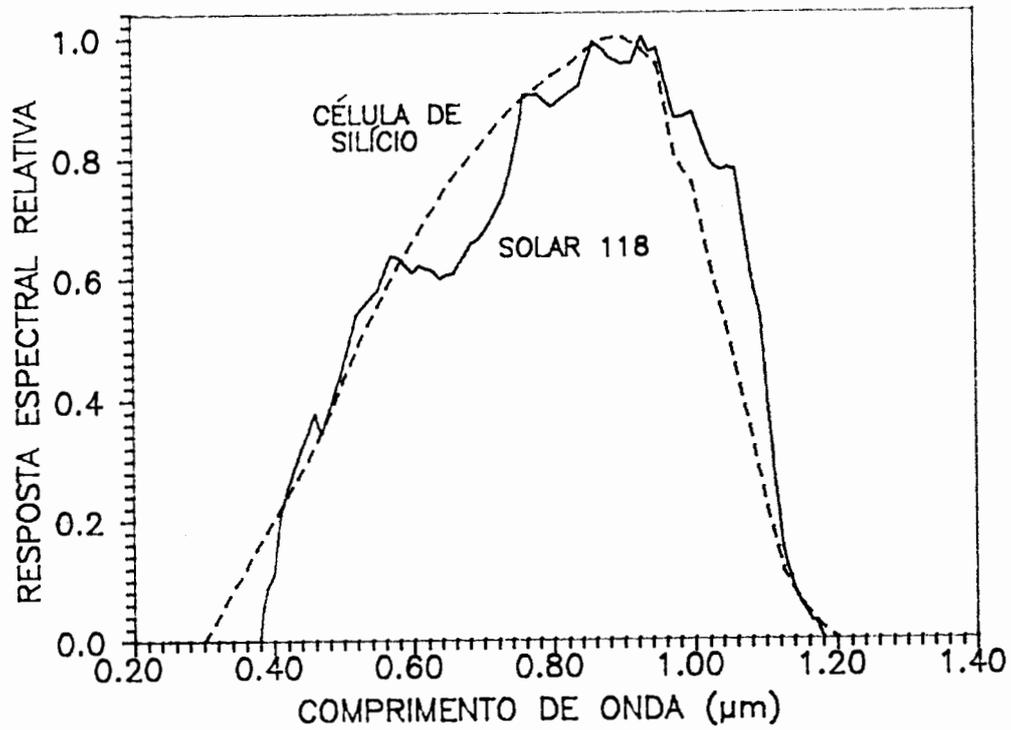


Figura 4.25. Resposta espectral medida do piranômetro fotovoltaico Solar 118 e da célula de silício.

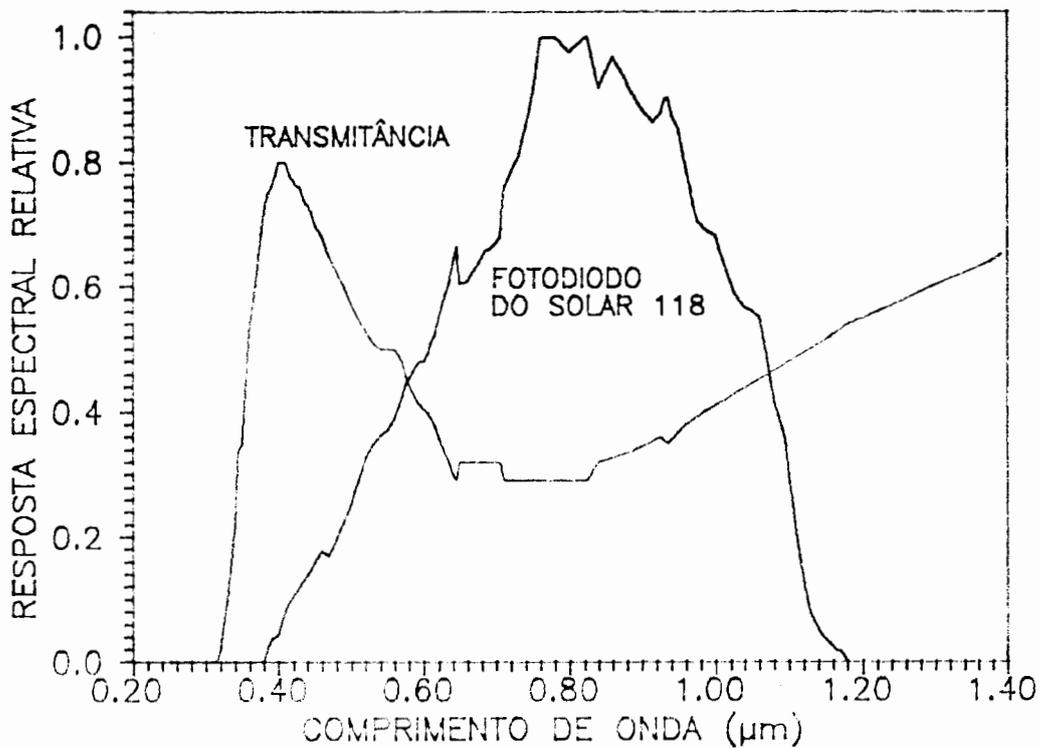


Figura 4.26. Transmissividade do filtro e resposta espectral do fotodiodo usados no piranômetro fotovoltaico Solar 118.

resposta espectral medida do piranômetro fotovoltaico Solar 118 e resposta da célula de silício. Nota-se que o Solar 118 apresenta maior sensibilidade numa região no infravermelho.

Com o objetivo de analisar a influência da correção espectral no piranômetro fotovoltaico Solar 118, obteve-se a transmissividade do filtro usado com o Espectrofotômetro Cary 14 do Instituto de Física da UFRGS. Conhecendo a transmissividade e a resposta espectral do Solar 118, foi possível obter a resposta espectral do fotodiodo utilizado. A Figura 4.26 apresenta a transmissividade do filtro e a resposta espectral do fotodiodo. Nota-se que realmente o filtro absorve na região de maior sensibilidade do fotodiodo. A Figura 4.27 compara a resposta espectral do fotodiodo usado como sensor no Solar 118 e a resposta espectral da célula de silício. Verifica-se que a célula de silício apresenta uma resposta menos dependente da radiação incidente.

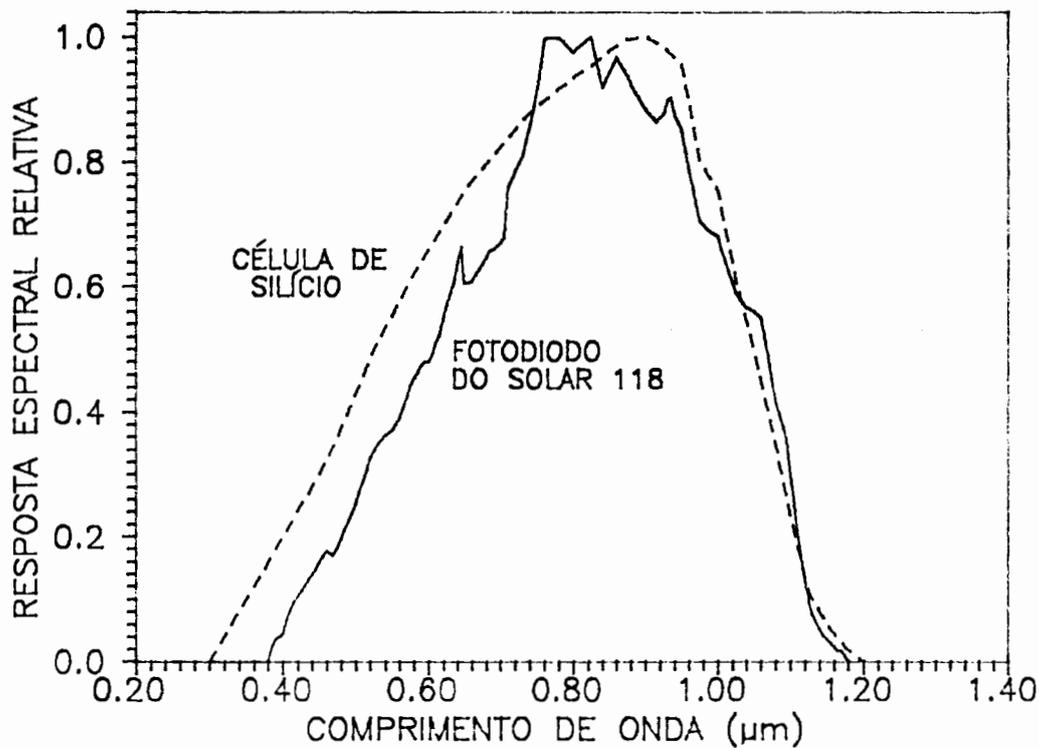


Figura 4.27. Resposta espectral do fotodiodo usado no Solar 118 e da célula de silício.

5. ANÁLISE DA SELETIVIDADE ESPECTRAL DA CÉLULA DE SILÍCIO

5.1. Relação entre irradiância espectral incidente e corrente de curto-circuito da célula de silício

A seletividade da célula de silício é causada pela dependência espectral de sua resposta e por ser sensível apenas em uma banda do espectro solar. Esta seletividade provoca desvios na medida da irradiância solar porque o espectro solar é variável. Através de uma simulação é possível verificar, separadamente, os desvios causados pela dependência espectral da resposta e pela banda de sensibilidade.

Para simular medidas de radiação solar realizadas com uma célula fotovoltaica de silício como sensor, com ou sem correção espectral, é necessário conhecer a corrente de curto-circuito desta em função da distribuição espectral solar incidente.

O valor da densidade de corrente de curto-circuito (d_{cc}) devido a uma determinada irradiância espectral solar $E(\lambda)$ é obtida conhecendo-se a resposta espectral $RSC(\lambda)$ da célula de silício, através da seguinte relação [20]:

$$d_{cc} = \int_0^{\infty} E(\lambda) RSC(\lambda) d\lambda \quad (5.1)$$

A irradiância espectral solar é expressa em miliwatts por centímetro quadrado por micrometro. As unidades da resposta espectral e do comprimento de onda da irradiância incidente são respectivamente, miliampere por miliwatt e micrometro, portanto, a unidade da densidade de corrente de curto-circuito é miliamperes por centímetro quadrado (mA/cm^2). Para obter a corrente de curto-circuito I_{cc} multiplica-se a densidade de

corrente pela área da célula.

A resposta espectral de uma célula de silício é obtida iluminando a célula com uma luz monocromática de intensidade $E'(\lambda)$ e medindo a corrente de curto-circuito. Obtém-se, então, a densidade de corrente dividindo a I_{cc} pela área ativa da célula, isto é, a área que não é preenchida ou sombreada pelo metal. A resposta espectral é a razão entre a densidade da corrente de curto-circuito e $E'(\lambda)$ [21].

5.2. Desvio nas medidas da irradiância solar devido a dependência espectral da resposta da célula de silício

Simulando a irradiância espectral solar incidente numa célula de silício, como foi apresentado no Capítulo 3 e utilizando a Equação 5.1 é possível computar medidas da irradiância solar, considerando somente a influência da dependência espectral da resposta da célula de silício.

A Tabela 5.1 apresenta as condições atmosféricas, usadas para simular 648 espectros da irradiância solar de dias limpos. Também foram gerados 180 espectros da irradiância solar de dias parcialmente nublados, sendo estes compostos por uma parte de um espectro de um dia nublado e a outra parte de um dia limpo.

Inicialmente simulou-se a irradiância espectral solar incidente na célula de silício. A partir desta, obteve-se a densidade espectral da corrente de curto-circuito $d_{cc}(\lambda)$, multiplicando a irradiância espectral solar pela resposta espectral da célula, sem correção espectral (Equação 5.1). Integrou-se a densidade espectral da corrente de curto-circuito e a irradiância espectral solar, usando o método de integração de Simpson, a fim de conhecer a densidade de corrente de curto-circuito e a irradiância solar incidente na célula. A corrente de curto-circuito foi obtida multiplicando a d_{cc} da célula pela área desta. Conhecendo, então, a corrente de curto-circuito e a irradiância solar incidente na célula, é possível construir um gráfico, como mostra a Figura 5.1 e obter a constante de calibração do sensor de silício.

Tabela 5.1. Parâmetros atmosféricos usados para simular 648 irradiâncias espectrais solar.

ANGULO DE ZENITE	de 0° a 85° de 5° em 5°
TEMPERATURA	10°C, 20°C e 30°C
UMIDADE RELATIVA	0,50 e 0,80
VISIBILIDADE	15 km, 30 km e 45 km
ALFA	1,10 e 1,50
ALBEDO TERRESTRE	0,20
QUANTIDADE DE OZONIO	0,28 cm(CNTP)
ALTURA MEDIA DA CAMADA DE OZONIO	22 km
ALTITUDE	ao nível do mar

A calibração foi realizada, utilizando irradiância solar de 300 W/m^2 até 1000 W/m^2 , que é o intervalo de maior importância para medidas [2]. Obteve-se a constante de calibração, através da inclinação da melhor reta entre os pontos mostrados na Figura 5.1, no intervalo acima especificado e que passe por zero, através da relação [22]:

$$\text{CTE} = \frac{\sum E(\lambda) I_{cc}(\lambda)}{\sum E(\lambda) E(\lambda)} \quad (5.2)$$

onde a constante de calibração é dada em $\text{mA}/(\text{W/m}^2)$.

Obtida a constante de calibração calculou-se a

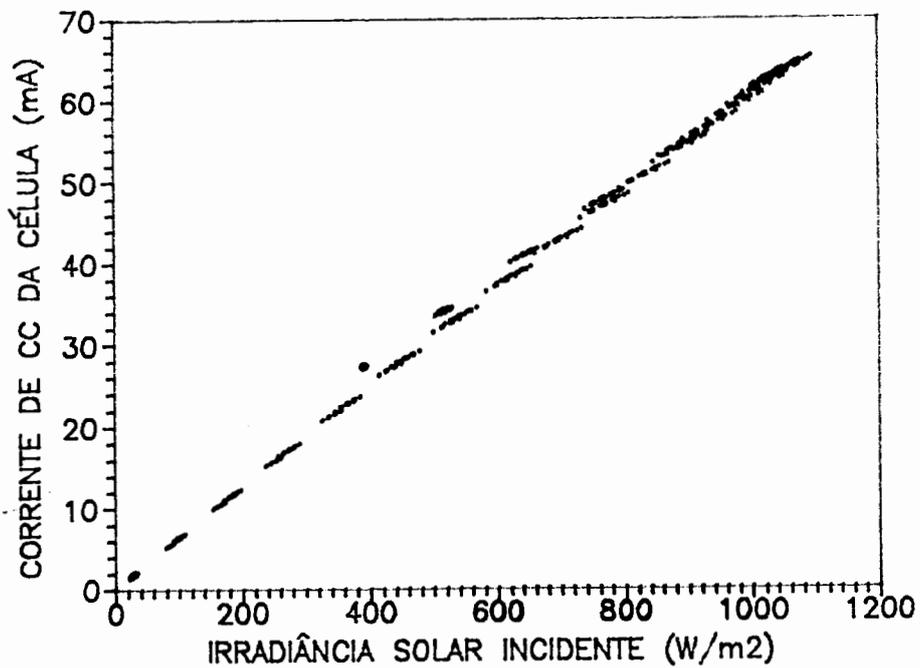


Figura 5.1. Corrente de curto-circuito versus irradiância solar incidente, ambas simuladas, para uma célula de silício sem correção espectral.

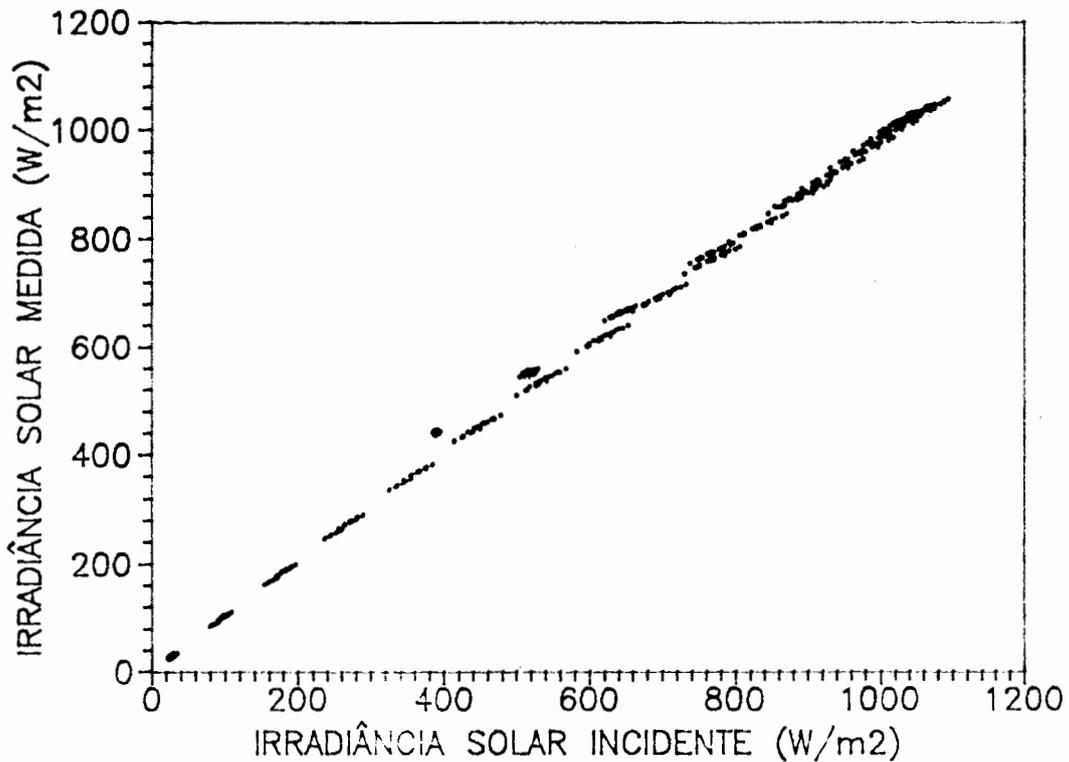


Figura 5.2. Irradiância solar medida com uma célula de silício versus irradiância solar incidente, ambas simuladas.

irradiância solar medida pela célula de silício e construiu-se um gráfico (Figura 5.2) que mostra a dispersão das medidas. A Figura 5.3 mostra os desvios percentuais de todas as medidas simuladas com a célula de silício sem correção espectral, apresentadas na Figura 5.2. Entende-se por desvio percentual a diferença percentual entre a irradiância incidente na célula e a irradiância medida, no caso, obtida através de simulação. Nota-se que com o decréscimo da irradiância solar os desvios aumentam. Os pontos que aparecem agrupados acima dos demais correspondem aos dias parcialmente nublados; pode-se constatar que para estes dias os desvios são maiores do que em dias limpos.

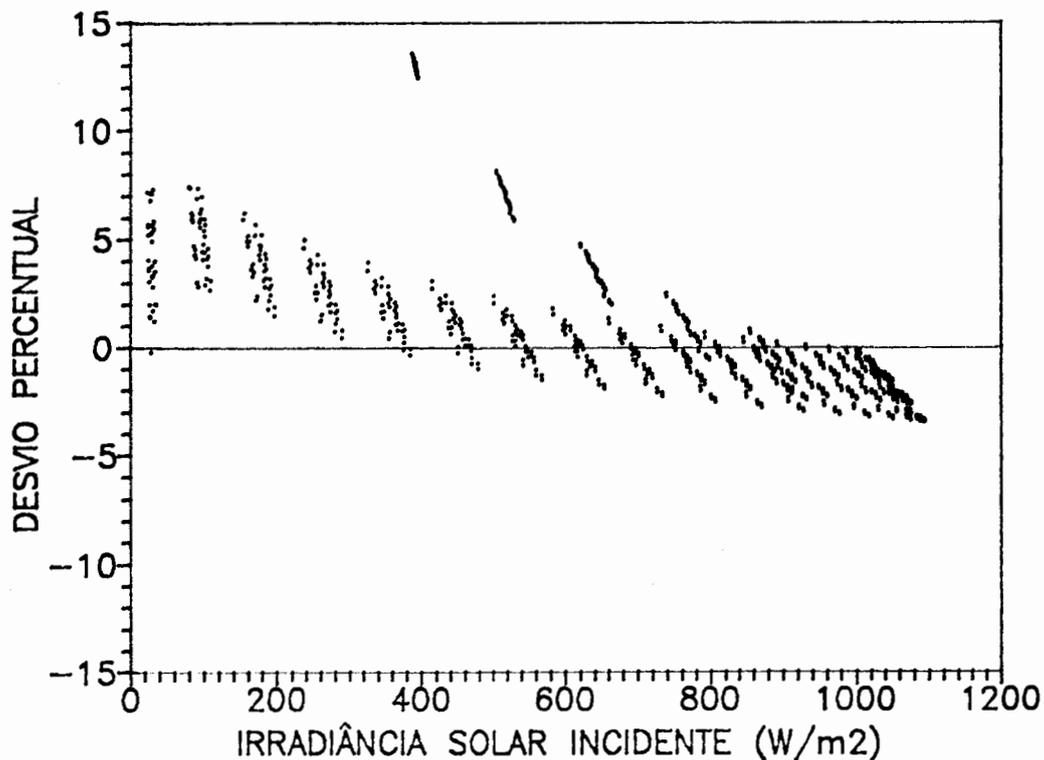


Figura 5.3. Desvio percentual da medida da irradiância solar com uma célula de silício sem correção espectral.

Conhecendo a resposta espectral de células de silício com correção, como foi mostrado no Capítulo 4, é possível fazer uma análise da influência da correção espectral em células de silício. Repetiu-se o processo acima para a célula de silício com a correção espectral apresentada na Figura 4.14, que utiliza um vidro comum de 7 mm de espessura. A dispersão das medidas é

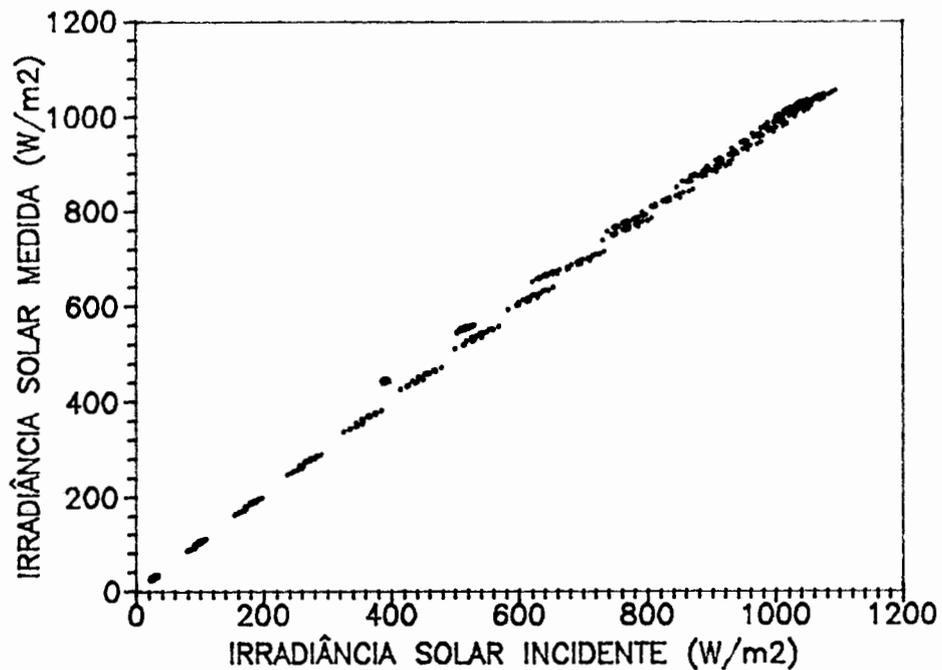


Figura 5.4. Simulação da dispersão da irradiância solar medida com uma célula de silício corrigida espectralmente com um vidro de 7 mm de espessura.

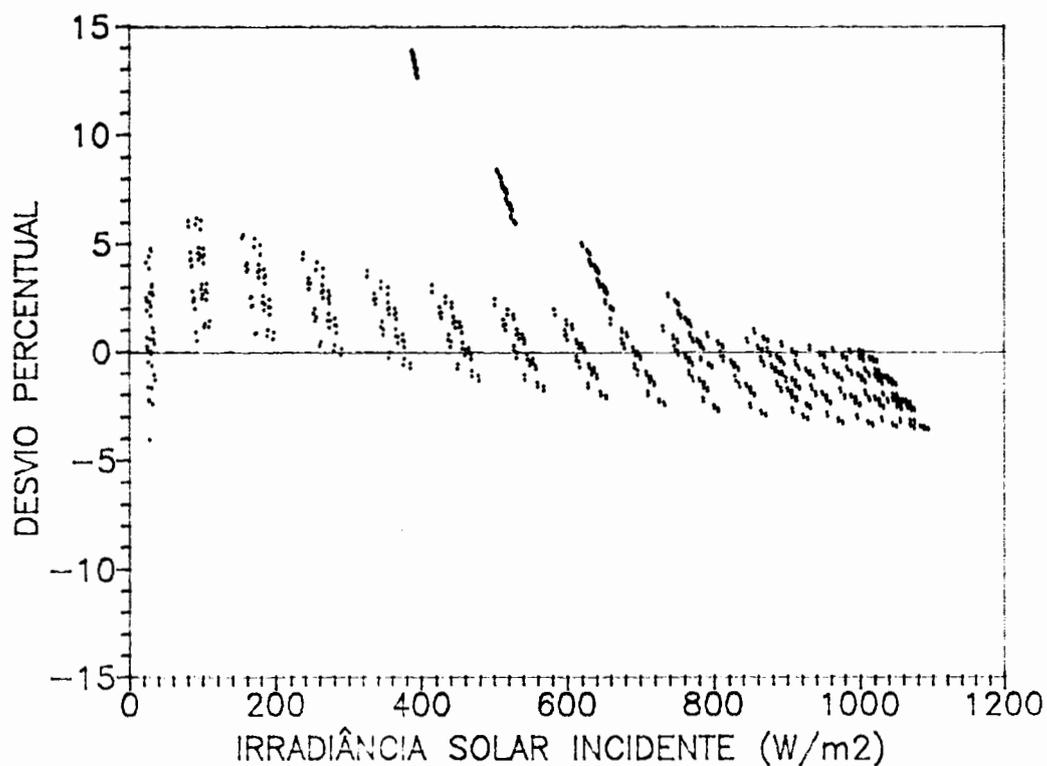


Figura 5.5. Desvio percentual da medida da irradiância solar com uma célula de silício corrigida espectralmente com um vidro de 7 mm de espessura.

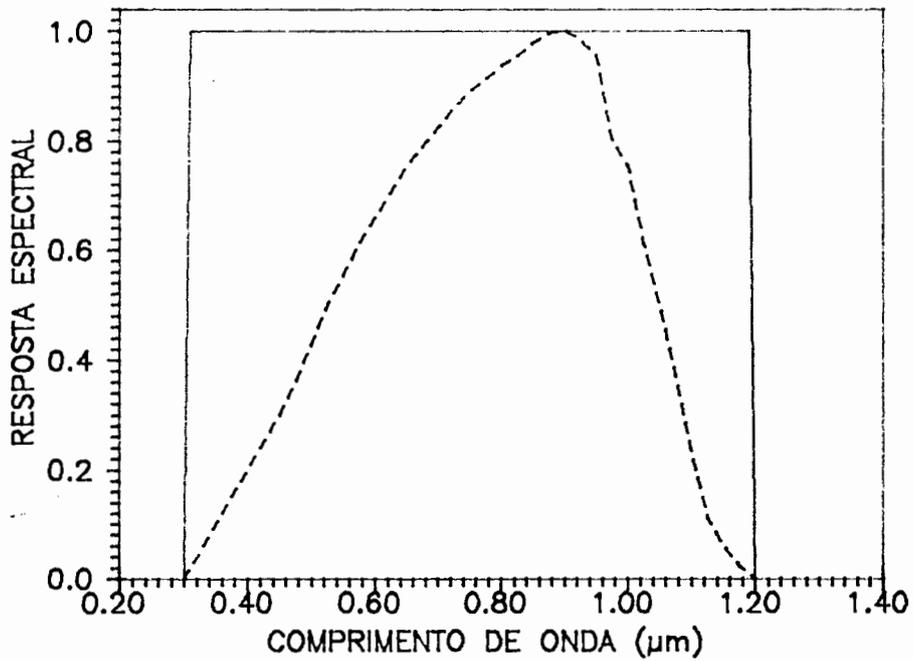


Figura 5.6. Resposta espectral uniforme da célula de silício comparada com a resposta real.

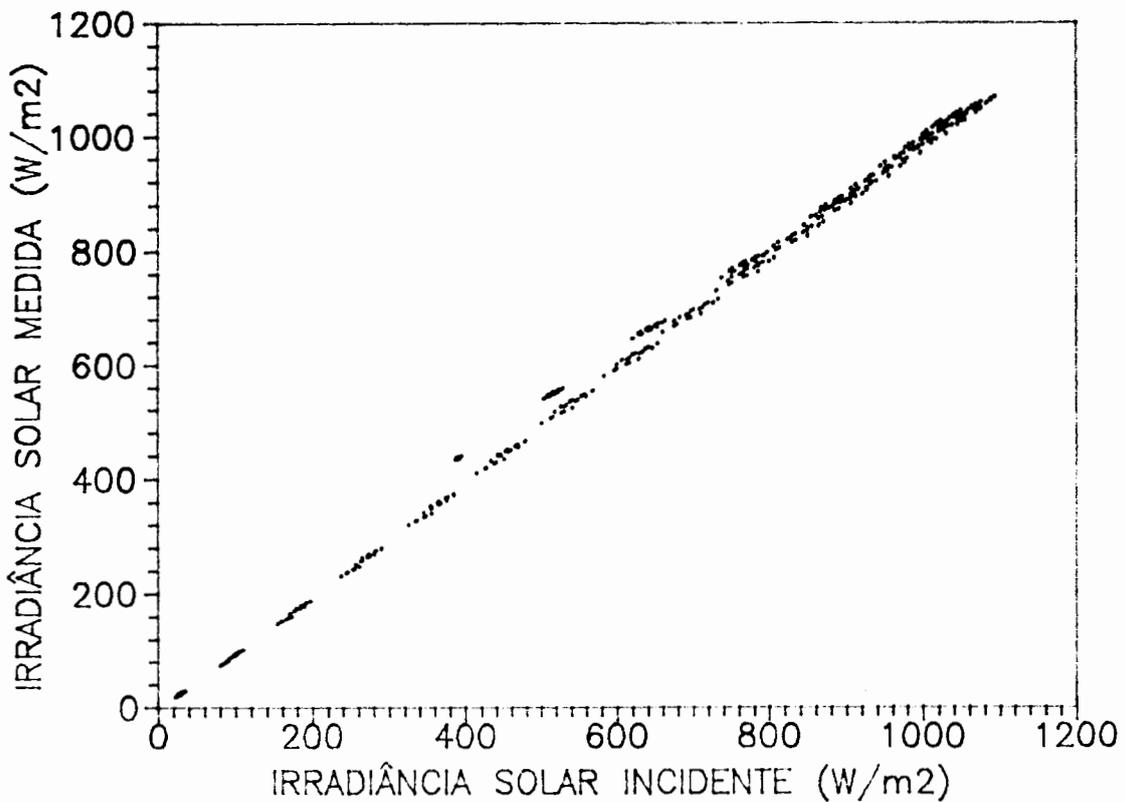


Figura 5.7. Simulação da dispersão da irradiância solar medida com uma célula de silício com resposta espectral uniforme.

apresentada na Figura 5.4 e na Figura 5.5 é mostrado o desvio para cada medida.

A comparação da Figura 5.3 com a Figura 5.5, não permite verificar uma melhora no desvio das medidas. Para verificar se uma resposta espectral uniforme em toda banda de sensibilidade (Figura 5.6) possibilita diminuir o erro nas medidas, repetiu-se o mesmo procedimento e obteve-se os gráficos da Figura 5.7 e da Figura 5.8.

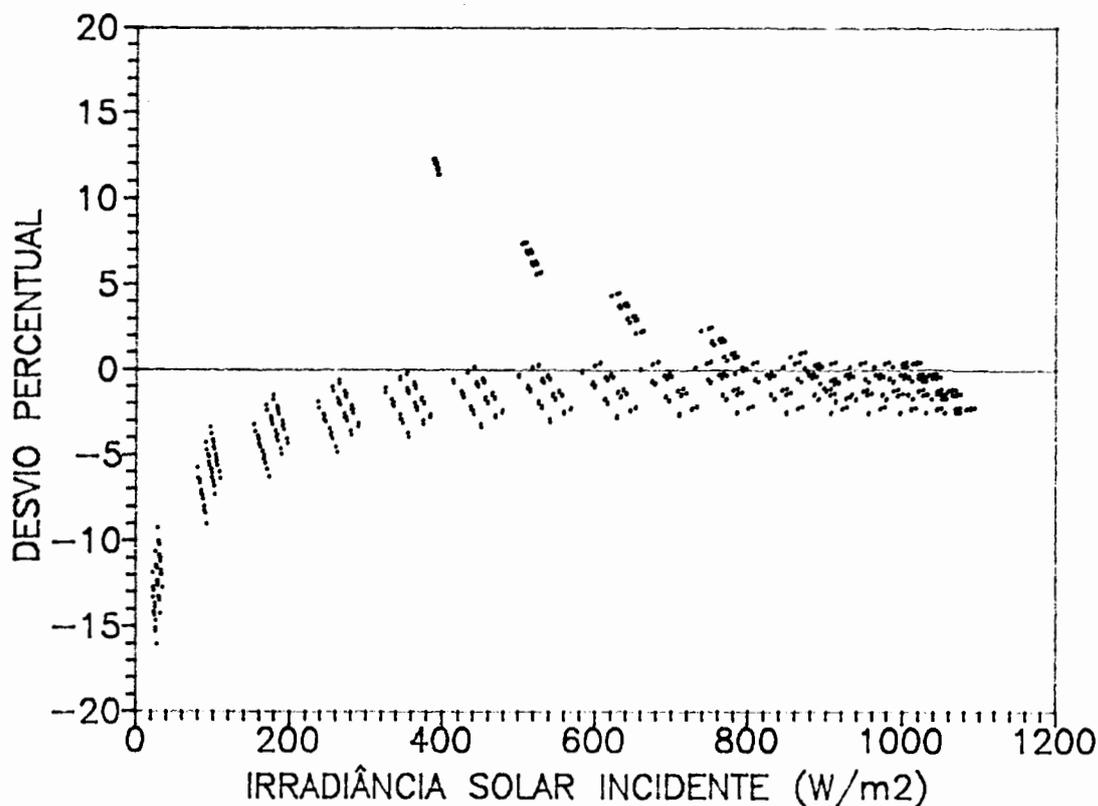


Figura 5.8. Desvios percentuais da medida da irradiância solar com uma célula de silício com resposta espectral uniforme.

Surpreendentemente não se verifica nenhuma melhora significativa no desvio das medidas. Para baixas irradiâncias nota-se que o desvio aumentou e para altos valores ocorreu uma pequena melhora. Observando os pontos que representam o desvio das medidas da irradiância em dias parcialmente nublados, também verifica-se que o desvio diminuiu, mas muito pouco. Deve-se ressaltar que a análise feita, considerou a maior parte da radiação de céu limpo, isto é, sem nuvens e apenas uma pequena

parte de radiação de céu parcialmente nublado. Fazendo esta análise, considerando uma maior quantidade de radiação de céu nublado e parcialmente nublado, o resultado pode não ser o acima.

Tabela 5.2. Desvios das medidas simuladas da irradiância solar utilizando células de silício com várias correções espectrais e um piranômetro fotovoltaico com e sem correção espectral.

SENSOR	1 (W/m ²)	2 (%)	3 (W/m ²)	4 (W/m ²)	5 (W/m ²)
CÉLULA DE SILÍCIO SEM CORREÇÃO	18,3	13,5	9,7	14,8	39,1
CÉLULA DE SILÍCIO COM VIDRO DE 7 mm	18,9	13,9	8,9	15,1	40,0
CÉLULA DE SILÍCIO COM RESPOSTA UNIFORME	18,0	12,3	10,8	12,9	38,2
CÉLULA DE SILÍCIO COM UVITEX OB E KF241	18,1	13,2	12,3	15,0	37,6
CÉLULA DE SILÍCIO COM UVITEX OB E COUMARINA 153	18,4	13,4	11,9	15,1	38,5
CÉLULA DE SILÍCIO COM UVITEX OB, COUMARINA 153 E VIDRO DE 6 mm	18,8	13,6	11,7	15,5	39,5
PIRANÔMETRO FOTOVOLTAICO SOLAR 118	17,2	13,1	9,3	11,7	47,5
PIRANÔMETRO FOTOVOLTAICO SOLAR 118 SEM CORREÇÃO ESPECTRAL	18,6	13,2	14,7	16,0	37,9

A fim de se dispor de vários parâmetros para analisar o desvio das medidas, computou-se:

1 - O desvio quadrático médio.

- 2 - O maior desvio percentual (%) para a irradiância superior a 200 W/m^2 .
- 3 - O maior desvio em W/m^2 para a irradiância inferior ou igual a 200 W/m^2 .
- 4 - O maior desvio em W/m^2 para as 68% (1 σ) melhores medidas.
- 5 - O maior desvio em W/m^2 para as 95% (2 σ) melhores medidas.

O desvio quadrático médio permite comparar a dispersão das medidas obtida com os diversos sensores, mas não possibilita conhecer em que intervalo ocorrem as piores desvios. Para poder verificar em que intervalo ocorreu uma melhora, selecionou-se o maior desvio percentual para irradiâncias superiores a 200 W/m^2 e o maior desvio em W/m^2 para irradiâncias inferiores ou iguais a 200 W/m^2 . Também obteve-se o maior erro para as 68% e 95% melhores medidas.

Na Tabela 5.2 compara-se os desvios nas medidas da irradiância solar com células corrigidas espectralmente, uma célula sem correção, uma célula com resposta uniforme, um piranômetro fotovoltaico (Solar 118) com e sem a correção espectral, mostradas nas Figura 4.25 e Figura 4.27 respectivamente, para todas as irradiâncias espectrais anteriormente mencionadas.

Analisando a Tabela 5.2 não é possível constatar uma melhora significativa no desvio quando é feita uma correção espectral na resposta da célula. Quando a cobertura é constituída por um vidro de 7 mm, que visualmente torna a resposta espectral mais uniforme, não se verifica uma melhora. Por outro lado, quando a correção é constituída de corantes orgânicos luminescentes, os quais tornam a resposta espectral menos uniforme, o desvio das medidas não aumenta. No caso do piranômetro fotovoltaico Solar 118, ao ser retirada a correção espectral, nota-se que o desvio quadrático médio das medidas piora, mas o pior desvio percentual para medidas no intervalo de maior interesse (superior a 200 W/m^2) quase não se altera; somente ocorre um aumento no desvio para as medidas de irradiância inferiores ou iguais a 200 W/m^2 . Quando é feita uma correção com um vidro de 7 mm na célula, verifica-se que ocorre uma pequena melhora para irradiâncias inferiores a 200 W/m^2 , mas para valores superiores a este o desvio aumenta. No entanto,

quando é feita uma correção espectral uniforme na célula os desvios diminuem, mas muito pouco. Analisando a segunda coluna constata-se que o pior desvio para irradiancias no intervalo de maior interesse varia muito pouco e portanto não é justificável uma correção espectral em células de silício.

5.3. Desvio das medidas da irradiância solar devido a banda de sensibilidade da célula de silício

Tendo em vista que uma correção espectral na resposta da célula de silício não melhora o desvio das medidas da irradiância solar, analisou-se a influência da banda de sensibilidade da célula. Foi suposta uma resposta espectral uniforme para a célula de silício, e aumentou-se a banda de sensibilidade desta em direção ao infravermelho, a partir da banda original entre $0,30 \mu\text{m}$ e $1,20 \mu\text{m}$. Foram simuladas as irradiancias espectrais apresentados na Tabela 5.1 e mais 180 de dias parcialmente nublados. Obteve-se, então, a corrente de curto-circuito para cada irradiância solar incidente e a constante de calibração, pelo procedimento descrito anteriormente. Comparou-se as medidas com a irradiância solar incidente, através do desvio quadrático médio, o maior desvio percentual para irradiancias superiores a 200 W/m^2 e o maior desvio para irradiancias inferiores ou iguais a 200 W/m^2 . Repetiu-se o processo, aumentando a banda de sensibilidade da célula em direção ao infravermelho de $0,05 \mu\text{m}$ em $0,05 \mu\text{m}$ até $2,0 \mu\text{m}$ e a partir deste valor de $0,25 \mu\text{m}$ em $0,25 \mu\text{m}$. Na Figura 5.9 apresenta-se o desvio quadrático médio das medidas versus o limite da banda de sensibilidade no infravermelho. Nota-se que o desvio quadrático médio decresce aproximadamente exponencialmente com o aumento da banda de sensibilidade e em certas regiões este decréscimo é menos acentuado. Estas regiões correspondem a banda de absorção da água, nas quais ocorre absorção de toda ou quase toda a radiação solar. A Figura 5.10 e a Figura 5.11 apresentam o maior desvio percentual para irradiancias superiores a 200 W/m^2 e o maior desvio em W/m^2 para irradiancias inferiores ou iguais a 200 W/m^2 , respectivamente. Verifica-se que o decréscimo destes

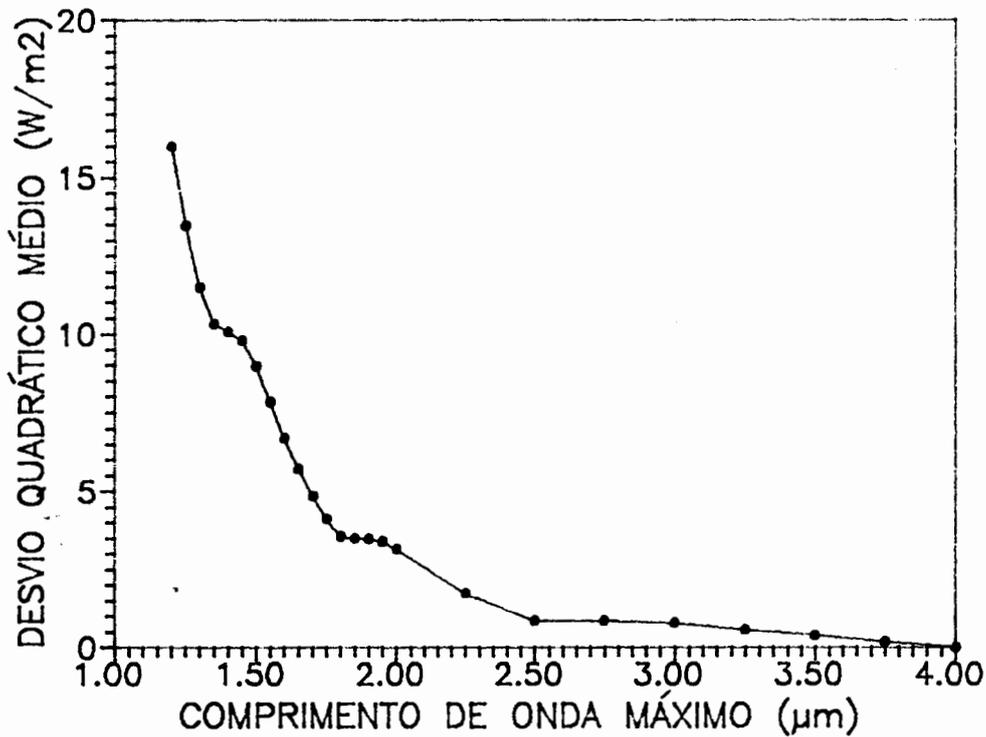


Figura 5.9. Desvio quadrático médio das medidas da irradiância solar em função do limite da banda de sensibilidade do sensor no infravermelho.

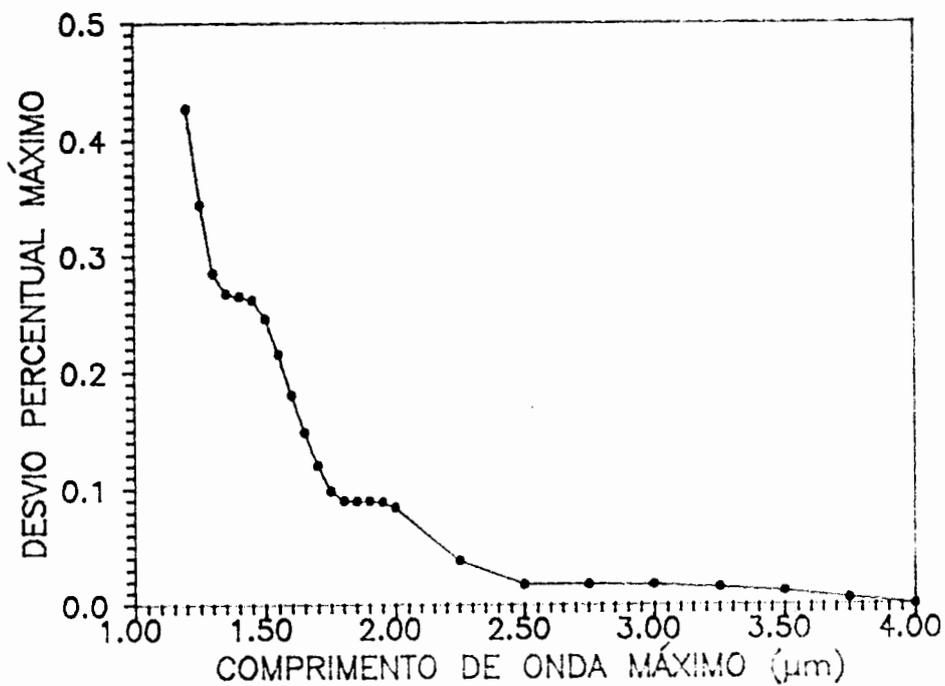


Figura 5.10. Desvio percentual máximo para irradiâncias superiores a 200 W/m^2 em função do limite da banda de sensibilidade do sensor no infravermelho.

desvios também é aproximadamente exponencial e apresenta o mesmo comportamento do desvio quadrático médio.

Conclui-se, a partir das análises feitas neste capítulo, que em se tratando da maior parte de irradiância solar de céu limpo, sem nuvens, somente é possível diminuir o desvio das medidas, aumentando a banda de sensibilidade em direção a comprimentos de onda mais longos. No caso de uma célula de silício, isto não é possível. Portanto, como uma correção espectral dentro da banda de sensibilidade não diminui o desvio, um medidor de irradiância solar, que usa uma célula de silício como sensor, apresenta uma imprecisão devido a largura e localização da banda de sensibilidade.

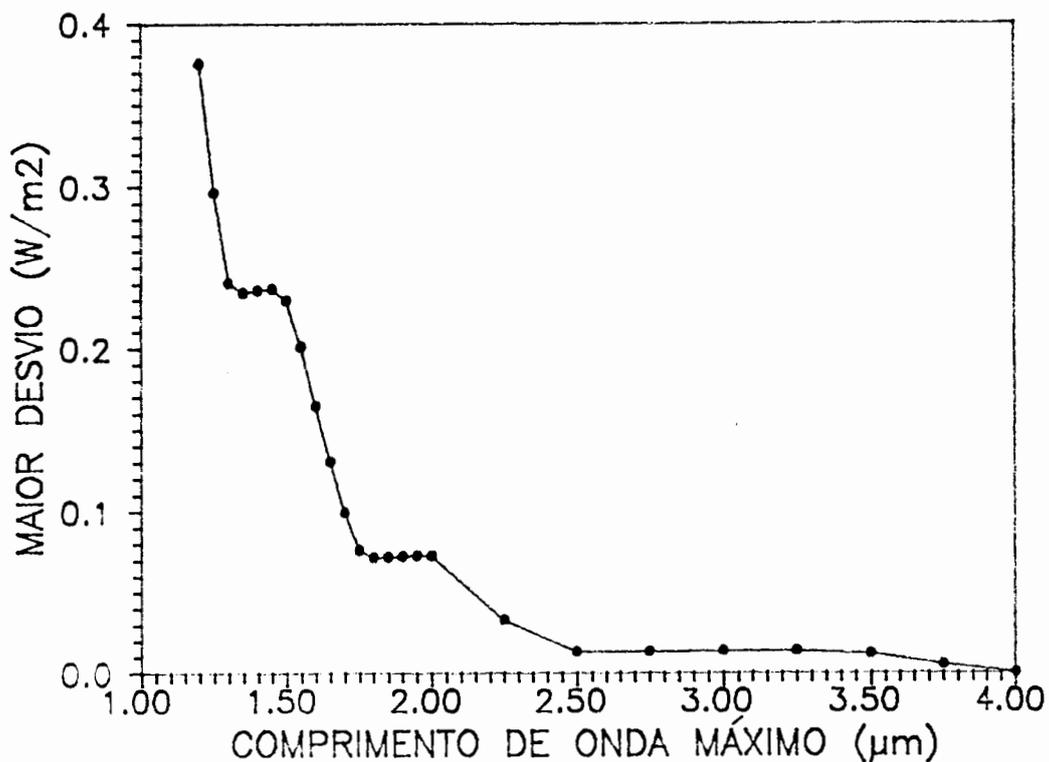


Figura 5.11. Maior desvio para irradiâncias inferiores a 200 W/m^2 em função do limite da banda de sensibilidade do sensor no infravermelho.

6. MEDIDAS EXPERIMENTAIS

6.1. Comparação teórica e experimental da influência da seletividade espectral da célula de silício

Foram realizadas medidas experimentais da irradiância solar usando células de silício com as coberturas descritas no Capítulo 4. Sobre um plano inclinado de 26° foram dispostas todas as células com cobertura, o piranômetro fotovoltaico Haenni (Solar 118) e o piranômetro Eppley PSP (Eppley Radiometer Model PSP). Este último foi utilizado como referência, por ser um piranômetro padrão secundário, o qual é utilizado para a calibração de outros piranômetros.

Para todas as células, a face da cobertura em que incidia a radiação solar era constituída por um vidro comum. Para que fosse possível comparar o desvio das medidas da irradiância destas com as medidas de uma célula de silício sem cobertura e do Solar 118, também foi colocado um vidro fino (1,85 mm) sobre a célula e sobre o difusor do Solar 118. Desta forma, em todos os sensores a radiação solar é refletida com a mesma intensidade para os mesmos ângulos de incidência. Para evitar efeitos devido às multiplas reflexões entre o vidro e a superfície da célula ou o difusor do Solar 118, este espaço foi preenchido com vaselina, a qual possui um índice de refração bastante próximo ao do vidro. No caso da célula com uma cobertura constituída por um vidro comum de 4,15 mm, também preencheu-se o espaço entre a superfície da célula e o vidro com vaselina. Com isso foi possível obter um bom casamento ótico.

Cada uma das células foi conectada a um resistor, medindo-se a queda de tensão sobre o mesmo, a qual é diretamente proporcional a corrente da célula. O resistor foi dimensionado de tal forma que a queda de tensão não fosse superior a 20 mV, a fim

de operar próximo da corrente de curto-circuito. Em todos os sensores construídos foi utilizado o mesmo tipo de resistor.

O plano inclinado de 28° foi girado em torno de um eixo vertical, acompanhando a trajetória do Sol. Foi mantida sempre a mesma inclinação, pois a constante de calibração do Eppley PSP varia conforme o ângulo de inclinação [8]. A irradiância solar foi medida de 10 em 10 minutos com o auxílio de um sistema de aquisição de dados constituído por um microcomputador PC-XT e uma placa conversora analógico-digital de 12 bits com entrada ajustável para fundo de escala de 40 mV, isto é, com resolução de centésimos de milivolt. Tendo em vista que os piranômetros térmicos apresentam um tempo de resposta mais longo que os fotovoltaicos, somente foram consideradas as medidas nas quais foi possível assegurar boa estabilidade da irradiância. O procedimento utilizado foi o de medir seqüências de dez medidas para todos os sensores num intervalo de tempo menor que meio minuto. Foram seleccionadas somente as médias dos conjuntos de 10 medidas em que a diferença entre cada uma das medidas individuais e o valor médio fosse menor que 1,5%. Somente foram realizadas medidas quando a radiação solar incidia no sensor num ângulo menor ou igual a 30° , para evitar desvios significativos devido a reflexão do vidro. Realizaram-se as medidas durante um dia limpo, quase sem nuvens e calibraram-se os sensores pelo método descrito no Capítulo 5, usando como referência o Eppley PSP. A diferença neste caso, é que o sinal obtido dos sensores é tensão e não corrente como no caso da simulação e portanto a constante de calibração é dada em $mV/(W/m^2)$. Na Tabela 6.1 apresenta-se a mesma análise da Tabela 5.2, na qual se mostram os desvios das medidas simuladas com estes sensores.

Analisando a Tabela 6.1 verifica-se que as medidas da irradiância solar realizadas com as células corrigidas espectralmente e com o Solar 118 apresentam desvios maiores do que a célula sem correção. Este resultado não concorda com o resultado obtido no Capítulo 5, a partir da Tabela 5.2. É conveniente, portanto, analisar as prováveis causas desta divergência para cada sensor, quando comparados com a célula sem correção. Para isso obteve-se os gráficos dos desvios percentuais das irradiâncias medidas e simuladas para todos os sensores

apresentados na Tabela 6.1. Em cada gráfico também apresenta-se os desvios percentuais da célula de silício sem correção, a fim de servir como parâmetro comparativo para a análise.

Tabela 6.1. Análise dos desvios nas medidas da irradiância solar durante um dia limpo.

SENSOR	1 (W/m ²)	2 (%)	3 (W/m ²)	4 (W/m ²)
CÉLULA DE SILÍCIO	15,1	3,2	17,2	22,8
CÉLULA DE SILÍCIO COM VIDRO DE 4 mm	22,6	6,2	27,7	40,1
CÉLULA DE SILÍCIO COM UVITEX OB E KF241	32,6	7,9	36,6	48,1
CÉLULA DE SILÍCIO COM UVITEX OB E COUMARINA 153	30,0	7,7	36,1	47,2
CÉLULA DE SILÍCIO COM UVITEX OB, COUMARINA 153 E VIDRO DE 6 mm	18,7	5,3	21,9	29,4
PIRANÔMETRO FOTOVOLTAICO SOLAR 118	20,5	4,3	21,5	32,3

onde:

- 1 - desvio quadrático médio.
- 2 - maior desvio percentual para a irradiância superior a 200 W/m².
- 3 - maior desvio em W/m² para as 68% (1σ) melhores medidas.
- 4 - maior desvio em W/m² para as 95% (2σ) melhores medidas.

O desvio percentual é calculado da seguinte forma: irradiância medida com o piranômetro em análise menos a irradiância medida com o Eppley PSP vezes 100, dividido pela irradiância medida com o Eppley PSP. Um desvio percentual positivo significa que a irradiância medida com o piranômetro em

análise é maior do que a irradiância medida com o Eppley PSP.

Observa-se nas Figuras 6.1.a, 6.2.a, 6.3.a, 6.4.a e 6.5 um desvio percentual positivo e maior do que a célula sem correção, para baixas irradiâncias, exceto na Figura 6.5. O desvio percentual positivo para baixas irradiâncias, quando é usada a célula de silício sem cobertura, é devido ao deslocamento do pico do espectro solar em direção a comprimentos de onda mais longos, com o aumento da massa de ar, onde a célula é mais sensível.

A fim de verificar se o comportamento dos desvios das irradiâncias medidas é devido a erros experimentais ou à resposta espectral do sensor, simularam-se as irradiâncias solar que seriam medidas com cada sensor, da mesma forma que no Capítulo 5, utilizando a resposta espectral medida, apresentada no Capítulo 4. Para isso simularam-se irradiâncias espectrais solar durante um dia limpo, conforme o Capítulo 3, a partir dos seguintes parâmetros atmosféricos:

temperatura = 28 °C

umidade relativa = 0,60

visibilidade = 30 km

alfa = 1,30

albedo terrestre = 0,20

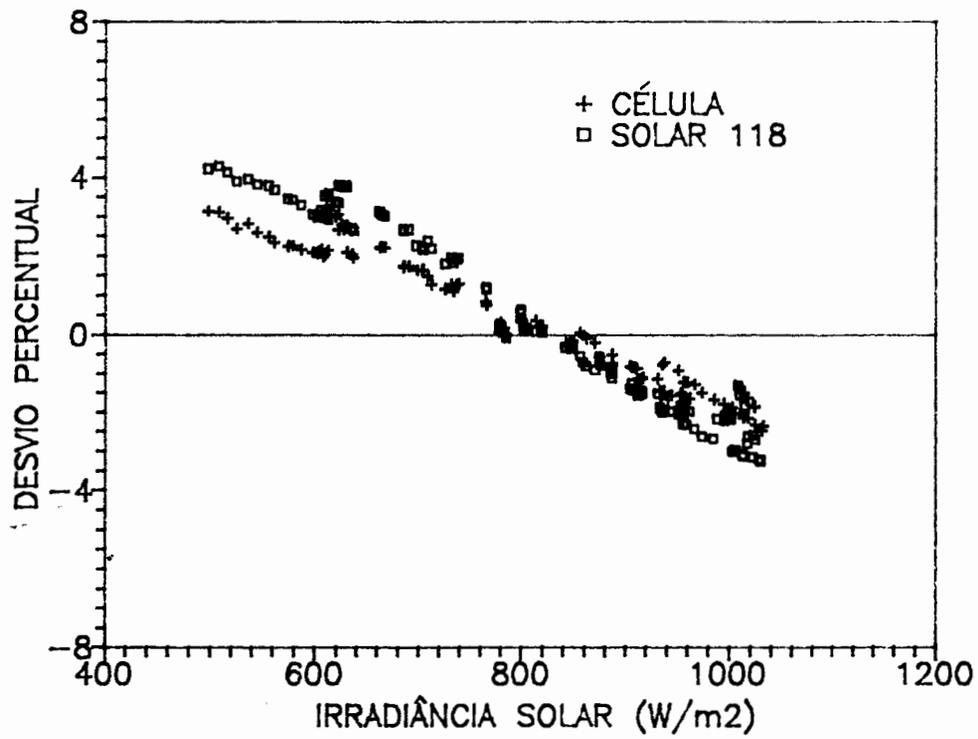
quantidade de ozônio = 0,28 cm(CNTP)

altura média da camada de ozônio = 22 km

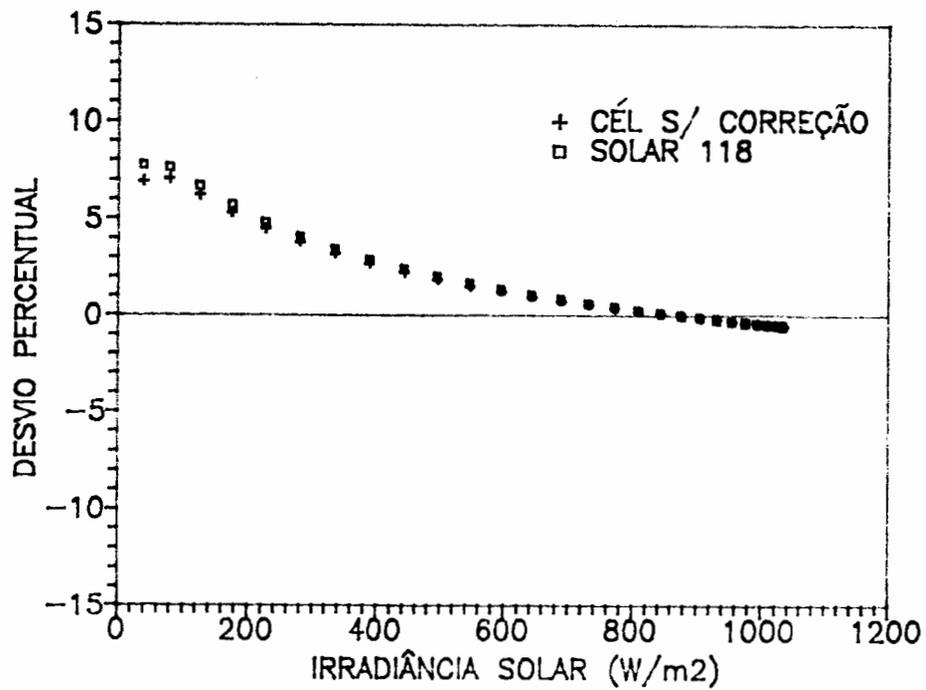
altitude = 100 m

Obteve-se, então, os desvios percentuais simulados para cada sensor, os quais são apresentados nas Figuras 6.1.b, 6.2.b, 6.3.b e 6.4.b. Nota-se nessas figuras, que os desvios da irradiância solar obtida com a célula de silício sem correção apresentam o mesmo comportamento que no caso das medidas experimentais.

Ao comparar-se a Figura 6.1.a com a Figura 6.1.b, as quais apresentam os desvios percentuais da irradiância solar obtida com o Solar 118, nota-se que, para baixas irradiâncias, os desvios das medidas experimentais são maiores do que das irradiâncias simuladas, comparados aos desvios da irradiância obtida com a célula sem correção. Esta diferença pode ser atribuída ao comportamento da curva da corrente versus a tensão

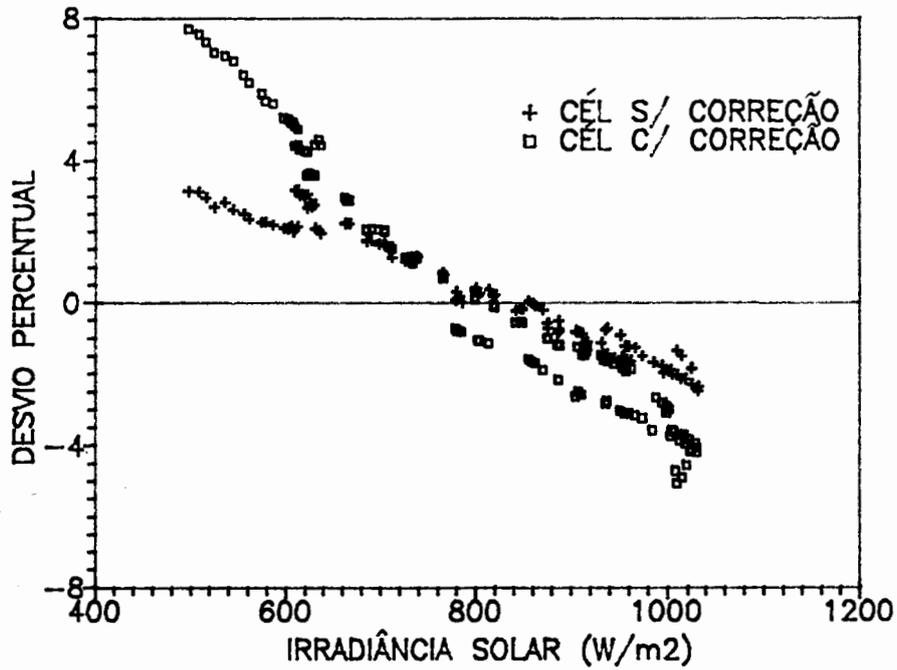


(a)

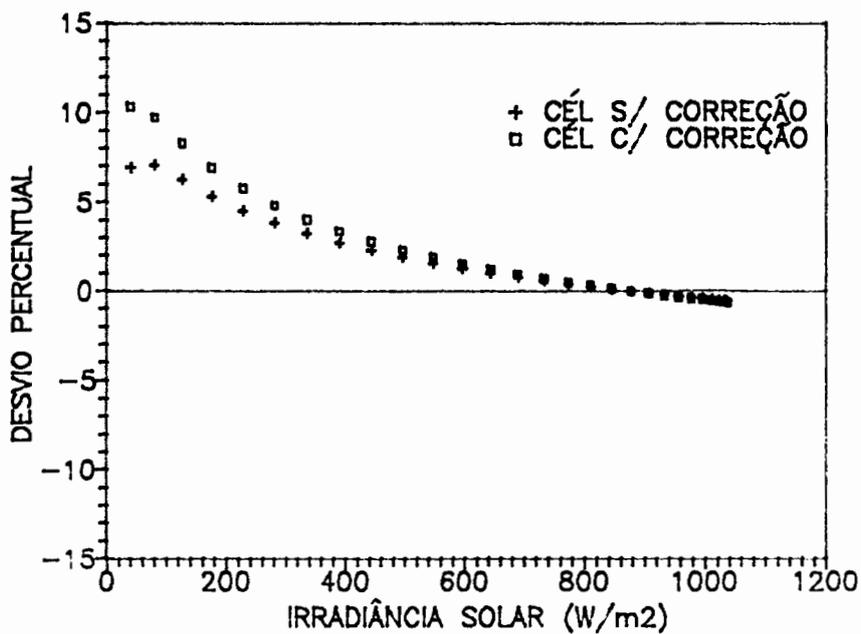


(b)

Figura 6.1. Desvios percentuais da irradiância solar obtida com o Solar 118 e a célula de silício sem correção. (a) Medida. (b) Simulada.

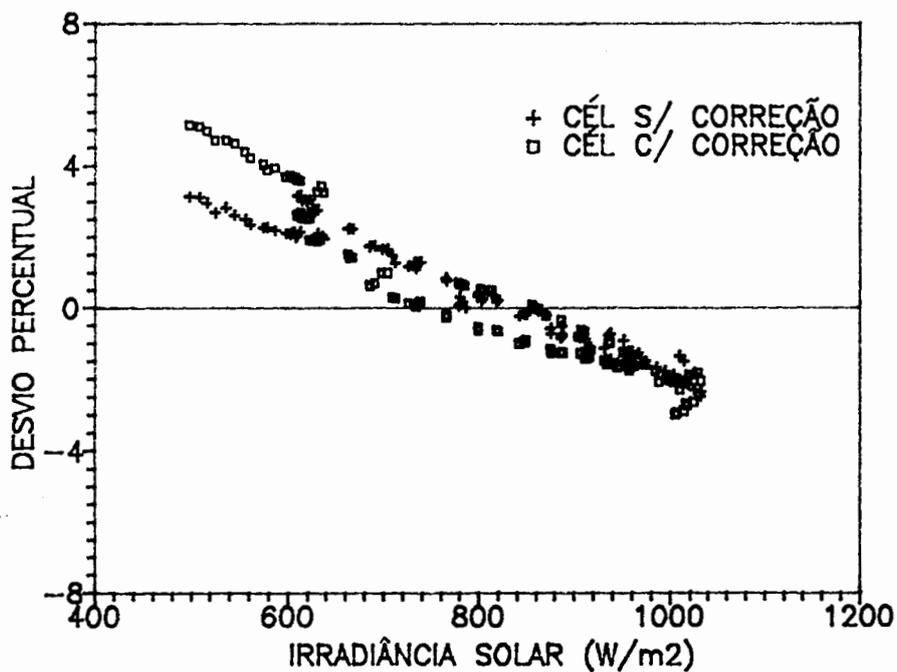


(a)

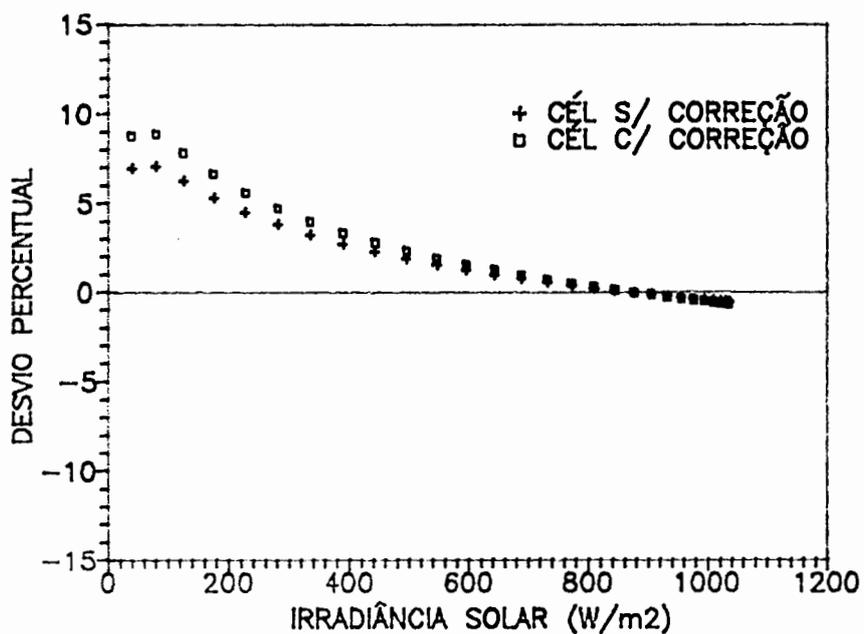


(b)

Figura 6.2. Desvios percentuais da irradiância solar usando uma célula com cobertura composta por Uvitex OB e coumarina 153 dissolvidos em resina poliéster e com a célula sem correção. (a) Irradiância medida. (b) Irradiância simulada.

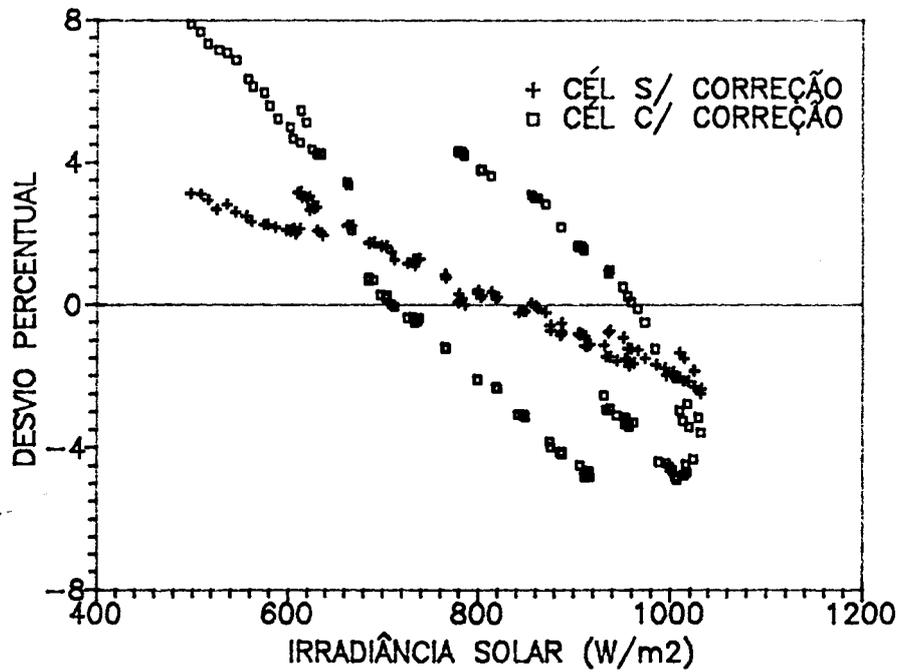


(a)

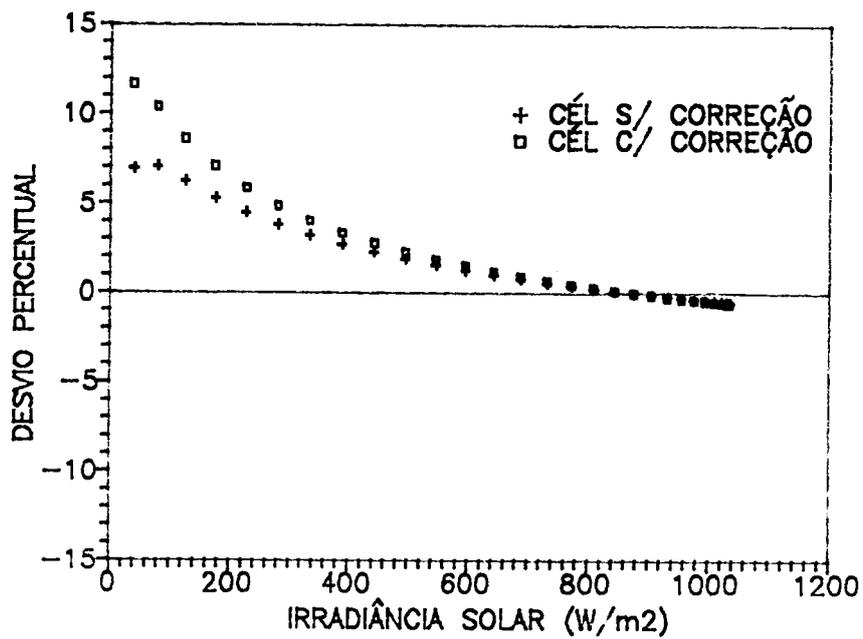


(b)

Figura 6.3. Desvios percentuais da irradiância solar usando uma célula com cobertura composta por Uvitex OB e coumarina 153 dissolvidos em resina poliéster e um vidro de 6,15 mm e com a célula sem correção. (a) Irradiância medida. (b) Irradiância simulada.



(a)



(b)

Figura 6.4. Desvios percentuais da irradiância solar usando uma célula com cobertura composta por Uvitex OB dissolvido em resina poliéster e KF241 dissolvido em PMMA e com a célula sem correção. (a) Irradiância medida. (b) Irradiância simulada.

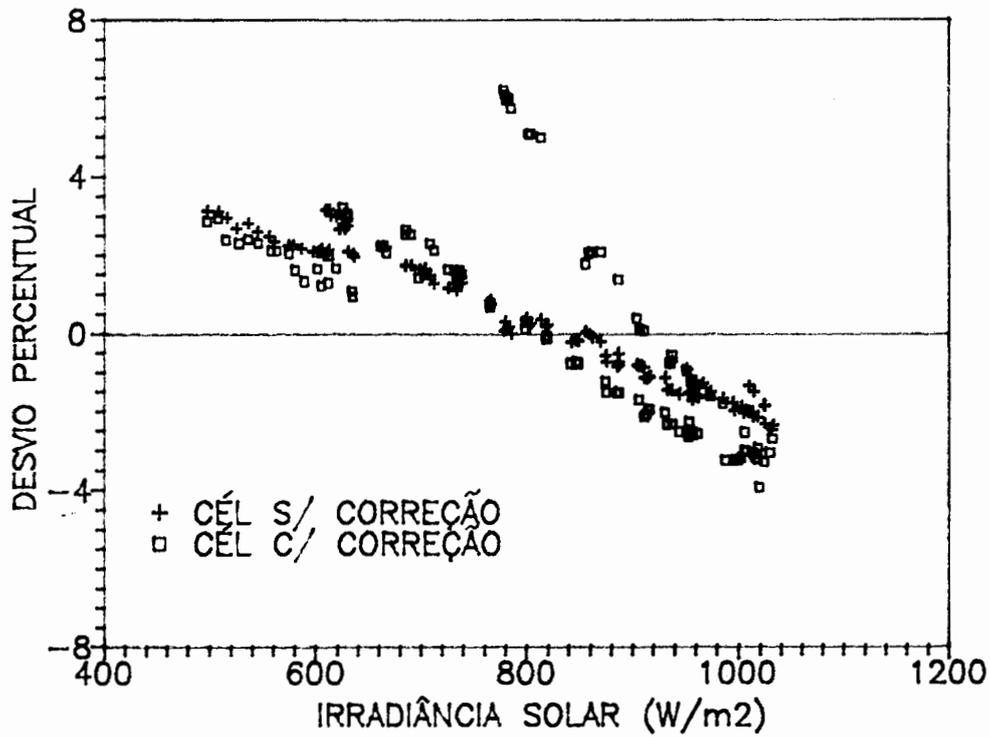


Figura 6.5. Desvios percentuais das medidas da irradiância solar usando uma célula sob um vidro de 4,15 mm e com a célula sem correção.

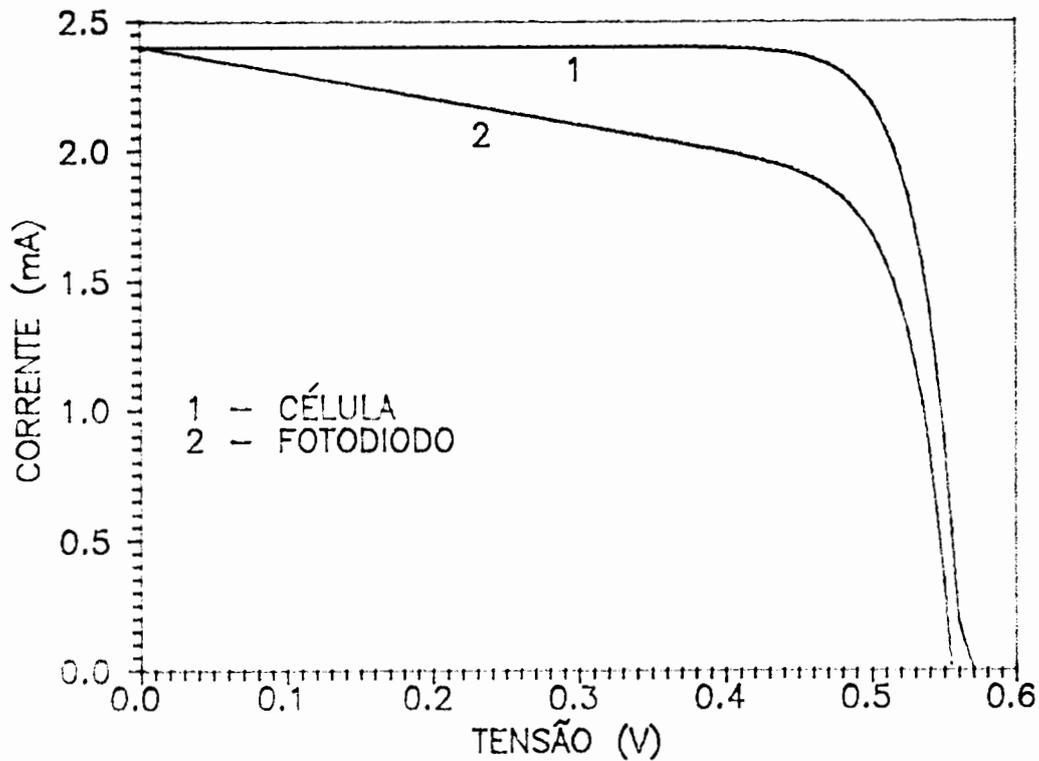


Figura 6.6. Curva I x V característica de boas células e de um fotodiodo de silício.

aplicada (I x V), característica do sensor usado no piranômetro Solar 118 e pelo afastamento do ponto de curto-circuito (100 mV para 1000 W/m²). Na Figura 6.6 apresenta-se uma curva característica de boas células de silício e uma curva de um fotodiodo de silício. Se a curva I x V do sensor do Solar 118 for semelhante à curva do fotodiodo apresentada, haverá um desvio na medida causado pela variação da corrente com a tensão na região próxima ao curto-circuito. O desvio percentual positivo maior do que quando se usa uma célula sem correção, observado para baixas irradiâncias nas medidas experimentais, pode ser devido a esta característica da curva I x V do sensor do Solar 118.

Ao comparar-se as Figuras 6.2.a, 6.3.a e 6.4.a com as Figuras 6.2.b, 6.3.b e 6.4.b respectivamente, verifica-se que para baixas irradiâncias ocorrem desvios percentuais positivos maiores do que a célula sem correção, tanto nas medidas experimentais quanto nas simuladas. Este comportamento dos desvios nas irradiâncias simuladas são provocados pela resposta espectral da célula com a cobertura composta por corantes orgânicos luminescentes, pois estes diminuem a sensibilidade da célula em uma banda no visível, como mostra a Figura 4.24. Para elevados ângulos de zênite o pico da distribuição espectral da irradiância solar se desloca em direção ao infravermelho e portanto a corrente medida não diminui proporcionalmente com o decréscimo da irradiância incidente. Nas medidas experimentais, o comportamento característico dos corantes orgânicos luminescentes realça ainda mais este efeito, porque a radiação direta para elevados ângulos de incidência viaja mais até chegar na célula. Neste caso, a resposta espectral diminui ainda mais na região do visível e não se altera na região do infravermelho. Mas provavelmente a maior causa destes desvios acentuados para baixas irradiâncias seja a geometria da cobertura, que permite incidência da radiação na lateral.

Nas Figuras 6.3.a e 6.3.b nota-se que o desvio percentual para baixas irradiâncias diminui em relação às Figuras 6.2.a e 6.2.b, respectivamente. Nas medidas experimentais acredita-se que parte do decréscimo foi provocado pelo vidro, por ser maior que a cobertura e evitar a incidência direta da radiação na lateral. A outra parte, que explica a diferença entre

os desvios das irradiâncias simuladas, também é provocada pelo vidro, que diminui a sensibilidade da célula próximo ao infravermelho ao mesmo tempo que os corantes orgânicos luminescentes diminuem a sensibilidade na região do visível. Predomina, entretanto, o efeito dos corantes na região do visível que provocam um desvio percentual positivo maior do que a célula sem correção.

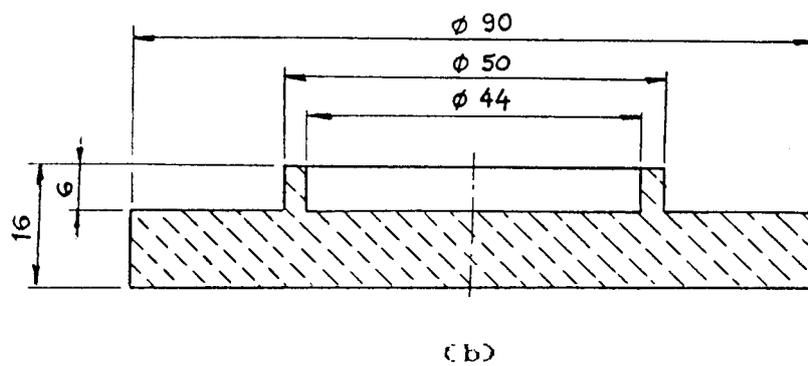
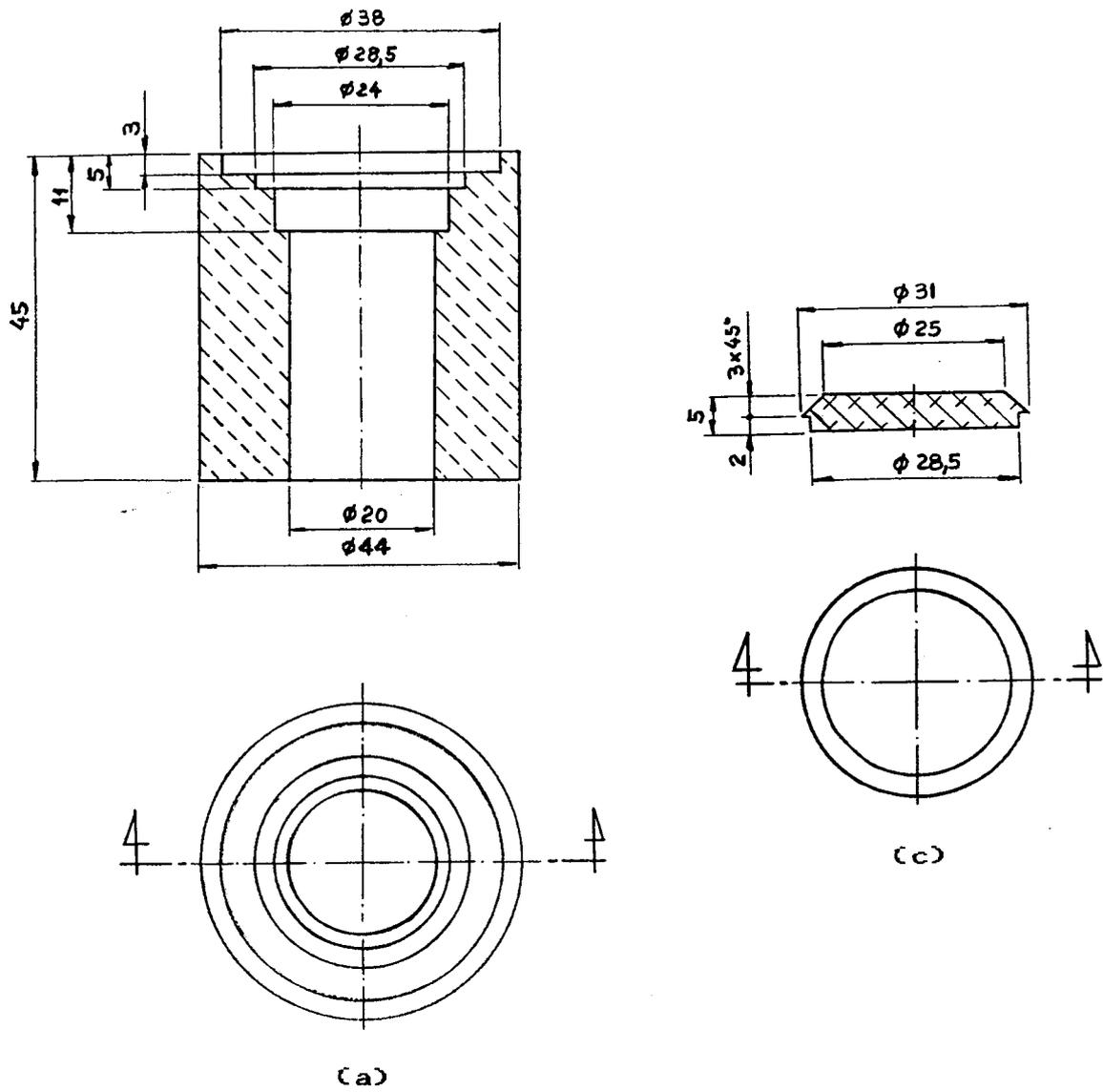
Nota-se na Figura 6.4.a, que o desvio para valores altos e intermediários da irradiância ora é positivo ora é negativo. Isto pode ser atribuído a uma alteração na camada antirefletiva da célula, que foi verificada visualmente, somado ao efeito de um posicionamento não bem paralelo aos demais.

Na Figura 6.5 apresenta-se o desvio percentual quando é colocado um vidro de 4,15 mm sobre a célula de silício. Para baixos valores das irradiâncias solar, nota-se que ocorrem desvios levemente menores do que os desvios das medidas com a célula sem correção, causados pela diminuição da sensibilidade da célula próximo ao infravermelho devido ao vidro. Para valores da irradiância intermediários verificam-se desvios elevados.

6.2. Construção de um piranômetro fotovoltaico

Tendo em vista que teoricamente com qualquer correção espectral dentro da banda de sensibilidade da célula de silício não é possível melhorar o desvio das medidas da irradiância solar e experimentalmente também não foi obtida nenhuma melhora, optou-se por construir um piranômetro fotovoltaico usando como sensor uma célula de silício sem nenhuma cobertura, exceto a própria camada antirefletiva e o difusor.

Projetou-se a estrutura do piranômetro de alumínio como mostra a Figura 6.7.a. No círculo de diâmetro $D_4 = 20,0$ mm foi colocado um disco de fenolite, que serviu de suporte para a célula de silício quadrada de 10,0 mm de lado. Os círculos de diâmetro $D_3 = 24,0$ mm e $D_2 = 28,5$ mm serviram para instalar o difusor. A geometria deste é apresentada na Figura 6.7.c e o material usado foi PVC. Tanto a estrutura como o difusor foram torneados e deu-se um acabamento no difusor de PVC com lixa



* dimensões em mm.

Figura 6.7. Projeto do piranômetro. a) Estrutura. b) Base. c) Geometria do difusor.

d'água, para que apresentasse uma boa resposta cosseno. Os resistores foram instalados sobre um disco de acrílico de diâmetro $D = 20,0$ mm, o qual foi colocado sob o disco de fenolite e na base da estrutura. Para se limitar a queda de tensão em 20 mV, foram necessários quatro resistores de 1Ω ligados em série.

Foi projetada também uma base de alumínio para o protótipo (Figura 6.7.b) a fim de dar boa estabilidade e para que, no futuro, pudesse servir de apoio a um nível de bolha e parafusos para regular a base num plano horizontal. A estrutura (Figura 6.7.a) foi encaixada sob pressão na base e para evitar infiltrações de água, utilizou-se cola araldite. O difusor também foi encaixado sob pressão e colado com silicone, pelo mesmo motivo. A Figura 6.8 mostra o protótipo construído.

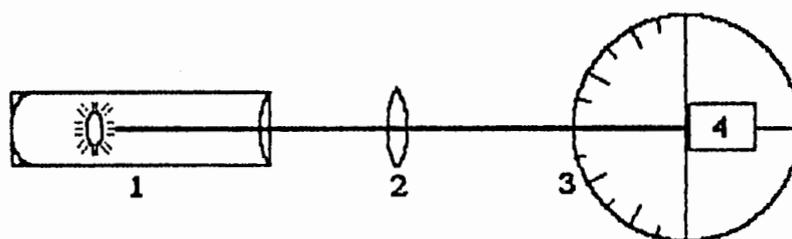


Figura 6.8. Protótipo construído.

6.3. Resposta cosseno

Para obter experimentalmente a resposta cosseno do protótipo construído e do Solar 118, montou-se sobre um banco

ótico, com o auxílio de cavaleiros, uma fonte de luz, uma lente convergente e um disco graduado. Sobre este disco foi disposto o piranômetro, como mostra a Figura 6.9. A luz da fonte incide de tal forma na lente e sobre o disco graduado que o centro do feixe coincide com o centro do disco. A lente convergente permite que os raios de luz se tornem mais paralelos. O piranômetro foi fixado de tal forma que a lateral ficasse paralela, na horizontal, ao disco graduado e que o centro coincidisse com o centro do disco. Uma régua foi fixada levemente abaixo do nível do disco para marcar a posição em que a luz incide perpendicular ao piranômetro e para possibilitar a leitura do ângulo de incidência. Desta forma, girando o disco fez-se incidir luz com vários ângulos no piranômetro. Realizaram-se medidas para ângulos de incidência variando de 10° em 10° , de 0° a 90° . A intensidade medida, quando a luz incide perpendicularmente ao piranômetro, foi considerada igual a 1 e as demais relativas a esta.



- 1 - Fonte de luz
- 2 - Lente convergente
- 3 - Disco graduado
- 4 - Piranômetro

Figura 6.9. Montagem para obter a resposta cosseno dos piranômetros fotovoltaicos.

Na Figura 6.10, a curva contínua representa a resposta cosseno ideal e os pontos representam as medidas realizadas usando o protótipo construído. Pode-se notar que há uma boa concordância entre as medidas e a resposta cosseno ideal. O maior desvio ocorre quando a luz incide a 80° , 7,5% e o maior desvio excluindo este, é de 1,16%. A Figura 6.11 apresenta as medidas

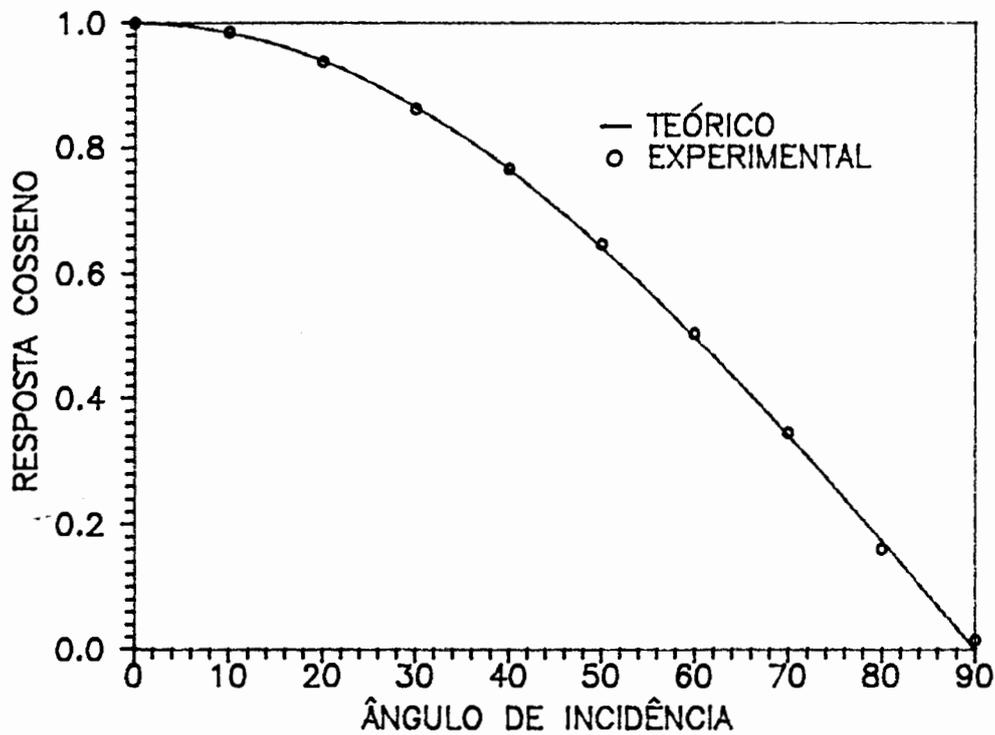


Figura 6.10. Resposta cosseno do protótipo construído.

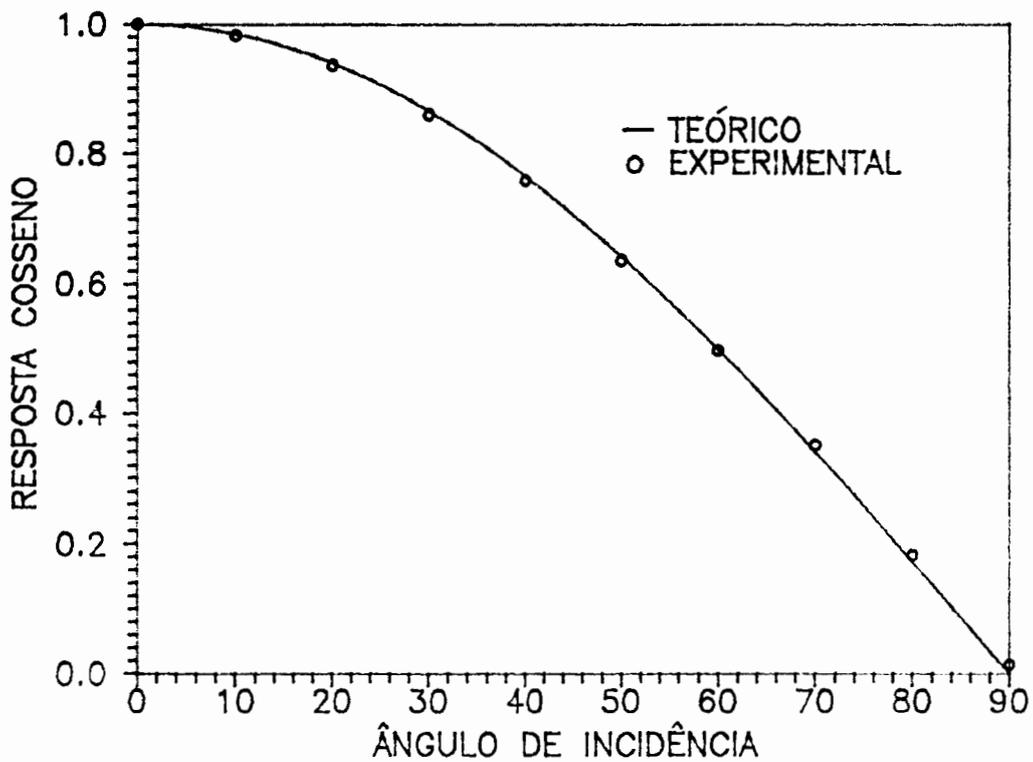


Figura 6.11. Resposta cosseno do Solar 118.

experimentais da resposta cosseno do Solar 118. Também verifica-se uma boa concordância entre as medidas, representadas

pelos pontos e a resposta cosseno ideal. O maior desvio é de 5,6% quando a luz incide a 80°; excluindo este ponto o maior desvio é de 2,67%.

O grande desvio observado para ambos os piranômetros, quando o ângulo de incidência é de 80°, pode ser atribuído em parte ao aparelho usado para realizar as medidas, pois o sinal nesta situação é baixo. Além disso, a irradiância para elevados ângulos de incidência é menos significativa. Conclui-se que a resposta cosseno do protótipo construído é muito boa e levemente melhor do que a resposta cosseno do Solar 118.

6.4. Análise experimental do protótipo construído

Montou-se sobre um plano horizontal e em local isolado, o protótipo construído, o Eppley PSP, o Solar 118 e o piranômetro térmico Kipp & Zonen. Foi utilizado um nível de bolha para verificar que o Solar 118 e o protótipo construído estivessem efetivamente num plano horizontal. Foram realizadas medidas da irradiância solar durante um dia quase sem nuvens, com o auxílio de um sistema computacional composto por um microcomputador PC-XT e uma placa conversora analógico-digital. Foram realizadas medidas quase simultâneas de cada piranômetro e para evitar efeitos devido à diferença entre os tempos de resposta foi utilizada a média de dez medidas de cada um, com o especial cuidado de rejeitar cada série de medidas onde uma delas pudesse ter variado mais de 1,5%, tarefa realizada pelo próprio microcomputador. Com estes dados calibrou-se o protótipo construído, através do método descrito no capítulo 5, usando como referência o Eppley PSP [7]. Também foram calibrados da mesma forma o Solar 118 e o Kipp & Zonen. Na Tabela 6.2 apresenta-se os desvios.

Analisando a Tabela 6.2, nota-se que o protótipo construído apresenta desvios levemente inferiores que o Solar 118, quando se trata de irradiâncias maiores ou menores que 200 W/m². Entretanto, ao se comparar os piranômetros fotovoltaicos com o térmico (Kipp & Zonen) nota-se que este apresenta um desvio menor, da ordem de 7%. Comparações realizadas

[24] entre piranômetros Eppley de mesmo modelo indicam desvios máximos também da ordem de 7% para irradiâncias acima de 200 W/m^2 , mostrando que este não é um comportamento atípico. Se forem analisados os desvios das medidas das irradiâncias maiores e menores que 300 W/m^2 (desvios 6 e 7), conclui-se que para os piranômetros fotovoltaicos os desvios são similares. Para baixas radiações o Solar 118 apresenta um desvio um pouco maior, mas para altas radiações o desvio é o mesmo. Comparando esta análise dos desvios com a Tabela 5.2, verifica-se que em ambos os casos o Solar 118 e o protótipo apresentam desvios semelhantes. A pequena divergência no maior desvio para irradiâncias inferiores a 300 W/m^2 , provavelmente é provocada pela variação da corrente com a tensão na curva característica do sensor do Solar 118.

Tabela 6.2. Análise do desvio das medidas da irradiância solar sobre um plano horizontal, durante um dia limpo, onde os desvio 1, 2, 3, 4 e 5 correspondem aos desvios da Tabela 5.2. Os desvios 6 e 7 representam o maior desvio percentual para irradiâncias superiores a 300 W/m^2 e o maior desvio para irradiâncias inferiores ou iguais a 300 W/m^2 .

SENSOR	1 (W/m^2)	2 (%)	3 (W/m^2)	4 (W/m^2)	5 (W/m^2)	6 (%)	7 (W/m^2)
SOLAR 118	25,1	20,3	41,0	29,8	39,8	11,5	41,2
PROTÓTIPO CONSTRUIDO	24,8	16,1	31,8	29,0	34,5	11,4	36,1
KIPP & ZONEN	8,7	7,1	16,2	9,1	15,4	3,3	16,2

A Figura 6.12, apresenta o desvio percentual das medidas da irradiância solar utilizando o Solar 118 e o protótipo construído. Verifica-se que para baixas irradiâncias foi mantida a tendência do desvio percentual positivo e de um desvio maior quando a irradiância é medida com o Solar 118.

Utilizando o mesmo sistema computacional usado nas

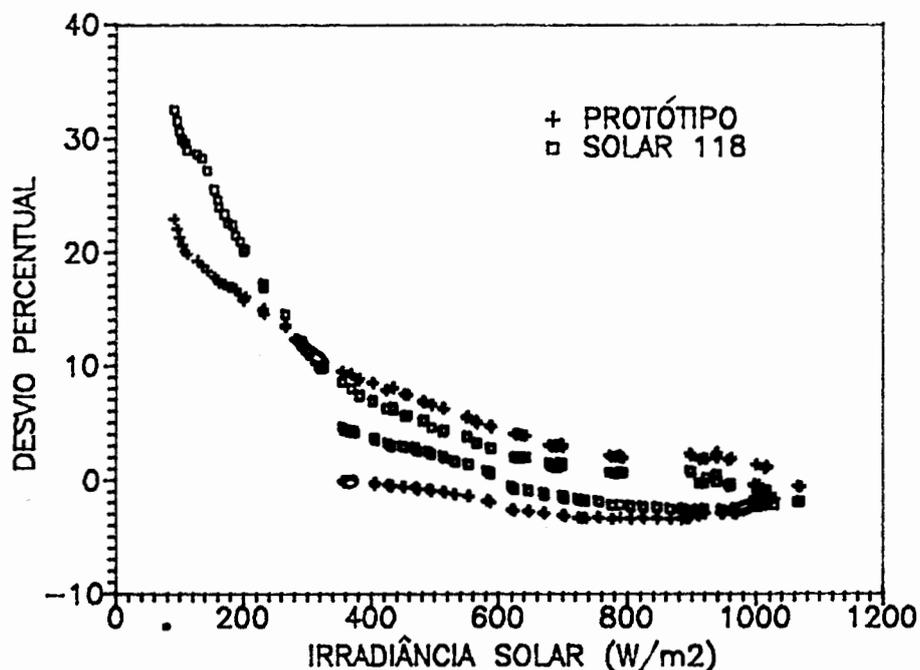


Figura 6.12. Desvio percentual das medidas da irradiância realizadas com o Solar 118 e com o protótipo construído.

piranômetros sobre uma superfície horizontal, mediu-se a média da irradiância solar em cada 5 minutos durante um dia limpo. Para isso, utilizou-se a constante de calibração obtida anteriormente. Os piranômetros fotovoltaicos foram colocados no plano horizontal com o auxílio de um nível de bolha. Na Figura 6.13 compara-se a média da irradiância, de 5 em 5 minutos, medida com o protótipo e com o Eppley PSP. Nota-se que na maior parte do dia a irradiância solar medida com o protótipo construído é bem próxima à medida com o Eppley PSP. Próximo ao meio-dia solar verifica-se uma diferença, que poderia ter sido causada pelo fato do protótipo não estar bem horizontal. Ao realizar estas medidas teve-se dificuldades de colocar horizontalmente o protótipo e o Solar 118, pois o nível de bolha foi extraído de um piranômetro Kipp & Zonen e a superfície inferior do nível pode não ser bem plana. Se os piranômetros fotovoltaicos estiverem desalinhados em 2° com relação ao referencial, quando a radiação incide num ângulo de 50° o desvio provocado é aproximadamente 4%, como se pode verificar na Figura 6.10. Além disso, cabe salientar que a resposta azimute do protótipo construído e do Solar 118 não são conhecidas.

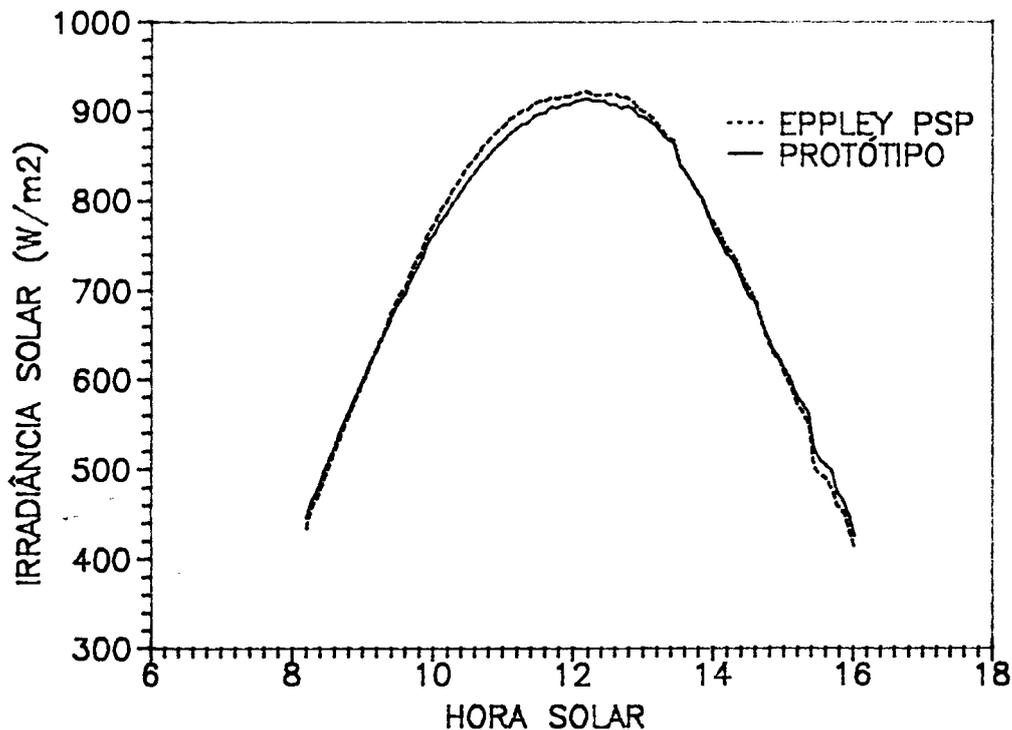


Figura 6.13. Média da irradiância solar em cinco minutos medida com o protótipo construído e com o Eppley PSP durante um dia limpo.

do protótipo construído e do Solar 118 não são conhecidas.

Na Figura 6.14 compara-se a média da irradiância solar de 5 em 5 minutos, medida com o Solar 118. Verifica-se novamente que a maior diferença ocorre próximo ao meio-dia solar. Para colocar os piranômetros fotovoltaicos na horizontal foi utilizado o mesmo nível de bolha e o efeito verificado foi o mesmo nas medidas realizadas com ambos os piranômetros. Também foram observadas pequenas diferenças entre as irradiâncias nas últimas medidas do dia.

As Figuras 6.15 e 6.16 apresentam a irradiância medida com o protótipo construído e com o Solar 118 respectivamente, em um dia nublado. Nota-se, em ambas as figuras, diferenças entre a irradiância medida com o piranômetro fotovoltaico e com o Eppley PSP nos picos próximos ao meio-dia solar e nas últimas medidas do dia. Os picos correspondem a radiação solar composta pela maior parte de radiação direta o que reforça o fato de que as diferenças são provocadas pelo não paralelismo entre piranômetros, pois quando incide somente radiação difusa, nos

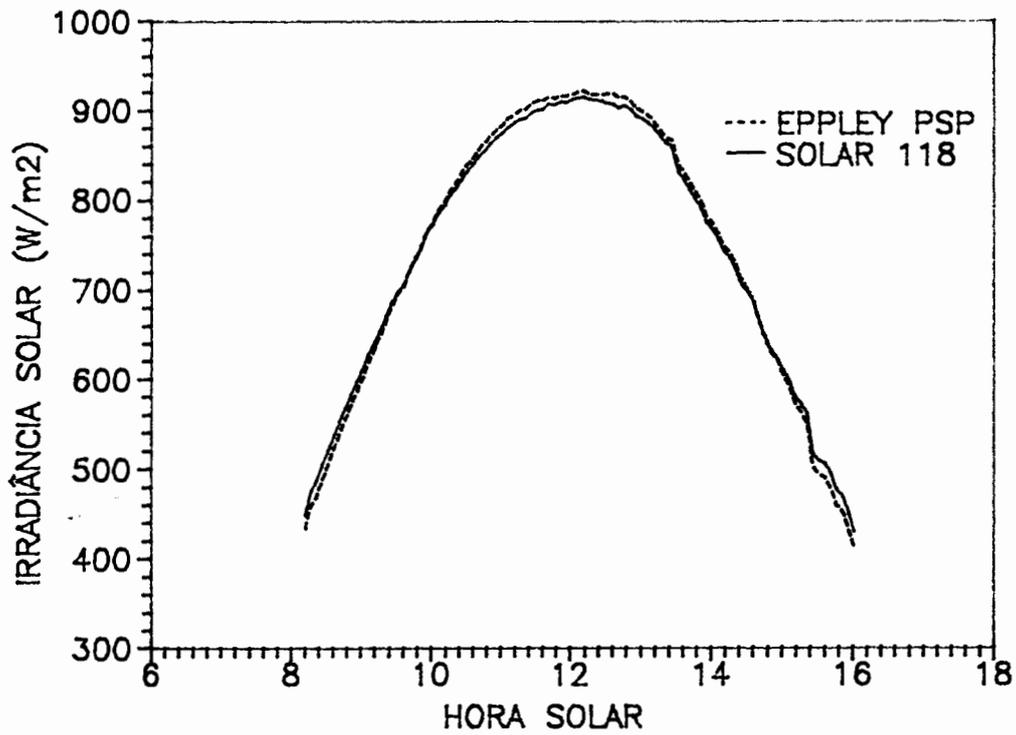


Figura 6.14. Média da irradiância solar em cinco minutos medida com o Solar 118 e com o Eppley PSP durante um dia limpo.

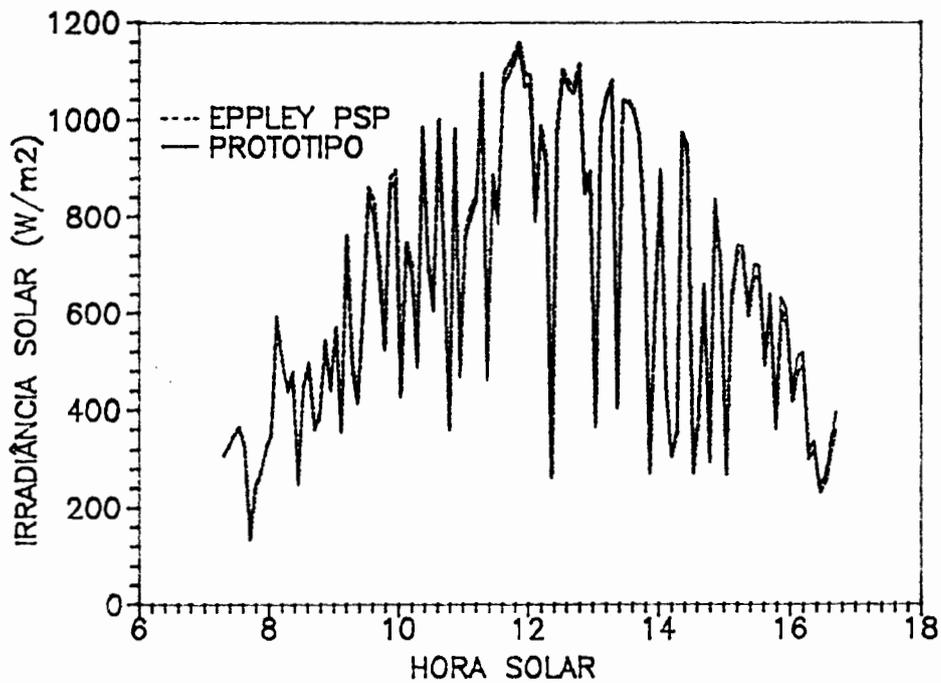


Figura 6.15. Média da irradiância solar em cinco minutos medida com o protótipo construído e com o Eppley PSP em um dia nublado.

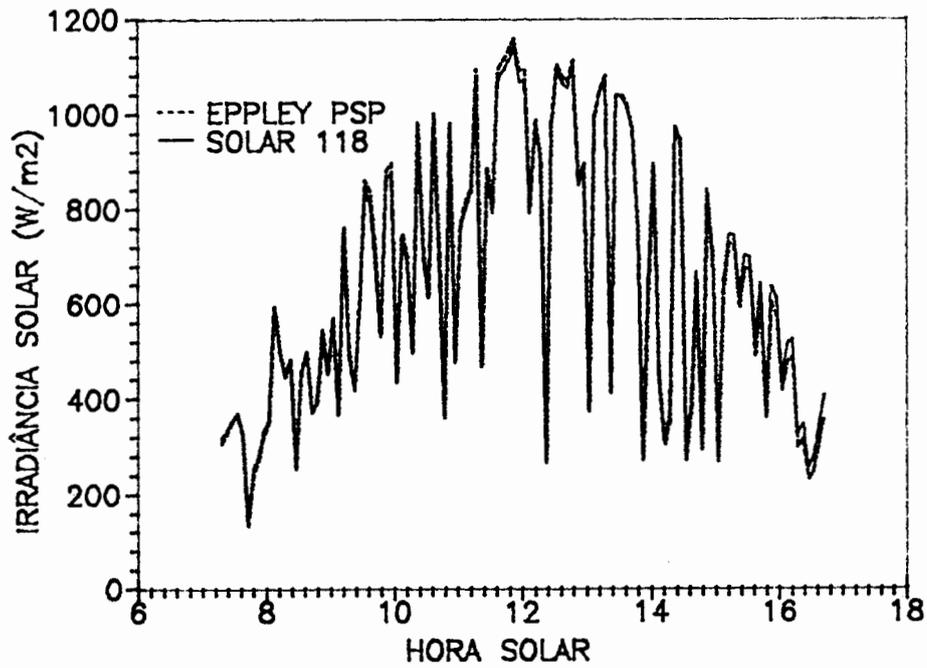


Figura 6.16. Média da irradiância solar em cinco minutos medida com o Solar 118 e com o Eppley PSP em um dia nublado.

Tabela 6.3. Desvios da média da irradiância solar em cinco minutos.

TIPO DE DIA	PIRANÔMETRO	MAIOR DESVIO HORARIO	DESVIO MÉDIO HORARIO	DESVIO DIARIO
LIMPO	SOLAR 118	3,2%	1,6%	0,2%
	PROTÓTIPO CONSTRUIDO	3,0%	1,2%	0,3%
	KIPP & ZONEN	1,3%	1,0%	0,7%
NUBLADO	SOLAR 118	5,4%	2,4%	0,4%
	PROTÓTIPO CONSTRUIDO	4,3%	2,4%	0,7%
	KIPP & ZONEN	1,1%	0,9%	0,6%

pontos de menor irradiância, não são verificadas diferenças visíveis. Na Tabela 6.3 apresenta-se os maiores desvios percentuais horários, a média dos desvios horários e os desvios diários da irradiância medida, tendo como referência o Eppley PSP.

Os piranômetros fotovoltaicos não podem ser classificados segundo os requisitos dos piranômetros convencionais, por causa da seletividade da resposta espectral. Kasten [23] propõe uma classificação quando estes piranômetros são usados para obter a radiação total horária e diária, apresentada na Tabela 6.4.

Comparando a Tabela 6.3 e a Tabela 6.4 pode-se classificar o protótipo construído e o solar 118 como de primeira classe. Se forem utilizados para obter a radiação total diária podem ser considerados como padrão secundário, mesma classe do Eppley PSP.

Tabela 6.4. Desvio máximo da radiação total horária e diária para diferentes classes de piranômetros.

RADIAÇÃO	PADRÃO SECUNDARIO	PRIMEIRA CLASSE	SEGUNDA CLASSE
TOTAL HORARIA	3%	8%	20%
TOTAL DIARIA	2%	5%	10%

7. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi analisar e construir um piranômetro fotovoltaico usando uma célula de silício como sensor. Ao comparar as características da célula com as características de um sensor de piranômetros térmicos, verificou-se que é possível usá-la em um medidor de radiação solar, embora ocorram desvios nas medidas devido às variações do espectro solar, por causa da seletividade da resposta da célula de silício.

Na tentativa de fazer uma correção espectral na resposta, estudaram-se corantes orgânicos luminescentes e filtros de absorção. Através de uma simulação, usando corantes, obteve-se a resposta espectral da célula. O realce da resposta não foi significativo, embora se usasse altas eficiências quânticas para os corantes. Ao simular a resposta espectral da célula com um vidro de 7 mm de espessura, que serviu de filtro de absorção, visualmente observou-se uma menor dependência desta com o comprimento de onda. A melhor resposta espectral obtida, foi usando dois corantes orgânicos luminescentes e um vidro de 7 mm de espessura. Experimentalmente observou-se que não é possível realçar a resposta espectral com os corantes e pelo contrário, ocorre um decréscimo da sensibilidade na região de absorção destes. A provável causa é atribuída a redução da eficiência quântica em meios sólidos. Ao se fazer uma simulação da resposta espectral estimou-se que a eficiência quântica ficasse próxima a 40%.

Fazendo uma análise detalhada da influência da seletividade espectral da resposta da célula de silício, concluiu-se que ao usar uma resposta espectral uniforme dentro da banda de sensibilidade não ocorre uma melhora significativa no

desvio das medidas. Somente é possível diminuir o desvio das medidas da irradiância se a resposta da célula pudesse ser estendida em direção a comprimentos de onda mais longos.

As medidas experimentais da irradiância solar com células de silício encapsuladas apresentaram desvios maiores do que as medidas realizadas com a célula sem cobertura. A causa provável disso, deve-se a erros devido a geometria dos encapsulantes e ao comportamento dos corantes orgânicos luminescentes.

Foi projetado e construído um piranômetro fotovoltaico de silício e obteve-se experimentalmente a resposta cosseno deste e do Solar 118, onde constatou-se que a resposta cosseno do protótipo construído é levemente melhor do que a do Solar 118. Ao se analisar medidas instantâneas da irradiância solar realizadas com os piranômetros fotovoltaicos, verifica-se que ocorrem desvios máximos, para irradiâncias superiores a 200 W/m^2 , da ordem de 20%, enquanto que para as mesmas medidas realizadas com um térmico (Kipp & Zonen), os desvios máximos são de 7%. No entanto ao se comparar a radiação total horária e diária medidas com os piranômetros fotovoltaicos e com o Kipp & Zonen, se verificam desvios menores e mais próximos. O protótipo construído, segundo os critérios de Kasten, pode ser classificado como um piranômetro de primeira classe.

Como sugestão para a continuidade deste trabalho sugere-se uma análise detalhada teórica e experimental da linearidade do instrumento. Além disso aponta-se um estudo experimental: da variação da tensão medida nos resistores em função das variações da temperatura ambiente, da resposta azimutal e da degradação do material difusor com o uso do instrumento. Também sugere-se a instalação de um nível de bolha e parafusos para regular o piranômetro num plano horizontal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MICHALSKY, J. J., HARRISON, L., LEBARON, B. A. Empirical radiometric correction of a silicon photodiode rotating shadowband pyranometer. Solar Energy, v. 39, n. 2, p. 87-96, 1987.
2. IMAMURA, M. S., BIN MAHFOODH, M., HUSSAIN, M. Simplified calibration method for silicon solar irradiance sensors. Proceedings of Seventh E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference. Sevilla, Spain, October 1986. p. 354-361.
3. BIN MAHFOODH, M., IMAMURA, M. S., AL-KHALDI, M. Long-term outdoor performance characteristics of silicon and thermopile solar irradiance sensors. Proceedings of Seventh E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference. Sevilla, Spain, October 1986. p. 349-353.
4. SELÇUK, K., YELLOTT, J. I. Measurement of direct, diffuse, and total solar radiation with silicon photovoltaic cells. Solar Energy, v. 6, n. 4, p. 155-163, 1962.
5. BASSO, D. Desenvolvimento, construção e calibração de radiômetros para a medida de radiação solar. Porto Alegre: PPGEEMM, 1980. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, UFRGS.
6. IQBAL, M. An introduction to solar radiation. Toronto: Academic Press, 1983. 390p.
7. KASTEN, F. Field instruments for solar radiation measurements. In: Physical Climatology for Solar and Wind Energy. R. Guzzi e C. G. Justus (ed.). Trieste, Italy, p. 438-477, April - May 1986.
8. DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. Solar engineering of thermal processes. New York: John Wiley, 1980. 762p.
9. BEM-SHAUL, A. et alii. Lasers and chemical change. Springer series in chemical physics 10. New York: Springer-Verlag, 1981.
10. SCHAFFER, F. P. et alii. Dye laser - topics in applied physics. Berlin: Springer-Verlag, 1973.

11. BATCHELDER, J. S., ZEWAİL, A. H., COLE, T. Luminescent solar concentrators. 1: theory of operation and techniques for performance evaluation. Applied Optics, v. 18, n. 18, p. 3090-3109, 1979.
12. YAVORSKI, B. M., DETLAF, A. A. Manual de física. Moscú: Mir, 1972. 961p.
13. HOVEL, H. J., HODGSON, R. T., WOODALL, J. M. The effect of fluorescent wavelength shifting on solar cell spectral response. Solar Energy Materials, n. 2, p. 19-29, 1979.
14. SARTI, D., LE POUILL, F., GRAVISSSE, P. Transformation du rayonnement solaire par fluorescence: application a l'encapsulation des cellules. Solar Cells, v. 4, p. 23-35, 1981.
15. LIFANTE, G. et alii. Solar concentrators using total internal reflection. Applied Optics, v. 22, n. 24, p. 3966-3970, 1983.
16. BATCHELDER, J. S., ZEWAİL, A. H., COLE, T. Luminescent solar concentrators. 2: experimental and theoretical analysis of their possible efficiencies. Applied Optics, v. 20, n. 21, p. 3733-3754, 1981.
17. FLETCHER, N. A. Laser dye stability. Part 3. Bicyclic dyes in ethanol. Applied Physics, v. 14, p. 295-302, 1977.
18. DE CARDONA, M. S. et alii. Outdoor evaluation of luminescent solar concentrator prototypes. Applied Optics, v. 24, n. 13, p. 2028-2032, 1985.
19. SPARROW, E. M., CESS, R. D. Radiation heat transfer. Washington: Hemisphere, 1978. 366p.
20. MATSON, R. J., EMERY, K. A., BIRD, R. E. Terrestrial solar spectra, solar simulation and solar cell short-circuit current calibration: a review. Solar Cells, v. 11, p. 105-145, 1984.
21. EMERY, K. A., OSTERWALD, C. R. Solar cell efficiency measurements. Solar cells, v. 17, n. 2-3, p. 253-274, 1986.
22. BEVINGTON, P. R. Data reduction and error analysis for the physical sciences. New York: McGraw-Hill, 1969. 335p.
23. KASTEN, F. Solar radiation instruments, calibration and

maintenance. In: Non-conventional Energy Sources . G. Furlan, N., A. Mancini e A. A. M. Sayigh (ed.). Trieste, Italy, p. 207-225, June 1983.

24. CHENLO, F., VELA, N., OLIVARES, J. · Comparison between pyranometers and encapsulated solar cells as reference photovoltaic sensors. Outdoor measurements in real conditions. Proceedings of 20th IEEE Photovoltaic Solar Energy Specialists Conference. 1989.

PUBLICAÇÕES GERADAS POR ESTA DISSERTAÇÃO

ZANESCO, I., MOEHLECKE, A. A conscientização dos problemas energéticos na escola de 1° e 2° graus do Brasil. Memórias del VI Congreso Latinoamericano y III Iberoamericano de Energía Solar, Cartagena, Colômbia, maio 1989. p. G13-G18.

ZANESCO, I., KRENZINGER, A. O efeito da variação dos parâmetros atmosféricos sobre a resposta da célula fotovoltaica de silício. Anais da 42° Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, v. 1. Porto Alegre, julho 1990. p. 71-72.

MOEHLECKE A., ZANESCO, I., SALVADORETTI, J. L. Construção e teste de um simulador solar para caracterização de módulos fotovoltaicos. Anais da 42° Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, v. 1. Porto Alegre, julho 1990. p. 73-74.

ZANESCO, I., KRENZINGER, A. Estudo da correção espectral para um piranômetro fotovoltaico. Anais do V Congresso Brasileiro de Energia, v. 1. Rio de Janeiro, novembro 1990. p. 218-227.

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA