

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

**ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA**  
**FOTOVOLTAICO ACOPLADO A CONCENTRADORES TIPO V**

**POR**

**NAUM FRAIDENRAICH**

**TESE PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM**  
**ENGENHARIA**

**PORTO ALEGRE**

**1994**

**ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA  
FOTOVOLTAICO ACOPLADO A CONCENTRADORES TIPO V**

**POR**

**NAUM FRAIDENRAICH**

Tese 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 necessários para a obtenção do Título de

**Doutor em Engenharia**

Área de Concentração: Geração de Energia

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Aprovada por:

Prof. Dr. Flávo Horowitz (I.F. -UFRGS)

Prof. Dr. Horácio Antônio Vielmo (PROMEC - UFRGS)

Prof. Dr. Ivan Emílio Chambouleyron (I.F. - UNICAMP)

Prof. Dr. Sérgio V. Möller  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 04 de novembro de 1994

Dedico este trabajo

A mis padres, Necha e Mailich (em memória)

A mi compañera, Maria Inés

A mis hijos, Sebastián

Verónica

Gustavo

## AGRADECIMENTOS

Desejo expressar meus agradecimentos

Ao Professor Arno Krenzinger, do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Rio Grande do Sul, pelas valiosas sugestões que ajudaram a enriquecer este trabalho.

A Antônio Nelson pela inestimável ajuda no processamento dos dados e na elaboração de programas de cálculo. Pela generosidade e infinita paciência com que colaborou no seu desenvolvimento.

A Ignacio Salcedo pelo estímulo e incentivo permanente.

A Elielza e Tiba pela compreensão e solidariedade, que ajudaram a torná-lo possível.

A Aguiar, pela construção do protótipo e dispositivos que fazem parte do sistema experimental utilizado. Pela sua competência profissional e espírito de colaboração.

A Marcelo pelo paciente e confiável trabalho de realização das medidas.

A Djanira pela árdua tarefa de digitar os resultados experimentais.

A José Alves pelos desenhos, cópias e variadas tarefas, realizadas com a maior qualidade.

A Walter, pela valiosa e competente ajuda no trabalho de edição.

Ao Departamento de Energia Nuclear da UFPE, ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRGS e ao CNPq, pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

A todos aqueles que de uma forma ou outra contribuíram para sua realização.

## RESUMO

Foi estudado teórica e experimentalmente um sistema fotovoltaico acoplado a cavidades tipo V com rastreamento em torno de um eixo horizontal orientado na direção Norte-Sul. Para certas combinações da relação de concentração e ângulo do vértice, os concentradores tipo V possuem a propriedade de iluminar uniformemente a região absorvedora, característica que os torna particularmente aptos para trabalhar em conjunto com módulos fotovoltaicos. O trabalho analisa três aspectos: a) as propriedades óticas e radiantes das cavidades tipo V; b) a metodologia de projeto das cavidades e c) o desempenho de um protótipo experimental. Com relação às propriedades óticas, os raios incidentes, que atingem o absorvedor (radiação aceita) ou invertem o sentido de sua trajetória e retornam à abertura (radiação rejeitada), são categorizados de acordo com o número de reflexões que experimentam antes de atingir o absorvedor ou a abertura, respectivamente. Os raios assim classificados são denominados modos de reflexão. O estudo do seu comportamento permite derivar soluções analíticas para as propriedades óticas e radiantes da cavidade. Estas soluções possibilitam calcular 1) a função de aceitação angular e a eficiência ótica para radiação direta, aceita e rejeitada; 2) a distribuição espacial e angular da densidade de fluxo na região do absorvedor e 3) os

coeficientes de intercâmbio radiante para radiação difusa, aceita e rejeitada. Resultados numéricos para uma variedade de combinações da relação de concentração e ângulo do vértice são apresentados. A metodologia de projeto da cavidade é abordada a partir dos resultados do estudo anterior, que permitem definir o subconjunto de cavidades cuja iluminação na região do absorvedor é uniforme, determinar o intervalo angular para o qual isso se verifica e calcular suas propriedades óticas e radiantes. Essas informações conjuntamente com uma análise de custos permitem definir a cavidade que apresenta as melhores condições operacionais e relação de custo-benefício. Foi construído um protótipo de sistema fotovoltaico e realizados testes instantâneos de caracterização ótica e elétrica de seus componentes e testes operacionais do sistema. Os resultados experimentais confirmam o aumento esperado de 31% na coleção de energia solar, devido ao acompanhamento do movimento do Sol, e mostram um aumento de 51% na produção de energia elétrica diária do sistema com concentração em relação ao sistema sem concentração. O resultado combinado de ambos efeitos é um aumento da ordem de 100% na energia elétrica produzida, com relação a coletores fixos sem concentração. Os procedimentos desenvolvidos para analisar o sistema fotovoltaico permitem, do ponto de vista qualitativo, adquirir uma adequada compreensão dos processos de conversão de energia e, do ponto de vista quantitativo, estimar seu desempenho com boa exatidão. Os resultados teóricos e experimentais deste estudo podem ser de importância no desenvolvimento da engenharia de projeto, construção e teste de sistemas fotovoltaicos de médio e grande porte.

## ABSTRACT

A theoretical and experimental study of a photovoltaic system coupled to V-trough cavities, tracking the sun around one axis, N-S horizontal, has been undertaken. For certain combinations of concentration ratio and vertex angle, V-trough cavities can uniformly illuminate the flat absorber, property which makes those concentrators particularly suitable to work in conjunction with photovoltaic modules. The work studies three aspects of the problem: a) the optical and radiative properties of the V-trough cavities; b) their design procedure and c) the performance of an experimental prototype. Concerning the first item, the incident light rays are categorized according to the number of reflections undergone before reaching either the absorber (accepted radiation) or the aperture (light rays which experiment a path reversal toward rejection out of the cavity). These are referred to as reflection modes. The analyses of the reflections modes behavior enables to derive closed form analytic solutions for the optical and radiative properties of the V-trough cavities. Then it can be obtained 1) the angular acceptance function and optical efficiency for accepted and rejected beam radiation; 2) the spatial and angular flux distribution on the absorber region and 3) the radiative exchange coefficients for accepted and rejected diffuse

radiation. Numerical results for various combinations of concentration ratio and vertex angle, are given. The design procedure of the cavity is closely related to the results derived in the previous study. They allow to identify the subclass of cavities with uniform illumination on the absorber, to determine the angular interval where this property holds and to calculate its optical and radiative properties. Together with a cost analyses it is possible to select the cavities that meet the best operational conditions and cost-benefit relation. A prototype of the photovoltaic system was built and the optical and electrical characteristics of the various system components were determined through instantaneous tests. Long run, operational tests of the photovoltaic system were also done. The results confirm the expected increase of 31% in collected energy, due to sun tracking, and show a 51% of energy increase due to light concentration. The combined result of tracking and concentration yields an energetic gain of de order of 100%, when compared with a fixed system with no concentration. The procedures developed to test and evaluate the photovoltaic system provide a good understanding of the energy conversion processes and enable to predict the system performance with good accuracy. The experimental and theoretical results of this study are relevant for the development of the engineering of design, building and test of medium and large size photovoltaic systems.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	largura do absorvedor [m]; superfície do absorvedor com comprimento unitário [m <sup>2</sup> ]
$A$	largura da abertura da cavidade [m]; superfície da abertura com comprimento unitário [m <sup>2</sup> ]
$A_f$	área de cada célula fotovoltaica [m <sup>2</sup> ]
$A_{\text{mód}}$	área do módulo fotovoltaico [m <sup>2</sup> ]
$A_B(\theta_i)$	região da abertura atravessada por raios incidentes com ângulo ( $\theta_i$ ), que atingem o absorvedor ou retornam à abertura depois de ( $s$ ) reflexões [m <sup>2</sup> ]
$Ah_k$	corrente elétrica integrada durante o período $kt$ [Ah]
$C$	relação de concentração da cavidade
$C_e$	custo da estrutura de movimentação, por m <sup>2</sup> de abertura da cavidade [US\$/m <sup>2</sup> ]
$C_{\text{lim}}$	concentração mínima que satisfaz a exigência de iluminação uniforme na superfície do módulo
$C_m$	custo por m <sup>2</sup> do módulo fotovoltaico [US\$/m <sup>2</sup> ]
$C_{\text{min}}$	concentração que minimiza os custos unitários da energia
$C_r$	custo da cavidade, espelhos e estrutura associada aos mesmos, por m <sup>2</sup> de espelho [US\$/m <sup>2</sup> ]
$C_{uE}$	custo unitário da energia produzida pelo conjunto módulo-cavidade [US\$/kWh]

$d_f$	diâmetro da fonte de luz utilizado nos testes de caracterização ótica da cavidade [m]
$D_{fc}$	distância fonte-cavidade utilizada nos testes de caracterização ótica da cavidade [m]
$E$	energia diária produzida pelo módulo fotovoltaico [Wh]
$E_a$	fluxo de energia no absorvedor da cavidade ótica [W]
$E_k$	energia elétrica produzida pelo gerador fotovoltaico ao longo do período $k\tau$ [W]
$E_A$	energia solar incidente na abertura da cavidade ótica [W]
$E_{Aa}$	fator de intercâmbio radiante entre abertura e absorvedor da cavidade ótica
$E_{AA}$	fator de intercâmbio radiante entre abertura e abertura da cavidade ótica
$f_b$	fração da componente da radiação direta na abertura
$f_d$	fração da componente da radiação difusa na abertura
$f_0$	fração da largura do absorvedor ocupada pelo modo zero de reflexão
$f_1^E$	fração da largura do absorvedor ocupada pelo primeiro modo esquerdo
$F(\theta_i)$	função de aceitação angular da cavidade, radiação aceita
$F_d$	valor médio da função de aceitação angular para radiação difusa, radiação aceita
$FO$	fator de ocupação do módulo fotovoltaico
$FP$	fator de preenchimento do módulo fotovoltaico
$FP_o$	fator de preenchimento ideal

$g(x, \theta_i)$	ordenada do registro gráfico no local $x$ do absorvedor [W/m <sup>2</sup> /m]
$\bar{g}$	valor médio, integrado sobre a largura do absorvedor, do registro gráfico $g(x, \theta_i)$ [W/m <sup>2</sup> /m]
$H_{dA}$	componente difusa da radiação solar, incidente na abertura da cavidade, integrada ao longo do período de observação (8 horas) [Wh/m <sup>2</sup> ]
$H_h$	radiação solar hemisférica, incidente no plano horizontal, integrada ao longo do período de observação (8 horas) [Wh/m <sup>2</sup> ]
$H_k$	radiação solar integrada ao longo do período $\tau$ , registrada por instrumentos solarimétricos [Wh/m <sup>2</sup> ]
$H_A$	radiação solar total, incidente na abertura da cavidade, integrada ao longo do período de observação (8 horas) [Wh/m <sup>2</sup> ]
$I$	corrente elétrica [A]
$I_a$	densidade de fluxo no absorvedor da cavidade ótica, soma da componente direta e difusa [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{ao}$	fluxo de radiação do modo de reflexão zero [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{a1}^E(\%)$	participação percentual do primeiro modo esquerdo na intensidade local
$I_{a1}^E(\%)$	participação percentual do primeiro modo esquerdo na intensidade local
$I_{ak}^D$	fluxo de radiação do modo de reflexão $k$ , associado ao espelho direito [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{ak}^E$	fluxo de radiação do modo de reflexão $k$ , associado ao espelho esquerdo [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{ba}$	fluxo de radiação direta na superfície do módulo fotovoltaico [W/m <sup>2</sup> ]

$I_{bA}$	componente da radiação direta na abertura da cavidade [W/m <sup>2</sup> ]
$I_c$	radiação coletada na abertura da cavidade ótica [W/m <sup>2</sup> ]
$\bar{I}_c$	radiação coletada média diária [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{cc}$	corrente de curto circuito [A]
$I_{da}$	fluxo de radiação difusa na superfície do módulo fotovoltaico [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{dA}$	componente difusa da irradiância na abertura da cavidade [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{dh}$	componente difusa da irradiância no plano horizontal [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{fn}$	intensidade da fonte de luz no plano normal aos raios, na abertura do concentrador [W/m <sup>2</sup> ]
$I_h$	irradiância no plano horizontal [W/m <sup>2</sup> ]
$I_k^r$	valor médio da irradiância na abertura da cavidade ou na superfície do módulo fotovoltaico, no intervalo $\{k\tau,$ $(k+1)\tau\}$ [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{mp}$	corrente elétrica no ponto de máxima potência [A]
$I_{ref}$	irradiância de referência [W/m <sup>2</sup> ]
$I(x, \theta_i)$	densidade de fluxo no local $x$ do absorvedor quando o ângulo de incidência na abertura é igual a $\theta_i$ [W/m <sup>2</sup> ]
$I_A$	irradiância na abertura da cavidade ótica [W/m <sup>2</sup> ]
$k$	número de reflexões do modo $k$ de radiação aceita
$\bar{K}$	modificador do ângulo de incidência para radiação difusa
$K(\theta)$	modificador do ângulo de incidência
$M$	máximo número de reflexões da radiação rejeitada pela cavidade
$M(\theta_i)$	máximo número de reflexões que existe na cavidade quando a radiação incide com ângulo $\theta_i$

$n$	número de reflexões do modo $n$ de radiação rejeitada
$n(\theta_i)$	número médio de reflexões para radiação aceita, incidente com ângulo $\theta_i$
$n_d$	número médio de reflexões para radiação difusa
$n_{dN}$	número médio de reflexões para radiação difusa que efetivamente atinge o absorvedor da cavidade ótica
$n_D$	fator de dípodo
$n_N(\theta_i)$	número médio de reflexões dos raios que efetivamente atingem o absorvedor da cavidade ótica
$\dot{n}_d$	número médio de reflexões para radiação difusa, calculado por meio de uma relação empírica
$N$	máximo número de reflexões da radiação aceita pela cavidade ótica
$N_c$	número de células que compõem o módulo fotovoltaico
$N_s$	número de células em série
$P$	Potência elétrica [W]
$P_m$	máxima potência do módulo fotovoltaico [W]
$P_s(\theta_i)$	função associada ao modo de reflexão ( $s$ ), para radiação aceita ou rejeitada, incidente com ângulo $\theta_i$
$P_s^D(\theta_i)$	função associada ao modo de reflexão ( $s$ ), para radiação aceita ou rejeitada, que realiza a primeira reflexão no espelho direito
$P_s^E(\theta_i)$	função associada ao modo de reflexão ( $s$ ) para radiação aceita ou rejeitada que realiza a primeira reflexão no espelho esquerdo
$P_k^{\tau}$	potência elétrica média no intervalo $\{k\tau, (k+1)\tau\}$ [W]
$\bar{P}$	potência média diária [W]

$R_g$	resistência série do módulo [ $\Omega$ ]
$R_v$	superfície de espelhos por $m^2$ de abertura da cavidade [ $m^2/m^2$ ]
$s$	número de reflexões do modo de reflexão $s$ de radiação aceita ou rejeitada
$s_y$	desvio padrão da grandeza representada no eixo das ordenadas
$s_x$	desvio padrão da grandeza representada no eixo $x$
$T$	temperatura do módulo fotovoltaico [ $^{\circ}C$ ]
$T_{am}$	temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ]
$T_c$	temperatura da célula fotovoltaica [ $^{\circ}C$ ]
$T_r$	temperatura de referência dos parâmetros característicos do módulo fotovoltaico [ $^{\circ}C$ ]
$U$	tensão nominal na saída do módulo fotovoltaico [V]
$V_k$	leitura de voltagem no instante $k\tau$ [V]
$V_{mp}$	tensão no ponto de máxima potência [V]
$V_{oc}$	tensão de circuito aberto [V]
$V_t$	potencial térmico do módulo [V]
$\bar{V}_k$	valor médio da tensão no intervalo $\{k\tau, (k+1)\tau\}$ [V]

## SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha_k$	menor ângulo de incidência para o qual se verifica a existência, no interior da cavidade, de radiação aceita no modo de reflexão $k$ [ $^{\circ}$ ]
------------	---

$\alpha_I$	coeficiente de variação da corrente por variação da temperatura [A/°C]
$\alpha_V$	coeficiente de variação da tensão por variação da temperatura [V/°C]
$\beta$	ângulo do plano de abertura do concentrador com relação ao plano horizontal [°]
$\beta_e$	inclinação do eixo de rotação do rastreador com relação ao plano horizontal [°]
$\beta_k$	maior ângulo de incidência na abertura da cavidade para o qual se verifica a existência de radiação aceita no modo de reflexão k [°]
$\gamma_k$	menor ângulo de incidência para o qual se verifica a existência de raios luminosos que atingem a abertura depois de realizar 2k reflexões [°]
$\delta$	declinação solar [°]
$\delta I$	variação estatística de corrente [A]
$\delta T$	variação estatística de temperatura [°C]
$\delta_k$	menor ângulo de incidência para o qual se verifica a existência de raios luminosos que atingem a abertura depois de realizar (2k + 1) reflexões [°]
$\Delta T$	diferença entre temperatura do módulo e temperatura ambiente [°C]
$\epsilon_N$	ângulo característico da região de rejeição parcial [°]
$\epsilon(m)$	função que expressa a paridade do modo de reflexão (m)
$\eta$	eficiência do conjunto módulo fotovoltaico-cavidade
$\eta_{otb}(\theta_i)$	eficiência ótica da cavidade para a componente direta da radiação solar
$\eta_{otd}$	eficiência ótica da cavidade para a componente difusa da radiação solar

$\eta_{PV}$	eficiência do módulo fotovoltaico
$\eta_{ot}$	eficiência ótica da cavidade tipo V para ambas componentes da radiação. Eficiência determinada nos testes de caracterização ótica da cavidade
$\eta_{PV,25^{\circ}C}$	eficiência do módulo fotovoltaico para a temperatura de referência (25°C)
$\eta_{cel}$	eficiência de conversão das células que compõem o módulo fotovoltaico
$\lambda$	latitude local [°]
$\mu$	largura do intervalo de ângulos de incidência dentro do qual a iluminação do absorvedor é uniforme [°]
$\theta_i$	ângulo de incidência dos raios projetados sobre o plano transversal da cavidade [°]
$\theta_m$	mínimo ângulo de incidência dos raios limites em cavidades tipo CEC ou CHC [°]
$\theta_M$	máximo ângulo de incidência dos raios limites em cavidades tipo CEC ou CHC [°]
$\theta_c$	ângulo de aceitação de cavidades concentradoras ideais (igual a $\text{sen}^{-1}(1 / C)$ ) [°]
$\theta_a$	ângulo de aceitação de cavidades tipo V ( $\theta_c + \psi$ ) [°]
$\theta$	ângulo de incidência dos raios luminosos na abertura da cavidade [°]
$\theta_i^D(j)$	ângulo de incidência projetado dos raios que realizam a reflexão j sobre a parede, havendo realizado sua primeira reflexão sobre a parede direita [°]
$\theta_i^E(j)$	ângulo de incidência projetado dos raios que realizam a reflexão j sobre a parede, havendo realizado sua primeira reflexão sobre a parede esquerda [°]

$\theta_{ak}^D$	ângulo de incidência do modo k, associado ao espelho direito, na superfície do módulo fotovoltaico [°]
$\rho$	refletividade das paredes da cavidade, quando considerada constante
$\rho_s$	refletividade do solo
$\rho[\theta^D(1)]$	refletividade dos espelhos para o ângulo de incidência $\theta^D(1)$ , na primeira reflexão no espelho direito
$\rho[\theta^E(1)]$	refletividade dos espelhos para o ângulo de incidência $\theta^E(1)$ , na primeira reflexão no espelho esquerdo
$\tau$	intervalo durante o qual o rastreador pode permanecer em repouso e a iluminação no absorvedor continuar sendo uniforme [s]
$\tau(\theta)$	transmitância do sensor fotovoltaico para radiação incidente com ângulo $\theta$
$\Psi$	semi-ângulo do vértice da cavidade ótica tipo V [°]
$\omega$	hora solar em graus a partir do meio-dia [1 hora = 15°]

### CONSTANTES FÍSICAS

k	constante de Boltzmann [ $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K]
q	carga do elétron [ $1,6 \cdot 10^{-19}$ C]

## SUMÁRIO

	Pág.
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>INTRODUÇÃO E OBJETIVOS</b>	01
1.1 Introdução	01
1.2 Justificativa e objetivos	03
1.2.1 Cavidades tipo V acopladas a sistemas fotovoltaicos	03
1.2.2 Concentradores de baixa relação de concentração e a qualidade do recurso solar	04
1.2.3 Sistemas de rastreamento	05
1.2.4 Rastreamento combinado com cavidades tipo V	05
1.3 Revisão da literatura	07
1.3.1 Características óticas das cavidades tipo V	07
1.3.2 Sistemas fotovoltaicos combinados com cavidades tipo V	10
1.3.3 Centrais fotovoltaicas com rastreamento	16
1.4 Descrição da tese	18
 <b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>CONCENTRADORES NÃO FORMADORES DE IMAGEM</b>	21
2.1 Introdução	21
2.2 Propriedades óticas dos concentradores não formadores de imagem	30
2.2.1 Intercâmbio radiante entre as paredes da cavidade	34

## CAPÍTULO 3

CAVIDADES TIPO V	36
3.1 Introdução	36
3.2 Aspectos gerais da geometria e ótica das cavidades tipo V	37
3.3 Classificação dos raios e modos de reflexão	40
3.4 Estrutura ótica da cavidade	41
3.4.1 Ângulos característicos	41
3.4.2 Estudo da iluminação do absorvedor e da abertura	44
A Radiação aceita	44
B Radiação rejeitada	46
C Diagrama de estados e modos de reflexão	47
3.4.3 Comportamento dos modos de reflexão na região de transição	49
A Determinação do máximo modo de reflexão da radiação aceita	49
B Determinação do máximo modo de reflexão da radiação rejeitada	53
C Modos de reflexão e estados na região de rejeição parcial	55
3.5 Soluções analíticas para os modos de reflexão	61
3.5.1 Propriedades gerais das funções $P_s(\theta_i)$	61
3.5.2 Expressões analíticas para $P_s(\theta_i)$	62
A Radiação aceita	62
B Radiação rejeitada	66

## CAPÍTULO 4

APLICAÇÃO DAS SOLUÇÕES ANALÍTICAS DE CAVIDADES TIPO V	70
4.1 Perfil de radiação na região do absorvedor	70
4.2 Iluminação uniforme do absorvedor	75

4.3	Eficiência ótica e fator de intercâmbio radiante de cavidades tipo V	78
4.3.1	Variação da refletividade dos espelhos com o ângulo de incidência	81
4.3.2	Coeficientes de intercâmbio radiante com refletividade dos espelhos constante e variável	86
	Resultados numéricos	86
4.4	Expressões aproximadas para o cálculo da eficiência ótica	87
4.4.1	Radiação direta	87
	Resultados numéricos	89
4.4.2	Radiação difusa	92
	Resultados numéricos	93
4.4.3	Comentários sobre os resultados numéricos	95

## CAPÍTULO 5

	PROJETO DA CAVIDADE TIPO V	97
5.1	Introdução	97
5.2	Cavidades óticas com iluminação uniforme na região do absorvedor	98
5.3	Modelo de simulação numérica do sistema fotovoltaico custo da energia do conjunto gerador-cavidade	100
5.3.1	Formulação do modelo	101
	A Modelo Solarimétrico	102
	B Ângulo de incidência da radiação direta na abertura da cavidade	102
	C Fluxo de radiação na superfície do módulo fotovoltaico	103
	D Temperatura e conversão de energia no módulo fotovoltaico	105
5.3.2	Custo da energia elétrica	107
5.3.3	Resultados numéricos	109
5.4	Definição da geometria da cavidade	112
5.5	Sensibilidade da energia elétrica produzida com relação à inclinação do eixo do rastreador	114

## CAPÍTULO 6

PROJETO E DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL	117
6.1 Critérios de projeto	117
6.2 Descrição do protótipo experimental	118

## CAPÍTULO 7

METODOLOGIA EXPERIMENTAL	121
7.1 Introdução	121
7.2 Fundamentos da metodologia experimental	122
7.3 Determinação da eficiência ótica da cavidade tipo V e uniformidade axial	124
7.4 Determinação do perfil de radiação transversal na região do absorvedor da cavidade	127
7.5 Caracterização elétrica do gerador fotovoltaico	130
7.6 Caracterização da carga eletrônica	133
7.7 Testes de desempenho diário	134
7.8 Instrumentação do sistema experimental	138
A Testes óticos	138
B Testes elétricos	138
B.1 Determinação das curvas características	138
B.2 Testes de desempenho diário	139

## CAPÍTULO 8

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	141
8.1 Comportamento do conjunto fotovoltaico ao longo de um dia típico	142

8.1.1	Efeito do acompanhamento do movimento do Sol	145
8.1.2	Radiação na superfície do módulo fotovoltaico	149
8.1.3	Potência elétrica e eficiência do módulo fotovoltaico	152
8.2	Caracterização ótica da cavidade tipo V	154
8.3	Perfil de iluminação no absorvedor	162
8.4	Comportamento elétrico do módulo fotovoltaico	171
8.4.1	Eficiência do módulo fotovoltaico sujeito a concentração da radiação solar	175
8.4.2	Resistência série e fator de preenchimento do módulo fotovoltaico	180
8.4.3	Variação da eficiência com o nível de radiação	182
8.4.4	Melhor tensão fixa	186
8.5	Caracterização da carga eletrônica	190
8.6	Testes diários	192
8.6.1	Comportamento estatístico da radiação coletada	193
8.6.2	Temperatura do módulo fotovoltaico	196
8.6.3	Potência elétrica produzida pelo conjunto fotovoltaico	199
	A Variabilidade da potência elétrica produzida	204
8.6.4	Energia elétrica diária	210

## CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES		216
9.1	Propriedades óticas e radiantes das cavidades tipo V	216
	A Estrutura ótica da cavidade	216
	B Soluções analíticas e soluções exatas	217
	C Eficiência ótica para radiação difusa e critérios de projeto	217
	D Largura da região de iluminação uniforme	218
9.2	Metodologia de projeto das cavidades tipo V	218
9.3	Avaliação do sistema experimental	219
	A A escala de tempo das observações e o regime de trabalho dos equipamentos	219
	B Perfil de iluminação no absorvedor	220

C	A qualidade das células fotovoltaicas	220
D	O desempenho do sistema fotovoltaico e sua viabilidade econômica	221
E	A metodologia de análise	221
RECOMENDAÇÃO		223
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		224
APÊNDICE A	Cavidades tipo V como caso particular dos concentradores hiperbólicos compostos	233
APÊNDICE B	Soluções analíticas para os modos de reflexão da radiação rejeitada na região de transição	234
APÊNDICE C	Registro de dados ao longo de um dia típico.	237
	Tabela C1. Informações diárias processadas	237

## LEGENDAS DE FIGURAS

		Pág.
 <b>CAPÍTULO 2</b>		
Figura 2.1	Função de aceitação angular de concentradores tipo CPC.	22
Figura 2.2	Configuração geométrica do conjunto fonte, cavidade e receptor.	23
Figura 2.3	Concentrador Elíptico Composto (CEC) com fonte de luz plana.	24
Figura 2.4	Concentrador hiperbólico composto com fonte de luz plana.	25
Figura 2.5	Lente combinada com concentrador secundário tipo CEC.	26
Figura 2.6	Combinação lente e concentrador secundário tipo CHC. A imagem primária é o segmento $\overline{F_E F_D}$ .	27

Figura 2.7 Cavityde tipo V como caso particular de concentrador CHC ( $\overline{R_E R_D} = \overline{R_D F_D}$ ). 28

Figura 2.8 Função de aceitação angular de concentradores tipo CEC e CHC. 29

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Geometria do concentrador tipo V. 37

Figura 3.2 (a) Função de aceitação angular de cavidades em V,  $F(\theta_i)$ ; (b) Função de rejeição angular,  $[1-F(\theta_i)]$ . 38

Figura 3.3 Ângulos característicos  $\alpha_2$ ,  $\beta_0$ . 42

Figura 3.4 Ângulos característicos  $\delta_2$  e  $\gamma_3$ . 43

Figura 3.5 Ilustração dos três estados (ascendente, completo e descendente) do primeiro modo de reflexão da radiação aceita.  $C = 2$ ,  $\psi = 7,5^\circ$ . 45

Figura 3.6 Estados ascendentes e descendentes do 4º modo de reflexão da radiação rejeitada.  $C = 2$ ,  $\psi = 7,5^\circ$ . 47

- Figura 3.7 Diagrama que ilustra a composição dos modos de reflexão e os respectivos estados em função do ângulo de incidência.  $C = 2$ ,  $\psi = 7,5^\circ$ . 48
- Figura 3.8 Procedimento gráfico para determinar os ângulos  $\alpha_{N+1}$  e  $\beta_{N-1}$  ( $\alpha_3$ ,  $\beta_1$ ,  $N = 4$ ).  $C = 2$ ,  $\psi = 7,5^\circ$ . 50
- Figura 3.9 Representação esquemática dos ângulos  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  na vizinhança do N-ésimo modo de reflexão. 51
- Figura 3.10 Determinação dos modos de maior ordem da radiação rejeitada. (a)  $N = 2$ ,  $\alpha_3 > \delta_2$  e  $M = 4$ ; (b)  $N = 2$ ,  $\alpha_3 < \delta_2$  e  $M = 5$ . 54
- Figura 3.11 Cavidade iluminada na região de transição. Uma fração atinge o absorvedor e seu complemento retorna à abertura. 55
- Figura 3.12 Sequência de modos e estados presentes na região de transição. (a) Caso  $\alpha_{N+1} < \delta_N$ ; (b) Caso  $\alpha_{N+1} \geq \delta_N$ . 57
- Figura 3.13 Definição do ângulo  $\varepsilon_N$  e ilustração da relação entre  $\varepsilon_N$  e  $\alpha_{N+1}$ ,  $\gamma_N$  e  $\delta_N$ . (a) Caso  $\alpha_{N+1} < \delta_N$  e (b) Caso  $\alpha_{N+1} \geq \delta_N$ . 59

## CAPÍTULO 4

- Figura 4.1 (a) Iluminação não uniforme devido a um modo par ( $k = 2$ ) no estado ascendente ( $\theta_i = 10^\circ$ ). (b) Iluminação devido a um modo ímpar ( $k = 1$ ) no estado ascendente.  $C = 2$  e  $\psi = 7,5^\circ$ . 72
- Figura 4.2 Função de aceitação angular para cavidades com iluminação uniforme na região do absorvedor. 78
- Figura 4.3 Eficiência ótica para radiação aceita e rejeitada ( $\rho = 0,8$ ). (a)  $C = 2$ ,  $\psi = 30^\circ$ ; (b)  $C = 2,5$ ,  $\psi = 30^\circ$ . 80
- Figura 4.4 Variação da refletividade com o ângulo de incidência de um espelho prateado na superfície posterior. 82
- Figura 4.5 Ângulos de incidência total e projetado ou transversal, na superfície do espelho. 83
- Figura 4.6 Ângulos de incidência projetados ao longo das paredes da cavidade.  $C = 2$ ,  $\psi = 7,5^\circ$ . 85
- Figura 4.7 Função de aceitação angular para  $C = 2$  e  $m = 2, 3$  e  $4$ . 90

Figura 4.8 Número médio de reflexões para radiação direta: (a)  $C = 1,5$ ; (b)  $C = 2,0$ ; (c)  $C = 2,5$ . 91

Figura 4.9 Número médio de reflexões para radiação difusa em função do número  $m$ . As retas são calculadas mediante a fórmula empírica (Eq. (4.44)) e os valores representados, calculados em forma exata. 95

## CAPÍTULO 5

Figura 5.1 Custo unitário da energia vs relação de concentração ( $C$ ). (a)  $C_m = 500$  US\$/m<sup>2</sup>, b)  $C_m = 1000$  US\$/m<sup>2</sup>. 111

Figura 5.2 Geometria da cavidade com  $C = 2,5$  e  $\psi = 30^\circ$ . 114

## CAPÍTULO 6

Figura 6.1 Esquema do sistema experimental. 119

Figura 6.2 Fotografias do conjunto fotovoltaico. 120

## CAPÍTULO 7

- Figura 7.1 Esquema conceitual do sistema fotovoltaico. 122
- Figura 7.2 Procedimento para determinação da eficiência ótica da cavidade. 125
- Figura 7.3 Ângulos e dimensões que definem a condição de pontualidade e paralelismo dos raios luminosos. 126
- Figura 7.4 Montagem para determinação da distribuição transversal de radiação no absorvedor da cavidade. 128
- Figura 7.5 Configuração do sistema experimental para obtenção das curvas características: a) do conjunto cavidade-módulo PV e b) do módulo PV. 131
- Figura 7.6 Esquema do arranjo experimental para realização de testes diários: (a) do conjunto cavidade-módulo PV e (b) do módulo PV. 135

## CAPÍTULO 8

- Figura 8.1 Perfil de insolação, potência elétrica e temperatura ao longo de um dia típico. Irradiância no plano de abertura ( $I_A$ ), Irradiância no plano horizontal ( $I_h$ ), Potência elétrica ( $P$ ), Temperatura do módulo ( $T$ ).  $U = 1,85$  Volts. 143
- Figura 8.2 Médias horárias da irradiância, potência elétrica e temperatura ao longo de um dia. 144
- Figura 8.3 Radiação solar global no plano horizontal e radiação solar global e difusa, coletada na abertura da cavidade. Variação ao longo do dia. 147
- Figura 8.4 Variação da irradiância na superfície do absorvedor ao longo do dia. Valores médios de 15 minutos e horários. 151
- Figura 8.5 Eficiência ótica em função do ângulo de incidência. 155
- Figura 8.6 Modificador do ângulo de incidência  $K(\theta)$ . Valores teóricos e experimentais. 157

- Figura 8.7 Resultados experimentais e valores teóricos corrigidos da eficiência ótica. 159
- Figura 8.8 Eficiência ótica de uma cavidade com  $C = 2,57$ ,  $\psi = 30,54^\circ$ . Resultados experimentais e teóricos. 161
- Figura 8.9 Perfil de iluminação no absorvedor para vários ângulos de incidência: (a) As cavidades esquematizadas no lado direito da figura mostram a participação do modo um de reflexão, correspondente ao espelho esquerdo, na iluminação do absorvedor (intervalo de 0 até  $30^\circ$ ). (b) Na região de 30 até  $50^\circ$ , as cavidades ilustram o comportamento do modo de reflexão zero. 164
- Figura 8.10 Perfil de iluminação no plano do absorvedor e do sensor. 168
- Figura 8.11 Curvas características V-I, para o módulo fotovoltaico sem concentração (curva A) e com concentração (curva B). 172
- Figura 8.12 Variação da eficiência no ponto de máxima potência com o nível de iluminação do módulo fotovoltaico. Resultados experimentais e valores corrigidos por temperatura. 183

- Figura 8.13 Comparação de resultados experimentais e teóricos da eficiência no ponto de máxima potência, para a temperatura de 25 °C. 185
- Figura 8.14 Eficiência de conversão para a condição de máxima potência e tensões fixas de 1,85 e 2 Volts. 187
- Figura 8.15 Relação entre potência elétrica e tensão no módulo fotovoltaico, para o mesmo nível de irradiância e diferentes temperaturas. 189
- Figura 8.16 Registro das variações de tensão durante os testes diários. 191
- Figura 8.17 Energia solar diária incidente na abertura do rastreador versus a energia solar diária no plano horizontal.  $H_A(\text{Wh}) = -59,95 + 1,17 H_h(\text{Wh})$  , desvio padrão  $s_y = \pm 348 \text{ Wh}$ . As ordenadas da linha tracejada são iguais a  $H_h$ . 195
- Figura 8.18 Relação entre a componente difusa e total na abertura em função da radiação total na abertura.  $H_{dA} / H_A = 0,786 - 1,01 \cdot 10^{-3} H_A(\text{Wh})$ ,  $s_y = \pm 0,065$ . 196

- Figura 8.19 Aumento de temperatura do módulo em relação à temperatura ambiente em função da radiação coletada. 197
- Figura 8.20 Potência elétrica média horária em função da insolação coletada para módulos com e sem concentração e diversas tensões fixas. 201
- Figura 8.21 Potência elétrica média horária em função da radiação coletada para tensão  $U = 2$  V. Testes com concentração. 203
- Figura 8.22 Tensão no ponto de máxima potência em função da radiação coletada para o conjunto de dados registrados na Tabela 8.4. 204
- Figura 8.23 Variação da corrente em função da variação de temperatura em torno do ponto de equilíbrio. 208
- Figura 8.24 Potência média diária em função da radiação coletada para  $U = 1,75$  V, com e sem concentração. 211

Figura 8.25 Energia elétrica diária em função da tensão fixa para uma radiação coletada média diária igual a  $721 \text{ W/m}^2$  ( $H_c = 5,77 \text{ kWh/m}^2$ ), com concentração e sem concentração. 212

Figura 8.26 Comparação entre a potência elétrica média horária para tensões fixas de 1,75 e 1,85 V do módulo com concentração. 213

## LEGENDAS DE TABELAS

Pág.

### CAPÍTULO 2

Tabela 2.1	Expressões aproximadas da eficiência ótica para cavidades concentradoras não formadoras de imagem.	34
------------	--	----

### CAPÍTULO 3

Tabela 3.1	Modos e estados na região de transição.	60
------------	---	----

### CAPÍTULO 4

Tabela 4.1	Fatores de intercâmbio radiante para refletividade dos espelhos constante e variável ( $\rho = 0,82$ )*.	87
Tabela 4.2	Eficiência ótica para radiação direta calculada em forma exata e aproximada. $C = 2$ , $m = 3$ e $\rho = 0,80$ .	90

- Tabela 4.3 Aceitação angular, número médio de reflexões e eficiência ótica para radiação difusa,  $\rho = 0,8$ . 93
- Tabela 4.4 Coeficientes empíricos para o cálculo do número de reflexões da radiação difusa. 94

## CAPÍTULO 5

- Tabela 5.1 Intervalo angular ( $\mu$ ), função de aceitação angular  $F(\theta_i)$  e eficiência ótica  $\eta(\theta_i)$  na região de iluminação uniforme do absorvedor. Máximo número de reflexões (N) igual a 1. 99
- Tabela 5.2 Valores padrão para o módulo HM-37C12 da Heliodinâmica. Temperatura de referência, 25°C, e irradiância de referência no plano do módulo sob incidência normal, 1000 W/m<sup>2</sup> 107
- Tabela 5.3 Custo unitário da energia elétrica gerada pelo conjunto fotovoltaico. Local, Recife; latitude, 8,18° Sul; azimute, 180°; inclinação do eixo, 10°, na direção do hemisfério norte. Semi-ângulo do vértice ( $\psi$ ), 30°. 110

Tabela 5.4 Limite inferior da relação de concentração em cavidades com iluminação uniforme e máximo número de reflexões (N). 112

Tabela 5.5 Valores da concentração que minimizam o custo da energia, custos mínimos e concentrações mínimas que satisfazem à condição de iluminação uniforme no absorvedor. 113

Tabela 5.6 Energia diária média anual (Wh/dia), gerada por conjuntos V-fotovoltaicos, para vários ângulos de inclinação do coletor. Área do módulo, 0,42 m<sup>2</sup>; potência, 35 W; eixo do movimento, Norte-Sul. (a) Semi-ângulo do vértice ( $\psi$ ), 30°; (b) Semi-ângulo do vértice ( $\psi$ ), 25°. 115

## CAPÍTULO 7

Tabela 7.1 Planilha de registro de dados. Testes com cavidades tipo V, movimento Norte-Sul. 136

## CAPÍTULO 8

Tabela 8.1	Valores médios máximos no plano horizontal e da abertura, da irradiância e potência elétrica em diversas escalas de tempo.	145
Tabela 8.2	Probabilidade dos modos de reflexão e valores da refletividade das paredes da cavidade. $C = 2,5$ , $\psi = 30^\circ$ .	158
Tabela 8.3	Valores da eficiência ótica com incidência normal para combinações $(C, \psi)$ em torno de $C = 2,5$ e $\psi = 30^\circ$ .	160
Tabela 8.4	Parâmetros de curvas características com diversos níveis de insolação. As eficiências $\eta_{PV}$ e $\eta_{PV, 25^\circ C}$ correspondem ao ponto de máxima potência.	182
Tabela 8.5	Valores médios e desvios padrão das tensões no ponto de operação.	192
Tabela 8.6	Valores da tensão fixa e períodos de medição correspondentes.	193

Tabela 8.7	Coefficientes das retas de regressão, desvio padrão da potência e potência elétrica média horária correspondente ao nível de irradiância $I_c = 800 \text{ W/m}^2$ , para as diversas tensões fixas, com e sem concentração.	202
------------	--	-----

## APÊNDICE C

Tabela C.1	Informações diárias processadas	237
------------	---------------------------------	-----

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

### 1.1 INTRODUÇÃO

A viabilidade da tecnologia de conversão fotovoltaica está hoje demonstrada. Se por um lado, os custos relativamente elevados limitam ainda sua difusão, por outro lado constituem o estímulo mais importante de inovação nesse campo da tecnologia. Diversos caminhos de desenvolvimento visando reduzir o custo de produção da energia elétrica, estão em franco processo de evolução:

- a) Aperfeiçoamento dos materiais já presentes no mercado;
- b) Produção de novos materiais;
- c) Utilização de cavidades concentradoras

No que se refere ao primeiro tópico, verifica-se um aumento permanente da eficiência de conversão das células solares e dos módulos fotovoltaicos, parâmetro que pode ser usado como indicador do progresso alcançado nessa área. O aumento da eficiência de conversão está estreitamente relacionado com o custo de produção da energia elétrica. Constata-se neste campo, embora não o seja na medida das

previsões, uma redução sistemática de custos. Numerosas aplicações da tecnologia fotovoltaica já são hoje perfeitamente competitivas com as opções tradicionais e em muitos casos, algumas aplicações remotas por exemplo, verifica-se que a tecnologia fotovoltaica não somente é a mais competitiva mas a única opção disponível.

A pesquisa de novos materiais visa a redução de custos, particularmente através do desenvolvimento de células de camada fina e a elevação da eficiência de conversão. Uma grande variedade de estruturas estão sendo estudadas com essa finalidade. A economia de material, baixo consumo de energia e possivelmente o potencial de um alto grau de automatização no processo de fabricação das células, prometem produzir energia elétrica a custos comparáveis com as formas tradicionais de geração de energia.

Numerosas propostas foram feitas para combinar o uso de conversores fotovoltaicos com cavidades concentradoras. Relações de concentração compreendidas entre 50X e 500X foram experimentadas com resultados favoráveis [1]. A utilização de concentradores permite, para uma determinada superfície de células, aumentar a produção de energia de forma aproximadamente proporcional à taxa de concentração. Para certas combinações de custo dos módulos fotovoltaicos e concentradores, uma redução significativa do custo da energia pode ser obtida.

Uma opção interessante é a utilização de concentradores não focais, de baixa relação de concentração ( $C \leq 10$ ) [2-4]. Apresentam extrema simplicidade construtiva, podem ser utilizados com células solares convencionais e são compatíveis com sistemas de dissipação natural de calor. Têm,

portanto, baixo custo potencial. Visando a redução do custo do kWh, esta tecnologia, embora pouco explorada, apresenta-se como uma alternativa interessante.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

### 1.2.1 CAVIDADES TIPO V ACOPLADAS A SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

As cavidades tipo V fazem parte da família de concentradores de baixa relação de concentração [3]. Constituídas por duas paredes planas que se interceptam formando um ângulo igual a  $2\psi$ , permitem a utilização de espelhos comuns, amplamente disponíveis no mercado e cujo índice de refletividade supera os 80%. Podem se esperar, em consequência, eficiências óticas relativamente elevadas.

Uma peculiaridade que torna estes concentradores particularmente aptos para seu uso em combinação com sistemas fotovoltaicos é a propriedade que estas cavidades possuem, para certas combinações da relação de concentração (C) e do ângulo do vértice ( $\psi$ ), de iluminar uniformemente a região absorvedora [5]. Isto permite um acoplamento ótico correto da cavidade a módulos fotovoltaicos comerciais, cujas células estão interligadas em série e ocupam a largura do absorvedor em número de três ou quatro. Deste fato decorre a necessidade de contar com iluminação transversal uniforme nesta região, embora não se subestime a necessidade de contar também com iluminação uniforme no sentido axial. Em contraste com as cavidades tipo V, as cavidades não formadoras de imagem tipo CPC, por exemplo,

apresentam perfis extremamente irregulares através do absorvedor [2], o que impede a utilização nessa região de mais de uma célula solar (uma única célula pode ter um desempenho razoável com perfis altamente irregulares dado que a mesma se comporta como um conjunto relativamente grande de mini-células em paralelo, gerando em cada uma delas uma corrente aproximadamente proporcional à iluminação local, correntes que se somam na saída da grade coletora).

### 1.2.2 CONCENTRADORES DE BAIXA RELAÇÃO DE CONCENTRAÇÃO E A QUALIDADE DO RECURSO SOLAR

Outro elemento a considerar em relação à utilização de cavidades de baixa relação de concentração é o alto nível de radiação solar global existente na região Nordeste do Brasil. Seus valores médios anuais são comparáveis às melhores regiões do estado de Califórnia, com a vantagem adicional de uma maior uniformidade ao longo do ano. Um alto nível de radiação global significa ao mesmo tempo alto nível da componente direta da radiação e, correlativamente, um baixo nível de radiação difusa. Este fator é de grande importância para o uso de concentradores de baixa relação de concentração, já que estes aceitam uma fração igual a  $1/C$  da radiação difusa, podendo-se contar portanto com bons níveis de aceitação da radiação global. Finalmente, cabe acrescentar que as relações de concentração admissíveis, como será mostrado ao longo do trabalho, se encontram no intervalo  $1 \leq C \leq 3$ , o que possibilita a utilização de sistemas de dissipação natural de calor.

### 1.2.3 SISTEMAS DE RASTREAMENTO

A produção de energia de sistemas fotovoltaicos pode ainda ser aumentada mediante o uso de dispositivos de rastreamento. A rotação do coletor em torno de um eixo, orientado na direção N-S, resulta em um aumento de aproximadamente 30% da energia coletada quando comparado com coletores fixos e a rotação em torno de dois eixos se traduz em um aumento da ordem de 33% [6], o que sugere que a configuração em torno de um eixo é a mais interessante do ponto de vista da relação de custo-benefício. Outras configurações geométricas possíveis, por exemplo com o eixo de rotação orientado L-O e rastreamento N-S são claramente desfavoráveis em relação às mencionadas [6]. Quando se considera a produção de energia elétrica em sistemas com rastreamento, verificam-se ainda benefícios maiores, da ordem de 34% para sistemas com rotação em torno de um eixo e 38% em torno de dois eixos [6], decorrentes dos menores ângulos de incidência na abertura dos coletores com rastreamento em relação aos coletores fixos.

### 1.2.4 RASTREAMENTO COMBINADO COM CAVIDADES TIPO V

Estimativas realizadas com programas de simulação mostram que a combinação de cavidades tipo V com rastreamento em torno de um eixo, orientado N-S, na cidade de Recife, se traduz em um aumento da energia elétrica produzida da ordem de 100% em relação à gerada por um sistema constituído por coletores planos [7]. Entretanto, é necessário determinar para que combinações

dos parâmetros  $C$  e  $\psi$  essa configuração apresenta custos mínimos e qual a redução relativa do custo da energia.

Dadas as pequenas latitudes da região Nordeste, duas vantagens adicionais dos sistemas de rastreamento podem ser mencionadas. A primeira é que a produção máxima de energia ocorre para ângulos de inclinação do eixo de rotação próximos da posição horizontal, de forma que os custos de montagem de uma central fotovoltaica ficam favorecidos em relação a regiões de maior latitude. A segunda tem relação com as características favoráveis do sombreamento em pequenas latitudes, que se traduzem na ocupação de menores superfícies que aquelas que seriam ocupadas pelo sistema a latitudes maiores. Cabe concluir, portanto, que a Região Nordeste reúne condições extremamente favoráveis para o desenvolvimento das tecnologias acima mencionadas. A pesar de que as regiões de maior latitude não apresentam as vantagens comparativas mencionadas, próprias das regiões equatoriais, estudos realizados mostram que a combinação de rastreamento com cavidades tipo V se traduz em benefícios similares no que diz respeito ao aumento da produção de energia elétrica [6].

Pelos motivos que antecedem, o trabalho a ser realizado se propõe:

Estudar as propriedades óticas e radiativas das cavidades tipo V;

Desenvolver uma metodologia de projeto de sistemas fotovoltaicos com rastreamento em torno de um eixo, acoplados a cavidades tipo V e

Desenvolver uma metodologia de testes e avaliação desses sistemas fotovoltaicos.

### 1.3 REVISÃO DA LITERATURA

Em primeiro lugar serão considerados os trabalhos realizados sobre as propriedades óticas e radiativas das cavidades tipo V e posteriormente serão analisados os trabalhos sobre sistemas fotovoltaicos com rastreamento, acoplados ou não a esse tipo de cavidades.

#### 1.3.1 CARACTERÍSTICAS ÓTICAS DAS CAVIDADES TIPO V

Diversos estudos sobre a ótica de cavidades tipo V foram publicados. O uso do método das imagens foi introduzido por Williamson [8], que estuda as propriedades óticas de superfícies cônicas com a finalidade de condensar a radiação luminosa. Williamson obtêm, para raios contidos no plano meridiano do cone, uma expressão análoga à que anos mais tarde e quase simultaneamente viriam a descobrir, para configurações geométricas absolutamente gerais, Winston, Baranov e Ploke [9-13].

Tabor analisa qual é a máxima concentração compatível com concentradores estacionários [14]. O estudo de um coletor cilindro-parabólico leva o autor a concluir sobre a impossibilidade de conseguir relações de concentração maiores do que um (1) com cavidades rigorosamente estacionárias. A partir dos trabalhos de Winston [2 e 10], verificou-se a posteriori que

esta conclusão não é válida e que concentradores anualmente estacionários podem operar satisfatoriamente. Por exemplo, um concentrador de relação de concentração  $C = 1,5$  pode operar durante 7 horas no dia de menor coleção ao longo do ano [3].

Hollands [5] realiza um estudo teórico sobre as propriedades óticas dos concentradores tipo V e define as condições de iluminação adequadas ao uso de módulos fotovoltaicos de características comerciais. Estabelece, desta maneira, a condição de uniformidade da iluminação na região absorvedora como exigência fundamental da viabilidade técnica desse tipo de equipamentos e deriva a relação matemática que essa subclasse de concentradores deve satisfazer. O autor utiliza o método das imagens múltiplas como ferramenta essencial para o estudo das propriedades óticas das cavidades. Nas cavidades analisadas neste trabalho o máximo número de reflexões é igual a um. Os resultados deste estudo, da mesma forma que o trabalho de Tabor, dependem da geometria coletor-sol escolhida e, apesar de que os mesmos contêm diversos conceitos e desenvolvimentos de grande interesse, seu grau de aplicabilidade não deixa de ser limitado. Cabe, neste sentido, salientar a importância de contar com uma descrição geral das propriedades óticas das cavidades, cujos resultados tenham maior aplicabilidade.

Diversos estudos sobre a ótica das cavidades tipo V, onde a radiação experimenta zero e uma reflexões, são publicados na década do 70 [15-16]. Uma análise mais ampla é realizada por Burkhard et al. [17], que deriva expressões analíticas para calcular a densidade de fluxo na região do absorvedor em cavidades onde a radiação experimenta um número arbitrário de

reflexões. Este trabalho constitui um avanço importante na análise das propriedades óticas das cavidades tipo V. No entanto, as expressões que apresenta tem validade limitada devido a que a sombra das paredes refletoras, que explica a desaparecimento dos modos de reflexão a medida que o ângulo de incidência aumenta, não é considerada. Adicionalmente, os resultados apresentados não permitem conhecer a composição dos modos de reflexão presentes na cavidade para um determinado ângulo de incidência.

Uma abordagem mais geral, apesar de não ser integralmente analítica, é desenvolvida por Fraidenraich e Almeida [18]. O trabalho apresenta uma análise conceitual do comportamento ótico das cavidades tipo V e introduz a noção de modo de reflexão, resultante da categorização dos raios luminosos incidentes de acordo com o número de reflexões que experimentam no seu caminho da abertura ao absorvedor. Em um trabalho posterior [19], os mesmos autores analisam as relações que regem o surgimento, presença e extinção dos modos de reflexão no interior da cavidade, discutem a validade de expressões analíticas aproximadas das propriedades óticas das cavidades tipo V e apresentam resultados numéricos da eficiência ótica para radiação direta e difusa. Fraidenraich [20] completa esta abordagem com o conceito de estado dos modos de reflexão, associados às características da iluminação, uniforme ou não, da região absorvedora. Na mesma referência são derivadas soluções analíticas gerais para as propriedades óticas associadas à radiação aceita pelas cavidades tipo V. Soluções analíticas para as propriedades óticas associadas à radiação não aceita pela cavidade são derivadas por Fraidenraich [21] e através de um

tratamento unificado com a metodologia desenvolvida em [20] são obtidas as propriedades radiantes para ambas frações, aceita e rejeitada, da radiação incidente.

### 1.3.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COMBINADOS COM CAVIDADES TIPO V

Uma das primeiras propostas de utilização de cavidades tipo V acopladas a sistemas fotovoltaicos foi realizada por Hollands [5]. O concentrador estudado está montado sobre um eixo orientado leste-oeste e projetado para acompanhar o movimento sazonal do sol. O autor realiza o estudo das propriedades óticas das cavidades tipo V em conjunto com a análise da configuração geométrica sol-coletor e calcula o valor médio anual do fator de concentração, para ambas as componentes da radiação. Se bem a configuração geométrica descrita neste trabalho, movimentos sazonais em torno de um eixo leste-oeste, requer de um dispositivo mecânico muito simples, os ganhos em termos de energia coletada são pequenos e a relação de custo-benefício não necessariamente favorável.

Stacey e McCormick [22] estudaram o desempenho de módulos fotovoltaicos acoplados a cavidades tipo V. Foram observadas densidades máximas de potência elétrica iguais a  $130 \text{ W/m}^2$  com células de silício monocristalino e relação de concentração de 2,2X. O aumento da temperatura e da densidade de fluxo na superfície da célula são identificados como fatores limitantes da eficiência dos módulos e sua contribuição é quantificada em cada caso. A redução do fator de forma observada para dois dos módulos testados foi igual a 7 e 13%, para uma

irradiância global de  $1000\text{W/m}^2$  e  $100\text{W/m}^2$  de radiação difusa. Os autores apresentam o resultado de um estudo de simulação mostrando que o uso de cavidades com relação de concentração igual a 4X, montadas sobre um eixo polar pode aumentar a potência pico do sistema em 3,2 vezes com relação á produzida por módulos planos e fixos. Apesar de ter utilizado módulos comerciais, no trabalho não é mencionada a necessidade de iluminação uniforme na região do absorvedor da cavidade, caracterizando estas pela relação de concentração exclusivamente, quando são precisamente os dois parâmetros  $C$  e  $\psi$  que definem essa condição. Embora tenham sido utilizados módulos cuja resistência série pode ser considerada adequada para seu uso com concentradores, a redução do fator de forma acima comentado pode ter relação com um inadequado acoplamento ótico módulo-cavidade

Um estudo de caso é apresentado por Freilich e Gordon [23]. Um sistema de 12 kW máximo, constituído por 189 módulos de silício policristalino, montado sobre rastreadores com movimento em torno de um eixo horizontal, orientado N-S e acoplado a cavidades tipo V, está ligado a uma unidade de condicionamento de potência que opera com tensão fixa, em lugar de operar no ponto de máxima potência como é habitual. A cavidade utilizada possui uma relação de concentração  $C = 2.56$  e ângulo do vértice  $\psi = 30,7^\circ$ . O trabalho apresenta resultados de simulação numérica. As propriedades óticas são obtidas a partir de uma análise diferenciado para a radiação direta que incide sem reflexões, radiação direta que incide depois de uma reflexão e radiação difusa. Os autores mostram que: (a) a operação do sistema de condicionamento com a melhor tensão fixa (MTF) pode

alcançar 96% da energia anual produzida quando opera no ponto de máxima potência (PMP); (b) o sistema é extremamente sensível à escolha da tensão fixa de operação e seu desempenho é fortemente assimétrico em torno dela; (c) as limitações da corrente elétrica estabelecidas pelo sistema inversor exercem uma forte influencia no desempenho global do sistema. Com referência à contribuição da concentração de radiação e do acompanhamento do sol no aumento da energia produzida pelo sistema, os resultados mostram que a relação existente entre coletores fixos e com rastreamento N-S, no clima de Sede Boqer, Israel (latitude  $30,9^\circ$ ), na região do deserto do Negev, é igual a 1,22. A relação análoga entre o sistema do conjunto "cavidade concentradora-rastreamento" e o sistema dotado exclusivamente de rastreamento é igual a 1,34, resultando em um benefício energético global igual a 63%. Estes valores estão afetados por efeitos de sombreamento (5,7%) e limitação nos ângulos extremos de rastreamento (4,7%). Não obstante a consideração destes efeitos, os ganhos mencionados são consideravelmente inferiores aos melhores valores que podem ser obtidos com esses recursos técnicos, como mostrado por autores que serão comentados a seguir. Um dos motivos desta diferença pode ter origem na inclinação inadequada do eixo (horizontal) para a latitude em que a experiência foi realizada ( $30,9^\circ$ ).

Um estudo do potencial de sistemas fotovoltaicos com rastreamento associados ou não a cavidades tipo V é apresentado por Nann [6], para climas com uma elevada incidência de radiação difusa (50% da radiação total) que o autor define como climas moderados (por exemplo Europa Central). O atrativo das cavidades tipo V radica precisamente na capacidade de aceitar uma elevada

fração ( $1/C$ ) da radiação difusa. O autor elabora um modelo de simulação numérica para o cálculo do benefício energético decorrente do uso de sistemas com rastreamento em torno de um e dois eixos, sistemas com eixo vertical e módulos com diversas inclinações e cavidades tipo V com rastreamento em torno de dois eixos. É interessante comentar que as estimativas do aumento da energia solar coletada, resultante do processo de acompanhamento do sol, realizadas para 28 cidades localizadas na Europa, América do Norte, Ásia e África mostram um comportamento bastante uniforme, apesar da enorme variação na qualidade do recurso solar nos locais estudados. Os resultados mostram aumentos relativos à energia elétrica produzida com painéis fixos que variam entre 30 e 37%, para acompanhamento em torno de um eixo, e entre 33 e 43% para dois eixos. Os cálculos relativos ao uso de cavidades tipo V com rastreadores foram limitados a um único valor da relação de concentração ( $C = 2$ ), sem especificar o ângulo do vértice. O estudo de sensibilidade do custo da energia mostra vantagens da ordem de 20% com relação a sistemas fixos, para rastreadores sem concentração em torno de um eixo e benefícios um pouco menores, para cavidades tipo V com rastreamento em torno de dois eixos, ambos em climas moderados e considerando os preços que os módulos tem no presente. Os resultados do estudo mostram também as vantagens comparativas de locais situados na região equatorial onde a escolha ótima são os dispositivos de rastreamento de eixo horizontal, orientados N-S, que podem ser construídos a custos bem menores que os correspondentes a sistemas instalados em maiores latitudes. O autor menciona que as vantagens desta configuração são tão importantes que ela foi adotada pelo sistema SMUD PV 1

(Sacramento Municipal Utility District) instalado em Sacramento, CA, (Potência: 1,2 MWp DC), apesar de não ser a escolha mais adequada para um local nessa latitude. O trabalho conclui que o benefício de sistemas com rastreamento torna-se sensível a partir de custos de módulos fotovoltaicos de 250 US\$/m<sup>2</sup>, resultado que oferece uma ampla margem, ainda, para aplicação destas tecnologias. Os resultados da análise dependem fortemente dos custos do sistema de rastreamento, que, espera-se, poderão ser drasticamente reduzidos a medida que a tecnologia dos heliostatos se desenvolve. O autor recomenda a utilização de sistemas de rastreamento com e sem cavidades tipo V como auxiliares em uma política de ampliação do mercado fotovoltaico.

Como parte de um trabalho sobre metodologia de cálculo da energia coletada por sistemas solares, Collares Pereira e Rabl [24] apresentam resultados do aumento na coleção de energia de um coletor com rastreamento em torno de dois eixos com referência a um sistema fixo, com ângulo de inclinação igual à latitude. O modelo utilizado considera a radiação difusa com distribuição angular isotrópica. A estimativa é realizada em função da latitude e o valor médio anual da transmitância atmosférica  $K_h$  ( $K_h = H_h / H_o$ ;  $H_h$  e  $H_o$  são valores médios anuais da radiação solar local e extraterrestre no plano horizontal, respectivamente). O aumento na coleção de energia para um clima com um valor de  $K_h$  igual a 0,3 (clima com nível de radiação solar baixo) varia desde um mínimo de 13% para latitude igual a 0° até um máximo de 17% para latitude igual a 50°. Para um clima com  $K_h$  igual a 0,7 (clima com elevado nível de radiação solar) os aumentos na coleção de energia variam entre 29 e 33% para latitudes iguais a 0° e 50°, respectivamente. Para o clima da

cidade de Recife ( $K_h = 0,55$  e latitude  $8,18^\circ$  S) a estimativa resulta em um aumento de 25%. A conversão destes resultados para rastreamento em torno de um eixo polar pode ser feita com boa aproximação multiplicando-os pelo fator 0,96, igual ao valor médio do coseno da declinação solar ao longo do ano. De forma geral, os valores numéricos obtidos mostram que entre os limites acima mencionados existe uma variação contínua dos ganhos derivados do rastreamento.

Um estudo visando desenvolver uma metodologia de análise e projeto de sistemas de rastreamento com e sem cavidades tipo V foi realizado por Fraidenraich [7]. A energia produzida por conjuntos fotovoltaicos com diversos sistemas de rastreamento, leste-oeste, norte-sul com eixo horizontal e inclinado, dois eixos, acoplados ou não a cavidades tipo V foi calculada para a cidade de Recife, PE (latitude  $-8,15^\circ$ ). Adotando como referência a energia produzida por coletores fixos, o aumento da produção de energia resultante do acompanhamento em torno de um eixo N-S horizontal é da ordem de 31%. O aumento da energia coletada com sistemas que mantêm a abertura do coletor na direção do sol (dois eixos) é da ordem de 36%. Em sistemas com acompanhamento em torno de um eixo orientado L-0, o aumento na coleção de energia é igual a 7%. Esta configuração é atrativa apenas quando o rastreamento está associado à utilização de cavidades concentradoras. O autor analisa também a associação de rastreamento em torno de um eixo N-S com cavidades tipo V, que resulta em um aumento da energia elétrica de 112% e quando o eixo está orientado L-0 o benefício é igual a 70%. O fator de capacidade médio anual do sistema fotovoltaico (relação entre a energia média anual e a energia expressa pelo produto da

potência pico vezes 24 horas), para diversas configurações, também é estimado neste trabalho. O valor em torno de 0,20 com coletores fixos se eleva para 0,26-0,27 com rastreamento em torno de um e dois eixos. A concentração não melhora o fator de capacidade porque aumenta a potência e a energia simultaneamente.

Em trabalho mais recente Maciel Lyra [25] calcula o desempenho de sistemas fotovoltaicos interligados na rede de energia elétrica utilizando o modelo solarimétrico de Perez [26]. Estimativas realizadas para um sistema fotovoltaico com rastreamento em torno de um eixo N-S, instalado na cidade de Recife, mostram um acréscimo da ordem de 30% na radiação solar coletada e de 33% na produção de energia elétrica, com relação a sistemas fixos.

### 1.3.3 CENTRAIS FOTOVOLTAICAS COM RASTREAMENTO

Existem exemplos importantes de aplicação destas tecnologias. Na década do 80 foram instaladas e testadas nos Estados Unidos três centrais fotovoltaicas, a central denominada Lugo (1 MWp-DC), na Hesperia, Carrisa Plains (6 MWp-DC) em San Luis Obispo e a primeira central SMUD (Sacramento Municipal Utility District) PV 1 (1,2 MWp-DC), em Sacramento, todas no estado de Califórnia.

Na Ref. 27, Berman e Mitchell analisam o desempenho das centrais Lugo e Carrisa Plains. Esta última central consta de painéis montados sobre rastreadores que mantêm o plano de coleção normal aos raios solares (dois eixos) e espelhos

laterais, na forma de V, de superfície igual a duas vezes a superfície dos módulos fotovoltaicos. Sua instalação foi completada em 1985 e operou satisfatoriamente até 1987 em que, devido a um processo de degradação (browning) do etil vinil acetato (EVA), começou a reduzir gradativamente a produção de energia elétrica da central e foi descontinuada em 1988. Estudos de laboratório realizados por Cuddihy et al. [28], mostram que este processo pode ser revertido desde que os módulos trabalhem a temperaturas inferiores às que foram submetidos, que se aproximam dos 90°C.

Com relação ao desempenho das centrais, observações diárias durante o mês de junho (verão no Hemisfério Norte) na central Lugo [27], mostraram que o sistema com rastreamento (dois eixos sem espelhos) produziu 50% a mais de energia DC que o sistema fixo. Na central de Carrisa Plains foram medidos valores do fator de capacidade em torno de 40% durante os meses de maior irradiância, o que confirma um dos benefícios esperados do uso de sistemas de rastreamento [6]. Trata-se, naturalmente, de valores para dias individuais de qualidade excepcional e no período de verão, em que os coletores fixos não tem a orientação mais favorável com relação ao sol, fator este que acentua a diferença no desempenho de ambos sistemas. O benefício médio anual é comprovadamente menor. Gordon e Reddy [29] citam, para sistemas fotovoltaicos instalados pela Pacific Gas and Electric Co. no estado de Califórnia, valores experimentais do fator de capacidade médio anual iguais a 0,24 para sistemas planos fixos e 0,28 para sistemas com concentração. Um aspecto pouco considerado quando se analisam as vantagens comparativas do uso de sistemas de acompanhamento, mencionado por Berman e Mitchell

[27], refere-se ao tamanho do inversor e a sua eficiência. Para produzir a mesma quantidade de energia a partir de sistemas fixos, com relação a um sistema com rastreamento, são necessárias, em media, superfícies de módulos 35% superiores que produzem potências pico 35% superiores e requerem inversores que sejam maiores na mesma proporção. Além de que os custos destes equipamentos são mais elevados, sua eficiência será menor devido a que seu ponto de operação estará afastado do máximo boa parte do tempo.

Com relação à produção de energia, a operação da central Carrisa Plains durante o período 1985-1987 confirmou e até superou ligeiramente as previsões de projeto. As conclusões resultantes de mais de três anos de operação é que as centrais fotovoltaicas são altamente confiáveis, previsíveis e simples de instalar e operar [27].

#### 1.4 DESCRIÇÃO DA TESE

A tese consta de três partes:

- (a) Estudo das propriedades óticas das cavidades tipo V;
- (b) Desenvolvimento da metodologia de projeto de sistemas fotovoltaicos com rastreador em torno de um eixo e cavidades tipo V;
- (c) Construção, teste e avaliação de um protótipo experimental.

Com relação ao item (a), são introduzidas as propriedades dos concentradores não formadores de imagem,

mostrando-se que certo tipo de cavidades em V constituem uma subclasse desses concentradores. A seguir é desenvolvido, através de uma abordagem conceitual, o conjunto de relações operacionais que define a estrutura ótica das cavidades tipo V. A derivação das soluções analíticas que representam o comportamento ótico dessas cavidades é uma simples consequência da estrutura operacional acima mencionada. As soluções encontradas tem caráter geral e podem ser utilizadas em diversas aplicações, sem nenhum tipo de restrição. Resultados teóricos e numéricos obtidos a posteriori exemplificam o uso destas soluções e permitem adquirir uma idéia geral do comportamento ótico destas cavidades.

A metodologia de projeto (item (b)), consta essencialmente de um programa de simulação numérica dos sistemas fotovoltaicos, com a possibilidade de representar coletores com rastreamento em torno de um e dois eixos e de um concentrador tipo V. Com esta finalidade foram incorporados os resultados do estudo das propriedades óticas dessas cavidades, possibilitando a realização de uma análise de sensibilidade dos custos da energia para uma variedade relativamente grande de combinações  $(C, \psi)$ , sem restrições relacionadas com o número de reflexões que os raios perfazem no seu caminho da abertura até o absorvedor. Os resultados são expressados através de uma família de curvas que permite definir a combinação  $(C, \psi)$  que minimiza o custo da energia. Conjuntamente com outros critérios define-se um espaço de opções que possibilita a escolha mais adequada para a geometria da cavidade.

O protótipo construído, com eixo de rotação horizontal e orientado na direção Norte-Sul, acopla um módulo fotovoltaico

à cavidade tipo V, de geometria definida na segunda parte deste trabalho. A metodologia de testes (item (c)) está baseada na análise da interação dos diversos componentes que participam do processo de conversão de energia, representados pelas curvas características, com o fluxo de energia que se propaga ao longo do sistema. Determina-se assim, a resposta do conjunto fotovoltaico em condições reais de operação, sujeito naturalmente às limitações de escala do protótipo estudado. O conjunto fotovoltaico atende à demanda de uma carga eletrônica controlada, que mantém a tensão de saída relativamente constante, e sua resposta é determinada para diversos valores da tensão. Comparam-se, finalmente, os resultados de desempenho do sistema fotovoltaico com os resultados esperados.

## CAPÍTULO 2

### CONCENTRADORES NÃO FORMADORES DE IMAGEM

#### 2.1 INTRODUÇÃO

A classe de concentradores não formadores de imagem, denominados concentradores parabólicos compostos (CPC), possuem a propriedade de aceitar todos os raios luminosos incidentes na sua abertura, dentro de um certo intervalo angular referido como ângulo de aceitação. Os raios que se encontram fora desse intervalo são rejeitados e para um determinado ângulo de aceitação estes concentradores atingem a máxima concentração compatível com o limite teórico [2-3].

Apesar de que, a rigor, os concentradores tipo CPC possuem absorvedor plano, essa denominação tem sido utilizada também, de forma genérica, para concentradores com as mais variadas geometrias do absorvedor [3]. Nestes casos as paredes refletoras já não são, necessariamente, segmentos de parábolas, mas possuem outras geometrias.

Os concentradores óticos podem ser caracterizados pela função de aceitação angular,  $F(\theta_i)$ , definida como a fração de energia aceita pela cavidade quando iluminada por raios que incidem com o ângulo  $\theta_i$  (a cavidade tem paredes refletoras

perfeitas,  $\rho = 1$ ). De acordo com o que foi mencionado, a função  $F(\theta_i)$  dos concentradores CPC pode ser representada segundo a Fig. 2.1.

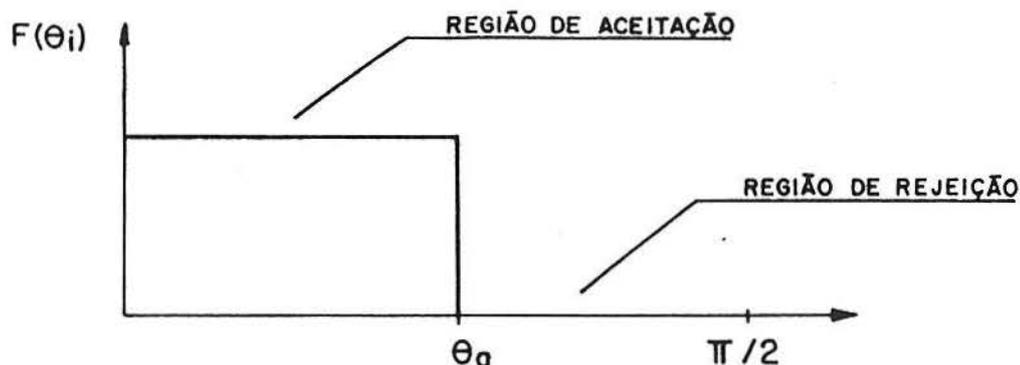


Figura 2.1 Função de aceitação angular de concentradores tipo CPC.

Esta forma da função de aceitação angular, na qual o intervalo de aceitação está separado por uma descontinuidade do intervalo de rejeição, tem sido, as vezes, confundida como o atributo essencial dos concentradores ideais. No entanto, outros tipos de concentradores, cuja função de aceitação angular apresenta uma transição suave entre a região de aceitação e rejeição, podem ser considerados ideais, desde que os conceitos básicos associados a este tipo de cavidades óticas sejam devidamente generalizados.

Um concentrador define-se por uma fonte luminosa, uma cavidade e uma região receptora, ou absorvedor (Fig. 2.2). Este concentrador pode ser considerado ideal se todos os raios emitidos pela fonte que atravessam a abertura, atingem a região absorvedora. A forma da fonte e do absorvedor não

necessariamente deve ser um segmento de reta, podendo assumir outras geometrias.

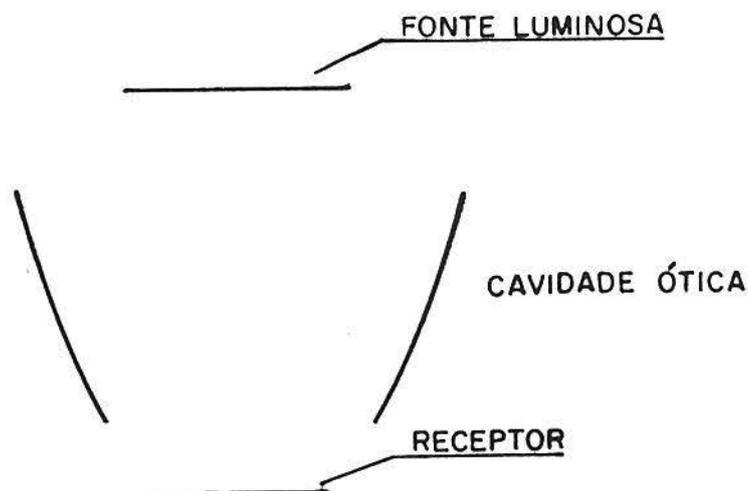


Figura 2.2 Configuração geométrica do conjunto fonte, cavidade e receptor.

Por razões de simplicidade só consideraremos cavidades com duas dimensões. No entanto os mesmos princípios que regem o comportamento destas cavidades são válidos para concentradores tridimensionais. Pode se demonstrar, utilizando o princípio dos raios limites (edge rays principle) [2], que se todos os raios dos extremos da fonte atingem os extremos do absorvedor, raios emanados de qualquer ponto interior da fonte chegarão necessariamente ao absorvedor.

Bastará portanto, para construir uma cavidade ideal, utilizar raios limites. Por exemplo se a fonte está definida por um segmento de reta  $\overline{F_D F_E}$  e, o receptor pelo segmento  $\overline{R_D R_E}$ , para que todos os raios emanados de  $F_D$  atinjam  $R_D$  será suficiente intercalar entre fonte e absorvedor um segmento de elipse cujos focos são precisamente esses pontos. Para cavidades simétricas

podem-se estender estas considerações ao par  $F_E, R_E$ , completando assim uma cavidade denominada Concentrador Elíptico Composto (CEC) (Fig. 2.3) [2 e 30]. A cavidade está definida por dois ângulos,  $\theta_m$  e  $\theta_M$ . Quando a fonte se encontra infinitamente distante, os ângulos  $\theta_m$  e  $\theta_M$  são iguais. Nesse caso as direções extremas coincidem e o refletor se converte em uma parábola. Recupera-se assim o Concentrador Parabólico Composto. As dimensões da fonte, infinitamente distantes, estão definidas pelo intervalo angular  $-\theta_c, +\theta_c$ .

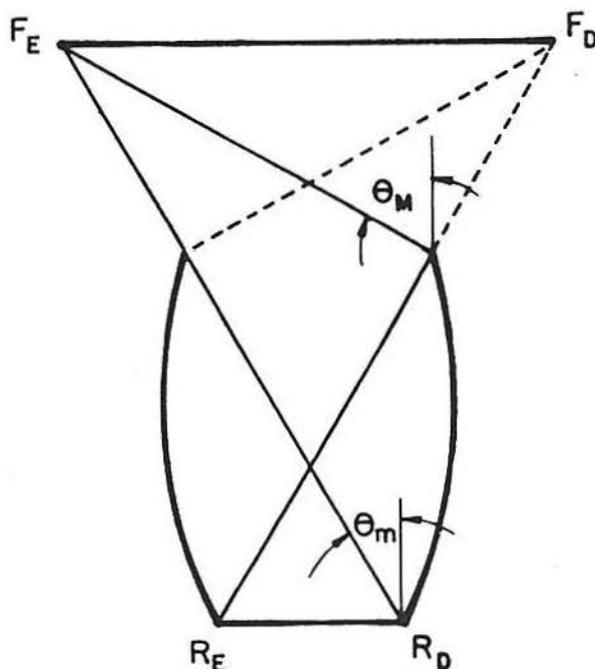


Figura 2.3 Concentrador Elíptico Composto (CEC) com fonte de luz plana.

Utilizando os mesmos conceitos pode-se imaginar também a existência de uma fonte virtual, ou seja localizada no prolongamento dos raios luminosos, de acordo com o ilustrado na Fig. 2.4.

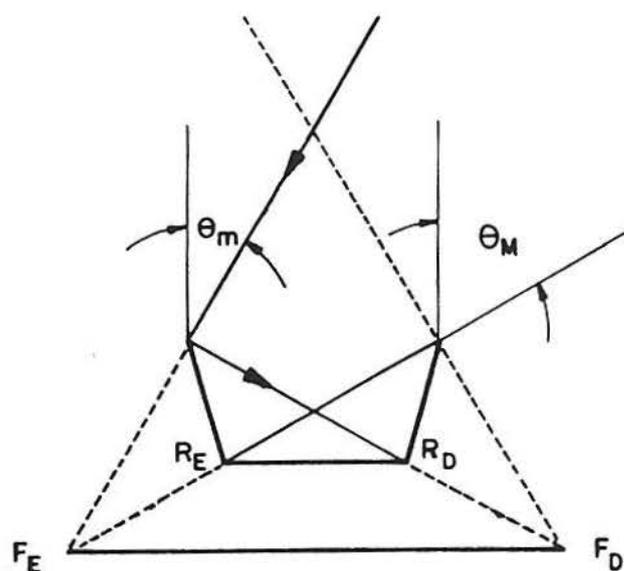


Figura 2.4 Concentrador hiperbólico composto com fonte de luz plana.

As paredes refletoras estão constituídas, neste caso, por segmentos de hipérbole, como por exemplo o refletor esquerdo de focos  $F_D$  e  $R_E$ . Esta classe de cavidades são conhecidas com o nome de Concentrador Hiperbólico Composto (CHC). Encontramos portanto três tipos de cavidades, caracterizadas pela existência de fontes reais a distância finita (CEC), fontes reais a distância infinita (CPC) e fontes virtuais a distância finita (CHC).

Uma aplicação importante deste tipo de cavidades consiste em melhorar a coleção de radiação produzida por sistemas óticos convencionais que formam imagem em uma região finita do espaço [4]. Localizando um concentrador tipo CEC, de forma que sua fonte luminosa seja a imagem de um sistema ótico

primário, podem ser atingidas eficiências de coleção muito elevadas (Fig. 2.5).

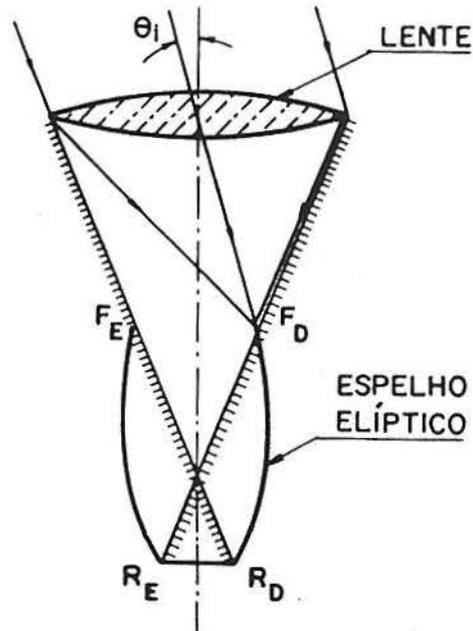


Figura 2.5 Lente combinada com concentrador secundário tipo CEC.

Alternativamente, a imagem do sistema primário pode-se encontrar por trás da região absorvedora, requerendo-se nesse caso um concentrador tipo CHC (Fig. 2.6).

Como consequência do procedimento de construção adotado, pode ser mostrado que estes sistemas óticos atingem a concentração teórica [4]

$$C = \frac{1}{\text{sen } \theta_c} \quad (2.1)$$

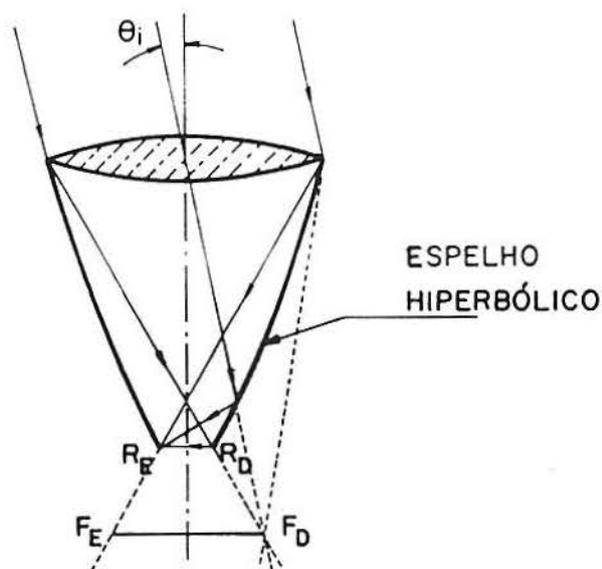


Figura 2.6 Combinação lente e concentrador secundário tipo CHC. A imagem primária é o segmento  $\overline{F_E F_D}$ .

Um caso particular dos concentradores hiperbólicos compostos (CHC) são as cavidades tipo V. No caso particular em que a distância  $\overline{R_E R_D} = \overline{R_D F_D}$  (Fig. 2.7), a hipérbole do lado direito se converte em uma reta, perpendicular à linha que une os pontos  $R_E$  e  $F_D$ . Uma condição análoga converte também o refletor esquerdo em uma superfície plana, obtendo-se assim uma cavidade formada por refletores planos. Estas cavidades constituem uma subclasse das cavidades tipo V, cujos parâmetros ( $C$ ), relação de concentração, e ( $\psi$ ), ângulo do vértice, já não são independentes mas estão relacionados através da expressão (Apêndice A)

$$\operatorname{tg}^2 \psi = \frac{C - 1}{3C + 1} \quad (2.2)$$

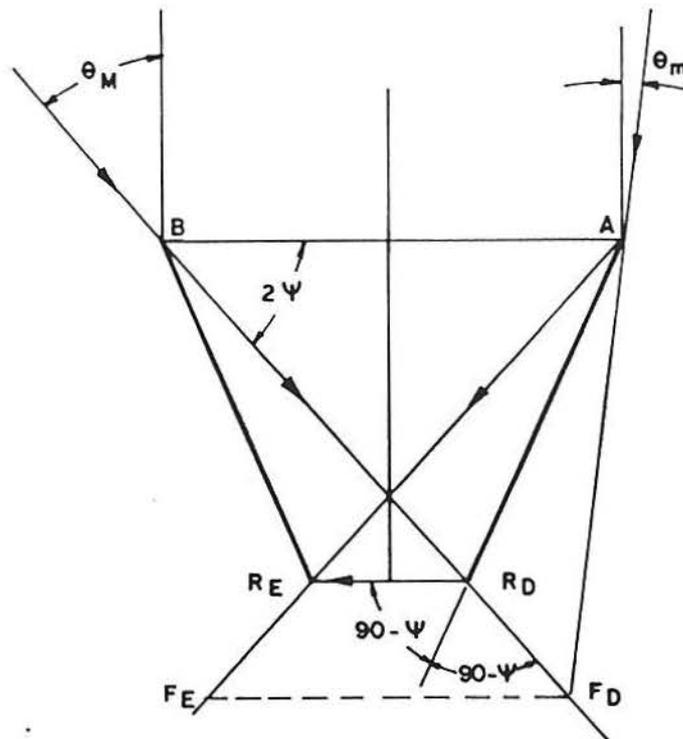


Figura 2.7 Cavidade tipo V como caso particular de concentrador CHC ( $\overline{R_E R_D} = \overline{R_D F_D}$ ).

A função de aceitação angular,  $F(\theta_i)$ , para os concentradores tipo CEC e CHC, pode se expressar analiticamente como segue [31]:

$$F(\theta_i) = \begin{cases} 1 & 0 \leq |\theta| \leq \theta_m \\ \frac{\operatorname{tg}\theta_i - \operatorname{tg}\theta_m}{\operatorname{tg}\theta_M - \operatorname{tg}\theta_m} & \theta_m \leq |\theta| \leq \theta_M \\ 0 & |\theta| \geq \theta_M \end{cases} \quad (2.3)$$

e sua representação gráfica está mostrada na Figura 2.8. Nos concentradores tipo CPC,  $\theta_m = \theta_M$  e a dimensão angular da região  $\theta_m < \theta \leq \theta_M$  tende a zero.

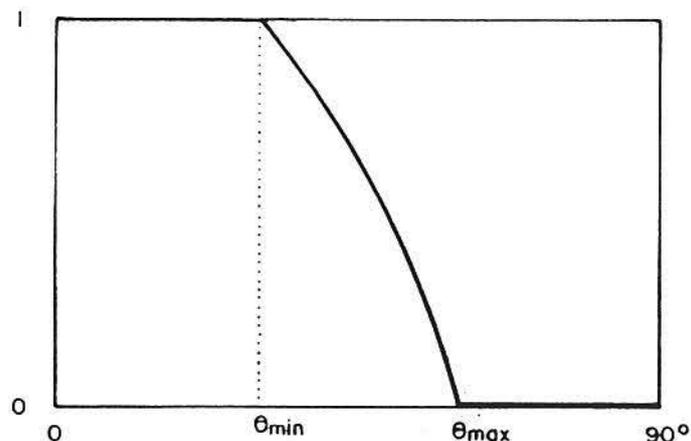


Figura 2.8 Função de aceitação angular de concentradores tipo CEC e CHC.

As cavidades tipo CEC e CHC rejeitam uma fração crescente de radiação no intervalo angular  $\{\theta_m, \theta_M\}$ , apresentando uma transição gradual entre aceitação total e rejeição total. Verificamos portanto, que concentradores ideais possuem funções de aceitação na qual existe uma região de aceitação e rejeição parcial e só no caso em que a fonte se encontra infinitamente afastada da cavidade ( $\theta_m = \theta_M$ ), a função  $F(\theta_i)$  é uma função degrau.

O princípio construtivo utilizado para os concentradores analisados (CEC, CHC e CPC), exige que os raios de borda realizem, no seu caminho da fonte ao absorvedor, uma reflexão como máximo. Porém, princípios mais complexos podem ser utilizados. Em particular, pode se admitir que o número de reflexões seja maior do que um. No caso de cavidades com refletores de paredes curvas isto introduziria um grau de complexidade muito grande no procedimento de construção.

Entretanto, se considerarmos cavidades tipo V, reflexões dos raios de borda em número maior que um seria admissível. As propriedades óticas que caracterizam os concentradores ideais, serão descritas na próxima seção.

## 2.2 PROPRIEDADES ÓTICAS DOS CONCENTRADORES NÃO FORMADORES DE IMAGEM.

Os concentradores não formadores de imagem podem ser caracterizados pela função de aceitação angular, a eficiência ótica e o fluxo da radiação na região absorvedora.

A função de aceitação angular para cavidades cuja fonte luminosa se encontra no infinito é simplesmente uma função degrau, como já foi mencionado. Habitualmente estes concentradores são truncados na parte superior com o benefício de uma redução drástica da superfície refletora e a desvantagem de uma redução, embora pequena, da concentração geométrica. Um benefício adicional do truncamento da cavidade é a aceitação parcial de radiação que se encontra fora do intervalo de aceitação angular da cavidade completa. As funções de aceitação angular para concentradores truncados tipo CPC foram calculadas analiticamente para diversas geometrias do absorvedor [32]. Recentemente foram publicadas as soluções analíticas para concentradores completos e truncados tipo CEC e CHC [33].

A função de aceitação angular representa o comportamento da cavidade com paredes refletoras perfeitas ( $\rho = 1$ ). Para valores reais da refletividade ( $\rho < 1$ ) a resposta da cavidade é expressa pela eficiência ótica,  $\eta(\theta_i)$ , que permite

calcular a fração de radiação direta, incidente na abertura com ângulo  $\theta_i$ , que atinge o absorvedor. O cálculo da função  $\eta(\theta_i)$  requer do conhecimento do peso estatístico dos raios solares que perfazem um certo número de reflexões no seu caminho até o absorvedor, número que depende do local de incidência da radiação na abertura da cavidade [19].

Para radiação difusa, utiliza-se a integral dessa função sobre todos os ângulos de incidência [19]. Foi mostrado por Rabl [34-35] que a eficiência ótica para este tipo de radiação pode ser calculada com boa aproximação por uma expressão que depende de um único parâmetro,  $\rho^{<n>}$ , onde  $<n>$  é o número médio de reflexões para radiação difusa, isto é o valor médio do número de reflexões para todos os possíveis ângulos de incidência. É importante notar que  $<n>$  depende só da geometria da cavidade e não da refletividade das paredes, de forma que a eficiência ótica pode ser obtida para qualquer valor de  $\rho$  uma vez conhecido  $<n>$ . Este parâmetro pode ser calculado para uma variedade de geometrias de concentradores através de expressões analíticas [35]. Porém este procedimento só é válido para concentradores onde a radiação se propaga ao longo da mesma parede refletora no seu caminho até o absorvedor. Isto não acontece nas cavidades tipo V, nas quais a radiação se propaga mediante reflexões entre ambas paredes, razão pela qual o número médio de reflexões ou a eficiência ótica devem ser obtidos por outros procedimentos [19-20].

É importante frisar que a ausência de soluções analíticas para o cálculo da eficiência ótica em função do ângulo de incidência, leva a utilizar indistintamente a expressão  $\rho^{<n>}$  para calcular a eficiência ótica das componentes

direta e difusa da radiação, apesar de que a rigor é válida exclusivamente para radiação difusa. Foi mostrado, no entanto, que para certos tipos de concentradores e relações de concentração moderadas,  $C \leq 10$ , a diferença entre os valores de  $n(\theta_i)$  e  $\langle n \rangle$ , onde  $n(\theta_i)$  é o número médio de reflexões ao longo da abertura para raios incidentes com ângulo  $\theta_i$ , é relativamente pequena [3], o que justifica o uso generalizado da expressão  $\rho^{\langle n \rangle}$ . Uma alternativa de caráter computacional, além da técnica de traçado de raios sempre disponível, foi desenvolvida em um trabalho recente [36], mostrando que a categorização dos raios incidentes na abertura de acordo com o número de reflexões permite descrever os aspectos essenciais do comportamento ótico da cavidade e calcular a eficiência ótica ao longo de todo o domínio angular, otimizando o tempo de computação.

A aproximação  $\rho^{\langle n \rangle}$  da eficiência ótica para radiação difusa é aplicável a concentradores ideais cuja função de aceitação angular,  $F(\theta_i)$ , é uma função degrau (Fig. 2.1). Concentradores truncados, cuja fonte luminosa encontra-se no infinito ou concentradores ideais com fontes a distância finita possuem uma função  $F(\theta_i)$  com uma região decrescente, tal como a representada na Fig. 2.8. Neste caso, pode ser mostrado que a eficiência ótica para radiação difusa é representada, com uma precisão da ordem de  $(1-\rho)$ , pela expressão (vide seção 4.4)

$$\eta_{\text{otd}} = \bar{F} \rho^{\langle n \rangle} \quad (2.4)$$

onde

$$\bar{F} = \int_0^{\pi/2} F(\theta_i) \cos \theta_i \, d\theta_i \quad (2.5)$$

Quando  $F(\theta_i)$  é uma função degrau de domínio angular igual a  $\theta_c$ ,  $\bar{F}$  é igual a  $1/C$  e a Eq. (2.4) resulta igual a

$$\eta_{otd} = \frac{\rho^{(n)}}{C} \quad (2.6)$$

No caso em que a dependência do número médio de reflexões correspondente ao ângulo de incidência  $\theta_i$  fosse conhecida poderia-se utilizar a expressão equivalente para radiação direta [19]

$$\eta_{otb} = F(\theta_i) \rho^{n(\theta_i)} \quad (2.7)$$

Dado que a função de aceitação angular habitualmente é conhecida, da mesma forma que  $\langle n \rangle$ , na literatura sobre o tema utiliza-se para a radiação direta a expressão [32]

$$\eta_{otb} = F(\theta_i) \rho^{\langle n \rangle} \quad (2.8)$$

indicativa das dificuldades ainda existentes no tratamento das propriedades óticas destas cavidades.

A Tab. 2.1 resume nas 1ª e 3ª linhas expressões que, embora aproximadas, são auto consistentes, e nas 2ª e 3ª linhas as expressões usualmente utilizadas. As expressões da 2ª linha apresentam as limitações acima mencionadas.

Tabela 2.1 Expressões aproximadas da eficiência ótica para cavidades concentradoras não formadoras de imagem.

Componente	Fonte no $\infty$		Fonte a distancia finita	Comentários
	Completa	Truncada		
Direta	$\rho^{n(\theta_i)}$	$F(\theta_i)\rho^{n(\theta_i)}$	$F(\theta_i)\rho^{n(\theta_i)}$	$n(\theta_i)$ deve ser obtido mediante traçado de raios.
	$\rho^{<n>}$	$F(\theta_i)\rho^{<n>}$		Utilizadas na literatura
Difusa	$\rho^{<n>/C}$	$\bar{F}\rho^{<n>}$	$\bar{F}\rho^{<n>}$	Utilizadas na literatura; $\langle n \rangle$ e $\bar{F}$ são calculados analiticamente.

### 2.2.1 INTERCÂMBIO RADIANTE ENTRE AS PAREDES DA CAVIDADE

As propriedades óticas e radiantes estão estreitamente associadas. Assim a eficiência ótica para radiação difusa e aceita é igual ao coeficiente de intercâmbio abertura-absorvedor. Da mesma forma a eficiência ótica para radiação difusa rejeitada é o coeficiente de intercâmbio abertura-abertura. Cabe salientar que, sejam coletores térmicos ou fotovoltaicos, o problema térmico dentro da cavidade precisa ser estudado e como parte dele o intercâmbio radiante entre suas paredes.

A cavidade está constituída por três superfícies e o problema radiante define nove coeficientes de intercâmbio. Pode-se mostrar que é necessário conhecer dois coeficientes independentes do total de nove para resolver o problema radiante [35]. Os outros coeficientes são obtidos a partir de equações de conservação de energia e relações de reciprocidade [37]. Uma condição adicional para definir o problema é que a cavidade tenha forma de funil de maneira que a radiação emitida pelo absorvedor não retorne a ele.

Nos próximos capítulos será analisado o comportamento ótico das cavidades tipo V e calculadas suas propriedades óticas e radiantes.

## CAPÍTULO 3

### CAVIDADES TIPO V

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Serão estudadas as propriedades óticas e radiativas das cavidades tipo V. A radiação incidente na sua abertura desdobra-se em uma fração que atinge o absorvedor, denominada radiação aceita [19-20], e uma fração que retorna à abertura, denominada radiação rejeitada [21]. O estudo apresentado a seguir descreve de forma unificada o comportamento da cavidade com relação a ambas frações da radiação. A estrutura ótica é analisada categorizando os raios incidentes na sua abertura de acordo com o número de reflexões experimentadas ao longo de sua trajetória no interior da cavidade.

Em primeiro lugar serão descritos aspectos gerais da geometria e ótica das cavidades, para apresentar imediatamente a metodologia de análise de sua estrutura. Posteriormente são derivadas soluções analíticas que permitem calcular suas propriedades óticas, função de aceitação angular e eficiência ótica da cavidade, e radiativas, coeficientes de intercâmbio radiativo entre abertura e absorvedor e entre abertura e abertura.

### 3.2 ASPECTOS GERAIS DA GEOMETRIA E ÓTICA DAS CAVIDADES TIPO V

As cavidades tipo V dependem de dois parâmetros: o ângulo do vértice  $\psi$  e a relação de concentração  $C$ , definida como

$$C = \frac{A}{a} \quad (3.1)$$

onde  $(A)$  e  $(a)$  são a largura da abertura e do absorvedor (Fig. 3.1).

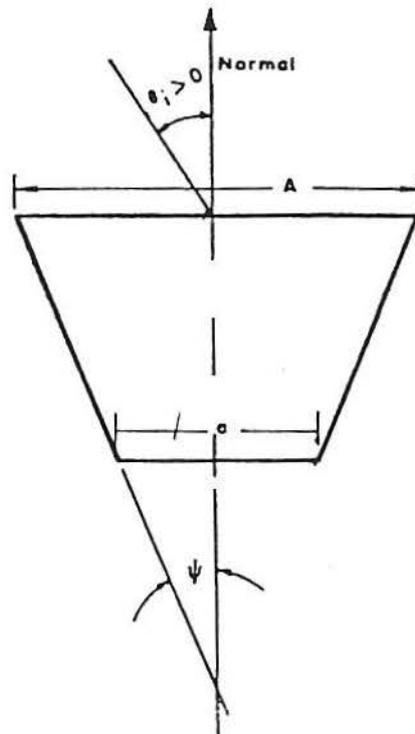


Figura 3.1 Geometria do concentrador tipo V.

A aceitação angular da cavidade, definida como o intervalo de ângulos de incidência dentro do qual todos os raios atingem o absorvedor, pode ser aproximada por

$$\theta_a = \theta_c - \psi \quad (3.2)$$

onde

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \frac{1}{C} \quad (3.3)$$

O comportamento das cavidades tipo V pode ser descrito convenientemente pela função de aceitação angular  $F(\theta_i)$  (Fig. 3.2). O ângulo  $\theta_i$  é formado pela projeção dos raios luminosos no plano transversal da cavidade com a normal à abertura.

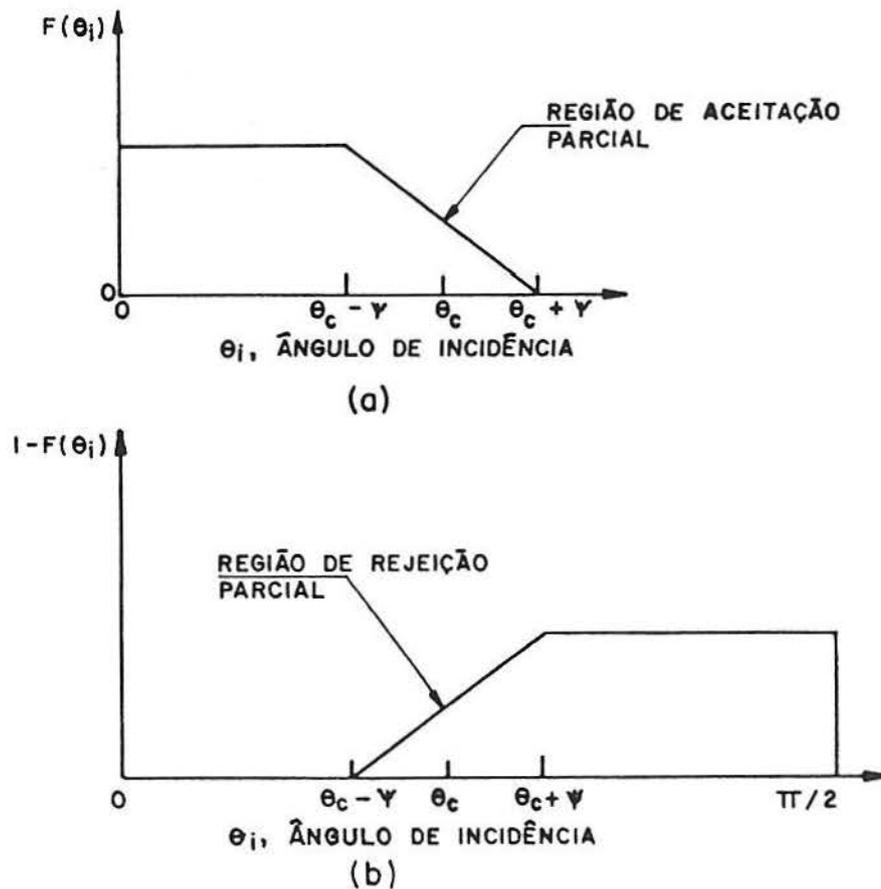


Figura 3.2 (a) Função de aceitação angular de cavidades em V,  $F(\theta_i)$ ; (b) Função de rejeição angular,  $[1-F(\theta_i)]$ .

A função de rejeição angular pode ser definida como o complemento,  $[1-F(\theta_i)]$ , da função de aceitação angular (Fig. 3.2(b)). Três regiões de ângulos de incidência podem ser distinguidas

**Região de aceitação total**

$$F(\theta_i) = 1 \quad 0 \leq |\theta_i| \leq \theta_c - \psi \quad (3.4)$$

**Região de aceitação e rejeição parcial**

$$F(\theta_i) < 1 \quad \theta_c - \psi < |\theta_i| < \theta_c + \psi \quad (3.5)$$

**Região de rejeição total**

$$F(\theta_i) = 0 \quad \theta_c + \psi < |\theta_i| \leq 90 \quad (3.6)$$

Nos concentradores ideais, tipo CPC, só existem duas regiões.

**Região de aceitação total**

$$F(\theta_i) = 1 \quad 0 \leq |\theta_i| \leq \theta_a \quad (3.7)$$

**Região de rejeição total**

$$F(\theta_i) = 0 \quad \theta_a < |\theta_i| \quad (3.8)$$

com  $\theta_a = \theta_c$

### 3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS RAIOS E MODOS DE REFLEXÃO

Os raios incidentes na abertura e que atingem o absorvedor ou invertem o sentido de sua trajetória e retornam à abertura, serão categorizados de acordo com o número de reflexões que experimentam antes de atingir o absorvedor ou a abertura, respectivamente. O conjunto de raios que experimentam o mesmo número de reflexões ( $s$ ) é denominado modo de reflexão. Definimos a função associada  $P_s(\theta_i)$  como a fração dos raios incidentes na abertura com ângulo  $\theta_i$ , que atinge o absorvedor ou retorna à abertura depois de realizar  $s$  reflexões. A eficiência ótica ( $\eta_{ot}$ ) da cavidade para radiação que incide com o ângulo  $\theta_i$ , pode ser calculada como

$$\eta_{ot}(\theta_i) = \sum_{s=0}^{M(\theta_i)} P_s(\theta_i) \rho^s \quad (3.9)$$

onde  $M(\theta_i)$  é o máximo número de reflexões que existe na cavidade quando a radiação incide com esse ângulo. A função de aceitação angular também pode ser expressa em função de  $P_s(\theta_i)$  como

$$F(\theta_i) = \sum_{s=0}^M P_s(\theta_i) \quad (3.10)$$

As definições (3.9) e (3.10) são válidas tanto para a radiação aceita como rejeitada.

### 3.4 ESTRUTURA ÓTICA DA CAVIDADE

A categorização dos raios luminosos através do número de reflexões revela a existência de uma estrutura bem definida, constituída por modos de reflexão e estados que permitem explicar a presença, desenvolvimento e extinção desses modos. O conjunto de relações operacionais que descreve o funcionamento da cavidade pode ser definido como estrutura ótica da cavidade e será analisado a seguir.

#### 3.4.1 ÂNGULOS CARACTERÍSTICOS

Cada modo de reflexão tem um domínio angular específico, incluído dentro do intervalo de aceitação. Os limites desse domínio estão definidos pelos seguintes ângulos característicos:

- (1)  $\alpha_k$  é o menor ângulo de incidência para o qual se verifica a existência, no interior da cavidade, de radiação aceita no modo de reflexão  $k$ ;
- (2)  $\beta_k$  é o maior ângulo de incidência para o qual se verifica a existência de radiação aceita no modo de reflexão  $k$ ;
- (3)  $\gamma_k$  é o menor ângulo de incidência para o qual se verifica a existência de raios luminosos que atingem a abertura depois de realizar  $2k$  reflexões;
- (4)  $\delta_k$  é o menor ângulo de incidência para o qual se verifica a existência de raios luminosos que atingem a abertura depois de realizar  $2k + 1$  reflexões.

Definiremos como positivos os ângulos com sentido antihorário, como indicado na Fig. 3.1. Por convenção, os modos de reflexão serão associados ao espelho atingido na primeira reflexão, espelho direito ou esquerdo. A radiação que atinge o absorvedor sem reflexões será atribuída ao modo de reflexão zero e associada ao espelho direito. O tratamento matemático que segue considera o espelho direito exclusivamente, a menos que referência explícita ao uso do espelho esquerdo seja feita. Os ângulos característicos  $\alpha_2$  e  $\beta_0$  estão mostrados na Fig. 3.3 e  $\delta_2$  e  $\gamma_3$  na Fig. 3.4.

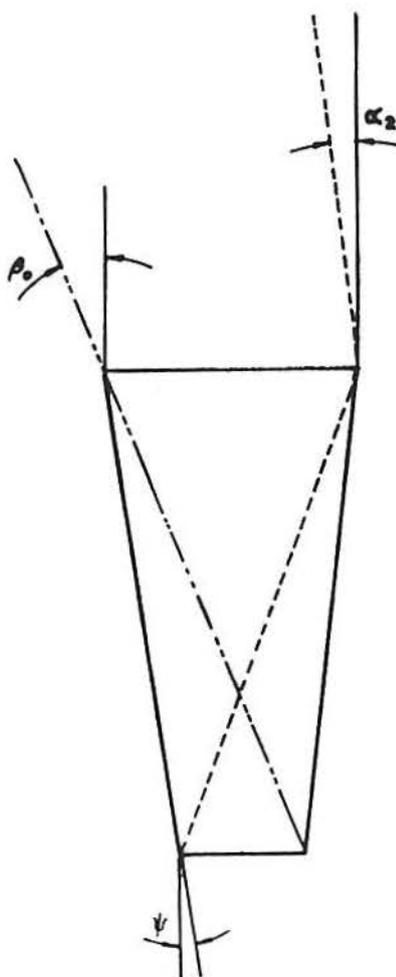


Figura 3.3 Ângulos característicos  $\alpha_2$ ,  $\beta_0$ .

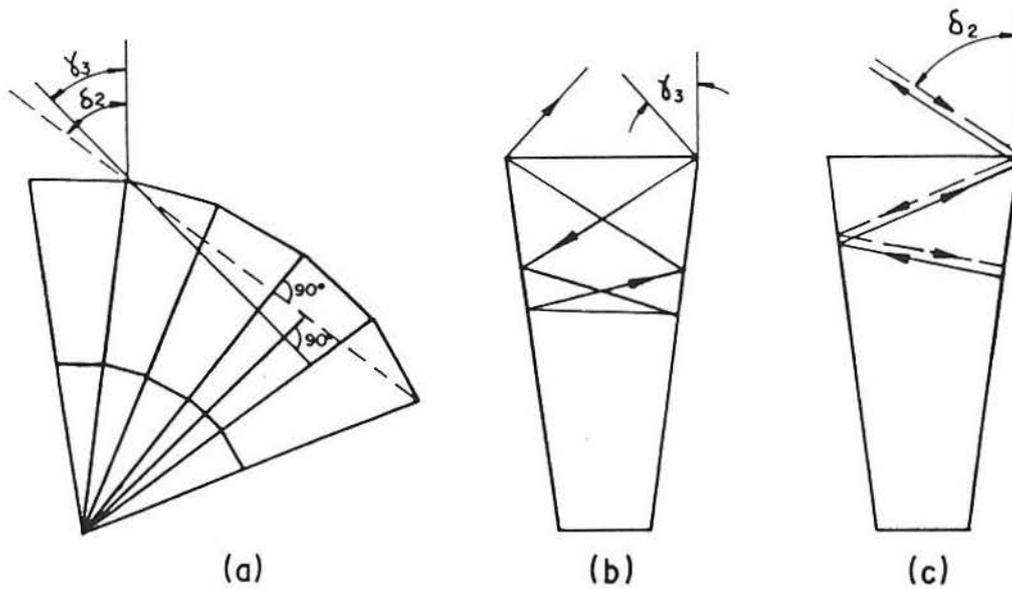


Figura 3.4 Ângulos característicos  $\delta_2$  e  $\gamma_3$ .

O método das imagens [5] pode ser utilizado para derivar as equações que expressam os ângulos  $\alpha_k$ ,  $\beta_k$ ,  $\gamma_k$  e  $\delta_k$ , que resultam iguais a:

$$\frac{\text{sen}(\alpha_k + \psi)}{\cos(\alpha_k + k\psi)} = \frac{2}{C - 1} \text{sen}[(k - 1)\psi] \quad (3.11)$$

$$\beta_k = \alpha_{k+2} + 2\psi \quad (3.12)$$

$$\gamma_k = \frac{\pi}{2} - 2k\psi \quad (3.13)$$

$$\delta_k = \frac{\pi}{2} - (2k + 1)\psi \quad (3.14)$$

O ângulo  $\alpha_k$  pode ser obtido em forma explícita a partir da Eq. (3.11)

$$\operatorname{tg} \alpha_k = \frac{\frac{2}{C-1} \operatorname{sen}[(k-1)\psi] \cos(k\psi) - \operatorname{sen} \psi}{\frac{2}{C-1} \operatorname{sen}[(k-1)\psi] \operatorname{sen} k\psi + \cos \psi} \quad (3.15)$$

Por exemplo os ângulos  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  estão dados por

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = -\frac{C+1}{C-1} \operatorname{tg} \psi \quad (3.16)$$

$$\alpha_1 = -\psi \quad (3.17)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = -\operatorname{tg} \psi \frac{4 \operatorname{sen}^2 \psi + C - 3}{4 \operatorname{sen}^2 \psi + C - 1} \quad (3.18)$$

Os ângulos  $\alpha_0$  e  $\alpha_1$  são sempre negativos, enquanto  $\alpha_2$  pode ser positivo ou negativo. Como será visto nas próximas seções uma definição completa do conjunto de ângulos característicos requer da definição do ângulo  $\beta_{-1} = \psi$ .

### 3.4.2 ESTUDO DA ILUMINAÇÃO DO ABSORVEDOR E DA ABERTURA

#### A RADIAÇÃO ACEITA

Para cada modo de reflexão, que abarca o intervalo angular  $(\alpha_k, \beta_k)$ , podem ser identificados três estados de iluminação do absorvedor:

- (1) Estado de iluminação parcial do absorvedor, desde que começa a ser iluminado até sua iluminação total, denominado estado ascendente. Para o modo  $k$  o domínio angular começa no ângulo  $\alpha_k$  e termina em  $\alpha_{k+1}$ .
- (2) Estado de iluminação total do absorvedor, denominado estado completo. Seu intervalo angular começa no ângulo  $\alpha_{k+1}$  e termina no ângulo  $\beta_{k-1}$ , que de acordo com a Eq. (3.12) é igual a  $2\psi$ .
- (3) Estado de iluminação parcial do absorvedor, desde a iluminação total até sua extinção, denominado estado descendente. Para o modo  $k$  o domínio angular começa no ângulo  $\beta_{k-1}$  e termina em  $\beta_k$ .

A Fig. 3.5 ilustra os estados mencionados, associados ao primeiro modo ( $k = 1$ ). Indicam-se também os raios extremos do modo e a primeira imagem do absorvedor no espelho direito.

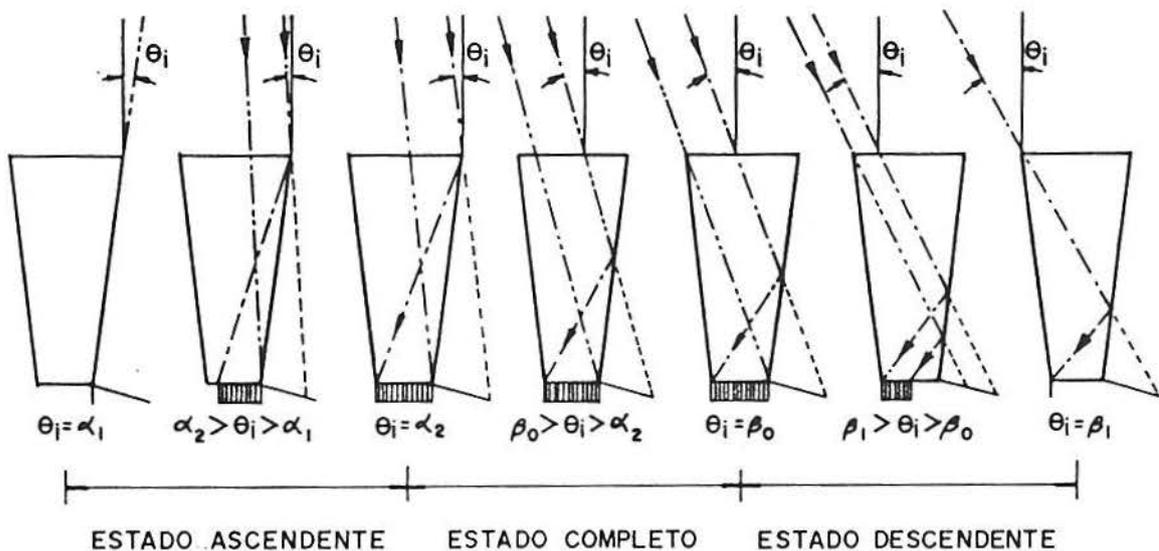


Figura 3.5 Ilustração dos três estados (ascendente, completo e descendente) do primeiro modo de reflexão.  $C = 2$ ,  $\psi = 7,5^\circ$ .

## B RADIAÇÃO REJEITADA

A análise dos modos de reflexão da radiação rejeitada requer tratar separadamente os modos pares e ímpares. Em cada modo de reflexão podem ser distinguidos dois estados:

- (1) Estado ascendente, durante o qual a iluminação da abertura pela radiação rejeitada aumenta de zero até sua iluminação completa. Os limites do domínio angular para modos pares e ímpares são

Ordem	Limites
Par (2k)	$\delta_k, \gamma_k$
Ímpar (2k+1)	$\gamma_{k+1}, \delta_k$

- (2) Estado descendente, durante o qual a iluminação da abertura decresce da iluminação total até sua extinção. Os limites deste estado são

Ordem	Limites
Par (2k)	$\gamma_k, \delta_{k-1}$
Ímpar (2k+1)	$\delta_k, \gamma_k$

A Fig. 3.6 ilustra os estados de iluminação da abertura para o quarto modo de reflexão,  $2k = 4$ , quando o ângulo de incidência  $\theta_i$  varia de  $\delta_2$  até  $\delta_1$ .

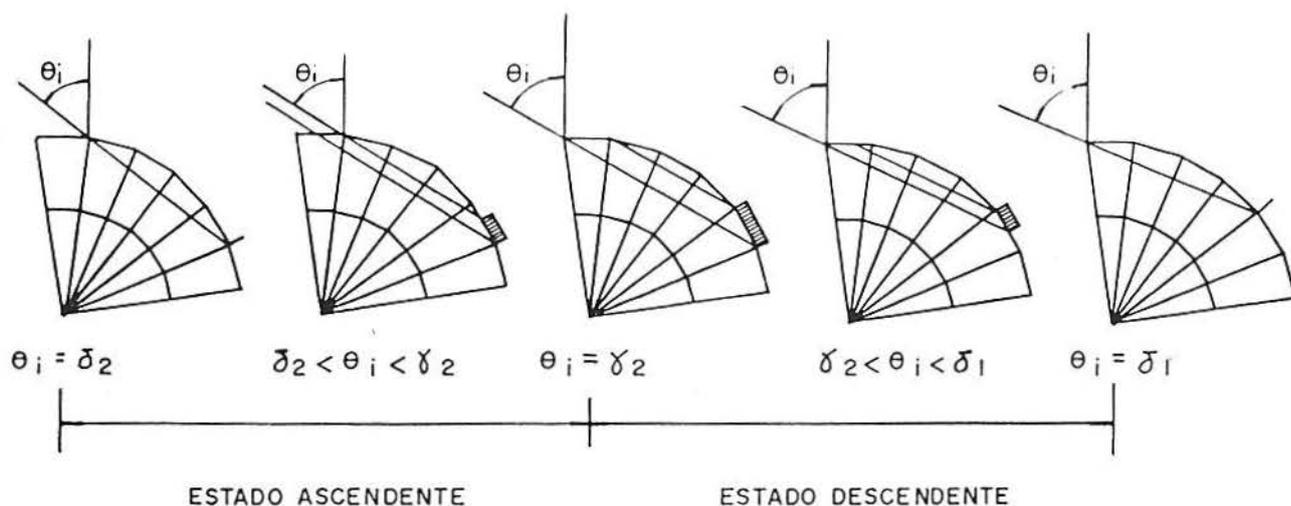
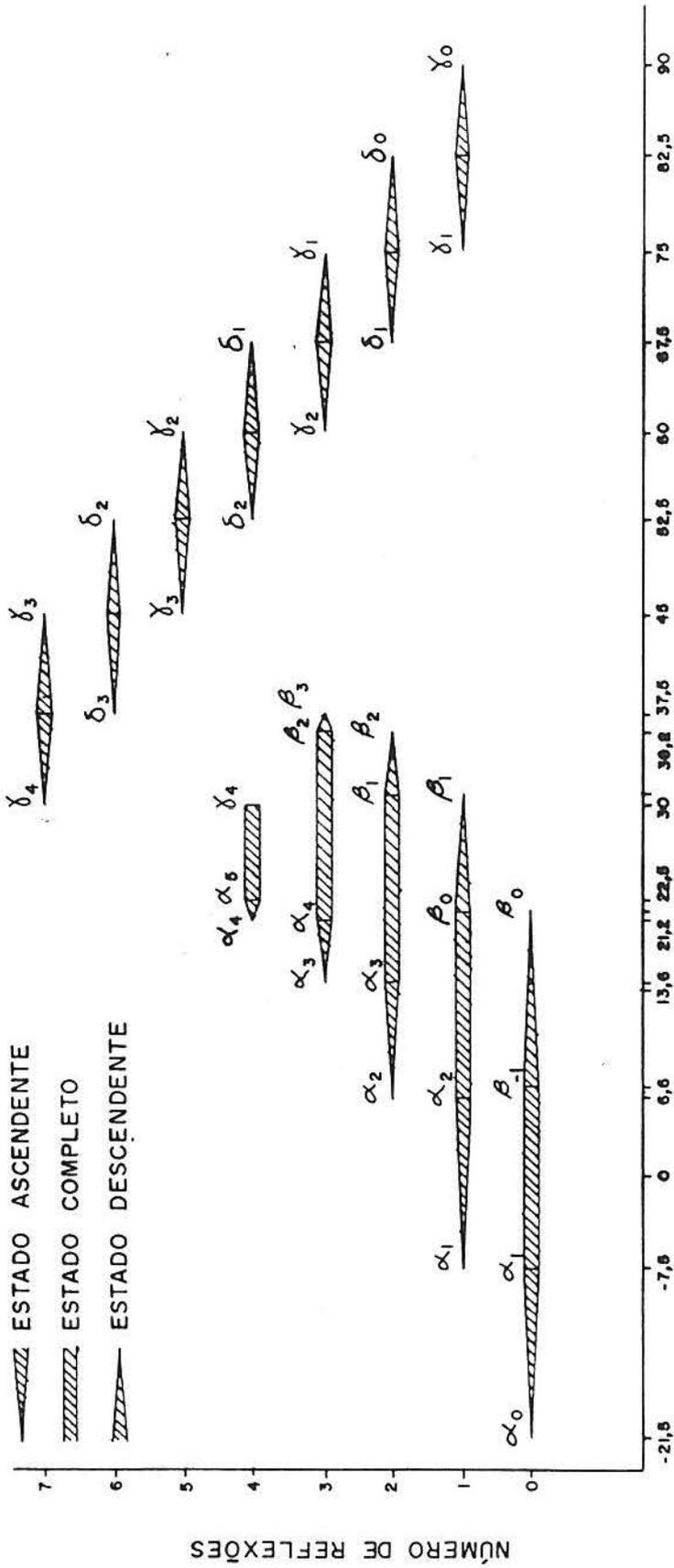


Figura 3.6 Estados ascendentes e descendentes do 4° modo de reflexão.  $C = 2$ ,  $\psi = 7,5^\circ$ .

### C DIAGRAMA DE ESTADOS E MODOS DE REFLEXÃO

Os modos de reflexão da radiação aceita e rejeitada, estados e ângulos característicos estão representados no diagrama da Fig. 3.7. Os estados ascendente e descendente de cada modo estão indicados com os símbolos  e , respectivamente. Para cada ângulo de incidência o diagrama ilustra a composição dos modos de reflexão. Na região de aceitação da radiação encontramos, para um determinado ângulo de incidência (por exemplo  $\theta_i = 20^\circ$ ), o modo de menor ordem no estado descendente, os modos intermediários no estado completo e o modo de maior ordem no estado ascendente.

REGIÃO DE ACEITAÇÃO PARCIAL  
E REJEIÇÃO PARCIAL



ÂNGULOS CARACTERÍSTICOS

Figura 3.7 Diagrama que ilustra a composição dos modos de reflexão e os respectivos estados em função do ângulo de incidência.  $C = 2$ ,  $\psi = 7,5^\circ$ .

### 3.4.3 COMPORTAMENTO DOS MODOS DE REFLEXÃO NA REGIÃO DE TRANSIÇÃO

#### A DETERMINAÇÃO DO MÁXIMO MODO DE REFLEXÃO DA RADIAÇÃO ACEITA

Como ilustrado na Fig. 3.2 a cavidade em V aceita todos os raios no intervalo  $0 \leq |\theta_i| \leq \theta_c - \psi$  e uma fração decrescente de raios no intervalo  $\theta_c - \psi < |\theta_i| \leq \theta_c + \psi$ . Os ângulos  $\theta_c - \psi$  e  $\theta_c + \psi$  são os limites aproximados da região de aceitação parcial. Os limites exatos dessa região são os ângulos  $\alpha_{N+1}$  e  $\beta_{N-1}$  e sua largura, pela Eq. (3.12), é igual a  $2\psi$ . O sufixo N indica o modo de reflexão de maior ordem, para radiação aceita pela cavidade. Um procedimento gráfico para determinar os ângulos  $\alpha_{N+1}$  e  $\beta_{N-1}$  está mostrado na Fig. 3.8, definidos pelas "tangentes" ao polígono central de múltiplas imagens do absorvedor.

A seguir é apresentado um procedimento analítico para o cálculo de N. Será mostrado também que o N-ésimo modo de reflexão apresenta a particularidade de se extinguir enquanto se encontra em um estado completo, em lugar de descendente como os outros modos (Fig. 3.7).

Considere o diagrama da Fig. 3.7 como ilustração do princípio geral. A medida que o ângulo de incidência  $\theta_i$  aumenta a partir de  $\alpha_0$ , modos de reflexão de ordem crescente se estabelecem na cavidade. O ângulo  $\alpha_5$  ( $22,5^\circ$ ) deveria ser o começo da existência do quinto modo de reflexão. No entanto verifica-se que esse modo não se estabelece na cavidade devido a que  $\gamma_5 < \alpha_5$ . O ângulo característico  $\gamma_5$  atua como um mecanismo de corte com relação a radiação aceita, ou de retorno de radiação na direção da abertura da cavidade.

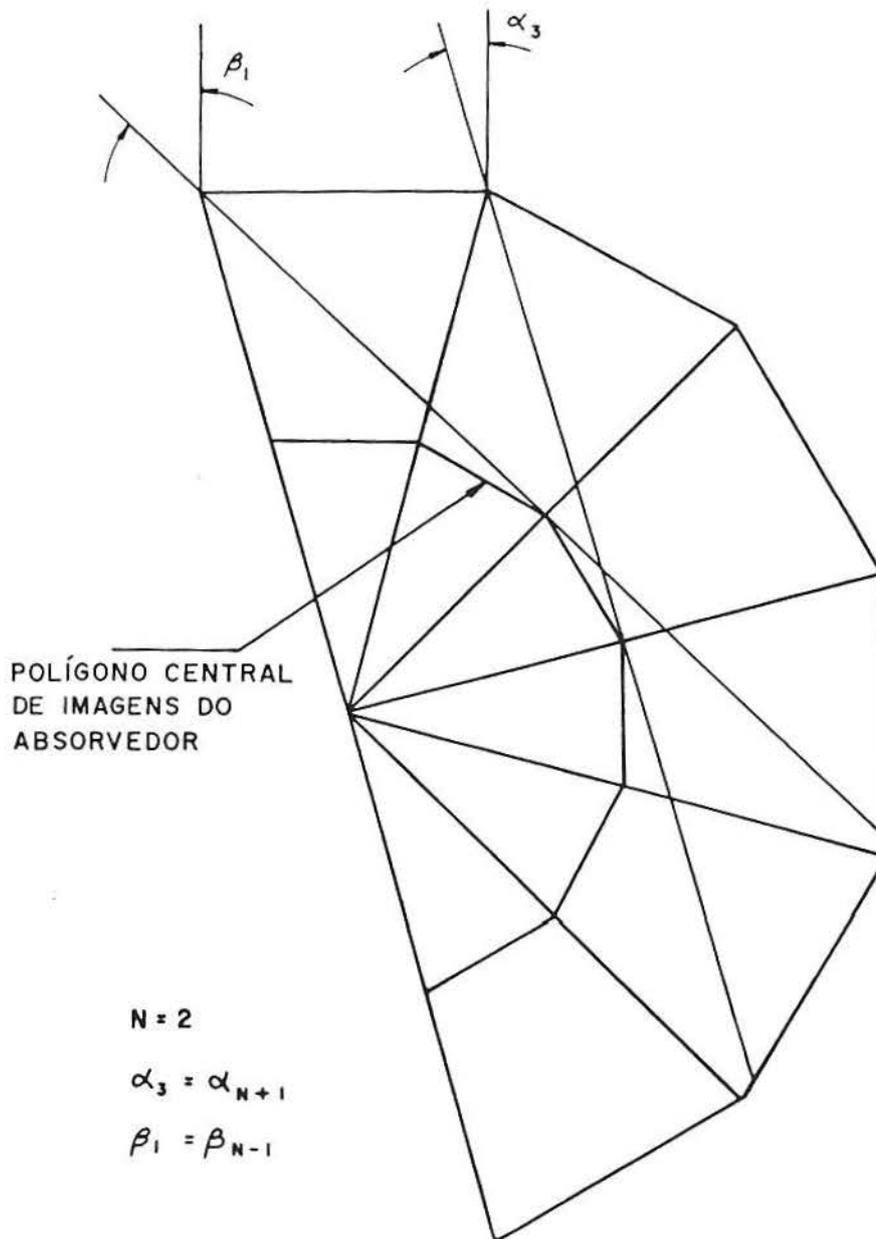


Figura 3.8 Procedimento gráfico para determinar os ângulos  $\alpha_{N+1}$  e  $\beta_{N-1}$  ( $\alpha_3, \beta_1, N = 4$ ).  $C = 2, \psi = 7,5^\circ$ .

Mas esse mecanismo só se manifesta em presença do quinto modo, ou seja a partir de  $\alpha_5$ , ângulo em que os raios luminosos começam a retornar a abertura. Este ângulo indica o começo da região de aceitação parcial ( $F(\theta_i) < 1$ ) onde  $\theta_i = \beta_5 \cong \theta_c - \psi$ . Nesta região os diversos modos  $k$  se extinguem,

seja quando  $\theta_i = \beta_k$  ou quando  $\theta_i = \gamma_k$ . No primeiro caso a extinção deve-se ao sombreamento da parede esquerda; no segundo devido ao retorno dos raios na direção da abertura. A aceitação parcial é o resultado de perdas não dissipativas, devidas exclusivamente ao mecanismo de corte estabelecido pelo ângulo  $\gamma$  (rejeição dos raios luminosos). Na região de aceitação total ( $F(\theta_i) = 1$ ) um modo  $k$  de reflexão também poderá se extinguir, mas isso só acontece quando  $\theta_i = \beta_k$ . Por exemplo o modo zero termina em  $\theta_i = \beta_0$ . Nesse caso verifica-se que outros modos passam a ocupar a região anteriormente ocupada pelo modo extinto, de forma que toda a radiação luminosa incidente na abertura atinge o absorvedor ( $F(\theta_i)=1$ ). No exemplo apresentado o modo de maior ordem presente na cavidade é  $N = 4$ . Para identificar o modo  $N+1$ , que define o começo da região de aceitação parcial note-se que os ângulos  $\alpha$  crescem com a ordem  $k$  e os ângulos  $\gamma$  decrescem (Fig. 3.9).

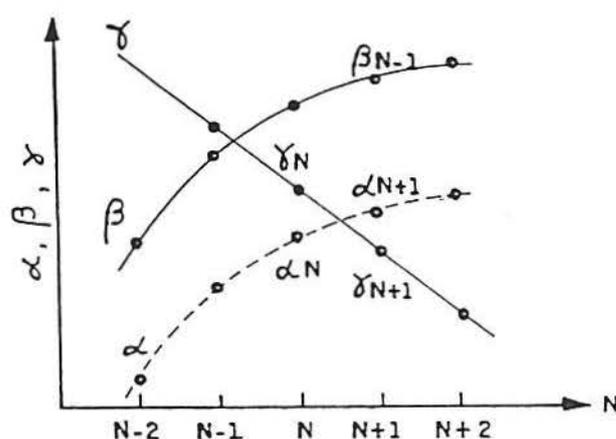


Figura 3.9 Representação esquemática dos ângulos  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  na vizinhança do  $N$ -ésimo modo de reflexão.

As seguintes desigualdades são satisfeitas pelos modos N e N+1 [20]

$$\gamma_N > \alpha_N \quad \text{e} \quad \gamma_{N+1} < \alpha_{N+1} \quad (3.19)$$

As expressões acima, permitem afirmar que o modo N poderá se estabelecer na cavidade, enquanto que isso não haverá de acontecer para o modo N+1 devido ao mecanismo de corte associado ao ângulo  $\gamma$ . Portanto o valor de N, que satisfaz essas desigualdades, indica o modo de reflexão de maior ordem presente na cavidade. Adicionalmente, verifica-se que o modo N se extingue como resultado do mecanismo  $\gamma$  de rejeição e enquanto se encontra no estado completo. Esta propriedade está baseada nas seguintes desigualdades [20]

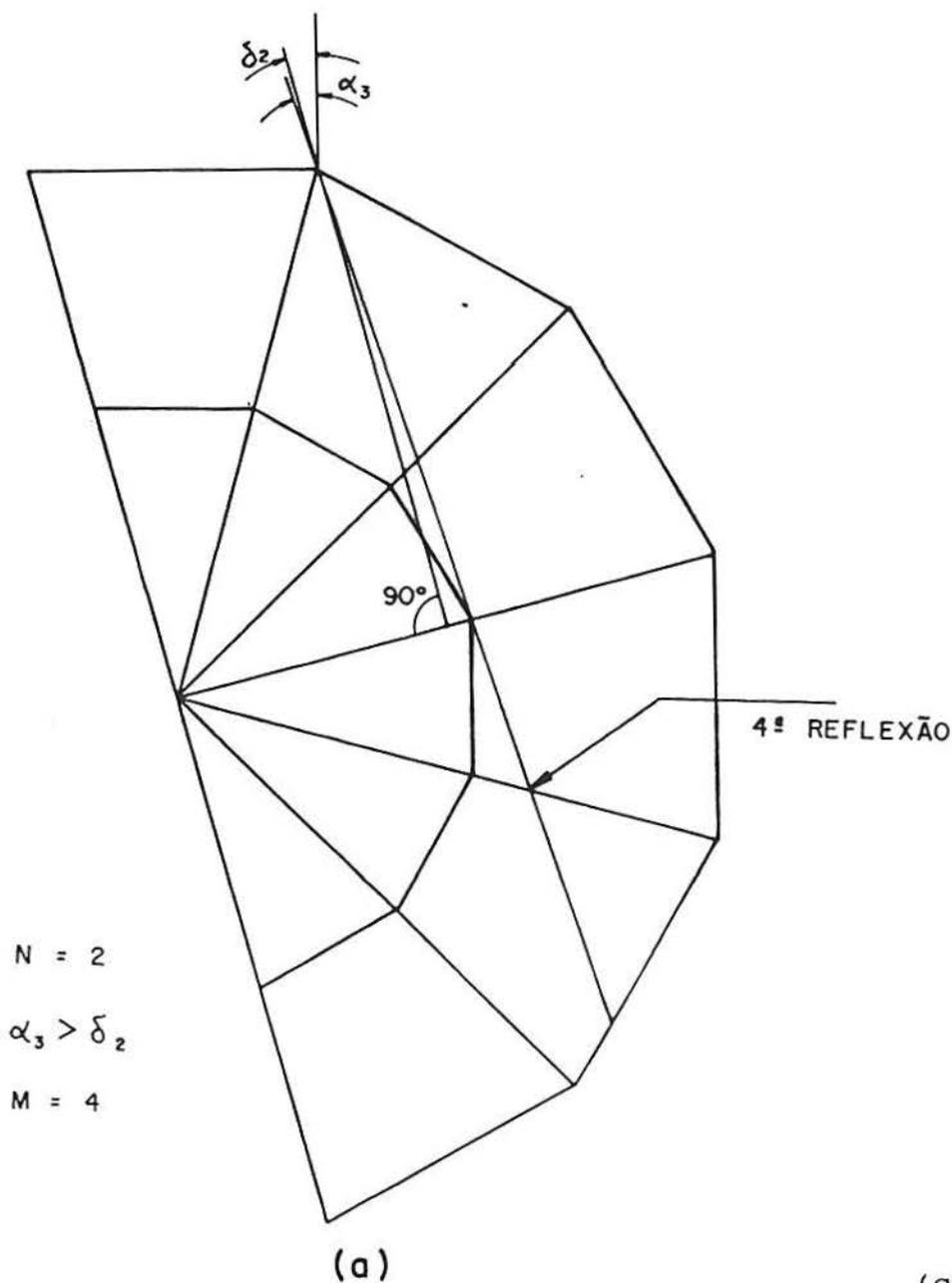
$$\gamma_N < \beta_{N-1} \quad \text{e} \quad \alpha_{N+1} < \gamma_N \quad (3.20)$$

O estado completo do modo N se estende a partir do ângulo  $\alpha_{N+1}$  até  $\beta_{N-1}$  ao longo de um intervalo igual a  $2\psi$ . Porém neste caso para  $\theta_i = \gamma_N$  o modo deixa de ser aceito e a radiação retorna para a abertura. A largura do modo nesse estado é igual a  $\gamma_N - \alpha_{N+1} < 2\psi$ .

Finalmente será mostrado que o ângulo  $\beta_{N-1}$  é o limite superior da região de transição (Fig. 3.8). Para um ângulo de incidência  $\theta_i = \beta_{N-1}$ , não existem modos de ordem N-1 ou menores na cavidade. Devido a que  $\beta_{N-1} > \gamma_N$  (desigualdade (3.20)) os raios que perfazem N ou mais reflexões são rejeitados. Por conseguinte a função de aceitação angular  $F(\theta_i)$  se anula para  $\theta_i = \beta_{N-1}$ . A transição entre aceitação plena e rejeição plena tem portanto uma largura igual a  $2\psi$  ( $\beta_{N-1} - \alpha_{N+1} = 2\psi$ ).

## B DETERMINAÇÃO DO MÁXIMO MODO DE REFLEXÃO DA RADIAÇÃO REJEITADA

A radiação incidente começa a ser rejeitada a partir do ângulo  $\theta_i = \alpha_{N+1}$ , tal como descrito no item anterior. No trajeto de retorno, a radiação que incide com ângulo  $\theta_i$  um pouco maior que  $\alpha_{N+1}$  pode realizar mais  $N$  ou  $N+1$  reflexões, totalizando  $M = 2N$  ou  $2N+1$  reflexões no seu caminho até a abertura, tal como ilustrado na Fig. 3.10.



(cont.)

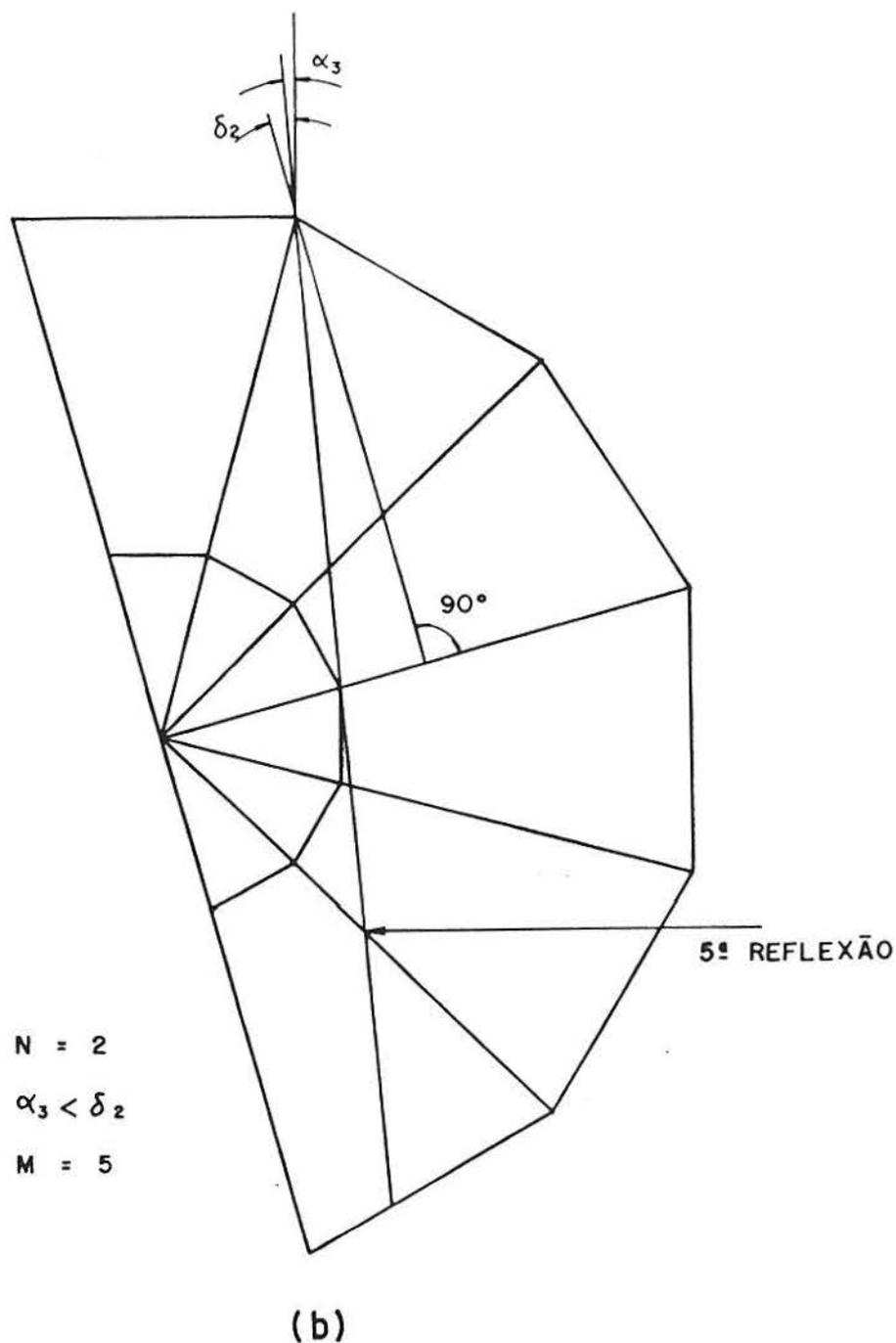


Figura 3.10 Determinação dos modos de maior ordem da radiação rejeitada. (a)  $\alpha_3 > \delta_2$  e  $M = 4$ ; (b)  $N = 2$ ,  $\alpha_3 < \delta_2$  e  $M = 5$ .

O número de reflexões ( $M$ ) dependerá da relação do ângulo  $\alpha_{N+1}$  com o ângulo  $\delta_N$  de acordo com

$$M = 2N + 1 \quad \text{se} \quad \alpha_{N+1} < \delta_N \quad (3.21)$$

$$M = 2N \quad \text{se} \quad \alpha_{N+1} \geq \delta_N \quad (3.22)$$

Na próxima seção serão determinados os modos de reflexão presentes na região de transição e seus respectivos estados.

### C MODOS DE REFLEXÃO E ESTADOS NA REGIÃO DE REJEIÇÃO PARCIAL

Na região de transição, a abertura é ocupada por uma fração de raios luminosos que atingem o absorvedor e outra fração de raios que retornam à abertura, (Fig. 3.11).

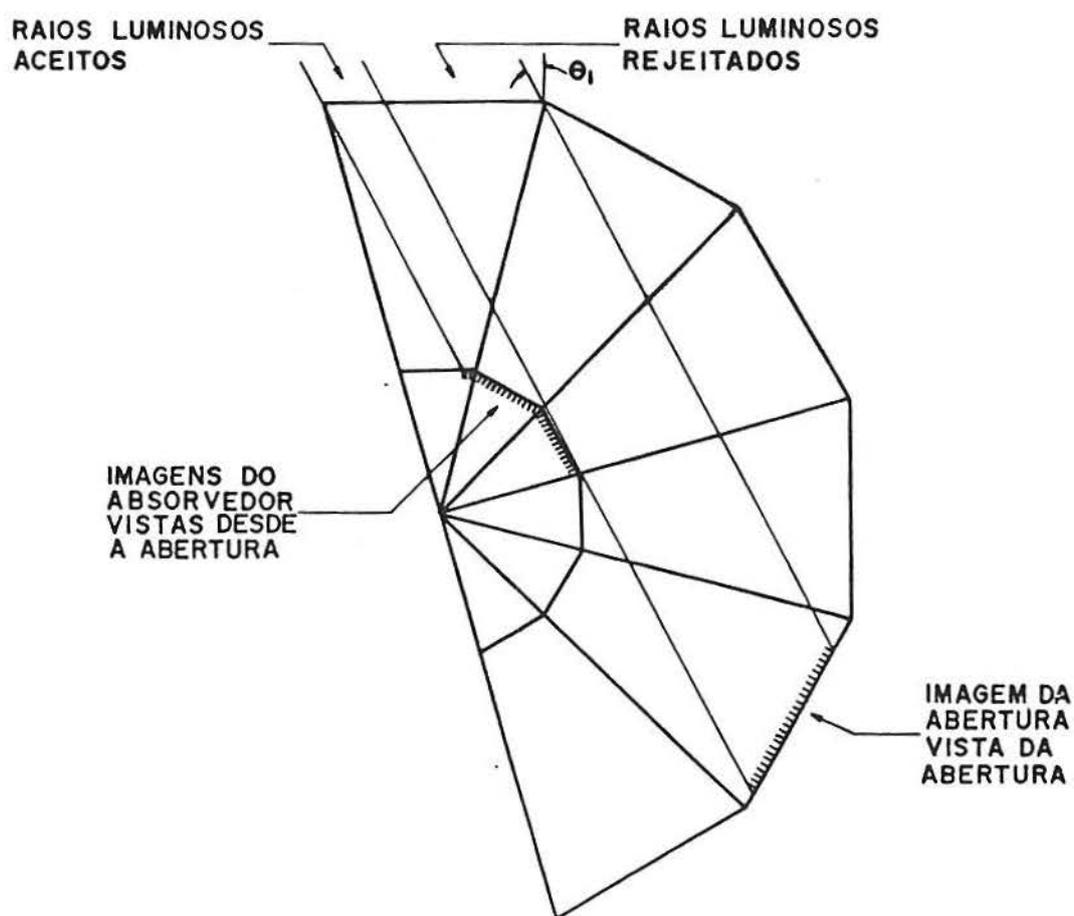
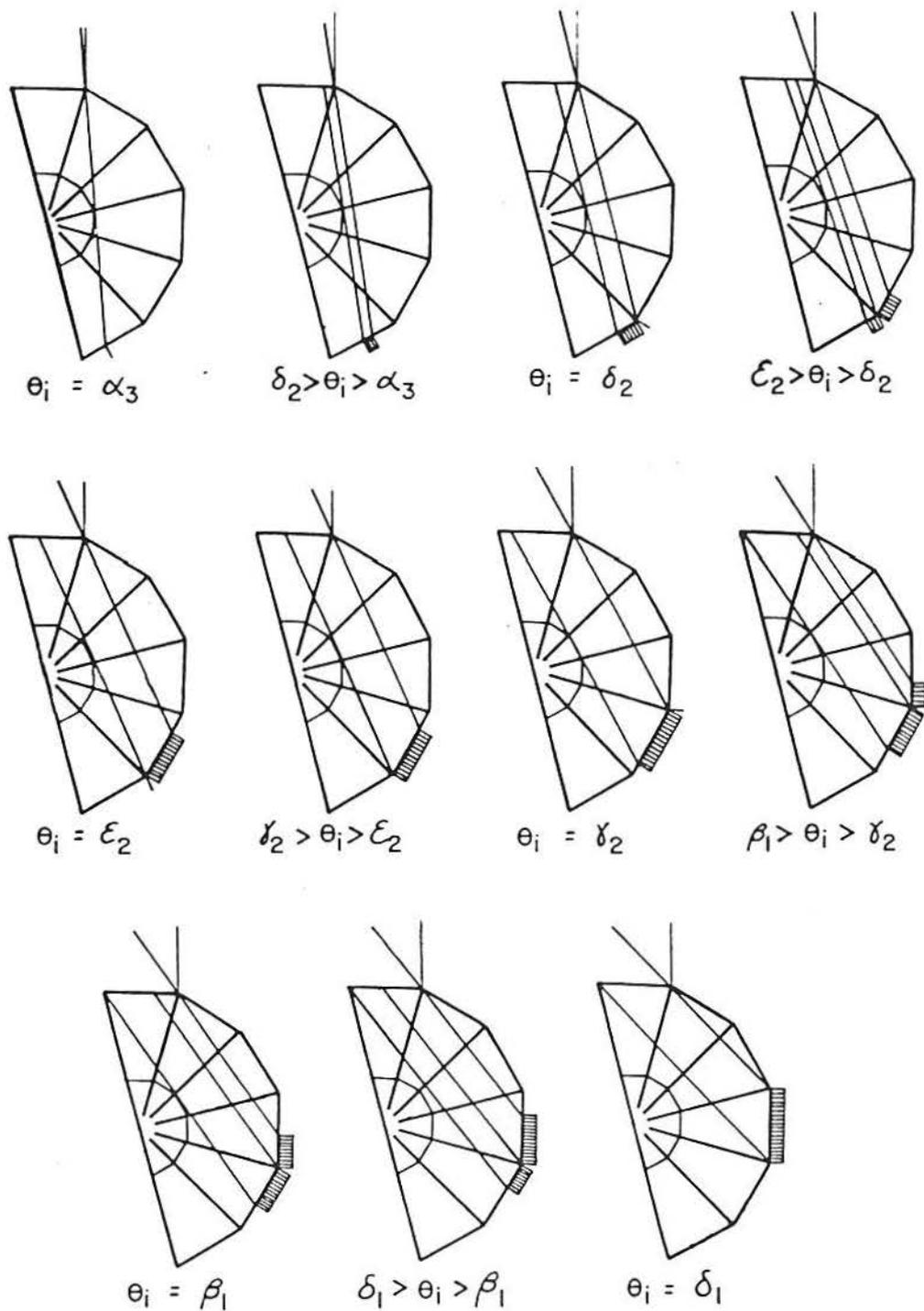


Figura 3.11 Cavidade iluminada na região de transição. Uma fração atinge o absorvedor e seu complemento retorna à abertura.

A sequência de modos e estados presentes na região de transição, a medida que o ângulo de incidência varia, estão ilustrados nas Figs. 3.12 (a) e (b).

CASO  $\alpha_{N+1} < \delta_N$



(a)

(cont.)

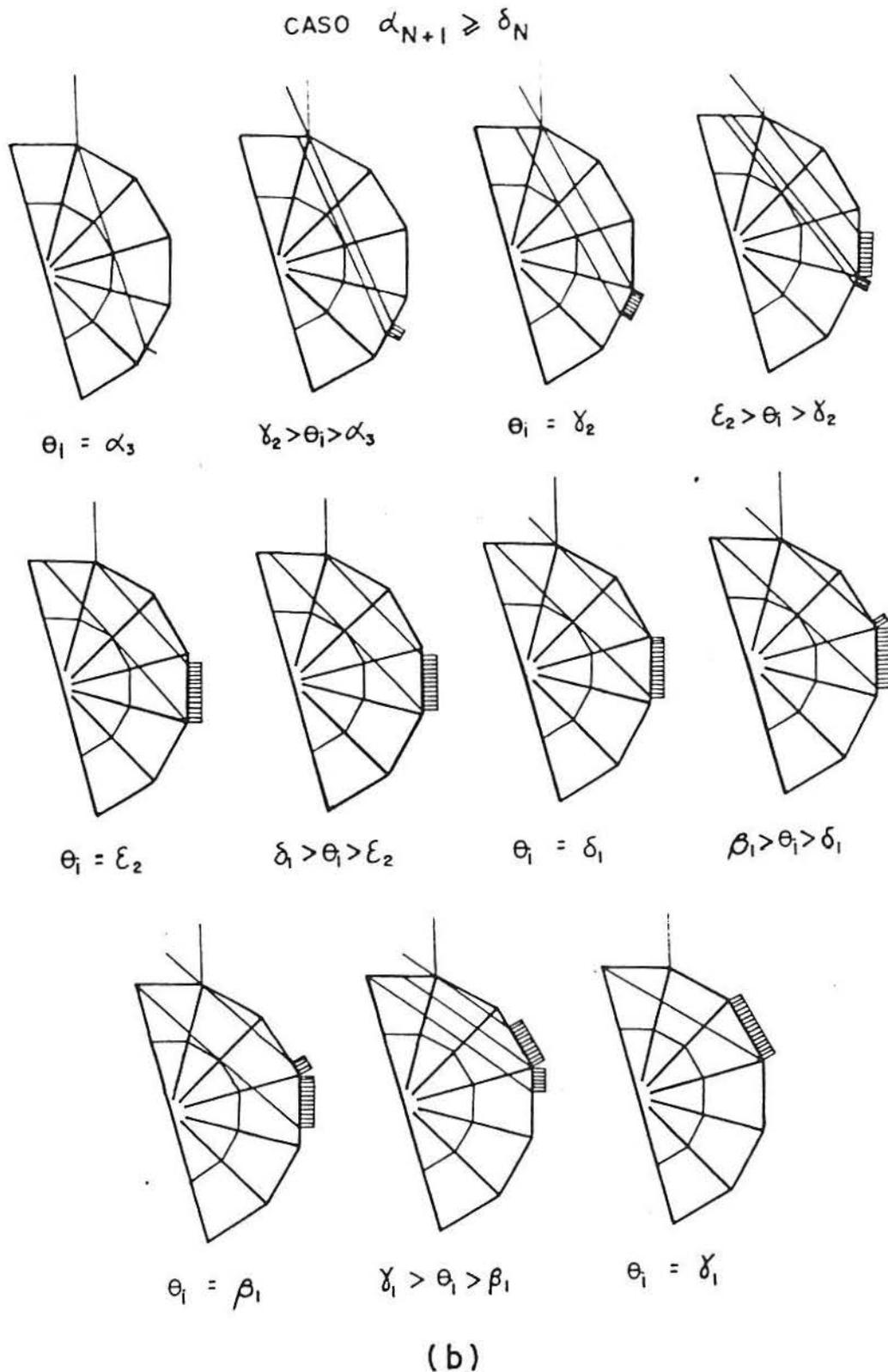


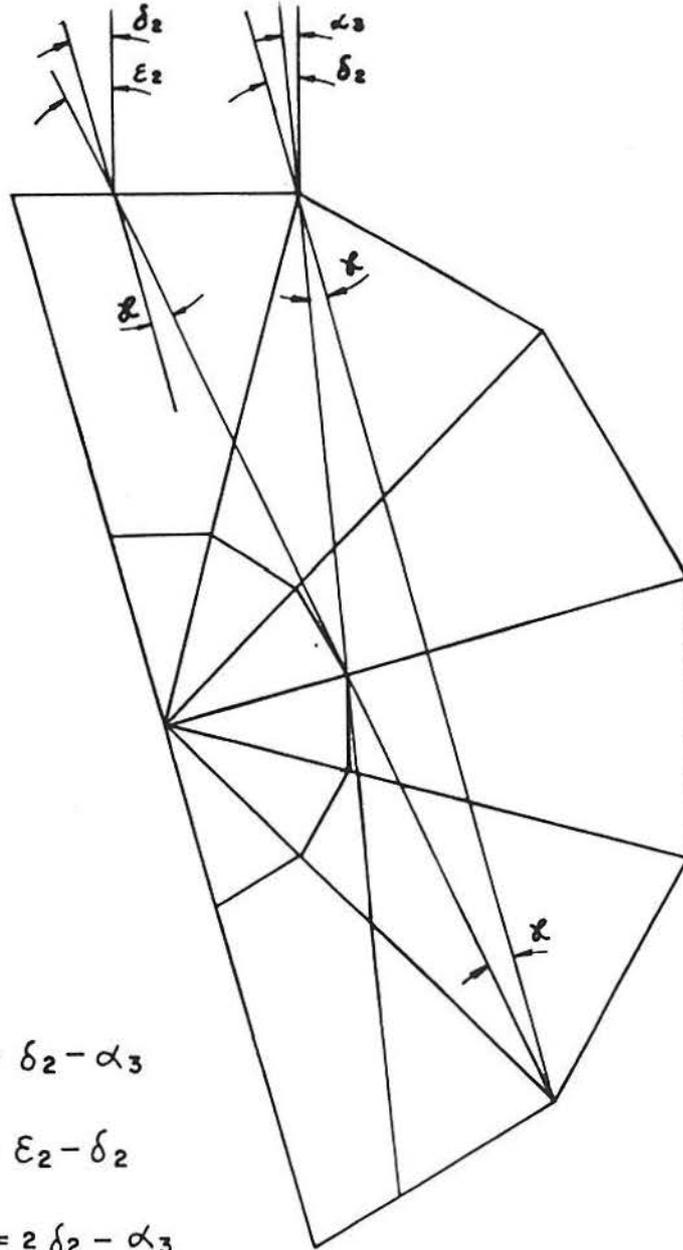
Figura 3.12 Sequência de modos e estados presentes na região de transição. (a) Caso  $\alpha_{N+1} < \delta_N$ ; (b) Caso  $\alpha_{N+1} \geq \delta_N$ .

A descrição de modos e estados nessa região requer que seja definido o ângulo  $\varepsilon_N$ , mostrado nas Figs. 3.13 (a) e (b). A

geometria ilustrada nas figuras permite verificar que o ângulo  $\epsilon_N$  satisfaz as seguintes relações

$$\epsilon_N = 2\delta_N - \alpha_{N+1} \quad \text{para} \quad \alpha_{N+1} < \delta_N \quad (3.23)$$

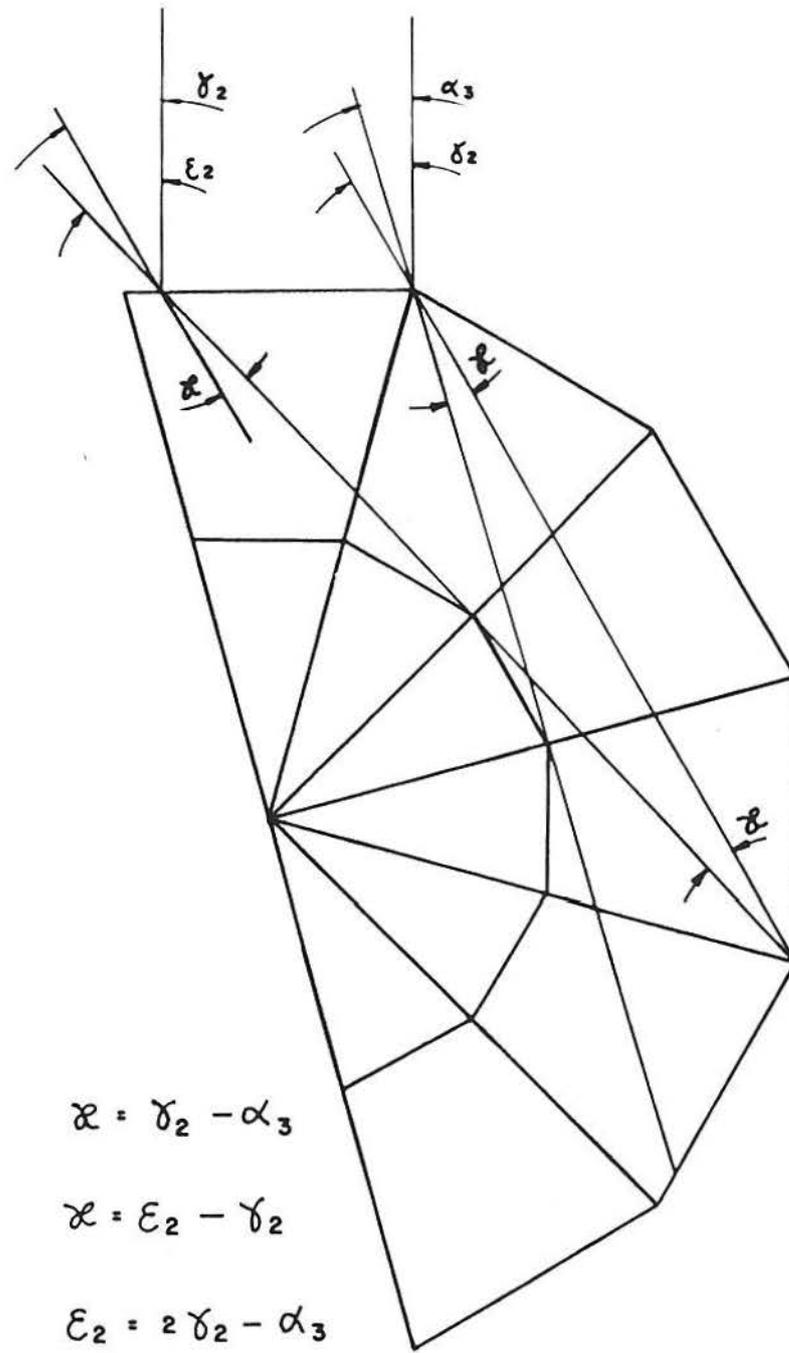
$$\epsilon_N = 2\gamma_N - \alpha_{N+1} \quad \text{para} \quad \alpha_{N+1} \geq \delta_N \quad (3.24)$$



Caso  $\alpha_{N+1} < \delta_N$ ,  $N = 2$

(a)

(cont.)



caso  $\alpha_{N+1} > \delta_N$ ,  $N = 2$   
 (b)

Figura 3.13 Definição do ângulo  $\varepsilon_N$  e ilustração da relação entre  $\varepsilon_N$  e  $\alpha_{N+1}$ ,  $\gamma_N$  e  $\delta_N$ . (a) Caso  $\alpha_{N+1} < \delta_N$  e (b) Caso  $\alpha_{N+1} \geq \delta_N$ .

A sequência de estados ilustrados pelas Figs. 3.12 (a) e (b) estão resumidos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Modos e estados na região de transição.

Caso  $\alpha_{N+1} < \delta_N$

Ordem do Modo	2N+1		2N				2N-1	
	Ascend.	Descend.	Ascend.	Intern.	Intern.	Descend.	Ascend.	Descend.
Estados								
Intervalo Angular	$\alpha_{N+1}, \delta_N$	$\delta_N, \epsilon_N$	$\delta_N, \epsilon_N$	$\epsilon_N, \gamma_N$	$\gamma_N, \beta_{N-1}$	$\beta_{N-1}, \delta_{N-1}$	$\gamma_N, \delta_{N-1}$	$\delta_{N-1}, \gamma_{N-1}$
Modo de maior ordem, $M = 2N+1$								

Caso  $\alpha_{N+1} \geq \delta_N$

Ordem do Modo	2N		2N-1				2N-2	
	Ascend.	Descend.	Ascend.	Intern.	Intern.	Descend.	Ascend.	Descend.
Estados								
Intervalo Angular	$\alpha_{N+1}, \gamma_N$	$\gamma_N, \epsilon_N$	$\gamma_N, \epsilon_N$	$\epsilon_N, \delta_{N-1}$	$\delta_{N-1}, \beta_{N-1}$	$\beta_{N-1}, \gamma_{N-1}$	$\delta_{N-1}, \gamma_{N-1}$	$\gamma_{N-1}, \delta_{N-2}$
Modo de maior ordem, $M = 2N$								

O comportamento dos dois modos de maior ordem,  $2N+1$  e  $2N$ , para o caso  $\alpha_{N+1} < \delta_N$  e  $2N$  e  $2N-1$  para  $\alpha_{N+1} \geq \delta_N$  está determinado pela interação com a região absorvedora (polígono central) assim como com a região de abertura (polígono externo) (Fig. 3.11). Os modos inferiores da região de transição,  $2N-1$  para  $\alpha_{N+1} < \delta_N$  e  $2N-2$  para  $\alpha_{N+1} \geq \delta_N$ , interagem apenas com a região da abertura, comportamento comum a todos os modos presentes na região de rejeição total. As soluções analíticas dos modos e estados correspondentes à região de transição são apresentados no Apêndice B. Na próxima seção serão derivadas

soluções analíticas para os modos e estados presentes na região de aceitação total e parcial e os modos e estados presentes na região de rejeição total.

### 3.5 SOLUÇÕES ANALÍTICAS PARA OS MODOS DE REFLEXÃO

#### 3.5.1 PROPRIEDADES GERAIS DAS FUNÇÕES $P_s(\theta_i)$

Para um dado ângulo de incidência a abertura da cavidade pode ser subdividida em regiões de largura  $A_s(\theta_i)$  atravessada por raios incidentes com ângulo  $\theta_i$  que atingem o absorvedor ou retornam à abertura depois de (s) reflexões. O sufixo (s) é definido como

$$s = k \quad \text{para radiação aceita} \quad (3.25)$$

$$s = n \quad \text{para radiação rejeitada} \quad (3.26)$$

A função  $P_s(\theta_i)$  pode, portanto, ser escrita como

$$P_s(\theta_i) = \frac{A_s}{A} \quad (3.27)$$

Para  $s \geq 1$  (o caso  $s = 0$  será discutido a seguir) a função  $P_s(\theta_i)$  pode ser expressa como a soma das contribuições dos espelhos direito e esquerdo

$$P_s(\theta_i) = P_s^D(\theta_i) + P_s^E(\theta_i) \quad s \geq 1 \quad (3.28)$$

onde os índices sobrescritos D e E denotam o espelho, direito ou esquerdo, onde ocorre a primeira reflexão.

Como será mostrado a seguir, a função  $P_s(\theta_i)$  é simétrica em torno de  $\theta_i = 0$ . A análise da trajetória dos raios luminosos mostra

$$P_s^D(-\theta_i) = P_s^E(\theta_i), \quad s \geq 1 \quad (3.29)$$

Substituindo (3.29) em (3.28) pode-se escrever  $P_s(\theta_i)$  em função de  $P_s^D(\theta_i)$  exclusivamente

$$P_s(\theta_i) = P_s^D(\theta_i) + P_s^D(-\theta_i) \quad s \geq 1 \quad (3.30)$$

função que é simétrica em torno de  $\theta_i = 0$ .

Analisaremos agora as funções  $P_s(\theta_i)$  para radiação aceita e rejeitada.

### 3.5.2 EXPRESSÕES ANALÍTICAS PARA $P_s(\theta_i)$

#### A RADIAÇÃO ACEITA

De acordo com a convenção expressa pela Eq. (3.25), para radiação aceita adotaremos  $s = k$ . A propriedade de simetria (Eq. (3.30)) é válida para  $k \geq 1$ . No caso do modo zero de reflexão, que de acordo com nossa convenção foi associado ao espelho direito, pode-se escrever

$$P_0(\theta_i) = P_0^D(\theta_i) \quad P_0^E(\theta_i) = 0 \quad (3.31)$$

Note-se que só existe modo zero para radiação aceita. A radiação rejeitada deve fazer no mínimo uma reflexão para retornar à abertura.

Resta estabelecer condições nos limites do domínio angular dos modos que, de acordo com a definição de ângulos característicos  $\alpha_k$  e  $\beta_k$ , devem satisfazer

$$P_k^D(\alpha_k) = 0 \quad 0 \leq k \leq N - 1 \quad (3.32)$$

$$P_k^D(\beta_k) = 0 \quad 0 \leq k \leq N - 1 \quad (3.33)$$

Finalmente, para o modo de maior ordem,  $N$ , pode-se escrever

$$P_N^D(\alpha_N) = 0 \quad P_N^D(\gamma_N) = 0 \quad (3.34)$$

Expressões analíticas para o modo  $k$  e os diversos estados foram derivadas na Ref. 20. A seguir serão apresentadas as soluções e verificada sua validade.

## A.1 CONTRIBUIÇÃO DO ESPELHO DIREITO

### 1 Estado completo

Este estado abarca o intervalo angular  $(\alpha_{k+1}, \beta_{k-1})$  e a expressão  $P_k(\theta_i)$  pode se escrever como

$$P_k(\theta_i) = \frac{\cos(\theta_i + 2k\psi)}{C \cos \theta_i} \quad \alpha_{k+1} \leq \theta_i \leq \beta_{k-1} \quad (3.35)$$

Para  $k = N$  e  $\theta_i = \gamma_N$  verifica-se que  $P_N(\gamma_N) = 0$ , como a condição (3.34) exige. Para o modo de reflexão zero a Eq. (3.35) reproduz o resultado conhecido

$$P_0(\theta_i) = \frac{1}{C} \quad \alpha_1 \leq \theta_i \leq \beta_{-1} \quad (3.36)$$

onde, como mencionado,  $\beta_{-1} = \psi$ .

## 2 Estado ascendente

Os limites do domínio angular desse estado são  $\alpha_k$  e  $\alpha_{k+1}$ , e a expressão de  $P_k(\theta_i)$  resulta

$$P_k(\theta_i) = \frac{C-1}{2C} \frac{\text{sen}(\alpha_k + \psi)}{\cos \theta_i \text{sen } \psi} \left[ \frac{\text{sen}(\psi + \theta_i)}{\text{sen}(\psi + \alpha_k)} - \frac{\cos(k\psi + \theta_i)}{\cos(k\psi + \alpha_k)} \right]$$

$$\alpha_k \leq \theta_i \leq \alpha_{k+1} \quad (3.37)$$

Para  $\theta_i = \alpha_k$ ,  $P_k(\theta_i) = 0$  e para  $\theta_i = \alpha_{k+1}$

$$P_k(\alpha_{k+1}) = \frac{\cos(\alpha_{k+1} + 2k\psi)}{C \cos \alpha_{k+1}} \quad (3.38)$$

que coincide com a expressão do estado completo (Eq. (3.35)) quando  $\theta_i = \alpha_{k+1}$ .

## 3 Estado descendente

Analogamente ao análise dos estados completo e ascendente,  $P_k(\theta_i)$  pode ser expressada em função dos ângulos  $\beta_k$

$$P_k(\theta_i) = \frac{C-1}{2C} \frac{\text{sen}(\beta_k - \psi)}{\cos \theta_i \text{sen } \psi} \left[ \frac{-\text{sen}(\theta_i + \psi)}{\text{sen}(\beta_k - \psi)} + \frac{\cos(k\psi + \theta_i)}{\cos(k\psi + \beta_k)} \right]$$

$$\beta_{k-1} \leq \theta_i \leq \beta_k \quad (3.39)$$

Por exemplo, o estado descendente do modo zero é igual a

$$P_0(\theta_i) = \frac{C-1}{2C} \frac{\text{sen}(\beta_0 - \psi)}{\cos \theta_i \text{sen} \psi} \left[ \frac{-\text{sen}(\theta_i - \psi)}{\text{sen}(\beta_0 - \psi)} + \frac{\cos \theta_i}{\cos \beta_0} \right]$$

$$\beta_{-1} \leq \theta_i \leq \beta_0 \quad (3.40)$$

## A.2 CONTRIBUIÇÃO DO ESPELHO ESQUERDO

Por convenção o espelho esquerdo contribui com modos de ordem  $k \geq 1$ . Por razões de simetria as contribuições do espelho direito para ângulos de incidência  $\theta_i$ , já calculadas, são iguais às contribuições do espelho esquerdo para ângulos  $(-\theta_i)$ . Interessa definir o comportamento dos modos associados ao espelho esquerdo só no primeiro quadrante ( $0^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$ ) já que a função  $P_k$ , soma das contribuições de ambos espelhos, é simétrica com respeito a  $\theta_i = 0^\circ$  (Eq. (3.30)). O primeiro quadrante para o espelho esquerdo será portanto o intervalo  $-90^\circ \leq \theta_i \leq 0^\circ$  do espelho direito. Inspeccionando o diagrama de estados e modos (Fig. 3.7) verificamos que o estado descendente do primeiro modo ocorre sempre na região de ângulos positivos, já que começa no ângulo  $\beta_0$  e se verifica que  $\beta_0 > \beta_{-1}$  (sabe-se que  $\beta_{-1} = \psi$ ). Estados descendentes de modos superiores ao primeiro tem sua origem em ângulos maiores que  $\beta_0$ . No primeiro quadrante do espelho esquerdo só haverá, portanto, estados ascendentes e completos.

O estado completo do modo  $k$  pode ser obtido substituindo  $\theta_i$  por  $-\theta_i$  em  $P_k(\theta_i)$  (Eq. (3.35))

$$P_k^E(\theta_i) = \frac{\cos(2k\psi - \theta_i)}{C \cos \theta_i} \quad \alpha_{k+1} < -\theta_i < \beta_{k+1} \quad (3.41)$$

e  $P_k^E(\theta_i)$  para o estado ascendente do modo  $k$  é igual a

$$P_k^E(\theta_i) = \frac{C - 1}{2C} \frac{\sin(\alpha_k + \psi)}{\sin \psi \cos \theta_i} \left[ \frac{\sin(\psi - \theta_i)}{\sin(\psi + \alpha_k)} - \frac{\cos(k\psi - \theta_i)}{\cos(k\psi + \alpha_k)} \right]$$

$$\alpha_k \leq -\theta_i \leq \alpha_{k+1} \quad (3.42)$$

expressão que completa a derivação das soluções analíticas das funções  $P_k(\theta_i)$  para radiação aceita. Serão calculadas de forma similar as funções para radiação rejeitada.

## B RADIAÇÃO REJEITADA

As funções associadas aos modos de reflexão da radiação rejeitada serão denotadas com o sufixo  $n$  ( $s = n$ , Eq. (3.26)). Do ponto de vista do comportamento da cavidade, os modos pares e ímpares devem ser claramente diferenciados, de forma que  $n$  será denotado como  $2k$  ou  $2k+1$ . O número  $k$  conserva o significado atribuído aos modos de radiação aceita, ou seja o número de reflexões antes de atingir o absorvedor ou iniciar seu retorno na direção da abertura.

Além das propriedades de simetria das funções  $P_n(\theta_i)$ , já derivadas, devem ser satisfeitas as seguintes condições nos limites dos estados ascendente e descendente:

Ordem par	Ordem ímpar	
$P_{2k}^D(\delta_k) = 0$	$P_{2k+1}^D(\gamma_{k+1}) = 0$	
$P_{2k}^D(\gamma_k) = 1$	$P_{2k+1}^D(\gamma_k) = 1$	(3.43)
$P_{2k}^D(\delta_{k-1}) = 0$	$P_{2k+1}^D(\gamma_k) = 0$	

O primeiro modo de radiação rejeitada tem um comportamento análogo ao modo N de radiação aceita, ou seja tem um estado ascendente e depois um estado completo, onde se extingue. Portanto,

$$\begin{aligned} P_1^D(\gamma_1) &= 0 \\ P_1^D(\delta_0) &= 1 \\ P_1^D(\gamma_0) &= 1 \end{aligned} \tag{3.44}$$

### B.1 EXPRESSÕES ANALÍTICAS DAS FUNÇÕES $P_n(\theta_i)$

#### REGIÃO DE REJEIÇÃO TOTAL

Utilizando o método das imagens, derivam-se as seguintes expressões para modos pares ( $n = 2k$ ) e ímpares ( $n = 2k+1$ )

#### MODOS PARES

##### 1. Estado ascendente

$$\begin{aligned} P_{2k} &= - \frac{\text{sen } 2k\psi}{\text{sen } \psi \cos \theta_i} \cos[\theta_i + (2k + 1)\psi] \\ &\delta_k \leq \theta_i \leq \gamma_k \end{aligned} \tag{3.45}$$

##### 2. Estado descendente

$$\begin{aligned} P_{2k} &= \frac{\text{sen } 2k\psi}{\text{sen } \psi \cos \theta_i} \cos[\theta_i + (2k - 1)\psi] \\ &\gamma_k \leq \theta_i \leq \delta_{k-1} \end{aligned} \tag{3.46}$$

## MODOS ÍMPARES

## 1 Estado ascendente

$$P_{2k+1} = - \frac{\text{sen}[(2k+1)\psi]}{\text{sen } \psi \cos \theta_i} \cos[\theta_i + 2(k+1)\psi]$$

$$\gamma_{k+1} \leq \theta_i \leq \delta_k \quad (3.47)$$

## 2 Estado descendente

$$P_{2k+1} = - \frac{\text{sen}[(2k+1)\psi]}{\text{sen } \psi \cos \theta_i} \cos[\theta_i + 2k\psi]$$

$$\delta_k \leq \theta_i \leq \gamma_k \quad (3.48)$$

Para  $n = 1$  ( $k = 0$ ) as expressões resultam

## 1 Estado completo

$$P_1 = - \frac{\cos[\theta_i + 2\psi]}{\cos \theta_i} \quad \gamma_1 \leq \theta_i \leq \delta_0 \quad (3.49)$$

## 2 Estado descendente

$$P_1 = 1 \quad \delta_0 \leq \theta_i \leq \gamma_0 \quad (3.50)$$

Verifica-se que estas equações satisfazem as condições (3.43) e (3.44).

Expressões para o espelho esquerdo podem ser obtidas por simples substituição do ângulo  $\theta_i$  por  $-\theta_i$ , tanto nas equações correspondentes ao espelho direito como no seu domínio angular.

Com a finalidade de não estender desnecessariamente o texto essas expressões não são incluídas aqui.

#### REGIÃO DE REJEIÇÃO PARCIAL

A geometria mostrada nas Figs. 3.12 (a) e (b) permite obter as expressões analíticas das funções  $P_n(\theta_i)$  para os modos e estados presentes na região de transição [21]. As soluções correspondentes aos modos  $2N+1$  e  $2N$ , caso  $\alpha_{N+1} < \delta_N$ , e modos  $2N$  e  $2N-1$ , caso  $\alpha_{N+1} > \delta_N$  são apresentadas no Apêndice. As funções  $P_n$  dos modos  $2N-2$  (caso  $\alpha_{N+1} > \delta_N$ ) são iguais às funções da região de rejeição total, expressadas pelas Eqs. (3.45) a (3.50).

## CAPÍTULO 4

### APLICAÇÃO DAS SOLUÇÕES ANALÍTICAS DE CAVIDADES TIPO V

A utilização dos concentradores tipo V requer do conhecimento detalhado de suas propriedades óticas e radiantes. Entre elas podemos mencionar o perfil de iluminação na região absorvedora, a identificação das cavidades com iluminação uniforme e o cálculo de propriedades básicas como eficiência ótica e coeficientes de intercâmbio radiativo.

A seguir serão desenvolvidos estudos relativos ao perfil de iluminação no absorvedor e imediatamente determinadas as características das cavidades com iluminação uniforme nessa região [19].

#### 4.1 PERFIL DE RADIAÇÃO NA REGIÃO DO ABSORVEDOR

O perfil de radiação no absorvedor é obtido como soma das contribuições de todos os modos presentes na cavidade, ponderada essa contribuição pelo fator  $\rho^k$ . No exemplo desenvolvido a seguir será considerada, por razões de maior simplicidade, uma cavidade V com espelhos perfeitos ( $\rho = 1$ ).

Resultados para  $\rho < 1$  podem ser igualmente gerados.

Na situação mais geral da cavidade iluminada com radiação que incide na abertura com um ângulo  $\theta_i$ , pode existir um modo no estado ascendente, vários em estado completo e um modo no estado descendente, todos eles associados ao espelho direito (Fig. 3.7). Com relação ao espelho esquerdo, podem existir vários modos em estado completo e um modo em estado ascendente. Como pode se deduzir do diagrama de estados e modos (Fig. 3.7), não existem modos em estado descendente associados ao espelho esquerdo no intervalo de 0 a  $90^\circ$ .

Consideraremos primeiro os estados associados ao espelho direito. Denominaremos estes modos com o sufixo 1 para o estado descendente, 1+1 a m-1 para os estados completos e com m, o estado ascendente. Os modos associados ao espelho esquerdo serão denominados com os sufixos 1 a k-1 para os estados completos e com k o estado ascendente. Devemos diferenciar ainda os modos pares dos ímpares já que a iluminação do absorvedor devido a um modo ascendente ímpar (espelho direito) se localiza na região adjacente ao espelho, entanto um modo ascendente par ilumina o absorvedor a partir do outro extremo do absorvedor (Figs. 4.1 (a) e (b)).

A relação entre a iluminação no absorvedor e na abertura resultante da contribuição dos modos no estado completo (espelho direito) pode ser escrita

$$\frac{I_a}{CI_A} = \sum_{1+1}^{m-1} \frac{\cos(\theta_i + 2j\psi)}{\cos \theta_i} \quad (4.1)$$

O domínio angular será definido na expressão final.

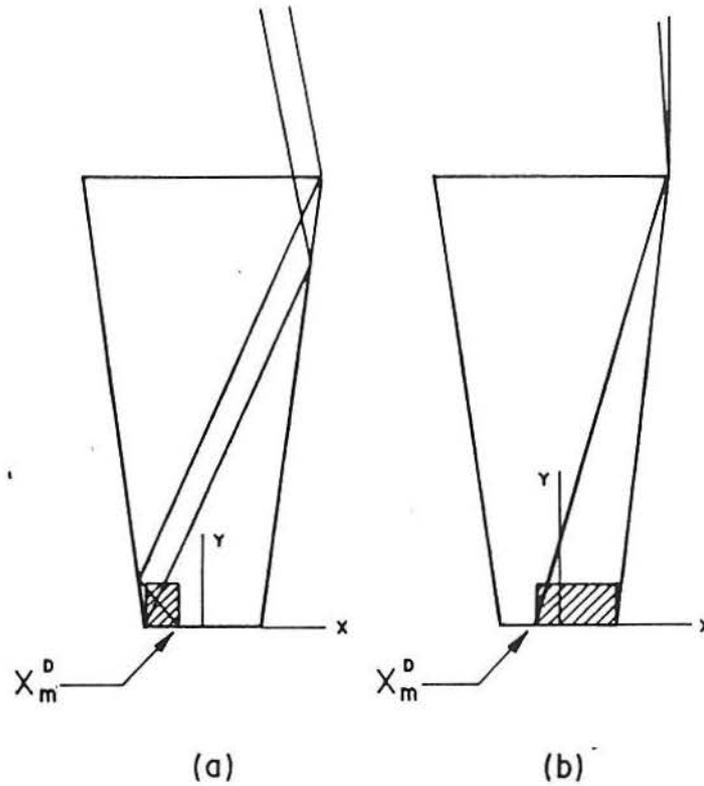


Figura 4.1 (a) Iluminação não uniforme devido a um modo par ( $k = 2$ ) no estado ascendente ( $\theta_i = 10^\circ$ ). (b) Iluminação devido a um modo ímpar ( $k = 1$ ) no estado ascendente.  $C = 2$  e  $\psi = 7,5^\circ$ .

Um modo par,  $m$ , em estado ascendente ilumina a região do absorvedor adjacente ao espelho esquerdo até um ponto de descontinuidade que será definido a seguir (Fig. 4.1(a)). Para um sistema de coordenadas centrado no ponto médio do absorvedor, pode ser mostrado que a descontinuidade se encontra no ponto  $x = x_m^D$

$$x_m^D = \frac{P_m^D(\theta_i)}{P_{mc}^D} - \frac{1}{2} \quad (4.2)$$

onde  $P_{mc}^D$  é um fator de normalização, igual à função do modo de reflexão para o estado completo (Eq. 3.35)

$$P_{mc}^D(\theta_i) = \frac{\cos(\theta_i + 2m\psi)}{C \cos \theta_i}$$

A justificativa da Eq. (4.2) pode ser vista na Ref. 20.

O ponto de descontinuidade de um modo de reflexão ímpar pode ser calculado como

$$x = -x_m^D \quad (4.3)$$

onde  $x_m^D$  está dado pela Eq. (4.2) (Fig. 4.1(b)). A contribuição de ambos modos, par e ímpar, podem ser reunidos em uma única expressão da forma

$$P_m^D(\theta_i)\varepsilon(m)\left[1 - S(x - x_m^D)\right] + P_m^D(\theta_i)[1 - \varepsilon(m)]S(x + x_m^D) \quad (4.4)$$

onde  $S$  é a função degrau, definida por

$$\begin{aligned} S(x - x_m) &= 0 && \text{para } x < x_m \\ S(x - x_m) &= 1 && \text{para } x > x_m \end{aligned} \quad (4.5)$$

e  $\varepsilon(m)$  uma função que tem as seguintes propriedades

$$\begin{aligned} \varepsilon(m) &= 1 && \text{para } m \text{ par e} \\ \varepsilon(m) &= 0 && \text{para } m \text{ ímpar.} \end{aligned} \tag{4.6}$$

Analogamente pode ser mostrado que a contribuição do modo em estado descendente é igual a

$$P_1^D(\theta_i)\varepsilon(1)S(x + x_1^D) + P_1^D(\theta_i)[1 - \varepsilon(1)][1 - S(x - x_1^D)] \tag{4.7}$$

O espelho esquerdo contribui através dos modos completos 1 a  $k-1$ , e sua contribuição pode ser quantificada como

$$\sum_1^{k-1} \frac{\cos(2j\psi - \theta_i)}{\cos \theta_i} \tag{4.8}$$

Finalmente, a contribuição do estado ascendente  $k$  é igual a

$$P_k^E(\theta_i)\varepsilon(k)S(x + x_k^E) + P_k^E(\theta_i)[1 - \varepsilon(k)][1 - S(x - x_k^E)] \tag{4.9}$$

Resumindo, a distribuição do fluxo de radiação no absorvedor é igual a

$$\begin{aligned}
\frac{I_a}{CI_A} = & \sum_1^{k-1} \frac{\cos(2j\psi - \theta_i)}{\cos \theta_i} + \sum_{l+1}^{m-1} \frac{\cos(\theta_i + 2j\psi)}{\cos \theta_i} \\
& + P_k^E(\theta_i) \varepsilon(k) S(x + x_k^E) + P_k^E(\theta_i) [1 - \varepsilon(k)] [1 - S(x - x_k^E)] \\
& + P_1^D(\theta_i) \varepsilon(1) S(x + x_1^D) + P_1^D(\theta_i) [1 - \varepsilon(1)] [1 - S(x - x_1^D)] \\
& + P_m^D(\theta_i) \varepsilon(m) [1 - S(x - x_m^D)] + P_m^D(\theta_i) [1 - \varepsilon(m)] S(x + x_m^D)
\end{aligned}
\tag{4.10}$$

onde o ângulo  $\theta_i$  deve satisfazer simultaneamente as seguintes condições

$$\begin{aligned}
\alpha_k < -\theta_i < \alpha_{k+1}, \quad \beta_{l-1} < \theta_i < \beta_l, \quad \alpha_m < \theta_i < \alpha_{m+1} \quad e \\
-\theta_i < \beta_{k-2}
\end{aligned}$$

## 4.2 ILUMINAÇÃO UNIFORME DO ABSORVEDOR

A iluminação uniforme no absorvedor requer da presença de estados completos exclusivamente. O estado completo do modo zero estende-se entre os ângulos  $-\psi$  e  $\psi$  e o estado completo do modo de ordem máximo entre  $\alpha_{N+1}$  e  $\gamma_N$ . Se o intervalo  $\{\alpha_{N+1}, \gamma_N\}$  inclui o valor zero as desigualdades  $\alpha_{N+1} < 0$  e  $\gamma_N > 0$  são satisfeitas. Admitiremos adicionalmente que  $|\alpha_{N+1}| < \gamma_N$ .

Raios que incidem dentro do intervalo  $\{\alpha_{N+1}, \gamma_N\}$  iluminam uniformemente o absorvedor. As propriedades de simetria garantem que os raios associados ao espelho esquerdo e dentro do intervalo  $\{-\alpha_{N+1}, -\gamma_N\}$  contribuem a iluminar o absorvedor de maneira semelhante. Portanto, para raios que partem tanto do espelho direito como esquerdo, a iluminação será uniforme no intervalo  $\{\alpha_{N+1}, -\alpha_{N+1}\}$ . A condição  $\alpha_{N+1} < 0$  pode também ser escrita como (vide Eq. (3.15))

$$C \geq 1 + \frac{2 \operatorname{sen}(N\psi) \cos[(N+1)\psi]}{\operatorname{sen} \psi} \quad (4.11)$$

Para  $N = 1$  essa equação reproduz o resultado habitualmente citado para cavidades em V com iluminação uniforme [5]

$$C \geq 1 + 2 \cos 2\psi \quad (4.12)$$

Neste caso o intervalo angular de iluminação uniforme ( $\mu$ ) é igual a  $|\alpha_2|$  e pode ser expresso como

$$\operatorname{tg} \mu = \frac{\frac{2}{C-1} \operatorname{sen} \psi \cos 2\psi - \operatorname{sen} \psi}{\frac{2}{C-1} \operatorname{sen} \psi \operatorname{sen} 2\psi + \cos \psi} \quad (4.13)$$

O benefício da uniformidade do fluxo de iluminação no absorvedor tem como consequência desfavorável a rejeição de uma fração da radiação incidente. Isso pode ser verificado calculando a função  $F(\theta_i)$  no intervalo angular ( $\mu$ ) como soma de estados completos. Por exemplo para  $N = 1$ ,

$$F(\theta_i) = P_0(\theta_i) + P_1^E(\theta_i) + P_1^D(\theta_i) \quad (4.14)$$

o que equivale a

$$F(\theta_i) = \frac{1 + 2 \cos 2\psi}{C} \quad |\theta_i| \leq \mu \quad (4.15)$$

expressão que independe de  $\theta_i$ .

A desigualdade (4.12) permite verificar que

$$F(\theta_i) < 1 \quad |\theta_i| \leq \mu \quad (4.16)$$

Quanto maior seja o ângulo  $\mu$ , menor será a função  $F(\theta_i)$  na região de incidência normal  $|\theta_i| \leq \mu$ . Por exemplo para  $C = 2,5$ ,  $\psi = 30^\circ$ ,  $\mu = 6,59^\circ$ ,  $F(\theta_i) = 0,80$  no intervalo  $|\theta_i| \leq \mu$ , ou seja que 20% da radiação que incide na abertura com ângulos menores que  $6,59^\circ$  é rejeitada. A função de aceitação angular para esse caso está representada na Fig. 4.2. Entretanto, este tipo de cavidades, quando utilizadas com sistemas de rastreamento em torno de eixos N-S, apresentam a vantagem de contar com um longo período de tempo ( $\tau$ ) durante o qual podem permanecer em repouso e a iluminação no absorvedor continuar sendo uniforme ( $\tau = 53$  minutos). Haverá, em consequência, uma redução do consumo de energia do sistema de acompanhamento. Resultados numéricos para diversas cavidades tipo V serão apresentados no próximo capítulo onde são analisados os critérios de projeto de cavidades orientadas Norte-Sul com dispositivos de acompanhamento do Sol.

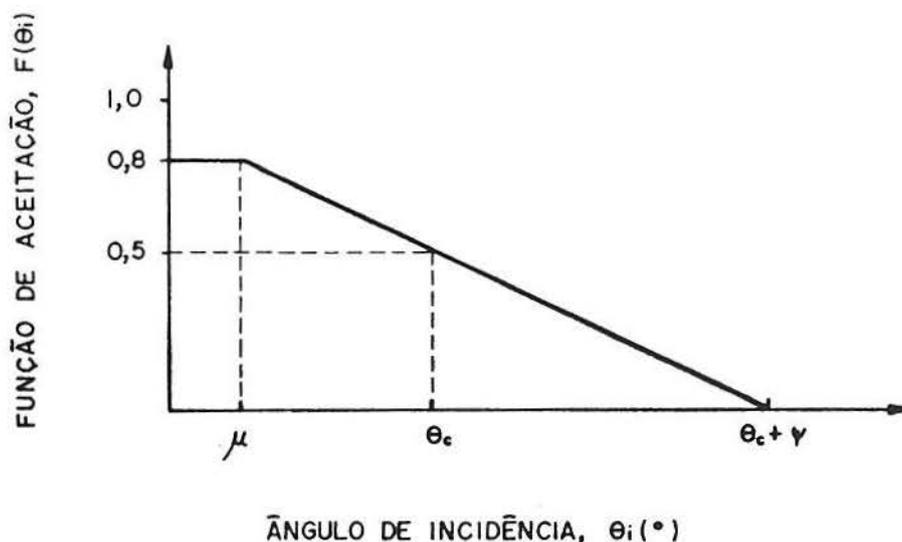


Figura 4.2 Função de aceitação angular para cavidades com iluminação uniforme na região do absorvedor.

#### 4.3 EFICIÊNCIA ÓTICA E FATOR DE INTERCÂMBIO RADIANTE DE CAVIDADES TIPO V

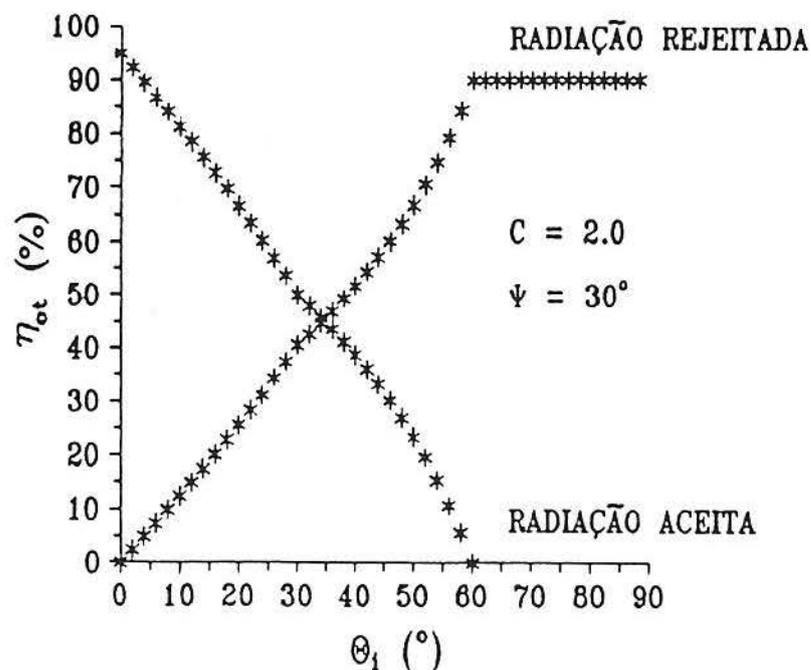
As propriedades óticas e radiantes das cavidades tipo V podem ser quantificadas através da eficiência ótica e os fatores de intercâmbio radiativo. Um feixe luminoso que realiza  $k$  reflexões tem uma eficiência ótica igual a  $\rho^k$ . Entretanto, no caso geral, a eficiência ótica de um feixe que incide na abertura com ângulo  $\theta_i$  é expresso como o valor médio sobre as diversas regiões em que fica subdividida a abertura quando os raios são categorizados de acordo com o número de reflexões. De acordo com isso a eficiência ótica escreve-se como (Eq. (3.9))

$$\eta_{\text{otb}}(\theta_i) = \sum_{s=0}^{M(\theta_i)} P_s(\theta_i) \rho^s$$

onde  $M(\theta_i)$  é o maior número de reflexões presentes na cavidade quando iluminada com o ângulo de incidência ( $\theta_i$ ).

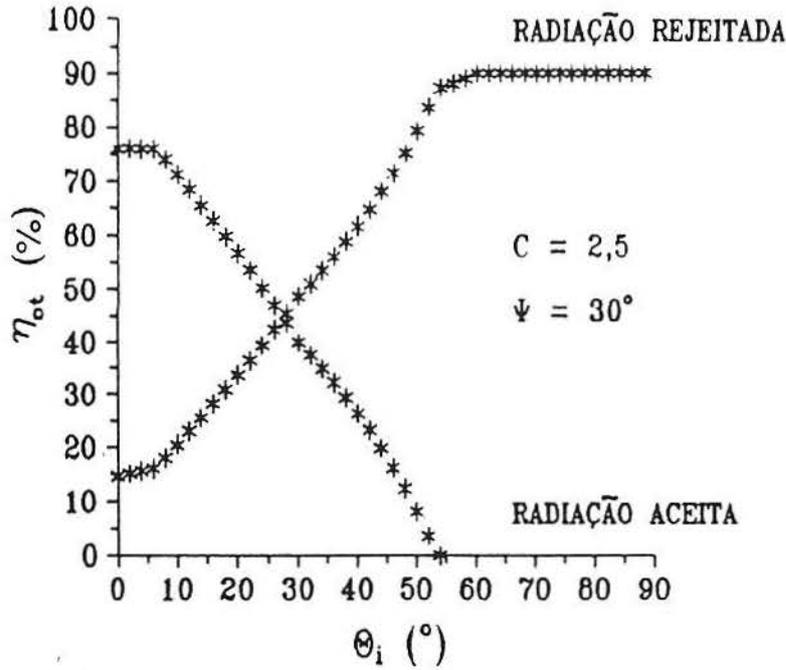
O fator de intercâmbio entre duas superfícies, por exemplo abertura e absorvedor, está definido como a fração da radiação emitida pela abertura que atinge o absorvedor **diretamente ou via reflexões** [37]. Como foi mencionado, a análise do intercâmbio radiante de concentradores tais como a cavidade em V (cavidades tipo funil nas quais, salvo perdas na parede, a totalidade da radiação emitida pelo absorvedor atinge a abertura) exige do conhecimento de dois coeficientes [35], entre abertura e absorvedor ( $E_{Aa}$ ) e abertura e abertura ( $E_{AA}$ ), por exemplo.

As soluções analíticas derivadas na Seção 3.5 permitem calcular a eficiência ótica para radiação aceita e rejeitada, função esta definida por dois parâmetros,  $C$  e  $\psi$ . Exemplos para cavidades típicas são apresentados na Fig. 4.3.



(a)

(cont.)



(b)

Figura 4.3 Eficiência ótica para radiação aceita e rejeitada ( $\rho = 0,8$ ). (a)  $C = 2$ ,  $\psi = 30^\circ$ ; (b)  $C = 2,5$ ,  $\psi = 30^\circ$ .

Os fatores de intercâmbio radiante, abertura-absorvedor e abertura-abertura, podem ser calculados como uma soma de produtos  $P_k^D(\theta_i)\rho^k$  (eficiência ótica), integrados sobre todos os ângulos de incidência de acordo com

$$E_{Aa} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left[ \frac{P_0(\theta_i)}{2} + P_1^D(\theta_i)\rho + \dots + P_N^D(\theta_i)\rho^N \right] \cos \theta_i d\theta_i$$

para  $\alpha_{N+1} > \delta_N$  (4.17)

e

$$E_{AA} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left[ P_1^D(\theta_i)\rho + P_2^D(\theta_i)\rho^2 + \dots + P_{2N}^D(\theta_i)\rho^{2N} \right] \cos \theta_i d\theta_i$$

para  $\alpha_{N+1} > \delta_N$  (4.18)

No caso que  $\alpha_{N+1} < \delta_N$  o termo mais elevado na Eq. (4.18) é  $2N + 1$ . Note-se que as funções do integrando da Eq. (4.17) correspondem á radiação aceita e da Eq. (4.18) á radiação rejeitada. Cada termo da integral que expressa  $E_{Aa}$  se subdivide em três termos para os estados ascendente, completo e descendente. No caso do coeficiente  $E_{AA}$  cada termo se subdivide em dois termos para os estados ascendente e descendente, salvo os dois modos de maior ordem que pertencem à região de transição e o primeiro modo que se divide em um estado ascendente e outro completo. As integrais que calculam os coeficientes  $E_{Aa}$  e  $E_{AA}$  admitem soluções exatas, de simples obtenção, dado que os termos do integrando,  $P_k^D(\theta_1) \cos(\theta_1)$ , são funções do  $\sin(\theta_1)$  e  $\cos(\theta_1)$  exclusivamente. Resultados numéricos serão apresentados no Seção 4.3.2.

#### 4.3.1 VARIAÇÃO DA REFLETIVIDADE DOS ESPELHOS COM O ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

A refletividade das paredes da cavidade, constituídas por superfícies de vidro espelhadas na parte posterior, varia com o ângulo de incidência. Estes ângulos podem ser bastante grandes, por exemplo para  $\psi = 20^\circ$  e  $\theta_i = 0^\circ$ , o ângulo de incidência projetado no plano transversal da cavidade é igual a  $70^\circ$ . A radiação rejeitada experimenta grandes variações do ângulo de incidência. Na primeira e última reflexão ocorrem os maiores ângulos e o menor ocorre na reflexão que inicia o retorno na direção da abertura (Fig. 3.8). A variação da refletividade para uma superfície espelhada na parte posterior, está mostrada na Fig. 4.4.

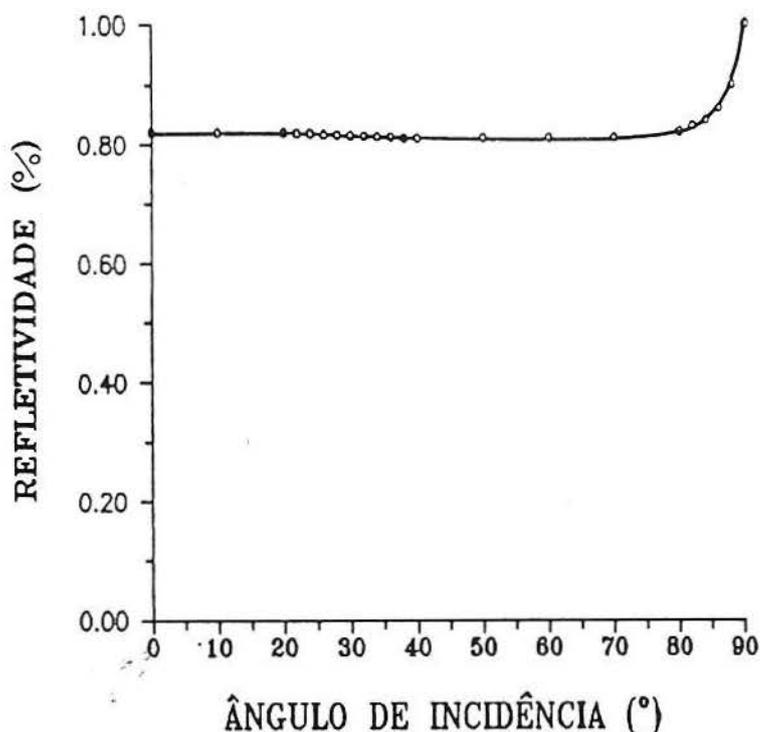


Figura 4.4 Variação da refletividade com o ângulo de incidência de um espelho prateado na superfície posterior.

O cálculo das propriedades óticas com  $\rho$  variável, poderá se refletir, em princípio, em um melhor desempenho ótico quando comparado com resultados obtidos com constante, devido ao aumento da refletividade na região de elevados ângulos de incidência. Com a finalidade de estimar essa influência, foram calculados os ângulos de incidência nas paredes da cavidade para cada reflexão. Uma clara distinção deve ser feita entre o ângulo de incidência no espelho ( $\theta$ ) e o ângulo projetado ( $\theta_i$ ). As propriedades óticas da cavidade são definidas em função deste último ângulo. Porém, é o ângulo ( $\theta$ ) que interessa para estimar a refletividade dos espelhos. A Fig. 4.5 ilustra esses ângulos.

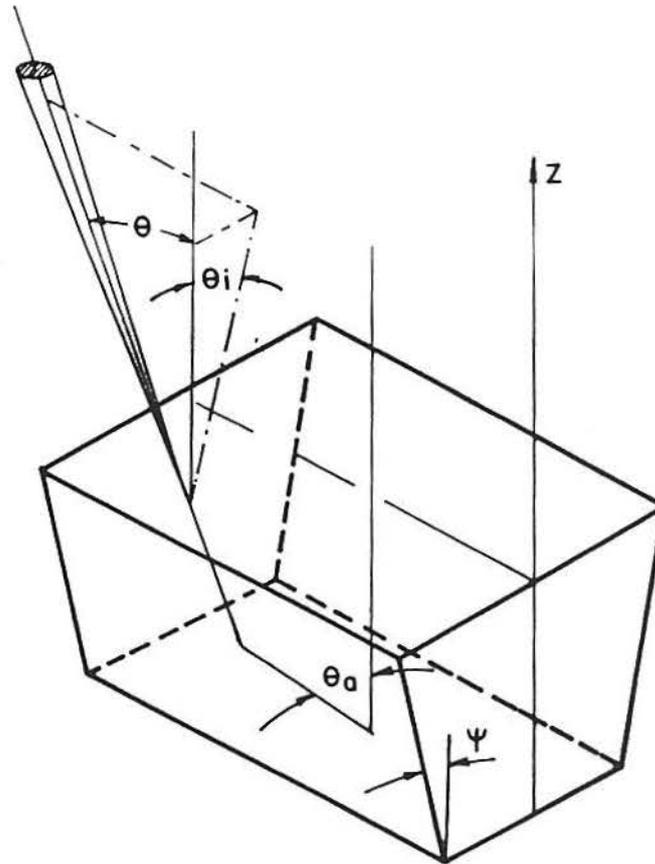


Figura 4.5 Ângulos de incidência total e projetado ou transversal, na superfície do espelho.

Utilizando a mesma convenção que a correspondente aos modos de reflexão, os ângulos  $\theta$  e  $\theta_i$  serão denotados com os índices sobrescritos D ou E, de acordo com o espelho onde se produz a primeira reflexão. O ângulo de incidência projetado, dos raios que realizam a reflexão  $j$  sobre a parede, é denotado com  $\theta_i^D(j)$ , se a primeira reflexão é na parede direita. A sequência de ângulos  $\theta_i$  está ilustrada na Fig. 4.6 e verifica-se que

$$j = 1 \quad \theta_i^D(1) = \frac{\pi}{2} - (\psi + \theta_i) \quad (4.19)$$

$$j = 2 \quad \theta_i^D(2) = \frac{\pi}{2} - (3\psi + \theta_i) \quad (4.20)$$

$$j = k \quad \theta_i^D(k) = \frac{\pi}{2} - [(2k - 1)\psi + \theta_i] \quad (4.21)$$

A partir de considerações de simetria, os ângulos de incidência na parede esquerda são

$$j = 1 \quad \theta_i^E(1) = \frac{\pi}{2} - (\psi - \theta_i) \quad (4.22)$$

$$j = 2 \quad \theta_i^E(2) = \frac{\pi}{2} - (3\psi - \theta_i) \quad (4.23)$$

$$j = k \quad \theta_i^E(k) = \frac{\pi}{2} - [(2k - 1)\psi - \theta_i] \quad (4.24)$$

Conhecido o ângulo projetado ( $\theta_i$ ) podemos calcular o ângulo de incidência  $\theta(j)$ . O aspecto mais importante a considerar com este fim refere-se à propriedade das cavidades "cilíndricas" (bidimensionais ou infinitas na direção axial), nas quais a componente longitudinal da direção do raio luminoso permanece invariante ao longo de sua trajetória [38]. A partir dessa informação, podem ser calculados os ângulos de incidência em ambas as paredes, que resultam iguais a

$$\cos \theta^D(j) = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_i} \text{sen}[(2j - 1)\psi + \theta_i] \quad (4.25)$$

$$\cos \theta^E(j) = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_i} \text{sen}[(2j - 1)\psi - \theta_i] \quad (4.26)$$

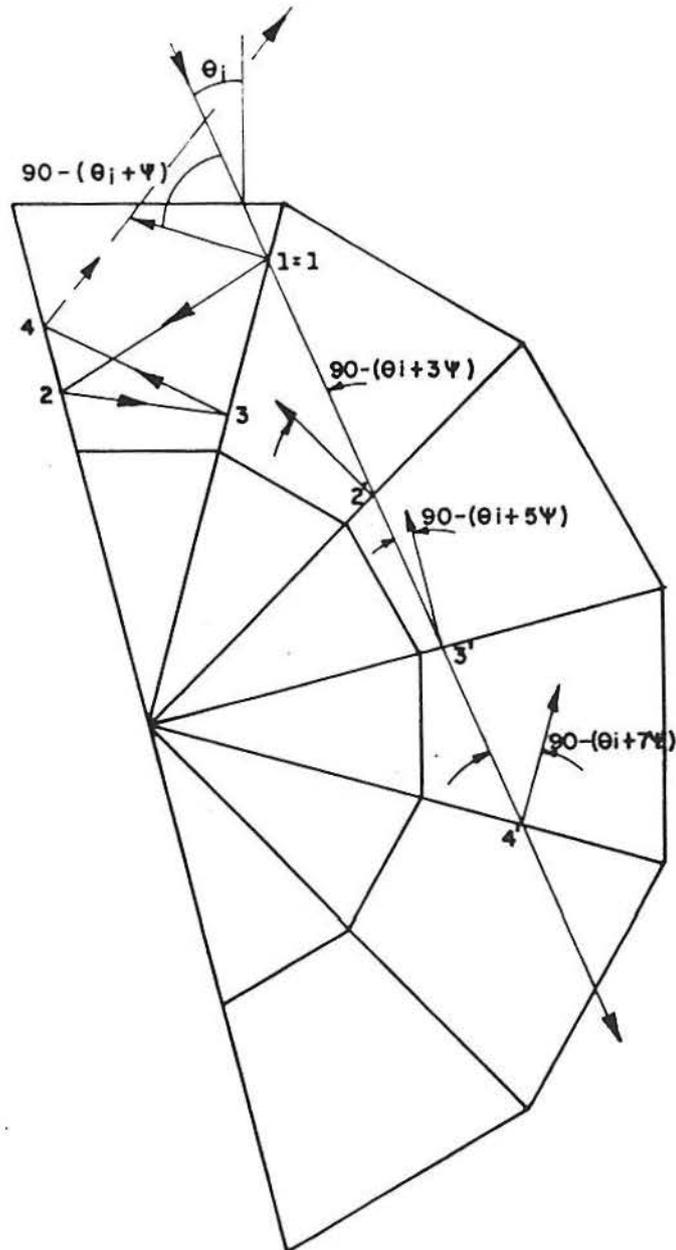


Figura 4.6 Ângulos de incidência projetados ao longo das paredes da cavidade.  $C = 2$ ,  $\psi = 7,5^\circ$ .

Finalmente, a refletividade dos espelhos pode ser escrita como  $\rho[\theta^D(j)]$  e  $\rho[\theta^E(j)]$  e calculada a partir das relações de Fresnel, levando em consideração as reflexões múltiplas na

superfície frontal e posterior e as perdas por absorção no interior da lâmina de vidro.

#### 4.3.2 COEFICIENTES DE INTERCÂMBIO RADIANTE COM REFLETIVIDADE DOS ESPELHOS CONSTANTE E VARIÁVEL

##### Resultados numéricos

As integrais (4.17) e (4.18) permitem calcular  $E_{Aa}$  e  $E_{AA}$  com refletividade constante nas paredes da cavidade. Se a variação da refletividade é levada em consideração, um termo típico dessas integrais pode ser escrito como

$$P_n^D(\theta_i) \rho[\theta^D(1)] \rho[\theta^D(2)] \dots \rho[\theta^D(n)] \quad (4.27)$$

ou

$$P_n^D(\theta_i) \prod_{j=1}^n \rho[\theta^D(j)] \quad (4.28)$$

O cálculo exato das propriedades óticas e radiantes da cavidade requer de uma ferramenta computacional. Com tal fim foi desenvolvido um programa que permite determinar essas propriedades para qualquer combinação dos parâmetros (C) e ( $\psi$ ) e refletividade constante e variável [39]. Coeficientes  $E_{Aa}$  e  $E_{AA}$  para vários casos que satisfazem a condição de iluminação uniforme, estão mostrados na Tab. 4.1.

Constata-se que os resultados obtidos considerando a refletividade variável e constante diferem menos de 1%. Dentro desse intervalo de precisão, as integrais (4.17) e (4.18) fornecem os parâmetros  $E_{Aa}$  e  $E_{AA}$  e, como já mencionado, suas

soluções podem ser obtidas de forma analítica e expressadas por uma soma de funções trigonométricas.

Tabela 4.1 Fatores de intercâmbio radiante para refletividade dos espelhos constante e variável ( $\rho = 0,82$ )\*.

C	$\psi$	$E_{Aa}$		$E_{AA}$	
		Constante	Variável	Constante	Variável
1,5	37,76	0,652	0,651	0,266	0,264
	40,00	0,653	0,652	0,267	0,266
	45,00	0,657	0,656	0,269	0,268
2,0	30,00	0,476	0,475	0,376	0,373
	35,00	0,482	0,480	0,386	0,384
	40,00	0,485	0,484	0,390	0,390
2,5	25,00	0,371	0,369	0,420	0,416
	30,00	0,377	0,376	0,442	0,438
	40,00	0,386	0,385	0,467	0,463

\* No caso de  $\rho$  variável,  $\rho = 0,82$  é o valor da refletividade quando a luz incide normalmente.

#### 4.4 EXPRESSÕES APROXIMADAS PARA O CÁLCULO DA EFICIÊNCIA ÓTICA

##### 4.4.1 RADIAÇÃO DIRETA

Consideremos a expressão que define a eficiência ótica para radiação direta

$$\eta_{otb}(\theta_i) = \sum_{s=0}^{M(\theta_i)} P_s(\theta_i) \rho^s$$

Para valores de  $\rho$  próximos de 1, uma expressão aproximada da

eficiência ótica (simbolizada como  $\eta'_{\text{otb}}(\theta_i)$ ) pode ser escrita da seguinte forma, tal como mostrado nas Refs. 34 e 35.

$$\eta'_{\text{otb}}(\theta_i) = \sum_{s=0}^{M(\theta_i)} P_s(\theta_i) - (1 - \rho) \sum_{s=1}^{M(\theta)} P_s(\theta_i)s + O[(1 - \rho)^2] \quad (4.29)$$

ou

$$\eta'_{\text{otb}}(\theta_i) = F(\theta_i) - (1 - \rho)n(\theta_i) + O[(1 - \rho)^2] \quad (4.30)$$

onde  $F(\theta_i)$  está definido pela Eq. (3.10) e  $n(\theta_i)$  é igual a

$$n(\theta_i) = \sum_{s=1}^{M(\theta_i)} P_s(\theta_i)s \quad (4.31)$$

Portanto  $\eta'_{\text{otb}}(\theta_i)$  pode ser calculada com aproximação de  $(1-\rho)$ , uma vez que  $F(\theta_i)$  e  $n(\theta_i)$  são conhecidos. A Eq. (4.30) pode ser escrita em forma mais compacta como [19]

$$\eta'_{\text{otb}}(\theta_i) = F(\theta_i)\rho^{n(\theta_i)/F(\theta_i)} \quad (4.32)$$

ou

$$\eta'_{\text{otb}}(\theta_i) = F(\theta_i)\rho^{n_N(\theta_i)} \quad (4.33)$$

onde

$$n_N(\theta_i) = \frac{n(\theta_i)}{F(\theta_i)} \quad (4.34)$$

É interessante constatar que a expressão (4.32) ou (4.33) unifica o conceito da função de aceitação angular com o número médio de reflexões, mostrando que ambos em conjunto

determinam a eficiência ótica da cavidade. As duas funções,  $F(\theta_i)$  e  $n(\theta_i)$ , estão interrelacionadas já que expressam os momentos de ordem zero e primeira ordem das funções  $P_k(\theta_i)$ , com relação ao número médio de reflexões. Cabe esclarecer ainda que a função  $n(\theta_i)$  é um valor médio calculado sobre a abertura toda, incluindo regiões atravessadas por raios que podem não chegar ao absorvedor, a diferença do número  $n_N(\theta_i)$  (Eq. (4.34)) que expressa o número médio de reflexões dos raios que efetivamente atingem o absorvedor.

## RESULTADOS NUMÉRICOS

As funções de aceitação angular foram calculadas para diversos valores de  $C$  e  $\psi$  (Fig. 4.7). O ângulo do vértice é expressado através do parâmetro

$$m = \frac{\theta_c}{\psi} \quad (4.35)$$

A forma da função coincide com o comportamento esperado [3]. A região de aceitação parcial começa, bastante aproximadamente, no ângulo de incidência  $\theta_i = \theta_c - \psi$  e tem como limite superior o ângulo  $\theta_i = \theta_c + \psi$ .

O comportamento da função  $n(\theta_i)$  pode ser visto na Fig. 4.8. Em todos os casos, salvo um, o máximo da função coincide, aproximadamente, com  $\theta_i = \theta_c - \psi$  e a função torna-se nula para valores de  $\theta_i$  próximos a  $\theta_c + \psi$ . Para incidência normal o número médio de reflexões é igual a  $[1-(1/C)]$ .

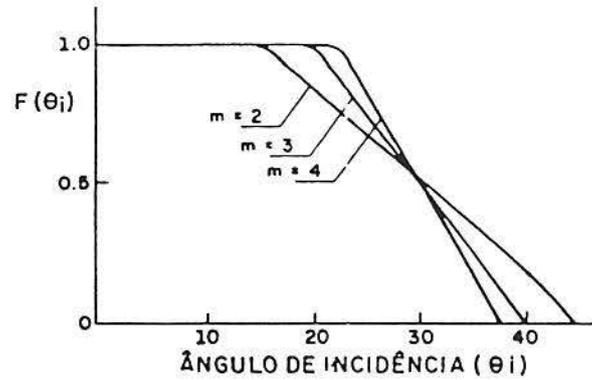


Figura 4.7 Função de aceitação angular para  $C = 2$  e  $m = 2, 3$  e  $4$ .

A eficiência ótica foi calculada em forma exata e comparada com a expressão aproximada (Eq. (4.33)). Os resultados constam na Tabela 4.2, conjuntamente com outros parâmetros de interesse.

Tabela 4.2 Eficiência ótica para radiação direta calculada em forma exata e aproximada.  $C = 2$ ,  $m = 3$  e  $\rho = 0,80$ .

$\theta_i$	$F(\theta_i)$	$n(\theta_i)$	$n_N(\theta_i)$	$\eta_{otb}$	$\eta'_{otb}$	$\Delta$ (%)
0	1,00	0,50	0,50	0,900	0,894	0,6
5	1,00	0,50	0,50	0,900	0,894	0,6
10	1,00	0,56	0,56	0,890	0,882	0,9
15	1,00	0,84	0,84	0,841	0,830	1,3
20	1,00	1,21	1,21	0,775	0,760	2,0
25	0,76	0,99	1,31	0,572	0,564	1,4
30	0,50	0,69	1,39	0,366	0,364	0,6
35	0,26	0,42	1,60	0,185	0,184	0,6
39	0,05	0,10	2,00	0,033	0,033	0,0

$$\Delta = \frac{\eta_{otb} - \eta'_{otb}}{\eta_{otb}} \times 100$$

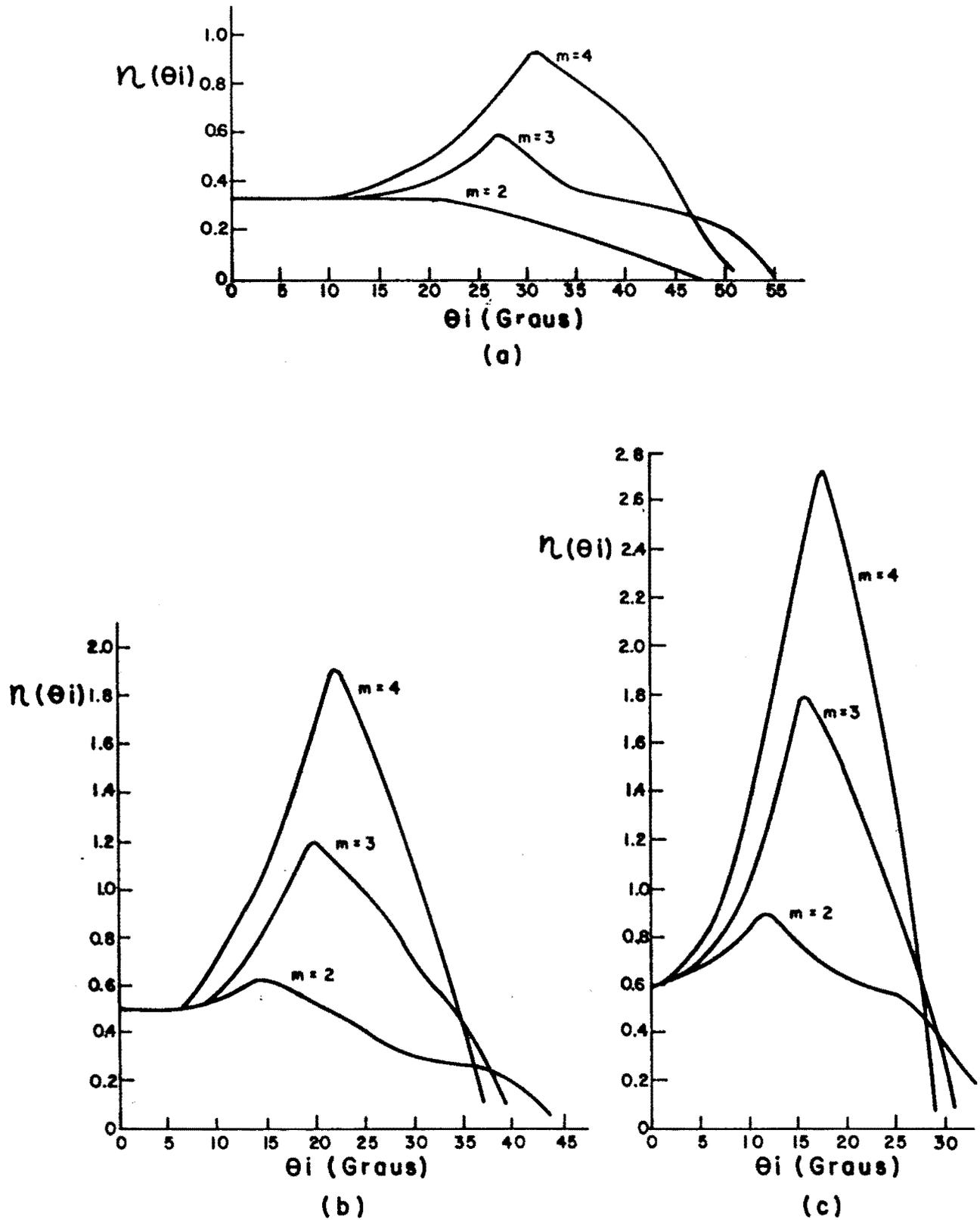


Figura 4.8 Número médio de reflexões para radiação direta  
 (a)  $C = 1,5$ ; (b)  $C = 2,0$ ; (c)  $C = 2,5$ .

#### 4.4.2 RADIAÇÃO DIFUSA

A eficiência ótica para radiação difusa calcula-se integrando a eficiência ótica para radiação direta sobre todos os possíveis ângulos de incidência

$$\eta_{otd} = \int_0^{\pi/2} \eta_{otb}(\theta_i) \cos \theta_i d\theta_i \quad (4.36)$$

expressão que, até a primeira ordem em  $(1 - \rho)$ , pode-se escrever

$$\eta_{otd} \approx F_d \rho^{n_d} / F_d \quad (4.37)$$

onde

$$F_d = \int_0^{\pi/2} F(\theta_i) \cos \theta_i d\theta_i \quad (4.38)$$

e

$$n_d = \int_0^{\pi/2} n(\theta_i) \cos \theta_i d\theta_i \quad (4.39)$$

A relação  $n_d/F_d$  tem um significado análogo ao número  $n_N$  para radiação direta e satisfaz a seguinte relação

$$\frac{n_d}{F_d} = \sum_{k=0}^N \frac{P_{kd} k}{F_d} \quad (4.40)$$

onde

$$P_{kd} = \int_0^{\pi/2} P_k(\theta_i) \cos \theta_i d\theta_i \quad (4.41)$$

e  $N$  é o máximo número de reflexões para radiação aceita. A Eq. (4.37) pode ser escrita portanto como

$$\eta_{otd} = F_d \rho^{n_d N} \quad (4.42)$$

onde

$$n_{dN} = \frac{n_d}{F_d} \quad (4.43)$$

Uma aplicação importante das propriedades óticas para radiação difusa é a predição do desempenho a longo prazo de cavidades quase-estacionárias (experimentam poucos movimentos ao ano). Exemplo ilustrativo dos parâmetros que representam essas propriedades é apresentado na próxima seção.

## RESULTADOS NUMÉRICOS

A eficiência ótica para radiação difusa, obtidas de forma exata e aproximada são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Aceitação angular, número médio de reflexões e eficiência ótica para radiação difusa,  $\rho = 0,8$ .

C	$\theta_c$ (°)	m	$\psi$ (°)	$F_d$	$n_d$	$n_{dN}$	$\eta_{otd}$	$\dot{\eta}_{otd}$	$\Delta$ (%)
1,5	41,8	2	20,9	0,669	0,194	0,290	0,631	0,627	0,6
		3	13,9	0,669	0,294	0,440	0,610	0,606	0,7
		4	10,5	0,675	0,402	0,600	0,597	0,590	1,2
2,0	30,0	2	15,0	0,507	0,295	0,582	0,449	0,445	0,9
		3	10,0	0,508	0,446	0,878	0,423	0,418	1,2
		4	7,5	0,502	0,590	1,175	0,395	0,386	2,3
2,5	23,6	2	11,8	0,403	0,350	0,868	0,336	0,332	1,2
		3	7,9	0,403	0,527	1,308	0,309	0,301	2,6
		4	5,9	0,403	0,703	1,744	0,285	0,273	4,2

$$\Delta = \frac{\eta_{otd} - \dot{\eta}_{otd}}{\eta_{otd}} \times 100$$

Para valores de  $C$  constante, verifica-se que a eficiência ótica varia lentamente com  $m$  (ou  $\psi$ ), ainda para grandes variações desse parâmetro. Com o aumento de  $(m)$  a cavidade fica mais profunda e o número de reflexões aumenta. No entanto o fator  $\rho^{n_{dN}}$  varia lentamente com o número de reflexões  $[0(1 - \rho)n_{dN}]$  e a pesar de que a região de transição varia (sua largura é igual a  $2\psi$ ) o fator  $F_d$  permanece praticamente inalterado (note-se que  $F_d$  é bastante aproximadamente igual a  $1/C$ ), resultando nas pequenas variações observadas. A quase-invariância de  $\eta_{otd}$  com  $m$  sugere a conveniência de se utilizar cavidades bastante abertas ( $\psi$  grandes), que apresentam uma baixa relação de superfície de espelhos por  $m^2$  de abertura e portanto uma opção interessante do ponto de vista da relação de custo-benefício.

Finalmente, o parâmetro  $n_d$  pode ser obtido empiricamente. O número médio de reflexões, cuja aproximação será denominada  $n'_d$ , pode se expressar em função de  $m$  através de uma relação linear da forma

$$n'_d = a + b(m - 1) \quad (4.44)$$

Os coeficientes  $a$  e  $b$  dependem da concentração e estão dados por

Tabela 4.4 Coeficientes empíricos para o cálculo do número de reflexões da radiação difusa.

$C$	$a$	$b$
1.5	0.089	0.104
2.0	0.149	0.148
2.5	0.174	0.177

A representação gráfica para os três valores de C pode ser vista na Fig. 4.9.

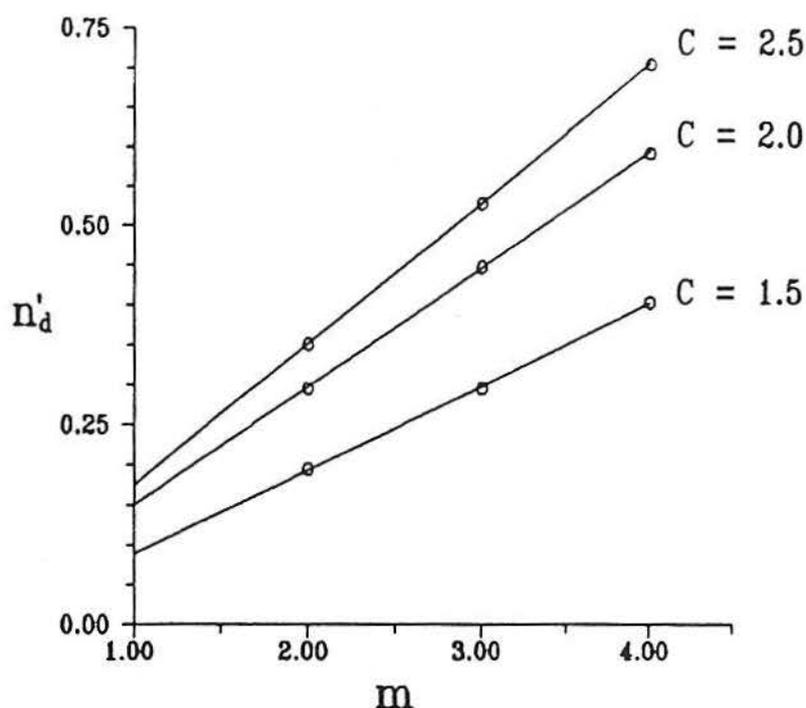


Figura 4.9 Número médio de reflexões para radiação difusa em função do número m. As retas são calculadas mediante a fórmula empírica (Eq. (4.44)) e os valores representados, calculados em forma exata.

O cálculo de  $\eta_{otd}$  utilizando essa relação empírica, conjuntamente com a aproximação  $F_d \approx 1 / C$  (válida para  $m \geq 1$ ), fornece valores com desvios menores que 5.5%.

#### 4.4.3 COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS

As aproximações apresentadas permitem calcular a eficiência ótica para radiação direta e  $\rho \geq 0,8$  com um desvio

máximo de 3,4% para relações de concentração iguais ou menores que 2,5 e  $m$  igual ou menor que 4 [19]. A eficiência ótica para radiação difusa pode ser calculada com precisão melhor que 4,5% com a aproximação dada pela Eq. (4.42) e mediante as relações empíricas apresentadas neste trabalho, com precisão melhor que 5.5% para o conjunto de configurações estudadas.

No próximo capítulo serão utilizadas as soluções analíticas e propriedades óticas determinadas, para simular o desempenho de conjuntos fotovoltaicos acoplados a cavidades tipo V, estimar sua produção de energia e o benefício decorrente do uso de concentradores quando comparados com sistemas sem concentração.

## CAPÍTULO 5

### PROJETO DA CAVIDADE TIPO V

#### 5.1 INTRODUÇÃO

Os critérios básicos para a escolha da geometria da cavidade tipo V são os seguintes:

**Uniformidade do fluxo de radiação na região absorvedora;**

**Custo mínimo da energia média anual gerada pelo conjunto cavidade-módulo fotovoltaico.**

O primeiro aspecto a ser estudado é a relação existente entre a condição de radiação uniforme na região absorvedora e as características operacionais do conjunto fotovoltaico. Posteriormente são calculadas, mediante um modelo de simulação, a energia elétrica produzida pelo sistema fotovoltaico e a variação do custo da energia elétrica produzida anualmente em função da relação de concentração ( $C$ ) e ângulo do vértice ( $\psi$ ). A energia média anual produzida em função da inclinação do eixo do rastreador também é calculada para determinar o ângulo mais adequado. Estes estudos, em conjunto,

permitem definir os dois parâmetros geométricos da cavidade: relação de concentração (C) e ângulo do vértice( $\psi$ ).

## 5.2 CAVIDADES ÓTICAS COM ILUMINAÇÃO UNIFORME NA REGIÃO DO ABSORVEDOR

Como foi mencionado, a cavidade a ser testada deve apresentar iluminação uniforme na região do absorvedor. Devemos salientar que se trata da uniformidade transversal ao absorvedor, dado que nele poderão estar localizados módulos integrados por quatro colunas, por exemplo, de células solares dispostas lado a lado e interligadas em série, de modo que a uniformidade de iluminação destas células torna-se uma exigência fundamental. Concentradores com zero e uma reflexão atendem esse requisito desde que a seguinte desigualdade seja satisfeita(Eq. (4.12))

$$C \geq 1 + 2 \cos 2\psi$$

A região de iluminação uniforme está definida no intervalo angular ( $|\theta_i| \leq \mu$ ) (Fig. 4.2). Quando a relação de igualdade  $C = 1 + 2\cos 2\psi$  é satisfeita o intervalo angular  $\mu$  é igual a 0. Para valores do intervalo angular  $\mu$  crescentes a função  $F(\theta_i)$  diminui (Seção 4.2). O comportamento para cavidades cujo máximo número de reflexões (N) é igual a 1 é ilustrado com os resultados da Tabela 5.1, onde também estão mostrados os valores da função de aceitação angular e eficiência ótica para  $|\theta_i| \leq \mu$  [20].

Tabela 5.1 Intervalo angular ( $\mu$ ), função de aceitação angular  $F(\theta_i)$  e eficiência ótica  $\eta(\theta_i)$  na região de iluminação uniforme do absorvedor. Máximo número de reflexões (N) igual a 1.

C	$\psi$	$\mu$	$F(\theta_i)$	$\eta_{otb}(\theta_i)^*$
	37,76	0	1,00	0,93
1,5	40,00	3,41	0,90	0,85
	45,00	11,30	0,66	0,66
	30,00	0	1,00	0,90
2,0	35,00	5,46	0,84	0,77
	40,00	11,66	0,67	0,64
	25,00	2,59	0,91	0,81
2,5	30,00	6,59	0,80	0,72
	40,00	17,05	0,54	0,51

\*A função  $\eta_{otb}(\theta_i)$  foi calculada com um valor da refletividade do espelho,  $\rho = 0,8$ .

A partir dos resultados acima pode ser definida uma relação de compromisso entre o período que o sistema não acompanha o movimento do sol e a eficiência ótica. É importante notar que valores do ângulo  $\mu$  relativamente pequenos, por exemplo  $\mu = 2^\circ$ , implicam uma tolerância de 16 minutos de desvio da posição do sol com relação ao plano de simetria da cavidade.

O acompanhamento descontínuo se traduz, naturalmente, em um consumo de energia menor que o correspondente a um sistema de rastreamento contínuo. Porém, tem a desvantagem de afetar a radiação incidente de um fator coseno, que para um ângulo  $\mu = 2^\circ$

resulta em uma perda de energia coletada da ordem de 0,2%. Mais uma vez está consideração obriga a fazer um balanço cuidadoso de ganhos e perdas. No que se refere a sistemas de rastreamento contínuo, o ângulo  $\mu$  da cavidade pode ser projetado para dota-lo de uma margem de tolerância compatível com os desvios operacionais do sistema de acompanhamento do sol.

Os resultados da Tabela 5.1 são válidos para cavidades com zero e uma reflexão. No caso em que o máximo número de reflexões (N) seja maior do que 1, a condição de uniformidade é expressa pela desigualdade (Eq. (4.11))

$$C \geq 1 + \frac{2 \operatorname{sen}(N\psi) \cos[(N+1)\psi]}{\operatorname{sen} \psi}$$

O modelo de simulação numérica que se descreve a seguir analisa o comportamento de cavidades sem estabelecer restrições com relação ao máximo número de reflexões, ou seja  $N \geq 1$ .

### 5.3 MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO E CUSTO DA ENERGIA DO CONJUNTO GERADOR - CAVIDADE

As considerações que antecederam indicam que existe uma região de limites bem definidos para a escolha da concentração C e ângulo  $\psi$ . A condição adicional, de custo mínimo do conjunto fotovoltaico, permitirá encontrar a combinação (C,  $\psi$ ) mais adequada da classe de concentradores com iluminação uniforme na região do absorvedor.

Para tal fim foi utilizado um modelo, que calcula a energia média anual produzida pelo conjunto concentrador-gerador fotovoltaico, movimentado por um sistema de rastreamento em torno de um eixo N-S. O custo dessa energia pode ser estimado a partir dos custos de investimento do conjunto gerador-cavidade. A seguir serão descritos os fundamentos do modelo e apresentados seus resultados numéricos. Finalmente é exposto o procedimento utilizado para escolha da geometria da cavidade.

### 5.3.1 FORMULAÇÃO DO MODELO

O sistema analisado está constituído por uma cavidade concentradora tipo V, um módulo fotovoltaico e uma carga de tensão controlada. A representação utilizada para simular os processos físicos será descrita com mais detalhe na seção de fundamentos da metodologia experimental (Seção 7.2). Os dados de entrada do modelo desenvolvido são os valores da radiação solar. A partir da radiação diária média mensal no plano horizontal, calcula-se a distribuição da radiação horária média mensal ao longo do dia. Sua interação com a cavidade ótica gera uma saída na interface cavidade-módulo, a iluminação da superfície do módulo. Conhecida esta variável e a temperatura, e definida a forma de operação da carga elétrica (tensão constante o ponto de máxima potência) é calculada a energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico. Gera-se desta forma, a saída média horária de energia elétrica, para o dia médio mensal (dia típico) ao longo dos doze meses do ano e, conseqüentemente, a energia diária média anual.

As grandezas físicas e modelos de subsistemas mais importantes são:

- A. Modelo solarimétrico;
- B. Ângulo de incidência da radiação direta na abertura da cavidade;
- C. Fluxo de radiação na superfície do módulo fotovoltaico;
- D. Temperatura das células solares e conversão de energia no módulo fotovoltaico.

Segue uma descrição destes tópicos.

#### **A MODELO SOLARIMÉTRICO**

A radiação incidente no plano de abertura da cavidade é calculada a partir do conhecimento da radiação incidente no plano horizontal. Para tal fim foi utilizado o procedimento descrito por Collares-Pereira e Rabl na Ref. 24, baseado nas correlações documentadas pelos mesmos autores na Ref. 40. Neste último trabalho descreve-se também um procedimento que permite sintetizar os níveis de radiação horária na abertura da cavidade a partir dos valores diários no mesmo plano.

#### **B ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DA RADIAÇÃO DIRETA NA ABERTURA DA CAVIDADE**

A cavidade acompanha o movimento do sol girando em torno de um eixo, orientado Norte-Sul, inclinado de um ângulo  $\beta_e$  com relação ao plano horizontal. Em consequência o ângulo de incidência dos raios solares na abertura da cavidade, projetados

no plano transversal à mesma,  $\theta_i$ , é igual a zero. O ângulo  $\beta$  (correspondente à hora solar  $\omega$ ), do plano de abertura da cavidade, com relação ao plano horizontal é igual a [38]

$$\cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + K^2}} \cos \beta_e \quad (5.1)$$

onde

$$K = \frac{\text{sen } \omega}{\cos \omega \cos(\lambda - \beta_e) + \text{tg} \delta \text{ sen}(\lambda - \beta_e)} \quad (5.2)$$

O ângulo  $\omega$  expressa a hora solar em graus a partir do meio-dia (1 hora =  $15^\circ$ ),  $\delta$ , a declinação solar e  $\lambda$ , a latitude local ( $\lambda = 8,18^\circ$  Sul)

O ângulo de incidência, da radiação direta no plano de abertura da cavidade,  $\theta$ , está dado por[38]

$$\cos \theta = \cos \delta \sqrt{\text{sen}^2 \omega + [\cos(\lambda - \beta_e) \cos \omega + \text{tg} \delta \text{ sen}(\lambda - \beta_e)]^2} \quad (5.3)$$

Os ângulos de incidência da radiação na superfície do módulo fotovoltaico serão analisados na próxima seção.

## C FLUXO DE RADIAÇÃO NA SUPERFÍCIE DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

Como foi descrito em capítulos anteriores, cada modo de reflexão se propaga ao longo da cavidade de acordo com seu número ( $k$ ) característico. Como será visto a seguir, é necessário fazer um tratamento diferenciado de cada um deles.

Para tal fim a radiação direta é desdobrada nos diversos modos existentes na cavidade, calculada a eficiência ótica de cada modo e o ângulo de incidência na superfície do módulo fotovoltaico. Por exemplo o fluxo de radiação do modo de reflexão  $k$ , associado ao espelho direito, na superfície do módulo fotovoltaico é igual a

$$I_{ak}^D = C I_{bA} P_k^D(\theta_i) \rho^k K(\theta_{ak}^D) \quad (5.4)$$

onde  $I_{bA}$  é a componente direta da irradiância na abertura,  $P_k^D(\theta_i)$  a função associada ao modo de reflexão  $k$ ,  $\rho^k$  a eficiência ótica do modo  $k$ ,  $\theta_{ak}^D$ , o ângulo de incidência do modo  $k$  na superfície do módulo fotovoltaico e  $K(\theta_{ak}^D)$  o modificador do ângulo de incidência para esse ângulo. Considerando que a componente longitudinal dos raios permanece invariante ao longo de sua trajetória [38], o ângulo  $\theta_{ak}^D$  pode ser calculado como

$$\cos \theta_{ak}^D = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_i} \cos(\theta_i + 2k\psi) \quad (5.5)$$

onde  $\theta_i + 2k\psi$  é o ângulo de incidência projetado na superfície do módulo. A contribuição de todos os modos e de ambos espelhos será, finalmente, igual a

$$I_{ba} = C I_{bA} [P_0(\theta_i)K(\theta_{a0}^D) + P_1^D(\theta_i)\rho K(\theta_{a1}^D) + \dots + P_M^D(\theta_i)\rho^M K(\theta_{aM}^D) \\ + P_1^D(-\theta_i)\rho K(\theta_{a1}^E) + \dots + P_L^D(-\theta_i)\rho^L K(\theta_{aL}^E)] \quad (5.6)$$

onde  $M$  e  $L$  são o máximo número de reflexões dos modos associados ao espelho direito e esquerdo, respectivamente. Analogamente o

fluxo de radiação difusa na superfície do módulo fotovoltaico é igual a

$$I_{da} = I_{dA} E_{Aa} \bar{K} \quad (5.7)$$

onde  $I_{dA}$  é a componente difusa da irradiância na abertura da cavidade,  $E_{Aa}$  o coeficiente de intercâmbio radiativo abertura-absorvedor (Seção 4.3) e  $\bar{K}$  o modificador do ângulo de incidência para radiação difusa, obtido a partir da integral do modificador para radiação direta sobre todos os ângulos de incidência.

Quando o ângulo  $\theta_i = 0$ , os ângulos de incidência na superfície do absorvedor, para os espelhos direito e esquerdo, são iguais e serão simbolizados como  $\theta_{ak}$ . Seu valor é igual a

$$\cos \theta_{ak} = \cos \theta \cos 2k\psi \quad (5.8)$$

Finalmente, a expressão do fluxo de radiação na superfície do absorvedor, para  $\theta_i = 0$ , adota a forma

$$I_{ba} = CI_{bA} \left[ P_0(0)K(\theta) + 2P_1^D(0) \rho K(\theta_{a1}) + \dots + 2P_M^D(0) \rho^M K(\theta_{aM}) \right] \quad (5.9)$$

onde foram agrupados os termos iguais da Eq. (5.6).

#### D TEMPERATURA E CONVERSÃO DE ENERGIA NO MÓDULO FOTOVOLTAICO

A resposta do gerador fotovoltaico depende do fluxo de radiação sobre sua superfície e da temperatura das células

solares. A temperatura das células pode ser determinada em forma empírica mediante a seguinte relação [41]

$$T_c(^{\circ}\text{C}) = T_{\text{am}} + 0,02 I_a (\text{W} / \text{m}^2) \quad (5.10)$$

onde  $T_c$  e  $T_m$  são as temperaturas das células e do meio ambiente, respectivamente, e  $I_a$  a soma das componentes direta e difusa da densidade de fluxo na região do absorvedor ( $I_a = I_{\text{ba}} + I_{\text{da}}$ ), calculadas na seção anterior.

A partir do conhecimento da temperatura  $T_c$  e da densidade total de fluxo,  $I_a$ , pode ser determinada a curva característica I-V do módulo fotovoltaico. Um procedimento simples e facilmente adaptável a tratamento computacionais é o modelo denominado TRW, largamente utilizado em simulação de sistemas fotovoltaicos. Na Ref. 25 consta uma descrição detalhada deste procedimento. Sua utilização requer do conhecimento de uma curva de referência, correspondente a condições padrão de irradiância e temperatura. Especificamente, a partir do conhecimento da corrente de curto circuito ( $I_{\text{cc}}$ ), a tensão de circuito aberto ( $V_{\text{oc}}$ ) e a corrente e tensão no ponto de máxima potência ( $I_{\text{mp}}$  e  $V_{\text{mp}}$ ) [41], é possível, mediante uma função exponencial, obter um ajuste razoável da curva de referência. A simulação das curvas características para outros valores da insolação e temperatura, requer ainda do conhecimento da resistência série e dos coeficientes de variação da corrente de curto circuito e da tensão de circuito aberto com a temperatura,  $\alpha_I$  e  $\alpha_V$ , respectivamente.

Valores típicos dos parâmetros mencionados constam na tabela seguinte.

Tabela 5.2 Valores padrão para o módulo HM-37C12 da Heliodinâmica. Temperatura de referência, 25°C, e irradiância de referência no plano do módulo, sob incidência normal, 1000 W/m<sup>2</sup>.

$V_{OC}(V)$	$V_{mp}(V)$	$I_{mp}(A)$	$I_{CC}(A)$	$\alpha_I(A / ^\circ C)$	$\alpha_V(V / ^\circ C)$	$R_S(\Omega)$
21,0	16,2	2,27	2,43	$8,91 \times 10^{-4}$	$82,8 \times 10^{-3}$	1,2

O procedimento descrito permite obter a resposta, em tensão e corrente, do gerador fotovoltaico, para valores qualquer da irradiância e temperatura do módulo. A energia fornecida pelo gerador requer definir ainda o ponto de trabalho, que depende da curva característica da carga. Esta curva pode-se expressar como uma relação entre a corrente (I) e a tensão (V) que determina, na sua interseção com a curva I-V do gerador, o ponto de operação. Como tal foi escolhido o ponto de máxima potência localizado, no processo de simulação, mediante uma varredura da curva I-V do gerador, cálculo da potência elétrica ponto a ponto e definição conseqüente do seu ponto de máximo. A integral dos valores instantâneos da potência elétrica fornece a energia elétrica diária. O modelo de simulação completa-se com o cálculo do custo da energia elétrica gerada.

### 5.3.2 CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA

O custo de investimento do conjunto cavidade-gerador fotovoltaico, por m<sup>2</sup> de abertura da cavidade, pode ser calculado de acordo com

$$C_c = \left( \frac{C_r(C-1)}{C \sin \psi} \sqrt{\frac{C}{2}} + C_e + \frac{C_m}{C} \right) \left( \frac{\text{US\$}}{\text{m}^2 \text{ abertura}} \right) \quad (5.11)$$

onde

$C_r$  é o custo da cavidade, espelhos e estrutura associada aos mesmos, por  $\text{m}^2$  de espelho;

$C_e$  o custo da estrutura de movimentação, por  $\text{m}^2$  de abertura da cavidade;

$C_m$  o custo do gerador fotovoltaico por  $\text{m}^2$  de módulo.

O custo da superfície refletora é proporcional à área da superfície refletora por unidade de área da abertura, expressa através da relação

$$R_v = \frac{C-1}{C \sin \psi} \quad (5.12)$$

A análise de custos de um protótipo de sistema fotovoltaico, construído no Laboratório da UFPE [42] mostrou a necessidade de multiplicar o primeiro termo da função de custo [Eq. (5.11)] pelo fator  $\sqrt{C/2}$ , que leva em consideração a relação de esbeltez da estrutura associada aos espelhos. Na medida em que o valor de  $C$  cresce o custo aumenta mais rapidamente que a superfície de espelhos  $R_v$ . O valor  $C = 2$  estabelece o limite entre custos que aumentam mais rápida ou mais lentamente que a superfície refletora.

O custo unitário da energia elétrica gerada pode ser calculado como a relação entre o custo de investimento do conjunto gerador-cavidade e a energia gerada durante 20 anos de vida do painel

$$C_{uE} = \frac{A_{\text{mód.}} \times C \times C_c}{E \times 365,25 \times 20} \text{ (US\$ / kWh)} \quad (5.13)$$

onde  $A_{\text{mód.}}$  é a área de um módulo fotovoltaico, para o qual adotou-se um valor igual a  $0,42 \text{ m}^2$ .

A energia diária média anual produzida pelo sistema assim como seus custos, para diversos valores da relação de concentração  $C$  e ângulo  $\psi$ , serão apresentados a seguir.

### 5.3.3 RESULTADOS NUMÉRICOS

Resultados do cálculo da energia diária média anual ( $E$ ), custo do conjunto fotovoltaico ( $C_c$ ) e custo unitário da energia ( $C_{uE}$ ), para  $\psi = 30^\circ$  e diversos valores de  $C$ , estão mostrados na Tabela 5.3. A inclinação ( $\beta_e$ ) do eixo de rastreamento N-S é igual a  $-10^\circ$  e os parâmetros de custo adotados foram:

$$C_r = 40 \text{ US\$/m}^2, \quad C_e = 34 \text{ US\$/m}^2 \quad \text{e} \quad C_m = 500 \text{ US\$/m}^2$$

O ângulo de  $-10^\circ$  corresponde aproximadamente à inclinação de um eixo polar na cidade de Recife (latitude,  $8,18^\circ$  Sul). Com a finalidade de encontrar seu valor mais adequado, na Seção 5.5 será analisada a sensibilidade da energia elétrica gerada com relação à inclinação  $\beta_e$  do eixo do rastreador.

Os resultados da Tabela 5.3 mostram que a energia gerada aumenta com a concentração até um valor limite de  $0,33 \text{ kWh/dia}$ . No entanto o custo do conjunto ( $C_c$ ) diminui gradativamente e a função  $C_{uE}$  apresenta, em consequência, um mínimo na região  $C$  igual a 2.

Tabela 5.3 Custo unitário da energia elétrica gerada pelo conjunto fotovoltaico. Local, Recife; latitude,  $8,18^\circ$  Sul; azimute,  $180^\circ$ ; inclinação do eixo,  $10^\circ$ , na direção do hemisfério norte. Semi-ângulo do vértice ( $\psi$ ),  $30^\circ$ .

(C)	Energia Gerada (E) (kWh/dia)	Custo do Conjunto ( $C_C$ ) (US\$/m <sup>2</sup> )	Custo da Energia ( $C_{UE}$ ) (US\$/kWh)
1,0	0,21	534	0,15
1,5	0,27	390	0,12
2,0	0,33	324	0,11
2,5	0,33	288	0,13
3,0	0,33	266	0,14

Cabe notar que o cálculo acima é feito para uma área constante do módulo fotovoltaico ( $A_{\text{mód}} = 0,42 \text{ m}^2$ ), localizado na região do absorvedor da cavidade. A área da abertura aumenta portanto com a concentração (C) [Eq. (5.13)].

O custo unitário da energia foi calculado para uma variedade de combinações (C,  $\psi$ ) e custos por m<sup>2</sup> do módulo fotovoltaico. Na Fig. 5.1 estão mostrados os resultados para valores da relação de concentração (C) compreendidos entre 1 e 3 e ângulos do vértice  $\psi$  no intervalo de  $15^\circ$  a  $40^\circ$ . Os custos unitários dos módulos, ( $C_m$ ), são iguais a 500 e 1000 US\$/m<sup>2</sup>, valores representativos dos preços de módulos fotovoltaicos no presente. Na próxima seção será descrito o procedimento de escolha dos parâmetros geométricos da cavidade.

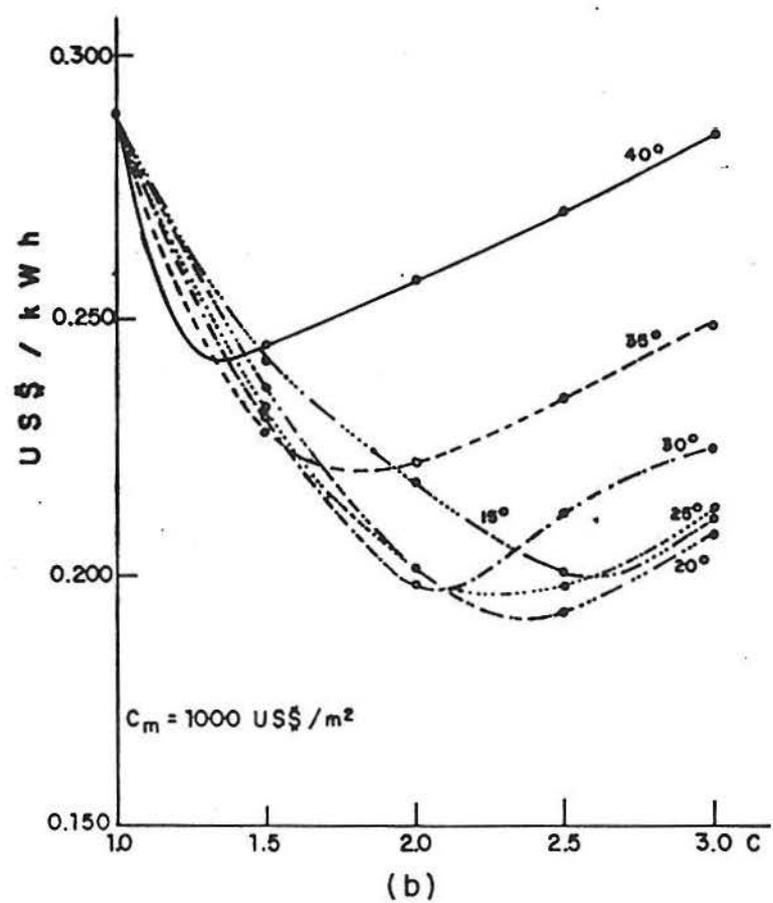
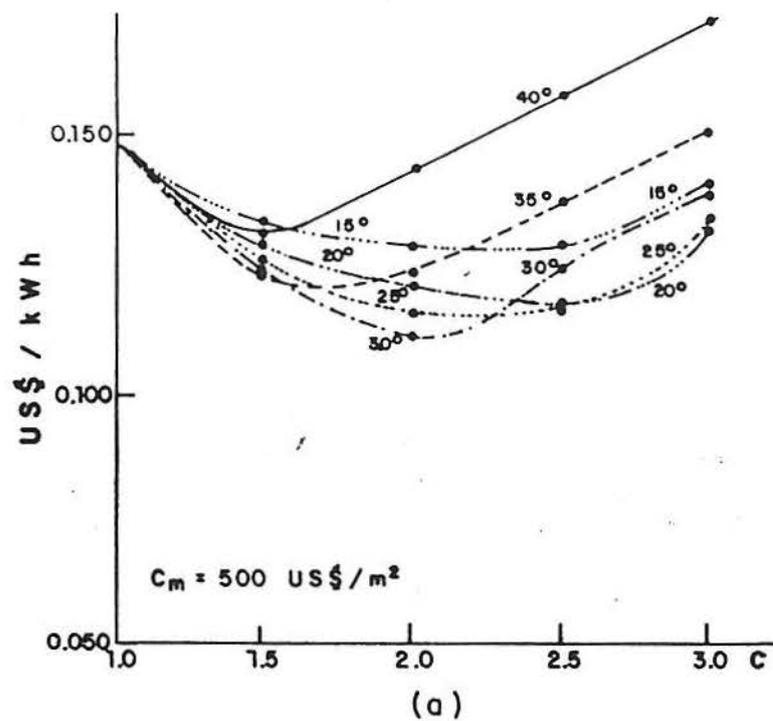


Figura 5.1 Custo unitário da energia vs relação de concentração (C). (a)  $C_m = 500 \text{ US\$/m}^2$ , b)  $C_m = 1000 \text{ US\$/m}^2$ .

#### 5.4 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DA CAVIDADE

Do conjunto de casos simulados interessa destacar apenas aqueles em que a iluminação na região do absorvedor é uniforme. Para cada ângulo do vértice, só existe iluminação uniforme na região do absorvedor a partir de um valor mínimo da relação de concentração (C). O limite inferior da concentração para cada valor de  $\psi$  é mostrado a seguir [Eq.(4.11)].

Tabela 5.4 Limite inferior da relação de concentração em cavidades com iluminação uniforme e máximo número de reflexões (N)

$\psi$ (graus)	15	20	25	30	35	40
$C_{lim}$	3,73	2,88	2,28	2,00	1,68	1,35
N*	3	2	1	1	1	1

\*N é o número que maximiza o segundo membro da Eq. (4.11).

Para cada ângulo do vértice o valor de C deve ser maior que  $C_{lim}$ . Satisfeito esse requisito, é selecionada a combinação (C, $\psi$ ) mais próxima do mínimo da função de custo,  $C_{uE}$ . Adicionalmente deve-se levar em conta o valor do intervalo angular ( $\mu$ ), a fim de reduzir o número de movimentos do sistema de rastreamento e portanto seu consumo de energia.

Os custos mínimos da função  $C_{uE}$  para valores de  $C_m$  igual a 500 e 1000 US\$/m<sup>2</sup> estão indicados na Tab. 5.5. A cavidade cujo ângulo do vértice é igual a 30° apresenta valores

de  $C_{lim}$  iguais a  $C_{min}$ , combinados com os menores custos, tanto para  $C_m$  igual a 500 US\$/m<sup>2</sup> como para 1000 US\$/m<sup>2</sup>.

Tabela 5.5 Valores da concentração que minimizam o custo da energia, custos mínimos e concentrações mínimas que atendem à condição de iluminação uniforme no absorvedor

$C_m$ (US\$/m <sup>2</sup> )	$\psi$	$C_{min}$	$C_{uE}(min)$ (US\$/kWh)	$C_{lim}$
500	20	2,5	0,120	2,88
	25	2,2	0,117	2,28
	30	2,0	0,112	2,00
	35	1,7	0,123	1,68
1000	15	2,6	0,210	3,73
	20	2,4	0,185	2,88
	25	2,3	0,198	2,28
	30	2,0	0,199	2,00
	35	1,7	0,225	1,68
	40	1,3	0,240	1,35

O valor mínimo de  $C$  para  $\psi = 30^\circ$  é igual a 2, mas para esse valor o intervalo angular ( $\mu$ ) é igual a zero, podendo-se escolher portanto  $C$  um pouco maior. Com a combinação  $C = 2,5$  e  $\psi = 30^\circ$ , por exemplo, são atendidos os requisitos de uniformidade e custo mínimo e adicionalmente conta-se com um valor significativo do intervalo angular ( $\mu$ ) ( $\mu = 6,6^\circ$ , Tabela 5.1). É importante mencionar que o máximo número de reflexões  $N$

para os parâmetros escolhidos ( $C = 2,5$  e  $\psi = 30^\circ$ ) é igual a um e que, portanto, as informações constantes da Tabela 5.1 são válidas. A cavidade resultante está mostrada na Fig. 5.2

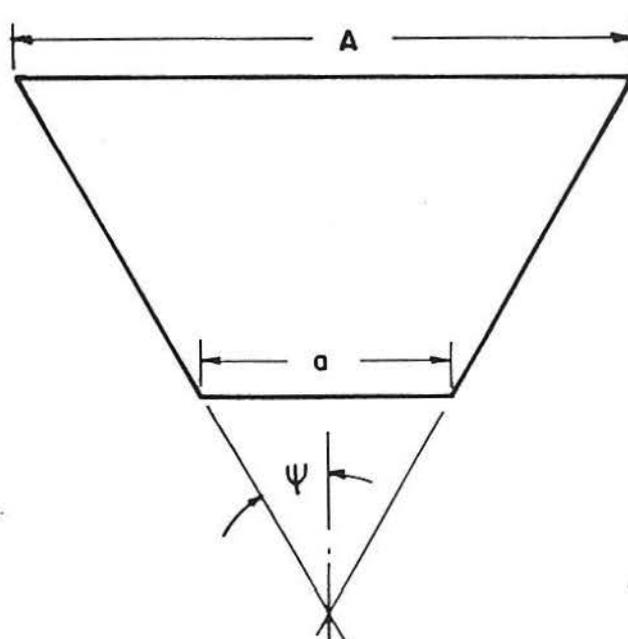


Figura 5.2 Geometria da cavidade com  $C = 2,5$  e  $\psi = 30^\circ$ .

## 5.5 SENSIBILIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA COM RELAÇÃO À INCLINAÇÃO DO EIXO DO RASTREADOR

Nas seções anteriores a energia produzida pelo conjunto fotovoltaico e seu custo unitário foram calculados assumindo uma inclinação do eixo do rastreador igual a  $-10^\circ$ . Dado que o Nordeste do Brasil está localizado em uma região tropical (pequenas latitudes), interessa verificar a possibilidade de instalar sistemas de rastreamento com eixo horizontal, o que pode resultar em uma significativa redução dos

custos do sistema no que se refere a obras civis e área ocupada.

Uma análise sobre a produção de energia de conjuntos fotovoltaicos-cavidades tipo V é apresentada na Ref. 7. Resultados para sistemas com rastreamento em torno do eixo N-S, para diversos valores do ângulo ( $\beta_e$ ), relações de concentração (C) e semi-ângulos ( $\psi$ ) iguais a  $25^\circ$  e  $30^\circ$  estão mostrados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 Energia diária, média anual, (Wh/dia), gerada por conjuntos V-fotovoltaicos. Área do módulo,  $0,42 \text{ m}^2$ ; potência, 35 W; eixo do movimento, Norte-Sul.

(a) Semi-ângulo do vértice( $\psi$ ),  $30^\circ$

Inclinação ( $\beta_e$ )	Concentração					
	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
-14	331,2	331,2	331,1	331,0	331,	331,0
-12	331,9	331,8	331,8	331,7	331,7	331,6
-10	332,4	332,3	332,2	332,2	332,1	332,1
-8	332,6	332,6	332,5	332,5	332,4	332,3
-6	332,7	332,7	332,6	332,6	332,5	332,5
-4	332,6	332,6	332,5	332,5	332,4	332,4
-2	332,3	332,3	332,2	332,2	332,1	332,1
0	331,8	331,8	331,7	331,7	331,6	331,6
2	331,1	331,1	331,0	331,0	330,9	330,9
4	330,3	330,2	330,2	330,1	330,1	330,0

(cont.)

b) Semi-ângulo do vértice ( $\psi$ ),  $25^\circ$ 

Inclinação ( $\beta_e$ )	Concentração		
	2,3	2,4	2,5
-14	361,5	361,4	361,4
-12	362,1	362,1	362,0
-10	362,6	362,5	362,5
-8	362,8	362,8	362,7
-6	362,9	362,8	362,7
-4	362,7	362,7	362,6
-2	362,4	362,3	362,2
0	361,8	361,8	361,7
2	361,1	361,0	360,9
4	360,1	360,1	360,0

Constata-se que a inclinação que resulta na máxima produção de energia é igual a  $-6^\circ$ . Porém a variação com relação ao eixo horizontal é menor que 0,3% para todos os casos analisados. Adotou-se portanto, o eixo horizontal de rastreamento como a opção mais conveniente.

## CAPÍTULO 6

### PROJETO E DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

#### 6.1 CRITÉRIOS DE PROJETO

Definida a geometria da cavidade, foram adotados os seguintes critérios para a construção do conjunto fotovoltaico e configuração do sistema experimental:

- (a) O módulo fotovoltaico está constituído por células convencionais (para módulos sem concentração). Este tipo de módulos são de produção massiva e comercializados na forma de unidades de 45-50W de potência pico. Seus custos são os mais reduzidos do mercado.
  
- (b) O calor gerado nas células é dissipado em forma natural. Experiências realizadas no Grupo de Pesquisas FAE com módulos trabalhando sob regime de baixa relação de concentração ( $C \leq 4$ ) mostram que procedimentos de dissipação passiva de calor são adequados para os níveis de concentração utilizados [43-44]. Nestas experiências as temperaturas das células não superam os 50°C, nas condições da cidade de Recife.

(c) A estrutura do conjunto cavidade-módulo PV permite o acompanhamento manual do movimento do sol em torno de um eixo N-S.

A carga eletrônica do gerador fotovoltaico tem um dispositivo de regulação que permite fixar a tensão de trabalho. Seu valor pode ser preestabelecido no intervalo de zero volts até valores superiores à tensão de circuito aberto do módulo. A corrente gerada é função do nível de insolação, cujas flutuações acompanha.

## 6.2 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO EXPERIMENTAL

O sistema experimental apresenta as seguintes características:

### MÓDULO FOTOVOLTAICO

Módulo de cinco células interligadas em série;

Material e dimensão das células: Si monocristalino,  $\phi = 0,10$  m,  
Área = 78,54 cm<sup>2</sup>;

Dimensões do módulo: largura, 0,12 m; comprimento, 0,53 m;

Valores padrão dos parâmetros elétricos do módulo nas condições de referência (fornecidos pelo fabricante, Heliodinâmica SA):

$V_{oc} = 2,92$  V;  $I_{cc} = 2,43$  A;  $V_{mp} = 2,25$  V e  $I_{mp} = 2,27$  A,

$P_m = 5,11$  W;

Coefficiente de variação de corrente:  $\alpha_I(A/^{\circ}C) = 8,91 \times 10^{-4}$ ;

Coefficiente de variação de tensão:  $\alpha_V(V/^{\circ}C) = 11,5 \times 10^{-3}$ ;

Condições de referência: temperatura, 25 °C e irradiância sob incidência normal, 1000 W/m<sup>2</sup>.

**CAVIDADE**

Parâmetros geométricos: relação de concentração (C), 2,5;  
 abertura, 0,30 m; comprimento, 0,88 m;

Material e espessura dos espelhos: vidro comum, tipo comercial  
 com depósito de prata na face posterior, 3 mm de espessura.

**CARGA ELETRÔNICA**

Modo de operação: tensão fixa regulável;

Tensão, corrente e potência máximas: 50 V, 15 A e 200 W.

**RASTREAMENTO**

Manual, com eixo de giro horizontal, orientado Norte-Sul

O esquema do arranjo experimental está mostrado na  
 Fig. 6.1 e fotografias do conjunto podem ser vistas na Fig. 6.2

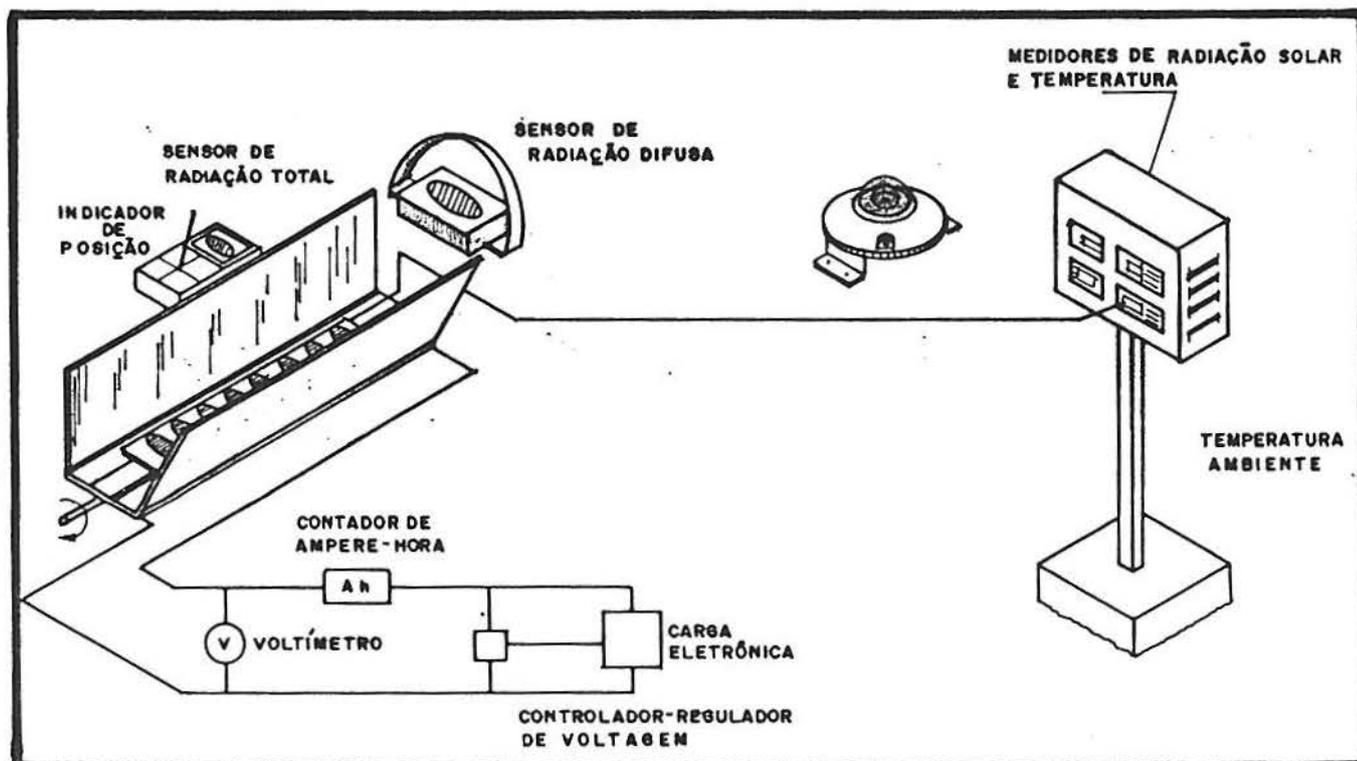


Figura 6.1 Esquema do sistema experimental.

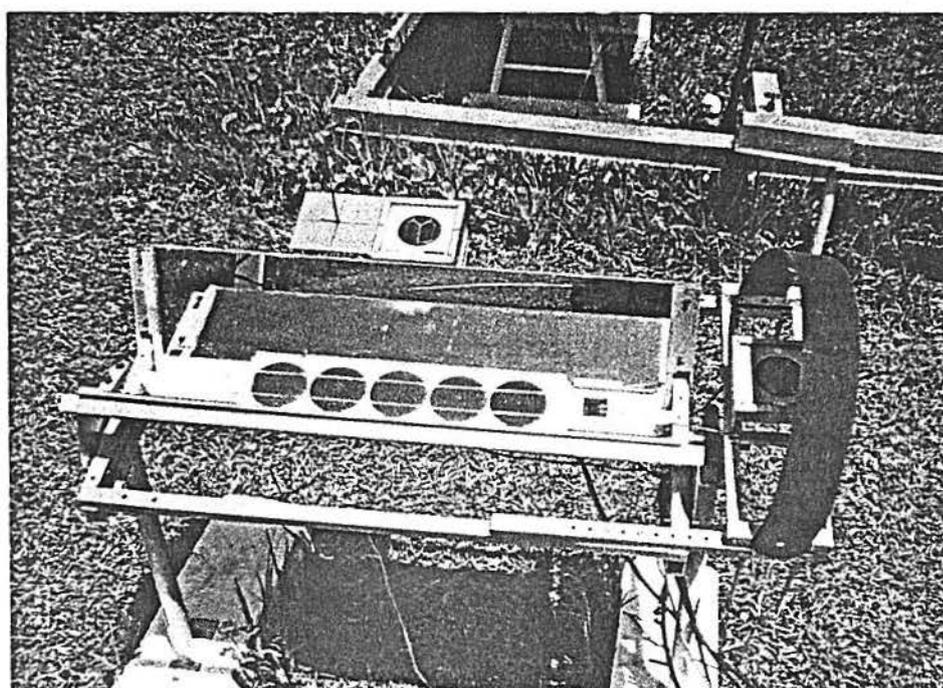
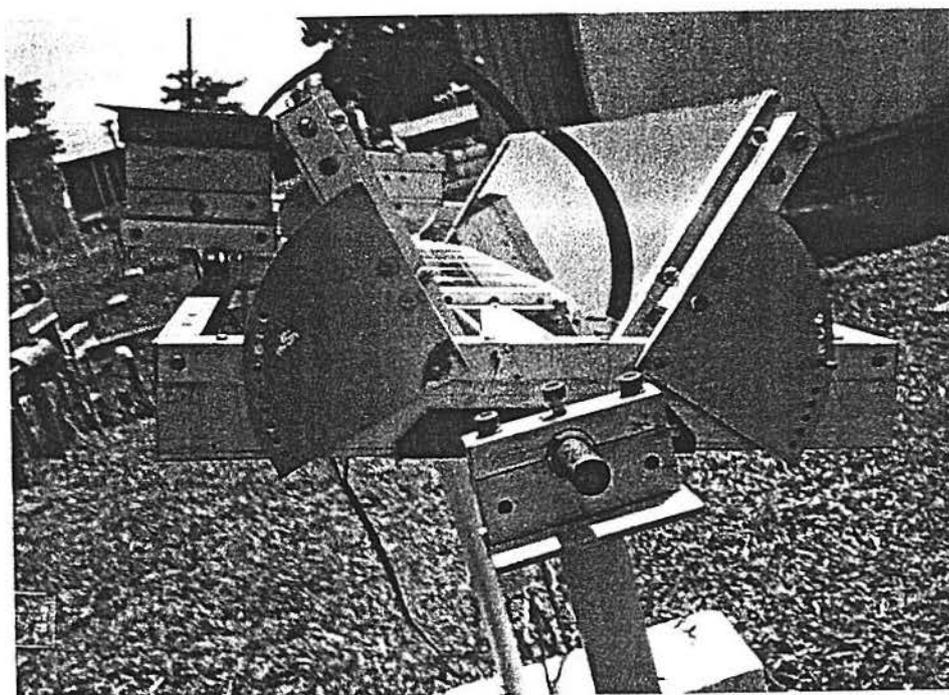


Figura 6.2 Fotografias do conjunto fotovoltaico.

## CAPÍTULO 7

### METODOLOGIA EXPERIMENTAL

#### 7.1 INTRODUÇÃO

A determinação das características operacionais do sistema estudado tem por objeto:

Avaliar o desempenho de conversores fotovoltaicos acoplados a cavidades tipo V;

Contribuir ao conhecimento dos processos físicos associados aos mecanismos de conversão de energia solar em energia elétrica;

Detectar peculiaridades que possam existir no domínio de operação do conversor fotovoltaico;

Avaliar a proposta de utilização de conversores fotovoltaicos em combinação com concentradores tipo V.

Com tal finalidade foi estabelecido um procedimento de testes que permite determinar, utilizando um sistema de instrumentação relativamente simples, as características básicas do sistema a estudar [43-44]. A metodologia adotada será exposta a seguir.

## 7.2 FUNDAMENTOS DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O sistema a ser estudado pode ser representado esquematicamente da seguinte forma.

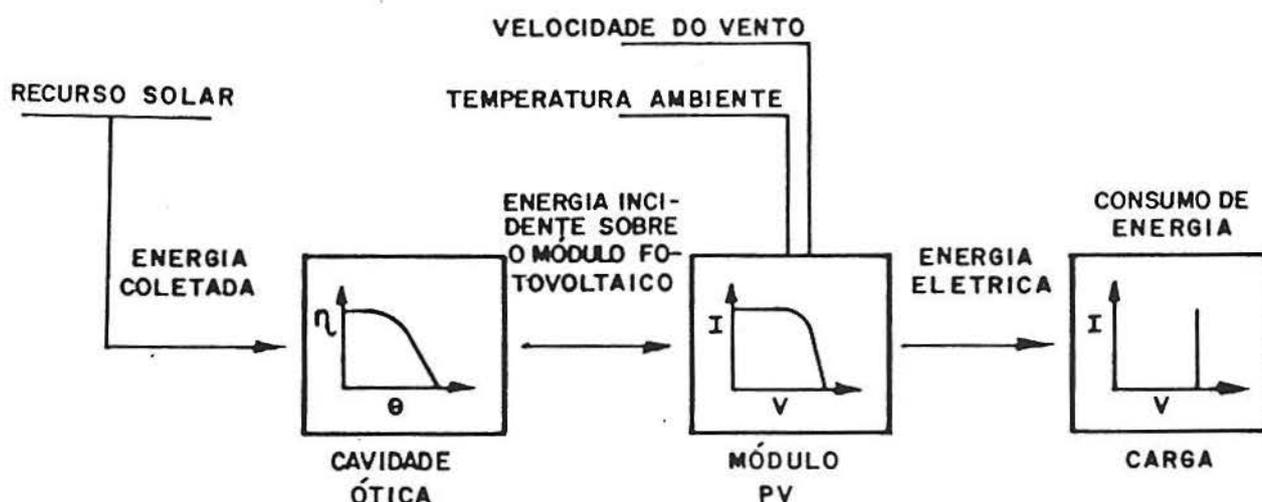


Figura 7.1 Esquema conceitual do sistema fotovoltaico

Da figura acima pode-se deduzir que as informações existentes no processo de análise de desempenho do sistema podem ser agrupadas como:

- curvas características dos equipamentos constitutivos do sistema: cavidade ótica, módulo fotovoltaico e carga, e
- variáveis de fluxo que se propagam ao longo do sistema: insolação, iluminação da superfície do módulo e potência de saída elétrica. A temperatura ambiente e a velocidade do vento condicionam a intensidade dessas variáveis.

As informações mencionadas no item (a) são representadas habitualmente por uma função ou uma família de funções. Em nosso caso a cavidade ótica está caracterizada pela relação entre eficiência ótica e ângulo de incidência, o módulo fotovoltaico pela curva tensão-corrente, para valores bem definidos dos níveis de irradiância e temperatura das fotocélulas e a carga também por uma curva tensão-corrente.

A dependência temporal das curvas características merece um breve comentário. Aparentemente essas funções tem caráter estático, já que não dependem explicitamente do tempo. A dependência temporal está implícita e de formas diversas. Por exemplo a curva V-I do módulo fotovoltaico depende do tempo através do nível de insolação e da temperatura ambiente, variáveis meteorológicas de natureza aleatória. A eficiência ótica depende do tempo através do ângulo de incidência da radiação direta. A curva característica da carga acompanha as variações de corrente do sistema.

As variáveis de fluxo (item (b)) são intrinsecamente variáveis aleatórias que interagem com os diversos componentes do sistema. O comportamento físico dos componentes, no processo de interação com as variáveis de fluxo, está representado, precisamente, pelas curvas características.

Do anterior podemos concluir que a caracterização do sistema envolve dois tipos de testes: determinação da função característica de cada componente e monitoração do fluxo de energia ao longo do sistema. O primeiro tipo de testes, de acordo com o que foi mencionado, tem caráter instantâneo e os parâmetros que definem a função possuem valores bem definidos, diferentes para cada uma das curvas da família de funções, como

ocorre, por exemplo, no caso das curvas V-I dos módulos fotovoltaicos. O segundo tipo de testes tem caráter dinâmico e registra o valor das variáveis em cada uma das interfaces mostradas na Fig. 7.1.

Nas próximas seções serão descritos os procedimentos utilizados para obtenção das características óticas da cavidade em V, das características elétricas do módulo fotovoltaico e o comportamento da curva de carga. Finalmente será descrita a metodologia de testes do sistema em condições operacionais.

### 7.3 DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA ÓTICA DA CAVIDADE TIPO V E UNIFORMIDADE AXIAL

A eficiência ótica expressa a relação existente entre a energia luminosa que incide no absorvedor e na abertura. Experimentalmente pode ser determinada medindo a densidade de radiação em ambas superfícies. Para tal fim são utilizadas células fotovoltaicas como sensores de radiação, já que sua corrente de curto-circuito é proporcional à intensidade da radiação incidente. Admitindo que a densidade de radiação na abertura é uniforme, a eficiência ótica ( $\eta_{ot}$ ) para cada ângulo de incidência ( $\theta_i$ ), pode ser calculada como

$$\eta_{ot}(\theta_i) = \frac{I_a a}{I_A A} \quad (7.1)$$

onde  $I_A$  e  $I_a$  são as densidades de radiação na abertura e no absorvedor, respectivamente (Fig. 7.2).

No caso que a largura do sensor seja igual à largura do absorvedor da cavidade, sua leitura será igual a  $I_a \cdot a$ .

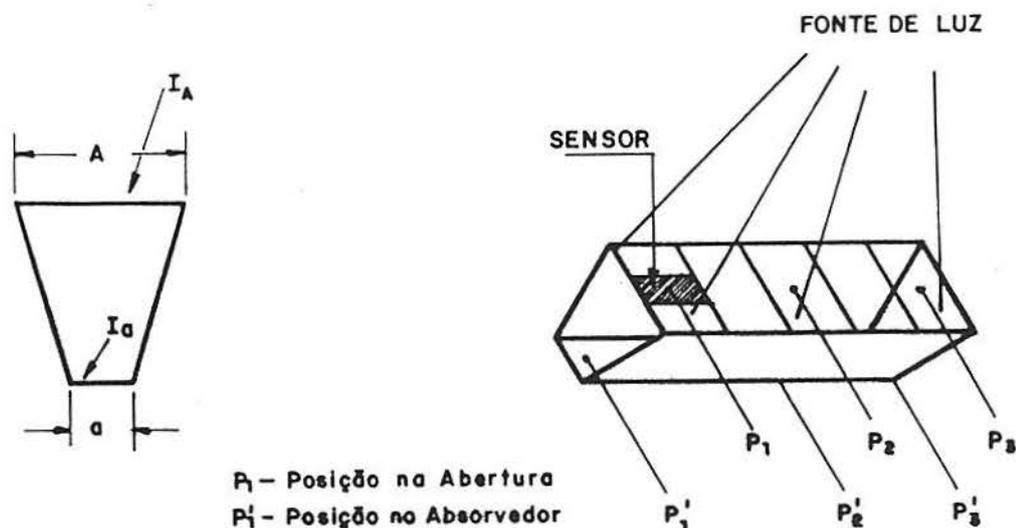


Figura 7.2 Procedimento para determinação da eficiência ótica da cavidade.

O valor de  $I_A \cdot A$  é obtido como a soma das leituras do sensor varrendo transversalmente a região da abertura, naturalmente sem superposição das posições do sensor.

As medidas óticas são realizadas na área de testes, no período noturno. Optou-se por realizar as medidas durante esse período em lugar de utilizar iluminação natural devido às características do clima da cidade de Recife. A presença permanente de nuvens no céu dessa cidade, como consequência de sua localização litoral, torna bastante difícil e demorado o processo de medidas em equipamentos solares, de forma que para certo tipo de determinações tem-se preferido a iluminação artificial. Interferências como a iluminação do campus universitário, devem ser registradas e levadas em consideração no processamento dos dados.

A cavidade ótica é montada em uma estrutura de suporte que permite variar o ângulo de incidência da radiação luminosa. Como fonte luminosa utiliza-se um projetor de slides de 150 W de potência. As dimensões da fonte luminosa e sua localização, com relação à abertura do coletor, devem satisfazer as condições de pontualidade e paralelismo [45]. A primeira condição pode ser expressa como

$$\frac{d_f}{D_{fc}} \ll \text{tg } \mu \quad (7.2)$$

onde  $d_f$  e  $D_{fc}$  representam o diâmetro da fonte e a distância fonte-concentrador, respectivamente (Figura 7.3).

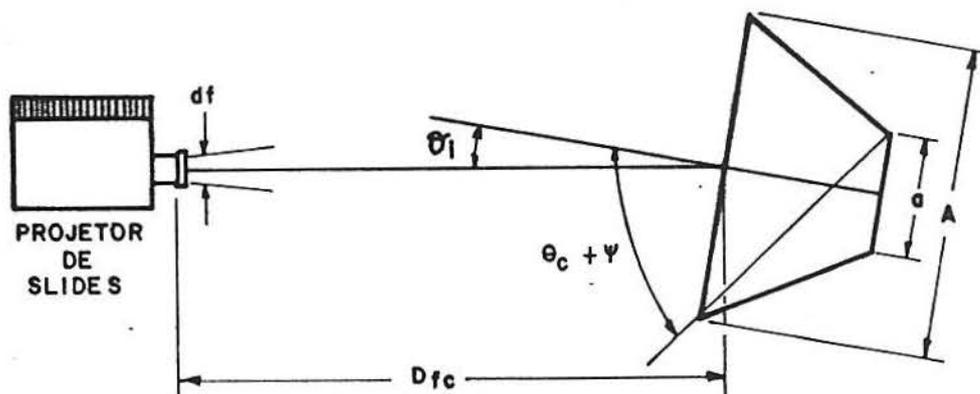


Figura 7.3 Ângulos e dimensões que definem a condição de pontualidade e paralelismo dos raios luminosos.

A condição de paralelismo, analogamente, será válida se a seguinte relação for verificada

$$\frac{A}{2D_{fc}} \ll \text{sen} \frac{\mu}{2} \quad (7.3)$$

Na definição das condições acima adotou-se o critério que o intervalo angular ( $\mu$ ), para os tipos de testes que haverão de ser realizados, é o parâmetro mais significativo do perfil de eficiência ótica da cavidade. Note-se que o ângulo  $\mu$  ( $6,59^\circ$ ) é bastante menor que  $\theta_c + \psi$  ( $53,6^\circ$ ) e exige portanto uma distância bem maior entre fonte luminosa e cavidade que a utilização de  $\theta_c + \psi$  como ângulo de referência. Introduzindo o valor numérico de ( $\mu$ ) na Eq. (7.3),  $D_{fc}$  resulta igual a 26 metros, valor que satisfaz ao mesmo tempo a condição de pontualidade da fonte.

O procedimento descrito é utilizado em vários locais ao longo do eixo para determinar a uniformidade axial da eficiência ótica, tal como ilustra a Figura 7.2. A uniformidade axial, é essencial para evitar uma redução drástica da corrente que circula pelo conjunto de células interligadas em série, corrente que é determinada pela célula com menor nível de iluminação. Com relação aos ângulos de incidência basta, para os efeitos desta experiência, verificar a existência de um razoável grau de uniformidade no intervalo angular ( $\mu$ ), onde a cavidade opera.

#### 7.4 DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE RADIAÇÃO TRANSVERSAL NA REGIÃO DO ABSORVEDOR DA CAVIDADE

De acordo com os critérios de projeto (Seção 5.2), o perfil de radiação através do absorvedor da cavidade deverá ser uniforme dentro do intervalo angular ( $\mu$ ) de ângulos de incidência. A comprovação experimental desta propriedade é da

maior importância quando as cavidades são utilizadas em conjunto com módulos fotovoltaicos (Seção 1.2.1).

Com esse fim foi utilizado um dispositivo experimental que permite obter o perfil de radiação na região do absorvedor [43 e 45]. O sensor de radiação está constituído por uma célula fotovoltaica em curto circuito, montada sobre um parafuso sem fim acoplado a um motor de baixa velocidade (30 rpm). Isto permite uma velocidade de deslocamento uniforme de 7.9 cm/min. A radiação que ilumina a cavidade atinge o sensor de radiação através de uma fenda de um milímetro de largura. O sinal fornecido pelo sensor é amplificado e a saída do amplificador ligada a um registrador gráfico, tal como ilustra a Fig. 7.4.

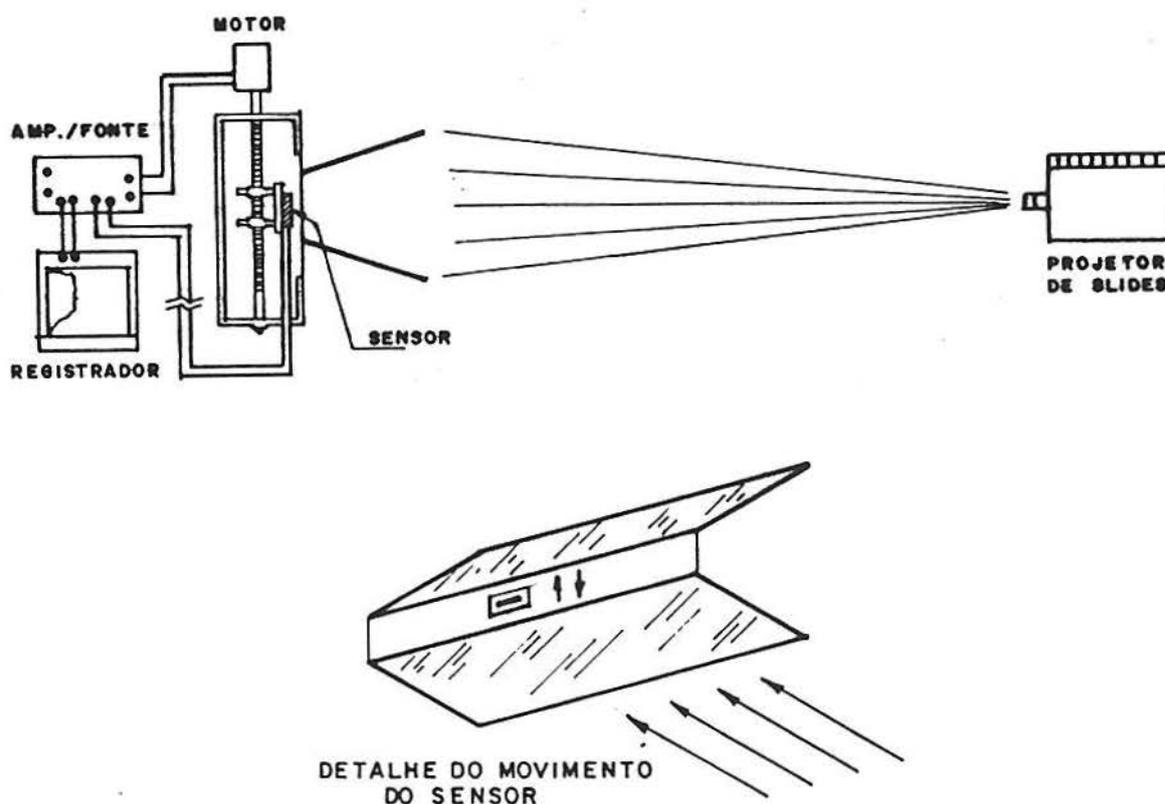


Figura 7.4 Montagem para determinação da distribuição transversal de radiação no absorvedor da cavidade.

A relação entre as ordenadas do registro gráfico e a intensidade de iluminação no absorvedor pode ser obtida da seguinte forma. Denominando  $I(x, \theta_i)$  a densidade de radiação no local  $x$  do absorvedor quando o ângulo de incidência na abertura é igual a  $\theta_i$ , pode-se escrever

$$I(x, \theta_i) = M g(x, \theta_i) \quad (7.4)$$

onde  $g(x, \theta_i)$  é a ordenada do registro gráfico nesse local e  $M$  uma constante de calibração.

Por considerações de conservação de energia, a integral de  $I(x, \theta_i)$  ao longo do absorvedor está relacionada com a energia luminosa que atinge a abertura através de

$$\int_0^a I(x, \theta_i) dx = I_A A \eta_{ot}(\theta_i) \quad (7.5)$$

Substituindo  $I(x, \theta_i)$  da Eq. (7.4) na Eq. (7.5), resulta

$$M \int_0^a g(x, \theta_i) dx = I_A A \eta_{ot}(\theta_i) \quad (7.6)$$

A constante  $M$  será, portanto

$$M = \frac{I_A A \eta_{ot}(\theta_i)}{a \bar{g}} = \frac{C I_A \eta_{ot}(\theta_i)}{\bar{g}} \quad (7.7)$$

onde

$$\bar{g} = \frac{\int_0^a g(x, \theta_i) dx}{a} \quad (7.8)$$

pode ser obtido mediante planimetria do registro gráfico  $g(x, \theta_i)$ . Finalmente,  $I(x, \theta_i)$  pode ser escrito como

$$\frac{I(x, \theta_i)}{I_A} = C \eta_{ot}(\theta_i) \frac{g(x, \theta_i)}{\bar{g}} \quad (7.9)$$

equação que expressa a intensidade local de radiação ( $I$ ) em função da intensidade do registro gráfico ( $g$ ) em cada ponto do absorvedor. No caso particular em que o registro  $g(x, \theta_i)$  é uniforme a Eq. (7.9) resulta igual a

$$\frac{I}{I_A} = C \eta_{ot}(\theta_i) \quad (7.10)$$

Existem duas situações em que a densidade de fluxo de iluminação é uniforme através do absorvedor. A primeira, como já foi analisado, corresponde ao intervalo angular ( $\mu$ ) e a segunda, ao ângulo de incidência em que os primeiros modos de reflexão desaparecem da cavidade. Ambos casos serão ilustrados no próximo capítulo (Seção 8.3).

## 7.5 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO GERADOR FOTOVOLTAICO

O comportamento dinâmico do gerador fotovoltaico depende das variações do nível de iluminação. Para um melhor conhecimento dessa relação, foi determinado um conjunto de curvas características para uma variedade de valores da irradiância, condicionados pela natureza do recurso meteorológico local. Cada curva característica está definida pelo valor da temperatura do módulo e da irradiância incidente no plano de abertura. Estas curvas são obtidas em condições de iluminação natural, com exposição direta sobre o módulo

(sem concentração) e através da cavidade (com concentração), utilizando o arranjo mostrado na Fig. 7.5.

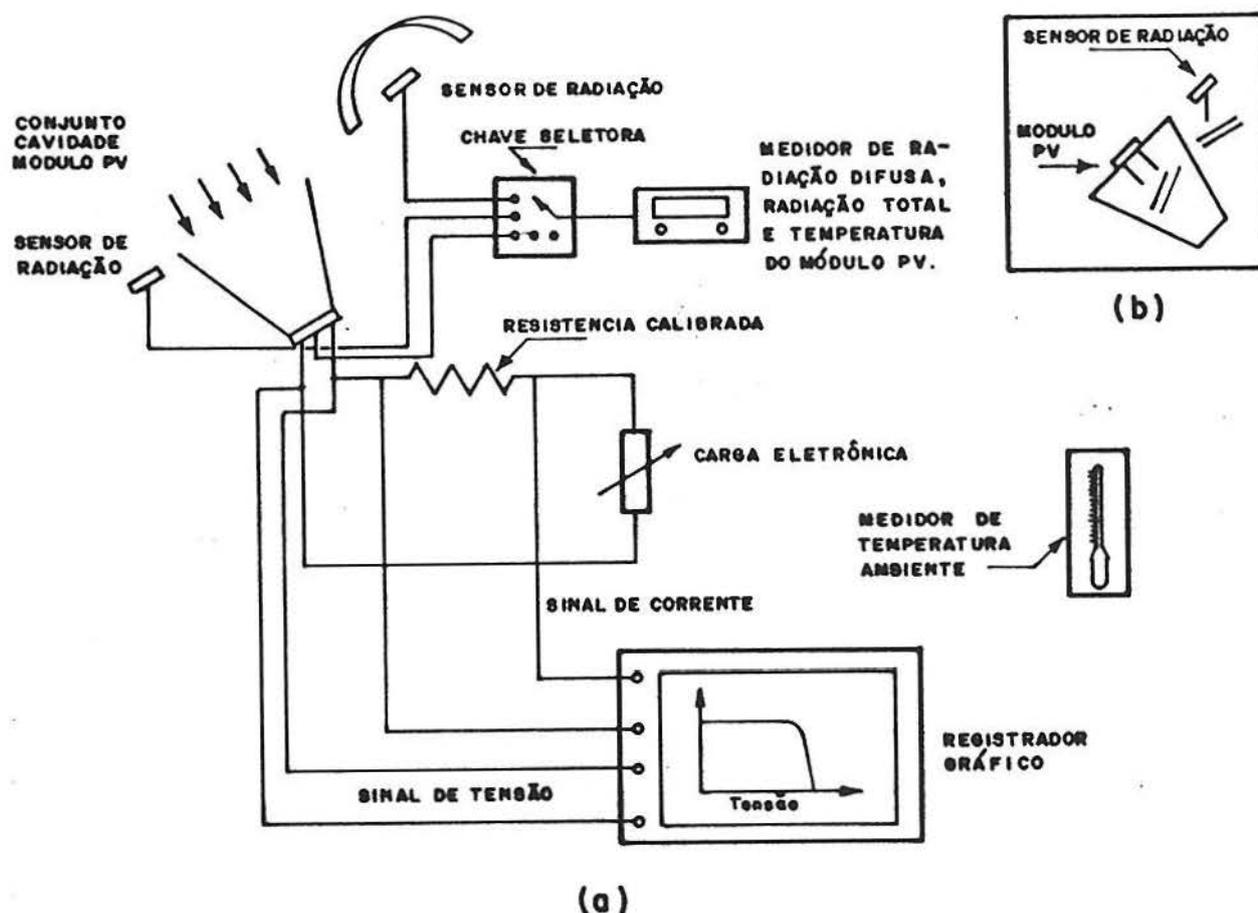


Figura 7.5 Configuração do sistema experimental para obtenção das curvas características: a) do conjunto cavidade-módulo PV e b) do módulo PV.

Uma carga eletrônica permite variar a impedância "vista" pelo gerador fotovoltaico, cuja saída elétrica descreve a relação de corrente versus tensão. A tensão varia desde o ponto de curto-circuito até o ponto de circuito aberto, em um intervalo de tempo relativamente curto durante o qual o nível de

iluminação permanece constante. A rigor, a varredura em tensão da carga eletrônica inclui valores negativos, a fim de compensar a queda de voltagem na fiação do circuito gerador-carga. Este efeito é minimizado, ligando a fiação que registra a tensão no local mais próximo da saída do gerador [41]. A curva tensão-corrente (V-I) é obtida em um registrador gráfico X-Y. Os terminais do gerador estão ligados ao canal X, registrando portanto sua tensão de saída. Os terminais de uma resistência calibrada, inserida em série com o módulo fotovoltaico, fornecem uma tensão proporcional à corrente e estão ligados ao canal Y.

Durante os testes com concentrador são monitoradas a radiação solar total e a radiação solar difusa no plano de abertura, acompanhando o movimento do Sol ( $\theta_i = 0$ ). Configuração análoga é adotada nos testes sem concentração, localizando o módulo no plano de abertura da cavidade e monitorando, neste caso, a radiação total apenas. A radiação total e difusa são medidas com sensores fotovoltaicos conectados a um milivoltímetro, através de uma chave seletora. Os sensores foram calibrados com um piranômetro Eppley, tipo PSP (Precision Spectral Pyranometer).

A configuração experimental adotada permite medir em forma direta a insolação coletada pelo módulo PV sem concentração, dado que o sensor de radiação e a abertura do módulo se encontram no mesmo plano. No entanto, a radiação coletada pelo conjunto cavidade-módulo PV pode ser estimada a partir das medidas de radiação total ( $I_A$ ) e difusa ( $I_{dA}$ ) no plano de abertura da cavidade. A radiação direta será

$$I_{bA} = I_A - I_{dA} \quad (7.11)$$

e a radiação coletada por uma cavidade concentradora pode ser aproximada pela equação

$$I_c = I_{bA} + \frac{I_{dA}}{C} = I_A - I_d \left( 1 - \frac{1}{C} \right) \quad (7.12)$$

obtida em função dos valores de radiação medidos. Na literatura sobre concentradores de baixa relação de concentração é habitual expressar as diversas grandezas físicas em função da radiação coletada (Eq.(7.12)), a fim de obter maior consistência na representação dos resultados [46]. Este tipo de representação é utilizada, no próximo capítulo, na análise dos testes diários.

Em ambos tipos de testes, com e sem concentração, registra-se também a temperatura do módulo. As medidas de temperatura foram realizadas com termopares localizados na parte inferior externa da primeira e segunda célula do conjunto fotovoltaico de cinco células. As extremidades dos termopares estão inseridas no interior de um disco metálico de pequenas dimensões que por sua vez se encontra fazendo um bom contato térmico com o filme de tedlar que encapsula as células pela parte inferior. O disco metálico está aderido ao filme de tedlar por meio de uma cobertura de borracha de silicone. O conjunto assim constituído provê os termopares de uma certa inércia térmica e os isola do efeito de esfriamento direto provocado pelo vento.

## 7.6 CARACTERIZAÇÃO DA CARGA ELETRÔNICA

Os testes do sistema fotovoltaico foram realizados acoplado o gerador a uma carga cujo ponto de operação está

definido por uma tensão fixa. A tensão e corrente na saída do gerador, acoplado à carga eletrônica, foram monitoradas durante os testes diários, de acordo com o esquema mostrado na Fig. 7.6 (Seção 7.7).

Durante os testes a tensão  $U = V_0$  permanece aproximadamente constante e a corrente varia com o nível de iluminação do módulo fotovoltaico. Uma análise estatística dos resultados fornece os valores médios da tensão utilizada durante os testes e seu grau de variabilidade.

## 7.7 TESTES DE DESEMPENHO DIÁRIO

Através desta experiência avalia-se o desempenho do sistema fotovoltaico em condições de operação real, registrando o fluxo de radiação solar e de energia elétrica ao longo do tempo. As informações obtidas durante os testes diários permitem, além de fazer uma avaliação do desempenho a longo prazo do conjunto fotovoltaico, estudar aspectos parciais do funcionamento do sistema que contribuem para uma melhor compreensão dos fenômenos físicos associados ao processo de conversão de energia. Por exemplo a análise do comportamento estatístico da radiação coletada, da variação da temperatura do módulo fotovoltaico com o nível de radiação ou a variabilidade da tensão da carga eletrônica complementam e enriquecem os resultados obtidos com os testes de caracterização dos componentes do sistema fotovoltaico.

Devido a que as grandezas a serem monitoradas tem, em condições normais, caráter aleatório o procedimento de medida

inclui sua integração ao longo do tempo. No entanto, as grandezas integradas são registradas em períodos relativamente curtos, possibilitando assim ter informação também sobre seu grau de variabilidade.

A configuração do conjunto experimental está mostrada na Fig. 7.6.

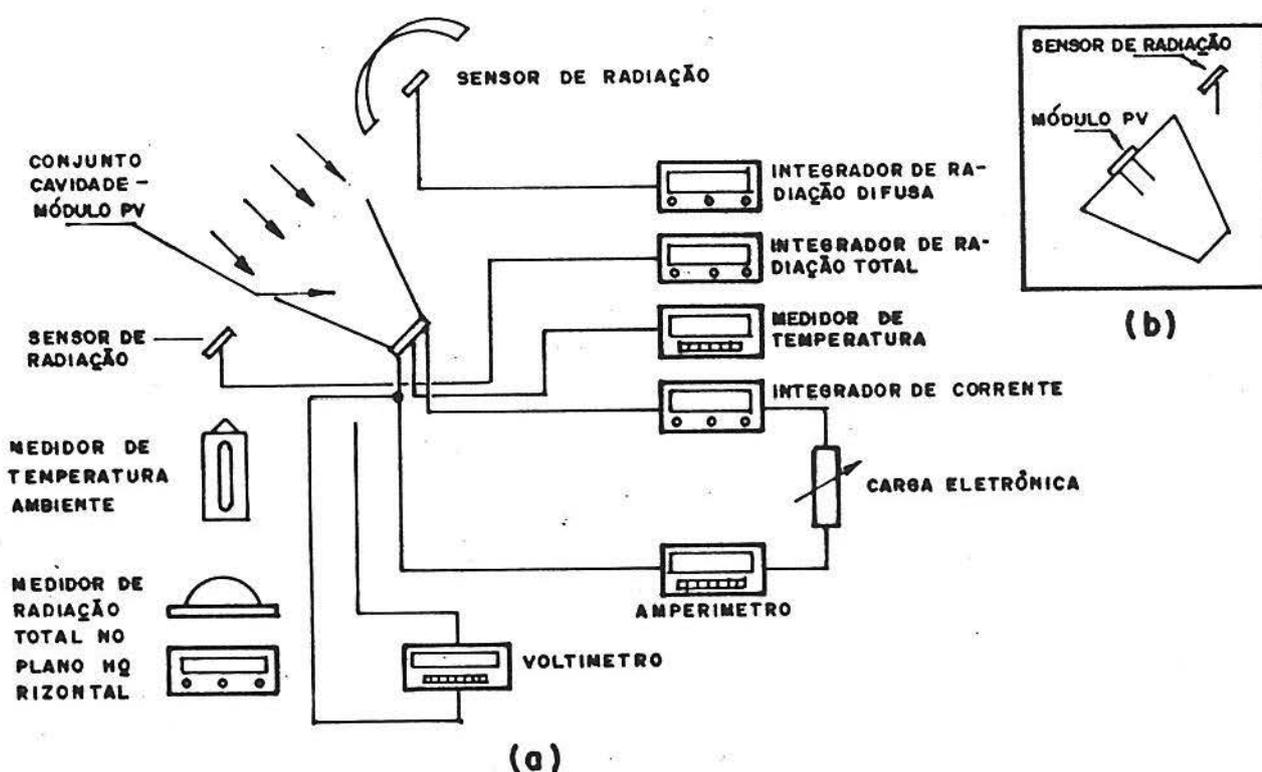


Figura 7.6 Esquema do arranjo experimental para realização de testes diários: (a) do conjunto cavidade-módulo PV e (b) do módulo PV.

Os testes diários tem uma duração de 8 horas, no período das 8 as 16 horas, durante as quais são registradas, com intervalos de 15 minutos, as variáveis acima mencionadas. Uma

planilha típica com dados da primeira hora de observação é mostrada a seguir.

Tabela 7.1 Planilha de registro de dados. Testes com cavidades tipo V, movimento Norte-Sul

Data: 04-01-93

Hora inicial: 8 hs

Hora final: 16 hs

Intervalo entre medidas: 15 min

Responsável: Marcelo

Radiação no Plano										
Hora (h)	Horiz.	Coletor		Tensão (V)	Corr. (A)	Amp. Hora (Ah)	Temperatura			Ângulo Rastr. (°)
	Total (Wh/m <sup>2</sup> )	Total (Ly/h)	Difusa				Tc1 (mV)	Tc2 (°C)	Tamb (°C)	
8:00	0	0	0	—	—	0,00	—	—	—	—
8:15	76	06	04	1,85	2,27	0,22	0,59	0,59	25,0	42
8:30	176	16	07	1,86	2,75	0,57	0,87	0,84	25,0	39
8:45	310	28	11	1,82	0,77	0,98	0,72	0,72	25,5	36
9:00	476	44	15	1,85	2,62	1,55	1,10	1,10	25,5	29
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

O processamento dos dados requer de alguns esclarecimentos. Os registros da radiação solar são valores integrados e por tanto o valor médio, ao longo do k-ésimo intervalo de duração ( $\tau$ ), seja este de 15 minutos, 1 hora ou 1 dia, é calculado de acordo com

$$I_k^\tau = \frac{H_{k+1} - H_k}{\tau} \quad (7.13)$$

onde  $H_{k+1}$  é o valor indicado pelo instrumento integrador de radiação ao longo do período ( $k\tau$ ). O procedimento é válido tanto para radiação total como difusa.

A energia elétrica gerada ao longo do período ( $k\tau$ ) é calculada utilizando todas as leituras de 15 em 15 minutos, de acordo com

$$E_{k+1} = \sum_{j=1}^k \frac{V_j + V_{j+1}}{2} \int_{(j-1)15 \text{ min}}^{(j)15 \text{ min}} I dt \quad k \geq 2 \quad (7.14)$$

que expressado em função da leitura dos instrumentos pode ser escrito como

$$E_{k+1} = \sum_{j=1}^k \bar{V}_j (Ah_{j+1} - Ah_j) \quad k \geq 2 \quad (7.15)$$

onde

$$\bar{V}_j = \frac{V_{j+1} + V_j}{2} \quad (7.16)$$

e  $Ah_{j+1}$  é a leitura do integrador de corrente ao longo de período ( $j.15\text{min}$ ). Valores médios da potência podem ser calculados através da expressão

$$P_k^\tau = \frac{E_{k+1} - E_k}{\tau} \quad (7.17)$$

para o intervalo  $[(k-1)\tau, k\tau]$ .

Na próxima Seção serão descritos os instrumentos, equipamentos e sensores que fazem parte do sistema experimental estudado.

## 7.8 INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

### A TESTES ÓTICOS

#### EFICIÊNCIA ÓTICA

Fonte de luz: projetor de slides, 150 W de potência;

Sensor de radiação: módulo fotovoltaico de cinco fotocélulas,  $\phi = 10$  cm, em curto circuito;

Amplificador de tensão DC: desenvolvido no laboratório do Grupo FAE-UFPE;

Multímetro digital: marca Keithley, modelo 179 A, 4½ dígitos, precisão média na escala de 200 mV, 100  $\mu$ V.

#### PERFIL DE RADIAÇÃO NO ABSORVEDOR

Fonte de luz: projetor de slides, 150 W de potência;

Sensor de radiação: módulo fotovoltaico de cinco fotocélulas,  $\phi = 10$  cm, em curto-circuito;

Amplificador de tensão DC: desenvolvido no laboratório do Grupo FAE-UFPE;

Registrador gráfico: Tipo X-t, marca ECB, modelo RB 101, sensibilidade, 1 mV plena escala.

### B TESTES ELÉTRICOS

#### B.1 DETERMINAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

##### MEDIDAS SOLARIMÉTRICAS

Piranômetro Eppley, modelo PSP, sensibilidade 9  $\mu$ V/W/m<sup>2</sup> e integrador eletrônico digital com impressora, marca

Digitec, série HT, modelo 413-6140. Intervalo de impressão: 1, 10 e 60 minutos;

Dois sensores fotovoltaicos Fonemat, modelo FM-SM-84 e milivoltímetro digital Engro, modelo DPM 2500, série 785, 4½ dígitos, alcance 199,99 mVCC, ligado a chave seletora de 10 canais, Engro, modelo 4800.

## MEDIDAS ELÉTRICAS

Registrador gráfico X-Y, Hewlett-Packard, modelo 7046 B, sensibilidade 25 mV/cm;

Carga eletrônica, tensão regulável. Tensão máxima, 50 V; corrente máxima, 15 A; potência máxima, 200 W;

Shunt, marca Hartmann & Braun, modelo N 4050, escala 10 A/60mV.

## MEDIDAS DE TEMPERATURA

Termômetro de bulbo para medida de temperatura ambiente;

Termopares de cobre-constantan e milivoltímetro digital Engro, modelo DPM 2500, série 785, ligado a chave seletora de 10 canais, marca Engro, modelo 4800.

## B.2 TESTES DE DESEMPENHO DIÁRIO

### MEDIDAS SOLARIMÉTRICAS

Piranômetro Eppley, modelo PSP, sensibilidade 9  $\mu\text{V/W/m}^2$  e integrador eletrônico digital com impressora, marca Digitec, série HT, modelo 413-6140. Intervalo de impressão: 1, 10 e 60 minutos;

Dois sensores fotovoltaicos de radiação solar, marca FONEMAT, modelo FM-SM-84 e os respectivos integradores de registros solarimétricos, marca FONEMAT, modelo FM-CAh-81-MU.

#### **MEDIDAS ELÉTRICAS**

Dois multímetros, marca Keithley, modelo 179A, 4½ dígitos, para realizar medidas de tensão e corrente do conjunto fotovoltaico;

Integrador de corrente, marca FONEMAT, modelo FM-CAh-80;

Carga eletrônica, tensão regulável. Tensão máxima, 50V; corrente máxima 15A, potência máxima, 200W.

#### **MEDIDAS DE TEMPERATURA**

Termômetro de bulbo para medida de temperatura ambiente;

Termopares de cobre-constantan e milivoltímetro digital Engro, modelo DPM 2500, série 785, ligado a chave seletora de 10 canais, marca Engro, modelo 4800.

## CAPÍTULO 8

### RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão expostos e discutidos os resultados obtidos com os procedimentos de caracterização de componentes e de teste do conjunto fotovoltaico. Em primeiro lugar será mostrada a variação das grandezas físicas ao longo de um dia, variação que ilustra o comportamento geral do sistema estudado. A apresentação dos resultados na escala de tempo de nossos registros, 15 minutos, permite constatar a forte variabilidade das grandezas monitoradas. Os fenômenos que ocorrem durante o processo de conversão de energia são analisados a partir dos resultados dos testes de caracterização ótica e elétrica dos componentes do sistema. Com esta finalidade determinam-se a eficiência ótica da cavidade tipo V, o fluxo de radiação na região do absorvedor e a eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica do conjunto fotovoltaico, para diversos níveis de radiação solar. Os resultados dos testes óticos são comparados com as previsões teóricas derivadas na primeira parte deste trabalho. Finalmente, são apresentados os resultados dos testes diários, que permitem comparar as configurações do sistema trabalhando com e sem concentração e avaliar seu desempenho a longo prazo.

## 8.1 COMPORTAMENTO DO CONJUNTO FOTOVOLTAICO AO LONGO DE UM DIA TÍPICO

O regime de trabalho do módulo fotovoltaico, sujeito a fortes variações da insolação, responde com bruscas flutuações da corrente e da potência elétrica. Adicionalmente, o uso de concentradores amplifica as flutuações, acentuando o caráter fortemente dinâmico das grandezas físicas envolvidas no processo de conversão fotovoltaica. As variáveis monitoradas ao longo de um dia, insolação, energia elétrica gerada pelo módulo fotovoltaico e temperatura estão representadas, de 15 em 15 minutos, na Fig. 8.1.

Observa-se, às 13 horas, que a irradiância na abertura, valor médio de 15 minutos, é superior a  $1300 \text{ W/m}^2$ , seguida de uma brusca redução,  $250 \text{ W/m}^2$ , na sua intensidade. A potência elétrica apresenta comportamento análogo, acompanhando as variações da irradiância com um pico e uma rápida redução de intensidade. A temperatura apresenta variações mais suaves, indicativas de efeitos de inércia térmica.

Valores elevados da irradiância ocorrem com considerável frequência em regiões onde se combinam céus claros com presença de nuvens, característica típica do céu de Recife. Certas configurações de nuvens podem concentrar a radiação solar, aumentando significativamente o valor de irradiância observado na superfície terrestre. Logo após, as mesmas nuvens podem bloquear a radiação, produzindo uma diminuição da intensidade. Estas flutuações, visíveis na escala de tempo utilizada neste estudo, deixam de ser observáveis quando as medições ou, em forma equivalente, as médias são realizadas em escalas de tempo de uma hora ou maiores. Estudos solarimétricos

realizados com diversas escalas de tempo confirmam esse comportamento [47].

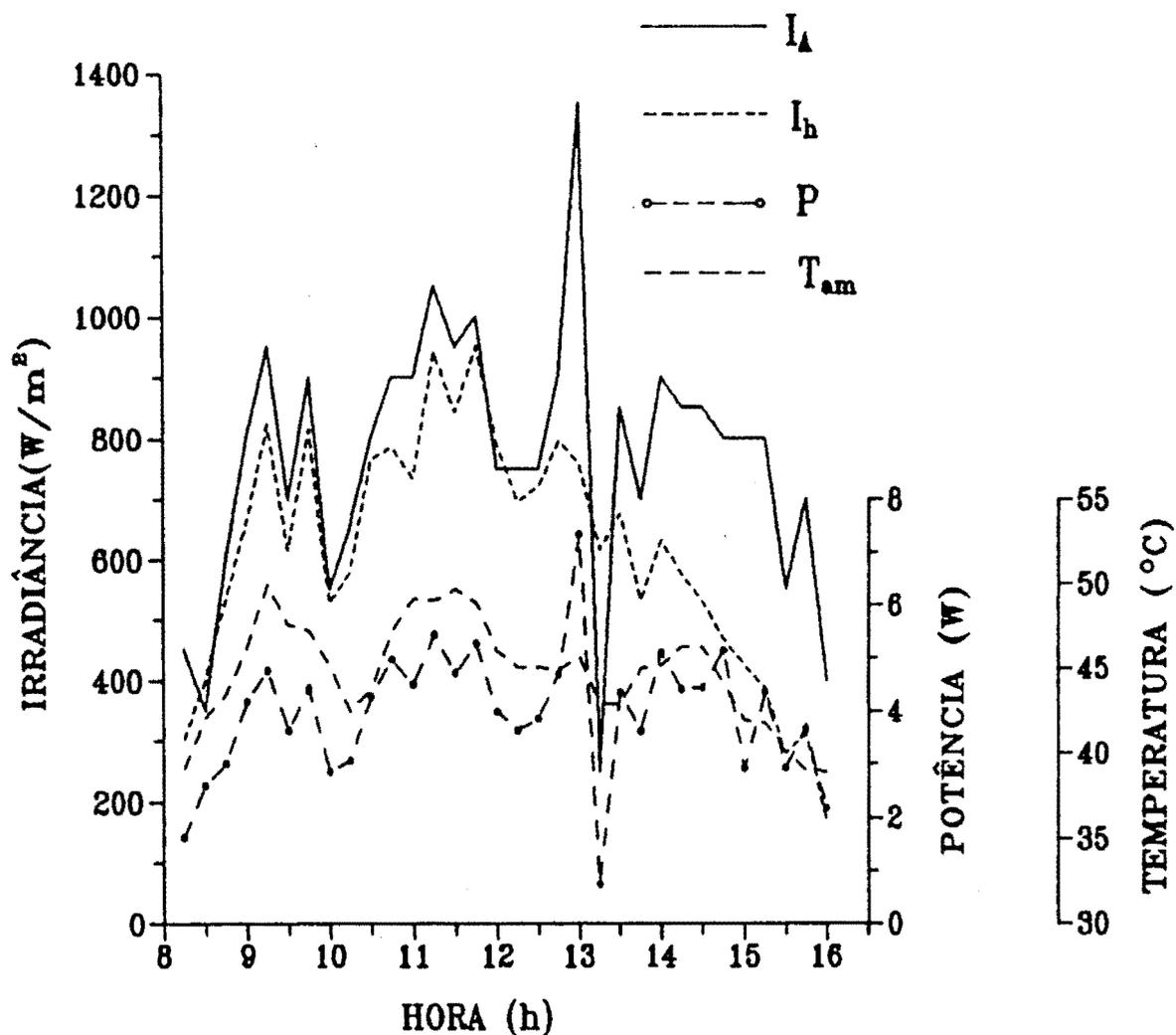


Figura 8.1 Perfil de insolação, potência elétrica e temperatura ao longo de um dia típico. Irradiância no plano de abertura, ( $I_A$ ); Irradiância no plano horizontal ( $I_h$ ); Potência elétrica ( $P$ ); Temperatura do módulo ( $T$ ).  
 $U = 1,85$  Volts.

As médias horárias da radiação solar (Fig. 8.2), medidas no plano horizontal e na abertura da cavidade apresentam intensidades máximas de  $883 \text{ W/m}^2$  e  $939 \text{ W/m}^2$ , respectivamente, valores estes consideravelmente menores que os registrados em intervalos de 15 minutos (os valores análogos são iguais a  $952 \text{ W/m}^2$  e  $1352 \text{ W/m}^2$ ). A potência elétrica registra máximos de  $7,3 \text{ W}$  e  $8,9 \text{ W}$ , em coincidência com o máximo de radiação, para valores médios de 15 minutos ou horários, respectivamente.

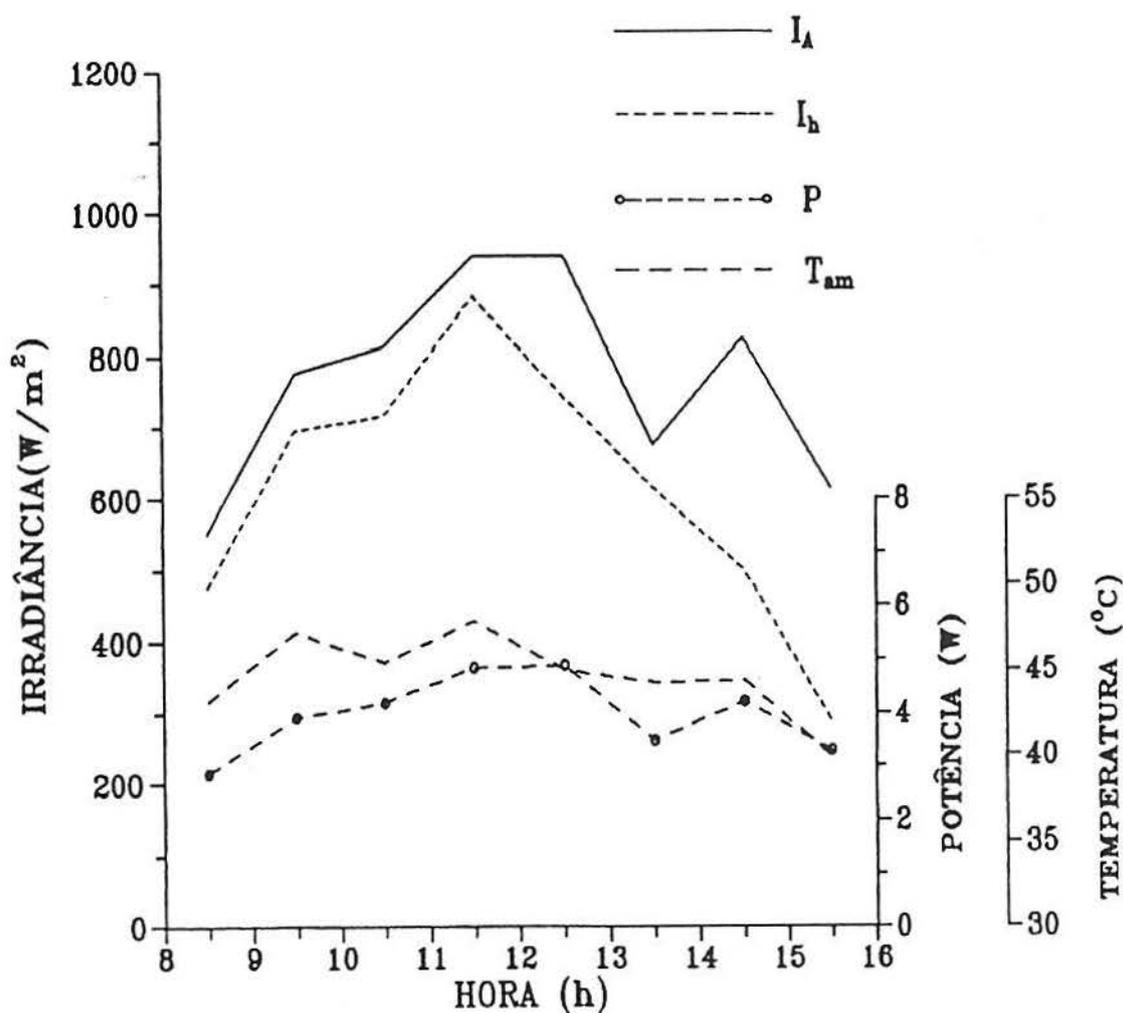


Figura 8.2 Médias horárias da irradiância, potência elétrica e temperatura ao longo de um dia.

Um resumo dos valores médios de radiação, calculados nas diversas escalas de tempo, incluindo as médias diárias estão mostrados na tabela a seguir.

Tabela 8.1 Valores médios máximos no plano horizontal e da abertura, da irradiância e potência elétrica em diversas escalas de tempo.

Valores médios máximos e diários da								
Irradiância (W/m <sup>2</sup> )						Potência elétrica (W)		
Plano horizontal			Plano abertura					
15 min	Hora	Dia	15 min	Hora	Dia	15 min	Hora	Dia
952	883	615	1352	939	767	7,3	4,9	4,0

Os valores diários da irradiância mostram um aumento de 28.7 % da energia coletada no plano de abertura em relação ao plano horizontal. Na próxima seção serão analisadas as características solarimétricas que, associadas à movimentação do coletor, possibilitam esse aumento.

### 8.1.1 EFEITO DO ACOMPANHAMENTO DO MOVIMENTO DO SOL

A comparação dos registros solarimétricos no plano horizontal, fixo, e no plano de abertura do conjunto FV mostram o aumento na coleção de energia devido ao efeito de rastreamento. Este efeito é particularmente importante a partir das 14 horas. No período central do dia, antes e depois da passagem pelo meridiano local, a coleção em ambas superfícies é aproximadamente igual, devendo se esperar diferenças importantes

a favor do rastreamento nos períodos do início e fim do dia. Naturalmente estes benefícios estão condicionados pela composição da radiação total, desde que o mecanismo de rastreamento não apresenta vantagens no que se refere à coleção da componente difusa da radiação. O efeito do movimento do coletor sobre essa componente da radiação pode ser analisado como segue.

A radiação difusa "vista" pelo plano de abertura do rastreador pode ser escrita como

$$I_{dA} = I_{dh} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho_s I_h \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (8.1)$$

onde

$\rho_s$  é a refletividade do solo;  
 $\beta$  a inclinação do plano de abertura do módulo FV e  
 $(1 + \cos \beta) / 2$  e  
 $(1 - \cos \beta) / 2$  as frações do céu e da radiação refletida pelo solo, vistas pela abertura do módulo.

Portanto, a relação  $I_{dA}/I_{dh}$  é igual a

$$\frac{I_{dA}}{I_{dh}} = \frac{1 + \cos \beta}{2} + \frac{\rho_s I_h}{I_{dh}} \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (8.2)$$

Para o tipo de solo em torno do equipamento estudado, recomendam-se valores da ordem de 0,2 para  $\rho_s$  (solos de baixa refletividade) [38]. Valores médios diários da relação  $I_{dh} / I_h$ , na cidade de Recife no mês de novembro, foram obtidos mediante uma versão mais recente do modelo de simulação descrito no Cap. 5 (FV-FAE [48]) e se encontram tipicamente no intervalo de 0,15 a 0,30, com um valor médio diário igual a 0,20. Conclui-se

portanto que a relação  $I_{dA} / I_{dh}$  é aproximadamente igual a 1. O benefício do rastreamento advém, por conseguinte, da maior coleção da componente direta. Resultados similares são obtidos com o modelo de simulação (FV-FAE) acima mencionado, confirmando que a radiação difusa no plano de abertura do coletor com rastreamento e no plano horizontal são praticamente iguais.

O efeito do rastreamento pode ainda ser ilustrado a partir da variação da energia coletada, ao longo das 8 horas de observação, nos planos horizontal e da abertura (Fig. 8.3).

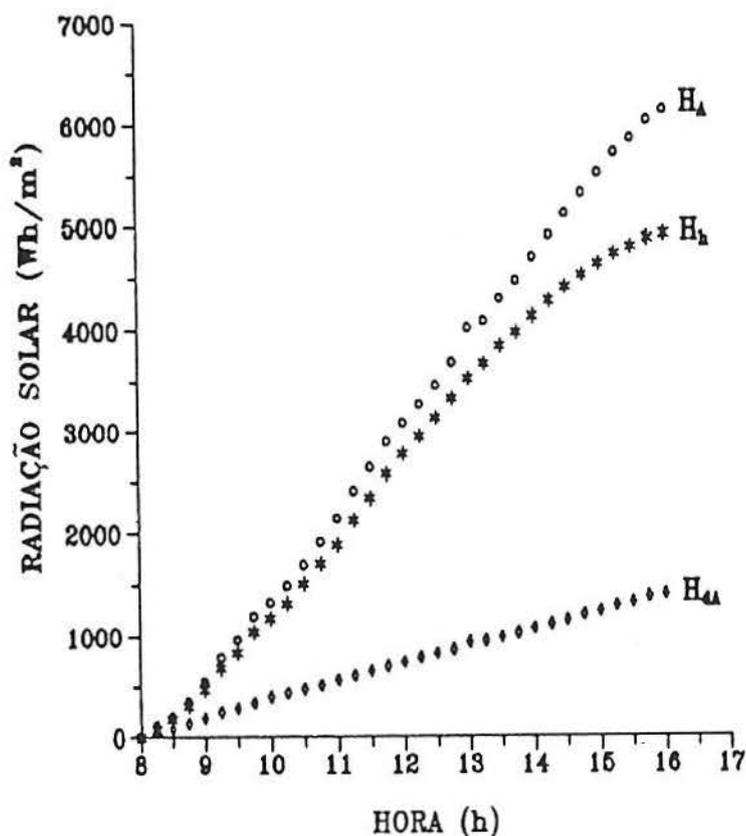


Figura 8.3 Radiação solar global no plano horizontal e radiação solar global e difusa, coletada na abertura da cavidade. Variação ao longo do dia.

A evolução da radiação no plano horizontal mostra a redução, a partir das 14 horas, da taxa de crescimento devido ao fator coseno, enquanto que no perfil da radiação coletada pela abertura da cavidade a taxa de crescimento é aproximadamente constante. Verifica-se que a maior diferença entre as energias coletadas ocorre no período do fim do dia. Cabe mencionar que o sol passa pelo meridiano local as 11:30 hs, de forma que os benefícios do rastreamento no início do dia não são tão visíveis quanto o seriam se as primeiras horas da manhã estivessem representadas. O perfil da radiação difusa, coletada pela cavidade, cresce linearmente e pelos motivos anteriormente mencionados pode-se considerar que a radiação difusa no plano horizontal segue uma evolução análoga. A relação entre as quantidades totais de energia mostra um benefício, devido ao rastreamento, de 24,8%. No entanto o aumento na coleção de radiação direta é igual a 30,7%. Valores para dias específicos superiores ao valor médio de 31%, estimado para a cidade de Recife [6], são possíveis dado que a energia coletada além das 8 horas de observação aqui registradas é uma fração importante da energia coletada total. Pode-se concluir, finalmente, que aumentos na coleção de energia, resultantes do acompanhamento do sol, só serão significativos em climas onde a componente direta da radiação solar seja importante. Estes resultados serão ilustrados posteriormente, desde um ponto de vista estatístico, na Seção 8.6.1.

No que diz respeito ao uso de cavidades concentradoras, a maior variação percentual na coleção de radiação direta (30,7% vs. 24,8%) tem considerável importância, já que em última instância o benefício líquido da configuração

que está sendo estudada deve ser medido pelo aumento na quantidade de energia que atinge o absorvedor por  $m^2$  de abertura da cavidade, quando comparado com a radiação incidente por  $m^2$  de superfície horizontal, por exemplo. Cabe estimar, portanto, o nível de radiação na superfície do módulo fotovoltaico, que devido ao efeito de concentração atinge valores consideravelmente altos.

### 8.1.2 RADIAÇÃO NA SUPERFÍCIE DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

O módulo fotovoltaico utilizado está constituído por células de tipo convencional, adequadas para trabalhar com níveis de irradiância habituais em equipamentos sem concentração ( $I_A \approx 1 \text{ kW/m}^2$ ). A associação dos módulos com cavidades concentradoras estabelece condições operacionais bastante exigentes para as células solares, como será visto a seguir.

O fluxo de radiação incidente na superfície dos módulos fotovoltaicos pode ser obtido, aproximadamente, de acordo com o seguinte procedimento. A energia solar incidente na abertura, expressada em função de suas componentes direta e difusa, é igual a

$$E_A = A(I_{bA} + I_{dA}) \quad (8.3)$$

Por outro lado, a energia que atinge o absorvedor está afetada pela eficiência ótica da componente direta e a eficiência ótica da componente difusa da radiação (ou seu equivalente, o fator de intercâmbio radiante),

$$E_a = A[I_{bA}\eta_{otb}(\theta_i) + I_{dA}E_{Aa}] \quad (8.4)$$

onde  $\eta_{otb}(\theta_i)$  é a eficiência ótica da cavidade para radiação direta (Seção 4.3). Devido ao rastreamento, a incidência dos raios luminosos é aproximadamente normal à abertura e portanto o ângulo  $\theta_i$  aproximadamente zero.  $E_{Aa}$  é o coeficiente de intercâmbio radiante entre abertura e absorvedor (Seção 4.3). A densidade de radiação "vista" pelo absorvedor será portanto, igual a

$$I_a = \frac{E_a}{a} = C(I_{bA} \eta_{otb}(0) + I_{dA} E_{Aa}) \quad (8.5)$$

A eficiência ótica pode ser calculada a partir da expressão

$$\eta_{otb}(\theta_i) = P_o(\theta_i) + P_1^D(\theta_i)\rho[\theta^D(1)] + P_1^E(\theta_i)\rho[\theta^E(1)] \quad (8.6)$$

Considerando  $\theta_i = 0$  e utilizando os valores constantes na Tab. 8.2 a eficiência ótica resulta igual a

$$\eta_{otb}(0) = 0,722$$

O valor de  $E_{Aa}$  é igual a 0,376 (Tab. 8.2). Uma expressão mais completa para o cálculo da eficiência ótica, que leva em consideração o modificador do ângulo de incidência, será introduzida na Seção 8.2. Valores de  $I_a$ , obtidos a partir da Eq. (8.5) e de  $I_A$  e  $I_{DA}$  (Tab. C.1, Apêndice C) estão mostrados na Fig. 8.4.

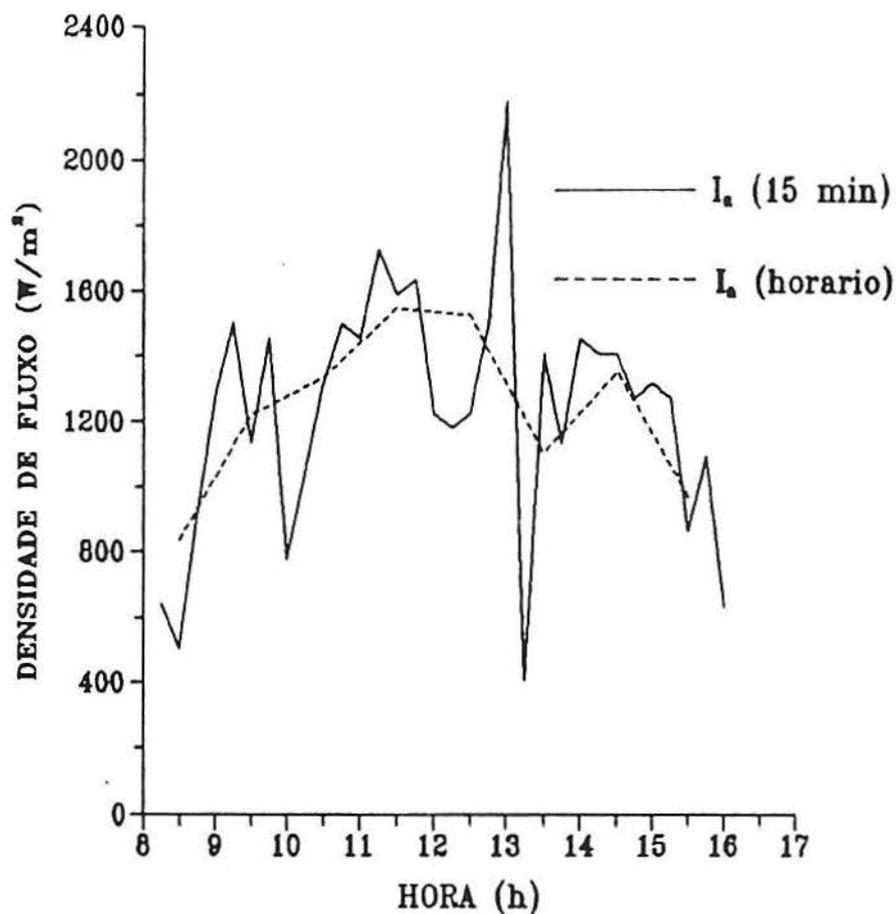


Figura 8.4 Variação da irradiância na superfície do absorvedor ao longo do dia. Valores médios de 15 minutos e horários.

Na superfície do módulo ou absorvedor, podem ser observados valores máximos da densidade de radiação da ordem de 2185  $\text{W/m}^2$ . Correlativamente, as correntes e potências geradas pelo módulo fotovoltaico são consideravelmente elevadas, como pode ser constatado a partir da Fig. 8.1 e Tab. C.1. Às 13 hs a corrente  $I = 4 \text{ A}$  e a potência  $P = 7,34 \text{ W}$ , enquanto que a corrente e potência nominal do módulo fotovoltaico, operando em

condições padrão (1000W/m<sup>2</sup> e 25°C) são iguais a 2.27 A e 5,11 W. Cabe mencionar que os valores de radiação citados ocorrem durante curtos períodos de tempo já que a média horária máxima e a média diária são consideravelmente menores, 1545 W/m<sup>2</sup> e 1233 W/m<sup>2</sup> respectivamente. Não obstante, devido a que se trata de um regime de trabalho bastante diferente ao convencional, estudos sobre o envelhecimento dos módulos trabalhando nessas condições são recomendáveis.

### 8.1.3 POTÊNCIA ELÉTRICA E EFICIÊNCIA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

As variações da potência elétrica, valores médios de 15 minutos, acompanham de forma geral as variações de irradiância na abertura e no absorvedor (Fig. 8.1).

A eficiência de conversão de energia solar em elétrica do conjunto fotovoltaico pode ser estimada como

$$\eta = \frac{P}{I_A A} \quad (8.7)$$

onde P e I<sub>A</sub> são determinados experimentalmente. A Eq. (8.7) é válida para os diversos intervalos temporais considerados nesta análise. O valor médio diário calculado é igual 3,25%, variando entre um valor mínimo de 3,17% e máximo de 3,36% para intervalos horários, como pode ser visto na Tab. C.1. Os dados constantes na mesma tabela mostram também que os valores correspondentes a intervalos de 15 minutos apresentam uma variabilidade bem maior que os valores que correspondem a intervalos horários.

A eficiência média do conjunto fotovoltaico pode ser calculada como o produto da eficiência de conversão do módulo fotovoltaico e a eficiência ótica do concentrador

$$\eta = \frac{P}{AI_A} = \frac{P}{aI_a} \frac{aI_a}{AI_A} = \eta_{PV}\eta_{ot} \quad (8.8)$$

Uma análise preliminar destes fatores é feita a seguir. Segundo dados de fabricante, a eficiência padrão do módulo fotovoltaico referida a uma área de coleção de 0,064 m<sup>2</sup> é igual a 7,98% (ou seja uma potência elétrica de 5,11 W para uma incidência de 64 W de radiação solar). Cabe mencionar que o valor de 7,98% inclui o fator de ocupação do módulo, igual a

$$FO = \frac{N_c A_f}{A_m} \quad (8.9)$$

onde  $N_c$  é o número de células fotovoltaicas,  $A_f$  a superfície de cada célula e  $A_m$  a superfície do módulo. Introduzindo os valores já definidos FO resulta igual 0,617, de forma que a eficiência da fotocélula referida a sua área ( $A_f$ ) é igual a 12,94%, valor que se encontra dentro do intervalo de eficiências de células solares de características comerciais. A eficiência ótica do concentrador pode ser estimada ponderando as componentes direta e difusa da radiação. Os dados solarimétricos do dia que está sendo analisado mostram que o valor diário da radiação difusa foi igual a 22,8% do total e portanto, pode-se escrever

$$\eta_{ot} = 0,772 \cdot 0,724 + 0,228 \cdot 0,376 = 0,645$$

de forma que a eficiência média de conversão do conjunto fotovoltaico resulta igual a

$$\eta = 0,0798 \cdot 0,645 = 0,0515$$

Introduzindo ainda a variação da eficiência com a temperatura, que diminui a razão de 0,4 a 0,5% por °C [47-49] (vide Seção 8.4, Eq. (8.22)), para um acréscimo médio diário de 20 °C acima do valor de referência ( $T_r = 25^\circ\text{C}$ )  $\eta$  resulta ser igual a 0,046. A diferença com o valor médio diário da eficiência calculada em base aos resultados experimentais deve-se, como será visto nas próximas seções, a que o valor da eficiência das células em condições de trabalho real é consideravelmente menor que a estimada a partir de dados do fabricante. Outro fator que contribui a explicar a diferença observada é a redução da densidade de fluxo de radiação devido a absorção da cobertura para ângulos de incidência fora da normal (modificador do ângulo de incidência). Sua influencia será considerada na próxima seção.

## 8.2 CARACTERIZAÇÃO ÓTICA DA CAVIDADE TIPO V

Utilizando o procedimento descrito na Seção 7.3 foi obtida a curva de eficiência ótica da cavidade, cujos resultados estão representados na Fig. 8.5. O perfil de eficiência ótica apresenta uma região uniforme em torno da origem, cuja largura é aproximadamente igual a 7°. A partir dessa região a eficiência ótica diminui e se anula para um valor de  $\theta_i \approx 50^\circ$ .

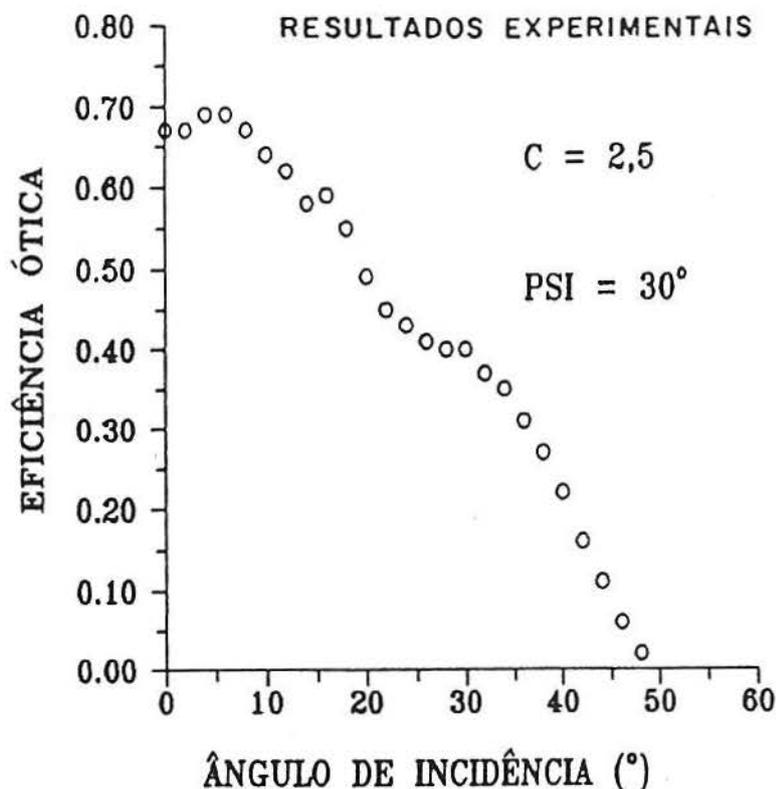


Figura 8.5 Eficiência ótica em função do ângulo de incidência.

Estes resultados podem ser comparados com os valores calculados teoricamente. As leituras fornecidas pelo sensor instalado na abertura e no absorvedor são, respectivamente, iguais a

$$I_A = I_{fn} \cos \theta_i K(\theta_i) \quad (8.10)$$

e

$$I_a = CI_{fn} \cos(\theta_i) \{ P_o(\theta_i) K(\theta_i) + P_1^D(\theta_i) \rho [\theta^D(1)] K(\theta_{a1}^D) + P_1^E(\theta_i) \rho [\theta^E(1)] K(\theta_{a1}^E) \} \quad (8.11)$$

onde  $I_{fn}$  é a intensidade da fonte de luz na abertura do concentrador (medida com um sensor localizado no plano normal aos raios luminosos) e as refletividades  $\rho[\theta^D(1)]$  e  $\rho[\theta^E(1)]$  são

calculadas para os ângulos de incidência da radiação, na primeira reflexão, nos espelhos direito e esquerdo. A influência da cobertura encapsulante das células no módulo fotovoltaico está representada pelo modificador do ângulo de incidência  $K(\theta)$ , que expressa a variação de transmitância da cobertura em função do ângulo de incidência e é definido como

$$K(\theta) = \frac{\tau(\theta)}{\tau(0)} \quad (8.12)$$

onde  $\tau(\theta)$  é a transmitância da cobertura do sensor para radiação incidente com ângulo  $\theta$ . Note-se que o modificador  $K(\theta)$  está definido para o ângulo de incidência real e não para sua projeção. No entanto, na experiência que se descreve, os ângulos de incidência reais se encontram no plano da seção transversal da cavidade. Quando isto se verifica, os ângulos de incidência na superfície do módulo fotovoltaico (absorvedor),  $\theta_{a1}^D$  e  $\theta_{a1}^E$  são calculados de acordo com

$$\theta_{a1}^D = \theta_i + 2\psi \quad (8.13)$$

$$\theta_{a1}^E = -\theta_i + 2\psi$$

A função  $K(\theta)$  foi determinada em testes de laboratório e os resultados experimentais, comparados com os obtidos através de simulação numérica [25], estão mostrados na Fig. 8.6. O modificador  $K(\theta)$  é aproximadamente igual a 0,92 para um ângulo de incidência igual a  $60^\circ$ , ângulo a partir do qual verifica-se uma rápida diminuição da transmitância da cobertura.

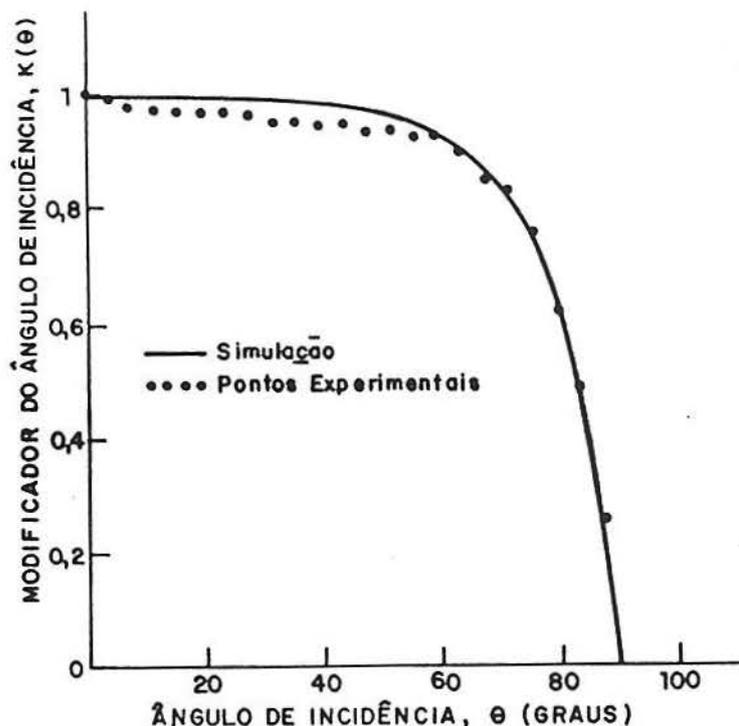


Figura 8.6 Modificador do ângulo de incidência  $K(\theta)$ . Valores teóricos e experimentais.

Uma aproximação analítica simples do modificador do ângulo de incidência pode ser escrita como [38]

$$K(\theta) = 1 - b \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (8.14)$$

Para o caso mostrado na Fig. 8.6 consegue-se um bom ajuste com o parâmetro  $b$  igual a 0,08. Utilizando essa função e os valores constantes na Tab. 8.2, gerados a partir das expressões derivadas no Cap. 3 (Seção 3.5.2) e Cap. 4 (Seção 4.3.1), foi calculada a relação

$$\eta_{ot}(\theta_i) = \frac{I_a}{C I_A} \quad (8.15)$$

que considera os valores teóricos corrigidos pelo modificador do ângulo de incidência.

Tabela 8.2 Probabilidade dos modos de reflexão e refletividade das paredes da cavidade.  $C = 2,5$ ,  $\psi = 30^\circ$

$\theta_i$	$P_0$	$P_1^D$	$P_1^E$	$\rho[\theta^D(1)]$	$\rho[\theta^E(1)]$	$\theta_{a1}^D$	$\theta_{a1}^E$
0	0,40	0,20	0,20	0,81	0,81	60	60
2	0,40	0,19	0,21	0,81	0,81	62	58
4	0,40	0,18	0,22	0,81	0,81	64	56
6	0,40	0,16	0,24	0,81	0,81	66	54
8	0,40	0,15	0,23	0,81	0,81	68	52
10	0,40	0,14	0,21	0,81	0,81	70	50
12	0,40	0,13	0,19	0,81	0,81	72	48
14	0,40	0,11	0,17	0,81	0,81	74	46
16	0,40	0,10	0,15	0,81	0,81	76	44
18	0,40	0,09	0,13	0,81	0,82	78	42
20	0,40	0,07	0,11	0,81	0,82	80	40
22	0,40	0,06	0,09	0,81	0,83	82	38
24	0,40	0,05	0,07	0,81	0,84	84	36
26	0,40	0,03	0,05	0,81	0,86	86	34
28	0,40	0,02	0,02	0,81	0,90	88	32
30	0,40	0,00	0,00	0,82	1,00	90	30
32	0,38	--	--	--	--	--	--
34	0,35	--	--	--	--	--	--
36	0,32	--	--	--	--	--	--
38	0,29	--	--	--	--	--	--
40	0,26	--	--	--	--	--	--
42	0,23	--	--	--	--	--	--
44	0,20	--	--	--	--	--	--
46	0,16	--	--	--	--	--	--
48	0,12	--	--	--	--	--	--
50	0,08	--	--	--	--	--	--
52	0,03	--	--	--	--	--	--

$$E_{Aa} = 0,376$$

Os parâmetros óticos utilizados no cálculo são os seguintes: índice de refração do vidro (1,52); espessura do vidro (0,003 m); coeficiente de extinção do vidro (15,918 m<sup>-1</sup>) e refletividade da prata (0,9).

O perfil da função  $\eta_{ot}(\theta_i)$  e os valores experimentais estão mostrados na Fig. 8.7.

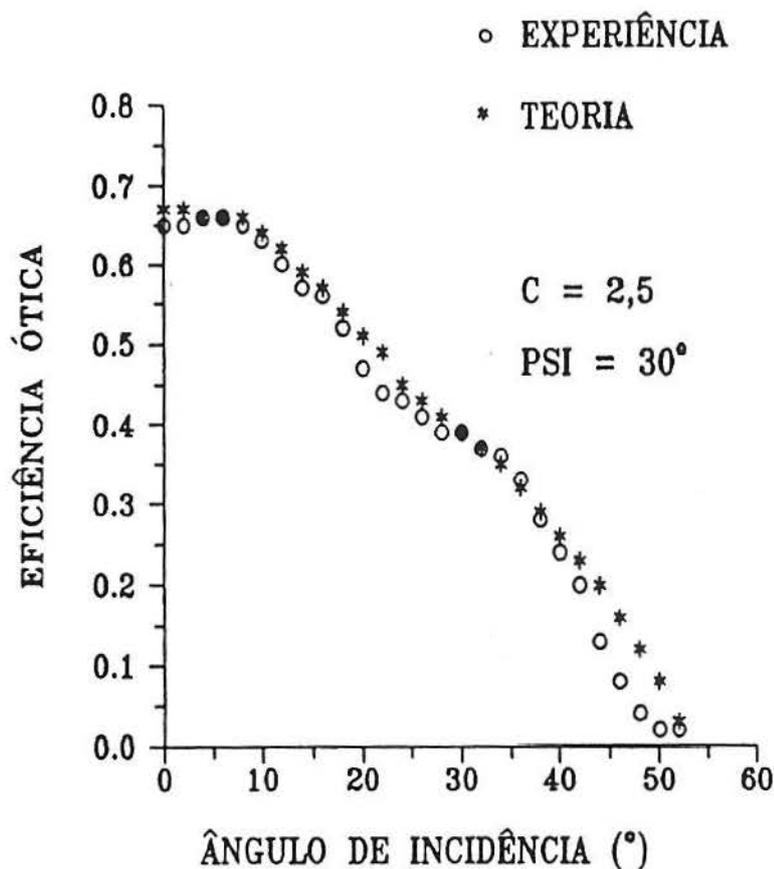


Figura 8.7 Resultados experimentais e valores teóricos corrigidos da eficiência ótica.

Verifica-se um bom acordo entre ambos conjuntos de valores, com um desvio típico igual a 0,044, medido em unidades de eficiência ótica. Na região do "plateau" e no intervalo de 0 a 40° os desvios são da mesma ordem e iguais a 0,023.

As maiores diferenças encontram-se na região entre 35 e 55°, fato que pode estar relacionado com a existência da iluminação de fundo proveniente do Campus Universitário, na vizinhança da área de testes. Essa iluminação dependia da posição da cavidade, sendo mínima quando o plano de abertura se

encontrava em posição horizontal e maior quando esse plano estava em posição vertical, passando por um máximo na região intermediária, em coincidência com a região de menores valores da eficiência ótica. Através do procedimento de elaboração dos dados tentou-se minimizar a influência dessa iluminação; verifica-se, no entanto, a existência de um efeito residual com desvios, nesse intervalo, da ordem de 0,06.

Durante a realização das experiências foram constatadas variações nas dimensões da abertura que se traduzem em variações da relação de concentração  $C$  e do ângulo  $\psi$  da ordem de 1,5 a 2%. Com a finalidade de verificar a sensibilidade da eficiência ótica perante essas variações de caráter estrutural foi calculada, com o programa desenvolvido para o estudo das propriedades óticas e radiantes [39] (Seção 4.3.2), a eficiência ótica para uma série de combinações  $(C, \psi)$ , indicadas na Tab. 8.3 (o modificador do ângulo de incidência não foi considerado)

Tabela 8.3 Valores da eficiência ótica com incidência normal para combinações  $(C, \psi)$  em torno de  $C = 2,5$  e  $\psi = 30^\circ$

$\psi(^{\circ})$	$C$		
	2,45	2,50	2,55
29,5	0,747	0,732	0,718
30,0	0,737	0,722	0,708
30,5	0,727	0,713	0,693

Observa-se uma apreciável dependência da eficiência ótica com relação aos parâmetros geométricos da cavidade. O

aumento da concentração e do ângulo  $\psi$  reduzem a eficiência ótica para incidência normal e suas variações percentuais são similares às da concentração e do ângulo  $\psi$ .

Com a finalidade de verificar a influência da variação dos parâmetros geométricos ao longo de todo o domínio angular, foi calculada a eficiência ótica para valores da relação de concentração  $C = 2,57$  e ângulo do vértice  $\psi = 30,54^\circ$ , levemente diferentes dos valores nominais da cavidade ( $C = 2,5$  e  $\psi = 30^\circ$ ). Os valores experimentais foram recalculados, considerando o novo valor de  $C$ , e os resultados apresentados na Fig. 8.8.

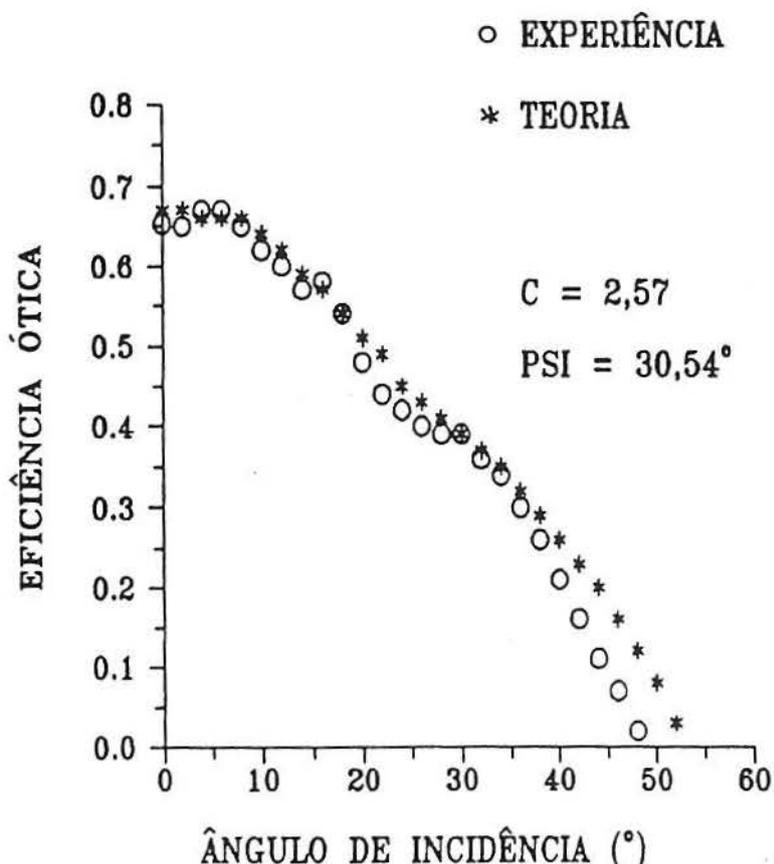


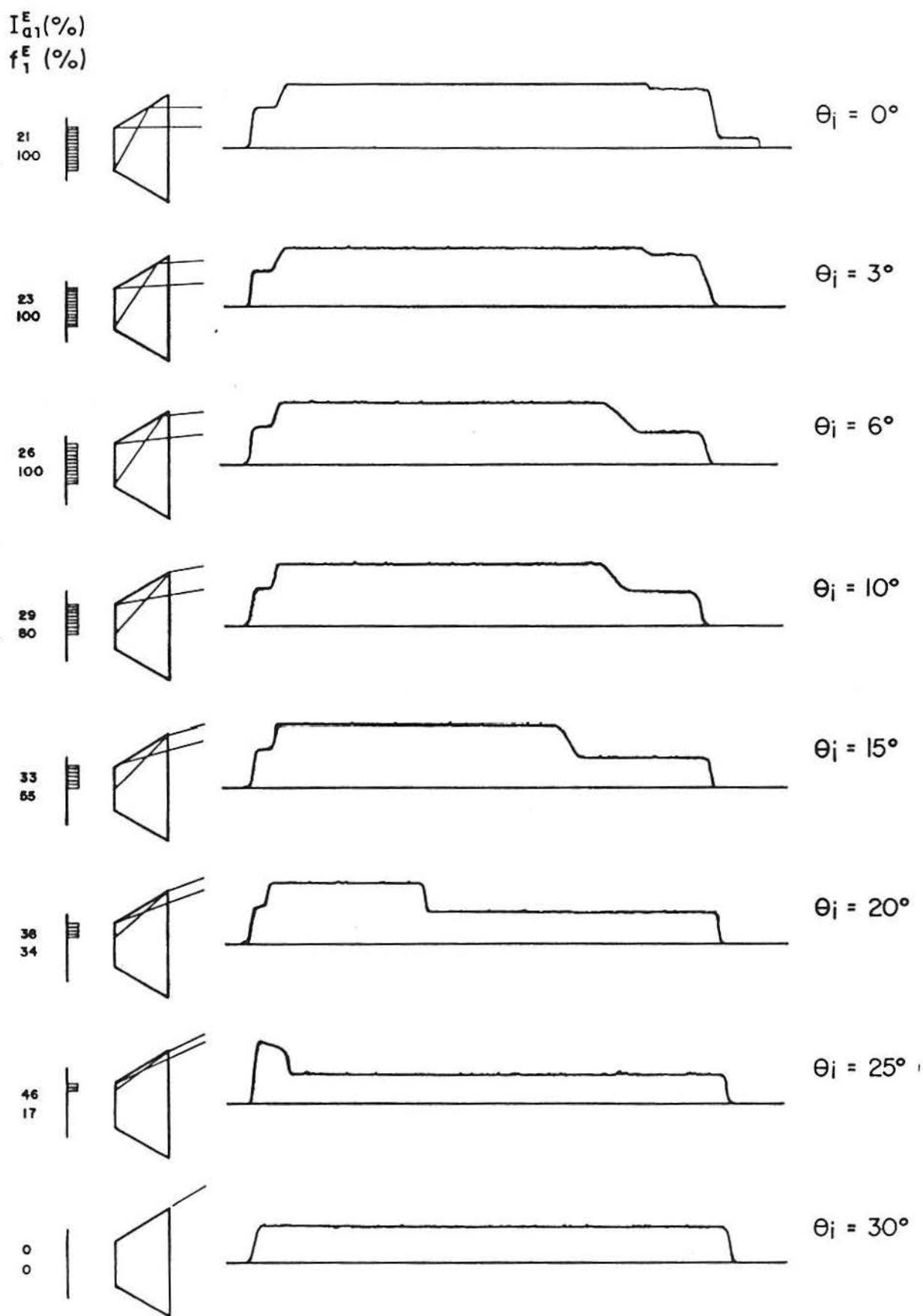
Figura 8.8 Eficiência ótica de uma cavidade com  $C = 2,57$  e  $\psi = 30,54^\circ$ . Resultados experimentais e teóricos.

Comprova-se que os desvios globais são da mesma ordem que os mencionados acima para a cavidade de projeto. Porém, na região do "plateau" as diferenças entre resultados teóricos e experimentais são menores e o desvio se reduz de 0,022, na cavidade de projeto, para 0,015, na cavidade com os novos parâmetros. Como resultado, cabe destacar a importância de dotar à estrutura dos espelhos da rigidez adequada para atender às exigências de projeto e de qualidade ótica das cavidades concentradoras.

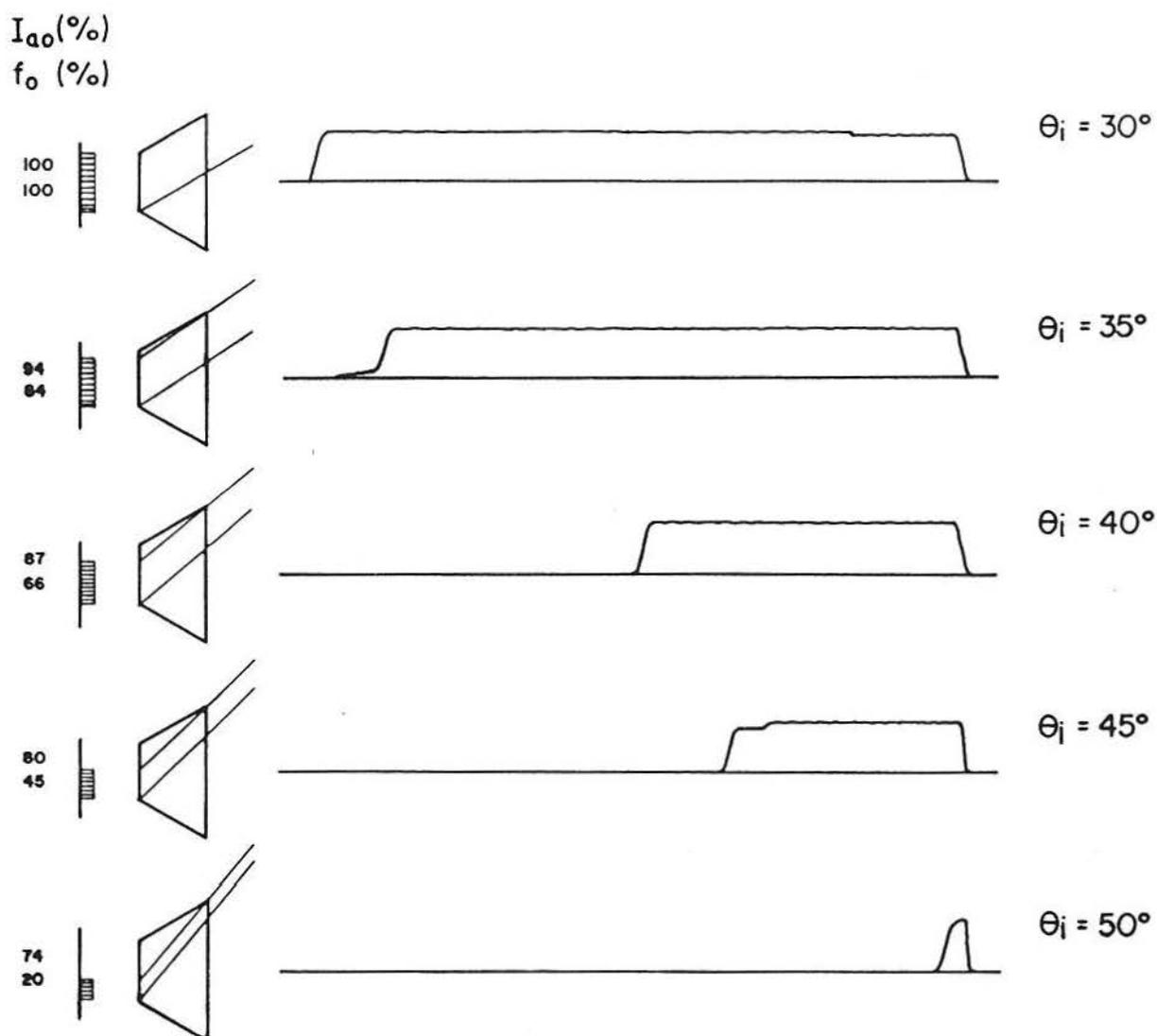
Finalmente, a uniformidade axial da iluminação do absorvedor, no intervalo de 0 a 4°, região de ângulos de incidência onde a cavidade opera, também foi verificada. Foram observados desvios máximos da ordem de 0,7% e desvios médios nesse intervalo da ordem de 0,5%. Essa verificação tem grande importância devido a que as células solares do módulo utilizado estão interligadas em série e a corrente que geram corresponde à célula com nível de iluminação mais baixo. Pode-se esperar portanto, por este motivo, uma perda da ordem de 0,7% na energia gerada.

### 8.3 PERFIL DE ILUMINAÇÃO NO ABSORVEDOR

A sequência de perfis de iluminação através do absorvedor, para ângulos de incidência compreendidos entre 0° e 50°, estão representados nas Fig. 8.9. De forma geral os perfis obtidos coincidem com as previsões teóricas, ou seja, boa uniformidade no intervalo entre 0 e 6°, ângulo a partir do qual observa-se uma crescente não uniformidade e diminuição da intensidade de iluminação até sua extinção em torno dos 50°.



(cont.)



(b)

Figura 8.9 Perfil de iluminação no absorvedor para vários ângulos de incidência. (a) As cavidades esquematizadas no lado direito da figura mostram a participação do modo um de reflexão, correspondente ao espelho esquerdo, na iluminação do absorvedor (intervalo de 0 até  $30^\circ$ ). (b) Na região de 30 até  $50^\circ$ , as cavidades ilustram o comportamento do modo de reflexão zero.

Para efeitos de análise, o perfil de radiação no absorvedor pode ser dividido em duas regiões, de  $0^\circ$  a  $30^\circ$  e  $30^\circ$  até  $53,4^\circ$ .

#### INTERVALO DE 0 A $30^\circ$

Nesta região existem os modos de reflexão zero e um, este último correspondente aos espelhos esquerdo e direito. O modo de reflexão zero e o primeiro modo correspondente ao espelho direito, iluminam toda a largura do absorvedor (estados completos) ao longo deste intervalo angular, embora o primeiro modo direito participe com intensidade decrescente a medida que  $\theta_i$  aumenta (vide Tabela 8.2).

O primeiro modo correspondente ao espelho esquerdo encontra-se no estado completo no intervalo  $(0, \mu)$  ( $\mu=6,6^\circ$ ). A partir desse ângulo de incidência este modo ocupa uma fração decrescente da largura do absorvedor (estado descendente), evidenciada pela extensão da região plana superior ("plateau") presente no registro dos perfis. Quando  $\theta_i = 25^\circ$ , por exemplo, o primeiro modo esquerdo se reduz a uma pequena região, embora de intensidade apreciável, que termina se extinguindo para  $\theta_i = 30^\circ$ . Neste ângulo de incidência a iluminação do absorvedor deve-se exclusivamente ao modo zero, já que ambos primeiros modos estão extintos, condição que se verifica nitidamente no registro do perfil.

A fração da largura do absorvedor ocupada pelo primeiro modo esquerdo pode ser calculada utilizando uma expressão análoga à Eq. 4.3 (Seção 4.1), válida para modos ímpares associados ao espelho esquerdo. Considerando a origem de

coordenadas no extremo esquerdo do absorvedor, deriva-se o seguinte resultado

$$f_1^E = \frac{C - 1}{2} \frac{\text{sen}(\psi - \theta_i)}{\text{sen } \psi \cos(2\psi - \theta_i)} \quad (8.16)$$

expressão que satisfaz as condições nos limites:

$$\theta_i = -\alpha_2 = \mu \quad f_1^E = 1 \quad (8.17)$$

$$\theta_i = \psi \quad f_1^E = 0$$

Os valores de  $f_1^E$  estão indicados no lado esquerdo da Fig. 8.9 (a), conjuntamente com a participação do primeiro modo esquerdo na intensidade local, ambos em unidades percentuais.  $I_{a1}^E(\%)$  esta definido pela relação

$$I_{a1}^E(\%) = \frac{100 \cdot I_{a1}^E}{I_{a0} + I_{a1}^D + I_{a1}^E} \quad (8.18)$$

Por exemplo para  $\theta_i = 15^\circ$ , o primeiro modo esquerdo ocupa 55% da largura do absorvedor e na região do absorvedor em que este modo está presente, sua contribuição é igual a 33% da intensidade total. A intensidade  $I_{a1}^E$  pode ser obtida considerando a equação de conservação de energia para cada modo. Por exemplo o primeiro modo esquerdo satisfaz a relação

$$I_{a1}^E f_1^E = C \rho^E K(\theta_a^E) P_1^E(\theta_i) I_{fn} \cos \theta_i \quad (8.19)$$

onde  $f_1^E$  está dado pela Eq. (8.16).

Finalmente a participação do primeiro modo esquerdo na intensidade local pode ser calculada de acordo com a seguinte expressão

$$I_{a1}^E(\%) = \frac{100 \cdot I_{a1}^E}{I_a + I_{a1}^E(1 - f_1^E)} \quad (8.20)$$

onde a soma  $(I_{a0} + I_{a1}^D)$  foi substituída por  $I_a - I_{a1}^E f_1^E$ . As frações  $f_1^D$  e  $f_0$  são iguais a 1 ao longo do intervalo  $(0, 30^\circ)$ .

De acordo com a descrição acima a única não uniformidade presente nos perfis de iluminação existentes neste intervalo angular deve-se ao primeiro modo esquerdo. No entanto os perfis mostrados na Fig. 8.9 apresentam não uniformidades nos extremos da região iluminada, particularmente para ângulos de incidência em que o perfil deveria ser perfeitamente uniforme, como por exemplo para  $\theta_i = 0$ .

Este aspecto do comportamento dos perfis de iluminação está relacionado com a localização do plano percorrido pelo sensor que não coincide exatamente com o plano do absorvedor. A Fig. 8.10 mostra cavidades iluminadas sob vários ângulos de incidência e esquemas dos perfis vistos pelo sensor localizado **no plano do absorvedor** e a uma pequena distância desse plano, que será denominado **plano do sensor**. Verifica-se um escalonamento análogo ao observado nos perfis experimentalmente determinados, constatando-se que este efeito afeta a forma do perfil nas suas extremidades. Por outro lado, o comportamento da descontinuidade relacionada com o estado do modo, ascendente ou descendente, é visto de maneira análoga em ambos planos, deslocando-se a través do absorvedor na medida em que o ângulo de incidência varia.

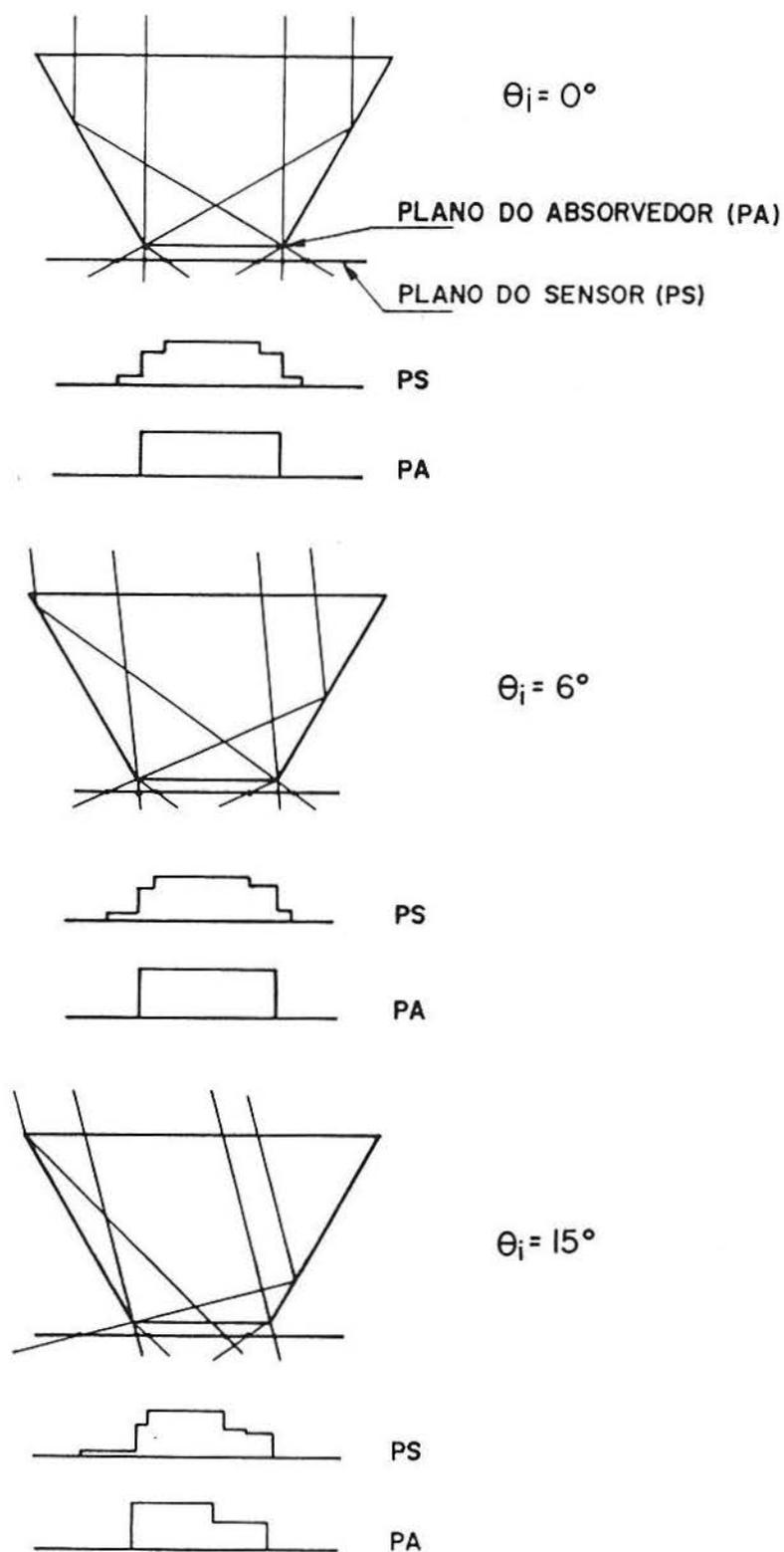


Figura 8.10 Perfil de iluminação no plano do absorvedor e do sensor.

Algumas diferenças entre os perfis observados em ambos planos merecem ser destacadas:

#### No plano do absorvedor

Para um determinado ângulo de incidência, os modos começam nos extremos do absorvedor e naturalmente este local não varia com o ângulo de incidência.

#### No plano do sensor

Para um determinado ângulo de incidência, os modos começam em locais diferentes. Estes locais variam com o ângulo de incidência.

Para incidência normal o perfil apresenta degraus nas extremidades do perfil, mas de caráter simétrico. Portanto as assimetrias observadas nos extremos do perfil, podem ser derivadas apenas de assimetrias presentes na geometria da cavidade ou de erros na determinação do ângulo de incidência.

Para qualquer ângulo de incidência diferente de zero o perfil é assimétrico, ainda na região de perfil uniforme ( $\theta_i \leq \mu$ ).

#### INTERVALO DE 30 A 53,40°

Para o ângulo de incidência  $\theta_i = 30^\circ$  observa-se um perfil perfeitamente uniforme (Fig. 8.9(b)). O único modo de reflexão existente é o modo zero, já que os primeiros modos de reflexão, esquerdo e direito, estão extintos (Tab. 8.2). A

partir dos  $30^\circ$  o modo de reflexão zero ilumina uma região decrescente do absorvedor e com intensidade também decrescente, até sua extinção para  $\theta_i = 53,4^\circ$ . A fração do absorvedor iluminada pode ser calculada através da expressão

$$f_0 = c - \frac{c-1}{2} \left( 1 + \frac{\text{tg } \theta_i}{\text{tg } \psi} \right) \quad (8.21)$$

que pode ser obtida a partir da Eq. (3.40) ou através de uma análise direta da geometria do modo zero no estado descendente. A fração  $f_0$  é igual a um para  $\theta_i = 30^\circ$  e zero para  $\theta_i = 53,4^\circ$ . Seus valores, na forma percentual, estão indicados na parte esquerda da Fig. 8.9(b). Verifica-se uma concordância razoável entre os valores observados e estimados teoricamente, salvo na região próxima a  $\theta_i = 50^\circ$  onde, como já foi comentado na Seção 8.2, registram-se os maiores desvios entre a experiência e cálculos teóricos.

A intensidade deste modo de reflexão, para ângulos de incidência maiores ou iguais a  $30^\circ$ , pode ser calculada de forma análoga ao cálculo do primeiro modo esquerdo, acima descrito, ou através do procedimento exposto na Seção 7.4. A partir da definição da fração  $f_0$  a relação  $(g / \bar{g})$  (Eq (7.8)) pode-ser escrita como  $(1/f_0)$  e a intensidade relativa calculada de acordo com a Eq. (7.9)

$$\frac{I_{ao}}{I_A} = \frac{C \eta_{ot}(\theta_i)}{f_0} \quad (8.22)$$

Por exemplo para  $\theta_i$  igual a  $40^\circ$  e  $\eta_{otb} = 0,26$  ( $\eta_{otb}$  pode ser calculado com os dados da Tabela 8.2) a Eq. 8.22 resulta igual a

$$\frac{I_{a0}}{I_A} = 0,985$$

Na Fig. 8.9(b) estão indicados os valores relativos de  $I_{a0}$ , tomando como referência o valor da intensidade do modo zero correspondente ao ângulo de incidência de  $30^\circ$ , verificando-se também um acordo razoável entre as estimativas e os valores registrados.

A análise realizada nesta seção mostra que a determinação do perfil de iluminação no absorvedor é um procedimento de diagnóstico bastante sensível para o controle de qualidade da geometria e do desempenho ótico da cavidade.

#### 8.4 COMPORTAMENTO ELÉTRICO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

O desempenho do módulo fotovoltaico pode ser estudado analisando as curvas características, corrente versus tensão. Na Fig. 8.11 estão mostradas duas curvas  $I \times V$ , determinadas com e sem concentração e para níveis de irradiância constante. A partir das mesmas pode ser calculada a eficiência de conversão da energia solar em energia elétrica, parâmetro que depende da tensão onde está localizado o ponto de trabalho. Para os valores extremos da tensão,  $V = 0$  ( $I = I_{cc}$ , condição de curto circuito) e  $V = V_{oc}$  ( $I = 0$ , condição de circuito aberto), a eficiência de conversão é igual a zero. Para um ponto intermediário, denominado ponto de máxima potência,  $V = V_{mp}$  e  $I = I_{mp}$ , existe um valor máximo da potência e da eficiência de conversão. Este último parâmetro utiliza-se, habitualmente, para caracterizar o desempenho das células solares ou módulos fotovoltaicos.

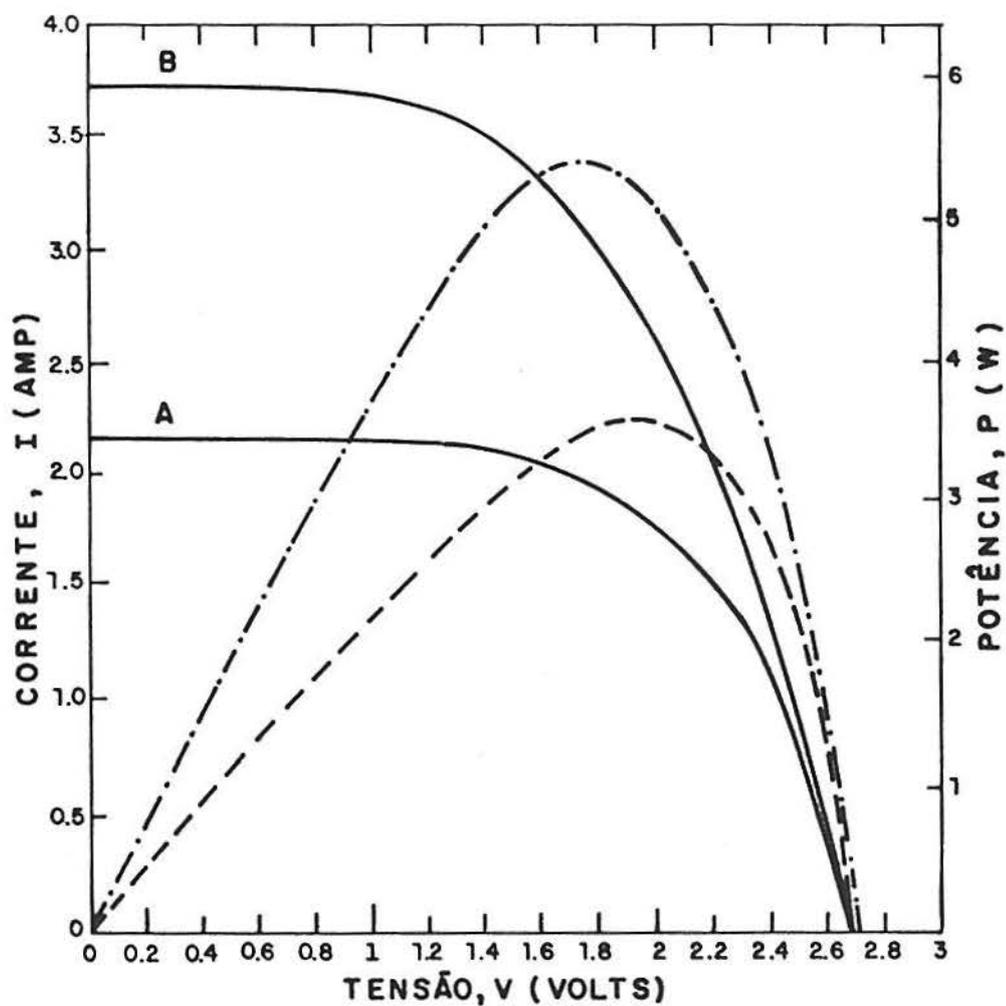


Figura 8.11 Curvas características V-I, para o módulo fotovoltaico sem concentração (curva A) e com concentração (curva B).

Os parâmetros mais importantes das curvas características do módulo, acoplado ou não ao concentrador, são resumidos a seguir.

## CURVAS CARACTERÍSTICAS

### CURVA A, SEM CONCENTRAÇÃO

Irradiância	$I_A^* = 857 \text{ W/m}^2;$	$I_{dA}^* = 261 \text{ W/m}^2$
Temperatura	$T_{am} = 29 \text{ }^\circ\text{C};$	$T = 43 \text{ }^\circ\text{C}$
Parâmetros elétricos	$I_{cc} = 2,17 \text{ A}$	$V_{oc} = 2,70 \text{ V}$
	$I_{mp} = 1,79 \text{ A}$	$V_{mp} = 2,0 \text{ V}$
	$P_m = 3,58 \text{ W}$	
Área do módulo	$A_m = 0,064 \text{ m}^2$	
Eficiência e fator de preenchimento	$\eta = 6,57\%$	$FP = 0,61$

### CURVA B, COM CONCENTRAÇÃO

Irradiância	$I_A^* = 975 \text{ W/m}^2$	$I_{dA}^* = 278 \text{ W/m}^2$
Temperatura	$T_{am} = 28 \text{ }^\circ\text{C}$	$T = 54 \text{ }^\circ\text{C}$
Parâmetros elétricos	$I_{cc} = 3,73 \text{ A}$	$V_{oc} = 2,70 \text{ V}$
	$I_{mp} = 3,08 \text{ A}$	$V_{mp} = 1,75 \text{ V}$
	$P_m = 5,39 \text{ W}$	
Área de abertura	$A = 0,16 \text{ m}^2$	
Eficiência do conjunto cavidade-módulo PV e fator de preenchimento	$\eta = 3,47 \%$	$FP = 0,54$

O asterisco nos valores de irradiância indica que estão afetados pelo modificador do ângulo de incidência, como será explicado na Seção 8.4.1. O fator de preenchimento define-se como

$$FP = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{cc}} \quad (8.23)$$

onde, de acordo com o mencionado na introdução desta seção,  $V_{mp}$  e  $I_{mp}$  são a tensão e a corrente no ponto de máxima potência e  $V_{oc}$  e  $I_{cc}$  a tensão em circuito aberto e corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico [41]. Os símbolos  $T_{am}$  e  $T$  representam a temperatura ambiente e do módulo, respectivamente.

A diferença entre as eficiências dos casos A e B decorre da inserção da cavidade ótica entre a abertura do coletor e o módulo fotovoltaico. A eficiência obtida no caso B está próxima do valor encontrado na análise dos resultados de um dia típico (3,48% neste caso, versus uma eficiência média diária de 3,25% (Seção 8.1.3)), sendo importante mencionar que ambos resultados foram encontrados por procedimentos totalmente independentes.

A eficiência do módulo fotovoltaico, convertida para uma temperatura de referência ( $T_r$ ), habitualmente 25°C, é igual a [49-51]

$$\eta_{PV,25^\circ C} = \frac{\eta_{PV}}{1 - \alpha_p(T - T_r)} \quad (8.24)$$

onde  $\alpha_p$  é o coeficiente de variação da potência com a temperatura. Valores típicos deste coeficiente estão compreendidos entre 4,5 e 5,5 x 10<sup>-3</sup> °C<sup>-1</sup> [49], adotando-se, portanto, o valor de

$$\alpha_p = 5 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Quando o módulo está iluminado sem a presença de um concentrador (caso A), a eficiência de conversão de energia solar em elétrica é igual à eficiência de conversão fotovoltaica. Por tanto esta

última pode ser convertida diretamente para uma temperatura padrão. No entanto, no caso de módulos acoplados a concentradores (caso B), a eficiência de conversão fotovoltaica deve ser estimada previamente a partir da Eq. (8.8))

$$\eta_{PV} = \frac{\eta}{\eta_{ot}}$$

valor que, uma vez calculado, pode ser corrigido por temperatura. Este caso será analisado na próxima seção. No caso A, a eficiência do módulo fotovoltaico corrigida por temperatura é igual a

$$\eta_{PV,25^{\circ}C} = 7,22\% \quad , \quad I_A^* = 857 \text{ W/m}^2$$

É importante constatar que este valor da eficiência é menor em 10% que o valor obtido a partir dos dados do fabricante(8%) [25].

#### 8.4.1 EFICIÊNCIA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO SUJEITO A CONCENTRAÇÃO DA RÁDIAÇÃO SOLAR

Nesta seção analisa-se a influência da concentração de radiação solar nos parâmetros elétricos acima apresentados. A eficiência do módulo fotovoltaico, inserido na cavidade ótica, pode ser calculada estimando a radiação incidente na sua superfície. Com tal fim é conveniente analisar separadamente cada uma das componentes da radiação, assim como cada um dos modos de reflexão existentes na cavidade. A leitura da radiação direta mediante um sensor localizado na abertura, será igual a  $I_{bA} K(\theta)$ . Esta leitura e a que corresponde a um sensor localizado

no absorvedor podem ser decompostas da seguinte forma:

### RADIAÇÃO DIRETA

	Modo zero	Modo um direita	Modo um esquerda
Abertura	$I_{bA}P_0(\theta_i)K(\theta)$	$I_{bA}P_1^D(\theta_i)K(\theta)$	$I_{bA}P_1^E(\theta_i)K(\theta)$
Absorvedor	$I_{bA}P_0(\theta_i)K(\theta)$	$I_{bA}P_1(\theta_i)\rho[\theta^D(1)]K(\theta_{a1}^D)$	$I_{bA}P_1(\theta_i)\rho[\theta^E(1)]K(\theta_{a1}^E)$

Note-se que a soma dos termos na abertura é igual a  $I_A$ , dado que

$$P_0 + P_1^D + P_1^E = 1 \quad (8.25)$$

### RADIAÇÃO DIFUSA

As leituras de radiação difusa serão iguais a

Abertura	$I_{dA}\bar{K}$
Absorvedor	$I_{dA}E_{Aa}\bar{K}$

A relação das energias incidente na abertura e absorvedor permite escrever

$$I_{ba} = C I_{bA}^* \left[ P_0 + P_1^D \rho[\theta^D(1)] \frac{K(\theta_{a1}^D)}{K(\theta)} + P_1^E \rho[\theta^E(1)] \frac{K(\theta_{a1}^E)}{K(\theta)} \right] \quad (8.26)$$

onde  $I_{bA}^*$  é a leitura da radiação direta na abertura ( $I_{bA}K(\theta)$ ).

Adotando a mesma nomenclatura para a radiação difusa,  $I_{da}$  será igual a

$$I_{da} = CI_{da}^* E_{Aa} \quad (8.27)$$

Denominando  $I_a$  a soma

$$I_a = I_{ba} + I_{da} \quad (8.28)$$

a eficiência de conversão pode ser escrita como (Eq. (8.8))

$$\eta = \eta_{pV} \eta_{ot}$$

onde

$$\eta_{pV} = \frac{P}{a I_a} \quad (8.29)$$

e

$$\eta_{ot} = f_b \eta_{otb} + f_d \eta_{otd} \quad (8.30)$$

$f_b$  e  $f_d$  simbolizam as frações da radiação direta e difusa na abertura. A eficiência ótica para radiação direta, incluindo o modificador do ângulo de incidência, é igual a

$$\eta_{otb} = \left[ P_0 + P_1^D \rho[\theta^D(1)] \frac{K(\theta_{a1}^D)}{K(\theta)} + P_1^E \rho[\theta^E(1)] \frac{K(\theta_{a1}^E)}{K(\theta)} \right] \quad (8.31)$$

e

$$\eta_{otd} = E_{Aa} \quad (8.32)$$

Na Eq.(8.32) ( $\eta_{otd}$ ) não aparece o modificador do ângulo de incidência porque as leituras da radiação na abertura e no absorvedor estão afetadas pelo mesmo fator. Situação análoga existe quando o módulo não está acoplado ao

concentrador.

As componentes  $I_{ba}$  e  $I_{da}$  podem agora ser calculadas. Os valores da irradiância na abertura, correspondentes à curva B, são:

$$I_{bA}^* = 697 \text{ W/m}^2$$

$$I_{dA}^* = 278 \text{ W/m}^2$$

Cabe mencionar que as medidas são realizadas sempre com ângulos  $\theta_i$  aproximadamente iguais a zero, valor que será adotado, igualmente, para o ângulo  $\theta$ . Introduzindo os valores das probabilidades  $P_K(\theta_i)$ , refletividades  $\rho[\theta^D(1)]$  e  $\rho[\theta^E(1)]$  e ângulos  $\theta_{a1}^D$  e  $\theta_{a1}^E$  apresentados na Tabela 8.2 e calculando o modificador do ângulo de incidência ( $K(\theta)$ ) a partir da Eq.(8.14), para os ângulos acima definidos,  $I_{ba}$  e  $I_{da}$  resultam

$$I_{ba} = 1216 \text{ W / m}^2$$

$$I_{da} = 261 \text{ W / m}^2$$

O fluxo de radiação no absorvedor,  $I_a$ , será portanto igual a

$$I_a = 1477 \text{ W / m}^2$$

O conhecimento de  $I_a$  permite agora o cálculo da eficiência de conversão fotovoltaica

$$\eta_{PV} = \frac{5,39}{1477 \times 0,0636} = 0,057$$

A eficiência ótica pode ser calculada com a Eq. (8.30)

$$\eta_{ot} = 0,606$$

O produto de ambas eficiências reproduz o valor original(3,48%).

A eficiência de conversão fotovoltaica ( $\eta_{PV}$ ) pode ser corrigida por temperatura e resulta igual a

$$\eta_{PV,25^{\circ}C} = 6,70\%$$

Este resultado está próximo do valor obtido sem concentração. A diferença entre ambos deve-se aos diferentes níveis de irradiância para os quais foram obtidos:

$$\text{Caso A} \quad I_A^* = 857 \text{ W/m}^2 \quad , \quad \eta_{PV,25^{\circ}C} = 7,22\%$$

$$\text{Caso B} \quad I_a = 1477 \text{ W / m}^2 \quad , \quad \eta_{PV,25^{\circ}C} = 6,70\%$$

Os valores encontrados contradizem, aparentemente, o comportamento esperado, já que a teoria prediz um aumento da eficiência das células fotovoltaicas com a concentração. Como será analisado na Seção 8.4.3, valores excessivamente altos da resistência série podem explicar este resultado.

Os valores da eficiência do módulo podem ainda ser reduzidos para a eficiência das células utilizando o fator de ocupação,

$$FO = 0,617$$

$$\eta_{cel} = \frac{\eta_{PV,25^{\circ}C}}{FO}$$

que para os casos A e B resulta

$$\text{Caso A,} \quad \eta_{\text{cel}} = 11,4\%$$

$$\text{Caso B,} \quad \eta_{\text{cel}} = 10,6\%$$

Estes valores são indicativos da qualidade das células fotovoltaicas que compõem o módulo e dependem essencialmente da resistência série e do nível de radiação. A influência destes parâmetros será analisada nas próximas seções. A uniformidade da iluminação da região absorvedora, já considerada na Seção 8.2, será também verificada a partir dos testes de caracterização elétrica.

#### 8.4.2 RESISTÊNCIA SÉRIE E FATOR DE PREENCHIMENTO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

Foram obtidas um conjunto de doze curvas características V-I (da qual a curva A faz parte), determinadas em condições de insolação natural, sem concentração e, aproximadamente, com o mesmo nível de irradiância, mediante uma carga eletrônica regulável e registrador X-Y. Os parâmetros médios e os desvios são os seguintes:

$$I_{\text{cc}} = 2,07 \pm 0,12 \text{ (A)}$$

$$V_{\text{oc}} = 2,67 \pm 0,05 \text{ (V)}$$

$$I_{\text{mp}} = 1,75 \pm 0,13 \text{ (A)}$$

$$V_{\text{mp}} = 1,96 \pm 0,10 \text{ (V)}$$

$$P_{\text{m}} = 3,42 \pm 0,24 \text{ (W)}$$

Os valores médios do nível de irradiância, temperatura dos módulos e temperatura ambiente, correspondentes ao período de testes são:

$$I_A = 818 \pm 39 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

$$T = 42,0 \pm 1,6 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$T_{am} = 29,0 \pm 1,1 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Dois parâmetros da maior importância, são o fator de preenchimento e a resistência série do módulo. O fator de preenchimento, obtido para o conjunto de curvas mencionado, resultou igual a

$$FP = 0,62 \pm 0,01$$

A resistência série foi obtida a partir da derivada gráfico-numérica da curva I-V no ponto  $I = 0$ ,  $V = V_{oc}$ , procedimento baseado nas propriedades matemáticas da curva característica [41]

$$R_S = \left( \left. \frac{\partial I}{\partial V} \right|_{V=V_{oc}} \right)^{-1} - \frac{N_s n_D k T}{q I_{cc}} \quad (8.33)$$

onde  $q$  é a carga do elétron,  $k$  a constante de Boltzmann,  $N$  o número de células em série e  $n_D$  o fator de diodo. Para este último foi adotado um valor igual a 1.15 [22]. A resistência série para o conjunto de medidas resultou igual a

$$R_S = 0,19 \pm 0,01 \text{ (}\Omega\text{)}$$

valor que concorda razoavelmente bem com o fornecido pelo

fabricante (Heliodinâmica) [25], uma vez realizada a conversão do módulo padrão de 36 células para o módulo de cinco células utilizado neste trabalho de tese.

### 8.4.3 VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA COM O NÍVEL DE RADIAÇÃO

Os resultados mencionados no Seção 8.4.1 mostram que a eficiência varia com o nível de insolação incidente no módulo fotovoltaico. Com a finalidade de analisar a relação que existe entre ambos parâmetros foram determinadas as características V-I do módulo, para diversos níveis de insolação, apresentando os resultados abaixo relacionados

Tabela 8.4 Parâmetros de curvas características com diversos níveis de insolação. As eficiências  $\eta_{PV}$  e  $\eta_{PV25^{\circ}C}$  correspondem ao ponto de máxima potência

N°	$I_A$ (W/m <sup>2</sup> )	$I_{dA}$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{am}$ (°C)	T (°C)	$I_a$ (W/m <sup>2</sup> )	$P_m$ (W)	$\eta_{PV}$ (%)	$\eta_{PV25^{\circ}C}$ (%)
01	206	135	28,0	39,0	251	0,99	6,2	6,7
02	233	134	28,0	39,0	298	1,25	6,6	7,1
03	295	148	28,0	44,5	395	1,70	6,8	7,5
04	384	233	25,0	29,7	482	2,14	7,0	7,2
05	420	73	27,0	41,5	674	2,87	6,7	7,3
06	527	92	27,0	44,1	845	3,72	6,9	7,6
07	857	260	29,5	43,0	857	3,58	6,6	7,3
08	644	99	27,0	47,0	1043	4,24	6,4	7,2
09	689	101	27,5	48,0	1120	4,35	6,1	6,9
10	758	68	26,7	52,7	1268	4,40	5,5	6,4
11	975	277	28,0	53,8	1477	5,39	5,8	6,8

Em todos os casos as curvas V-I foram determinadas com os módulos acoplados à cavidade ótica, salvo os valores que constam na linha N° 7 que foram obtidos sem concentração (curva A, Seção 8.4). Os valores de  $I_a$  foram, portanto, estimados de acordo com o procedimento descrito no Seção 8.4.1. A relação entre eficiência no ponto de máxima potência e  $I_a$ , para os valores obtidos experimentalmente e os valores corrigidos por temperatura, está mostrada na Fig. 8.12.

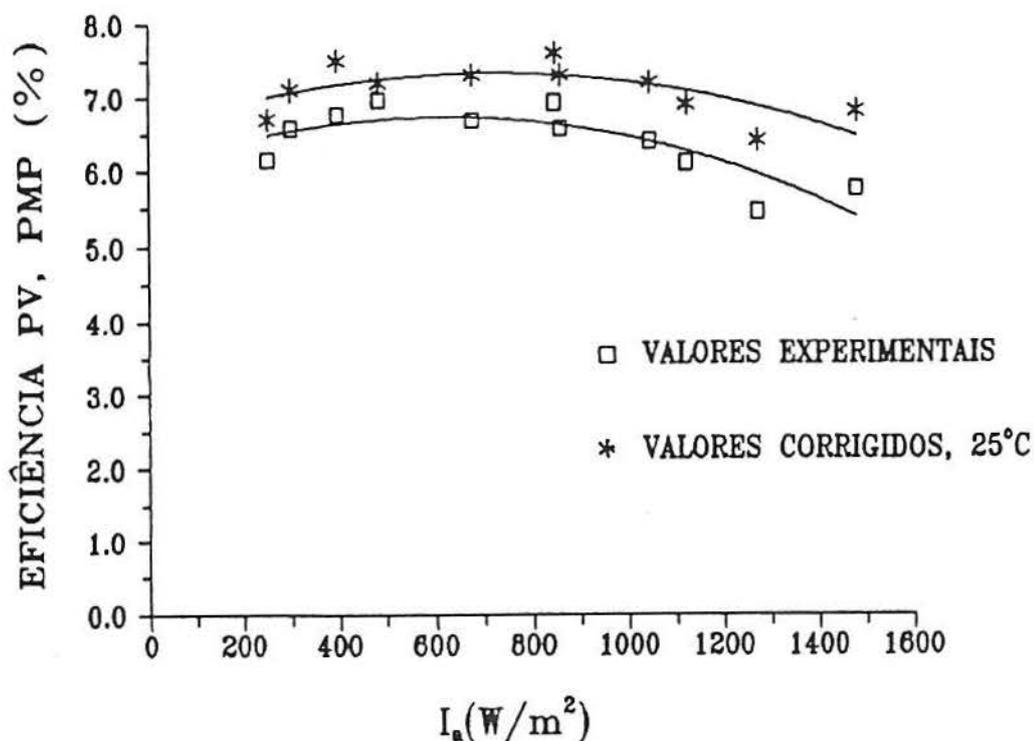


Figura 8.12 Variação da eficiência no ponto de máxima potência com o nível de iluminação do módulo fotovoltaico. Resultados experimentais e valores corrigidos por temperatura.

A variação da eficiência com o nível de radiação, considerando a temperatura constante e igual a um valor de referência (e.g. 25°C), pode ser estimada a partir de uma análise simplificada que considera dois fatores competitivos perante o aumento da irradiância, o aumento de  $V_{oc}$  e as perdas na resistência série. De acordo com essa consideração a eficiência de conversão pode ser escrita como [52]

$$\eta_{PV,teor} = \frac{(V_{oc} + V_t \ln i) i I_{cc} FP_0 - R_s i^2 I_{mp}^2}{i I_{ref}} \quad (8.34)$$

onde  $V_{oc}$ ,  $I_{cc}$  e  $I_{mp}$  são parâmetros que correspondem à irradiância de referência  $I_{ref}$ .  $FP_0$  é o fator de preenchimento ideal, calculado através da seguinte expressão empírica [41]

$$FP_0 = \frac{FP}{(1 - r_s)} \quad (8.35)$$

onde  $r_s = \frac{R_g}{R_c}$  e  $R_c = \frac{V_{oc}}{I_{cc}}$

FP é o fator de preenchimento experimentalmente determinado e (i) a variável da Eq. (8.34), definida como a relação entre a irradiância  $I_a$  e o valor de referência  $I_{ref}$ . Utilizando os parâmetros da curva A, corrigidos para a temperatura de 25°C, foram obtidos os resultados apresentados na Fig. 8.13.

Pode-se comprovar que a função  $\eta_{PV,teor}$  reproduz razoavelmente bem o comportamento médio dos valores de eficiência obtidos. Adicionalmente, verifica-se que esta função passa por um valor máximo ( $\eta_{PV,M}$ ), para o valor da irradiância igual a [52]

$$\frac{I_a(\eta_{PV,M})}{I_{ref}} = \frac{V_t I_{cc} FP_0}{R_s I_{mp}^2} \quad (8.36)$$

Introduzindo valores numéricos obtém-se

$$I_a(\eta_{PV,M}) = 330 \text{ W/m}^2$$

Este nível de irradiância é consideravelmente menor que os experimentados pelo módulo fotovoltaico quando submetido à concentração de radiação solar.

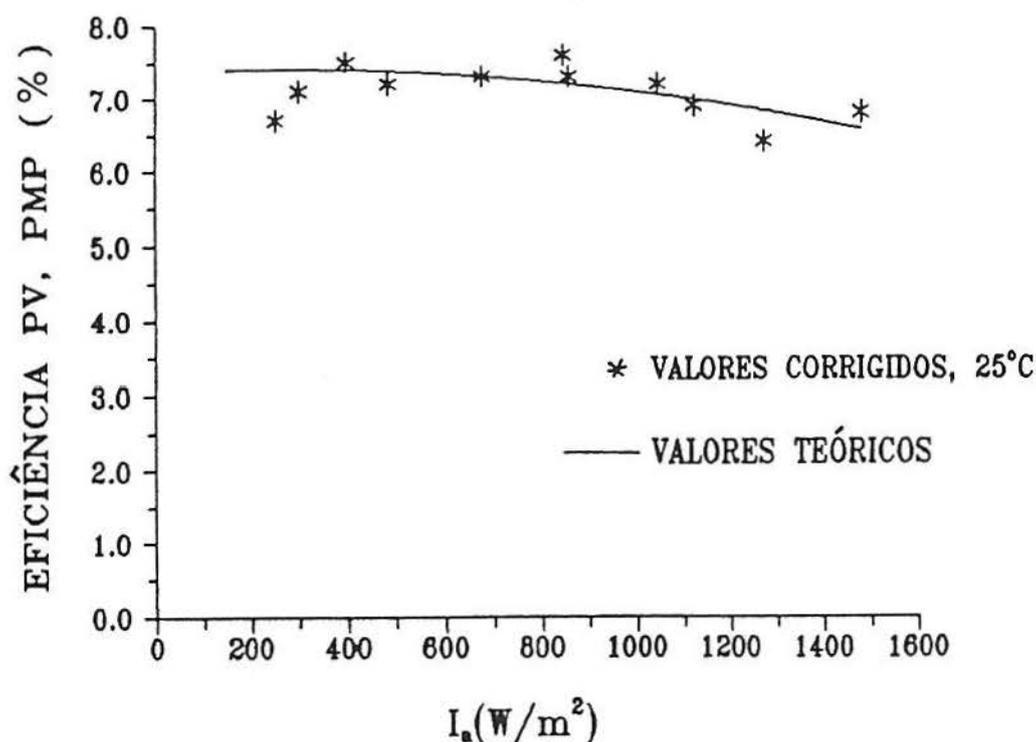


Figura 8.13 Comparação de resultados experimentais e teóricos da eficiência no ponto de máxima potência, para a temperatura de 25 °C.

O parâmetro básico que determina o valor de  $I_a(\eta_{PV,M})$  é a resistência série, que deveria ser bem mais reduzida que a resistência apresentada pelo módulo utilizado neste trabalho, para poder contar com uma boa adaptação entre o gerador

fotovoltaico e o fluxo de radiação incidente na sua superfície. Precisamente, a resistência série de módulos comerciais de boa qualidade é, tipicamente, da ordem de 2,5 vezes menor que o valor apresentado pelo módulo utilizado nestas experiências.

Finalmente, é importante elucidar a possível influência na redução da eficiência, da não uniformidade de iluminação na região absorvedora. Como foi mencionado, os resultados que constam na linha 7 da Tabela 8.4 ( $I_a = 857 \text{ W/m}^2$ ) foram obtidos sem concentração e fazem parte de um conjunto de doze curvas características de comportamento bastante homogêneo (Seção 8.4.2). Pode ser comprovado que a eficiência de conversão obtida nessas condições, iluminação perfeitamente uniforme, não difere do conjunto de valores registrado na Tab. 8.4, obtidos com o módulo sob concentração. Esta observação confirma os resultados mencionados na Seção 8.2 sobre o grau de uniformidade axial da iluminação na região absorvedora (desvios máximos de 0,7% e médios de 0,5%), no intervalo de ângulos de incidência em que a cavidade opera.

#### 8.4.4 MELHOR TENSÃO FIXA

A conexão entre o gerador fotovoltaico e a carga é realizada, sempre que seja possível, seguindo o ponto de máxima potência (PMP). A função de seguimento desse ponto de operação e conversão de potência DC em potência AC estão habitualmente integradas no conjunto inversor. Uma alternativa à interligação tipo PMP, tecnicamente mais simples, é a operação com tensão fixa. Interessa, nesse caso, definir a tensão que maximiza a potência de saída no intervalo de operação do sistema

fotovoltaico.

O diagrama eficiência versus irradiância permite estimar a tensão fixa na qual o gerador opera com eficiências próximas às condições PMP. Verifica-se que os valores que correspondem à tensão de 2V possuem o menor desvio padrão com relação à curva de eficiência na condição PMP, ao longo de todo o intervalo de níveis de radiação observado (Fig. 8.14). No entanto a tensão de 1,85 V está mais próxima da condição de máxima potência na região de níveis de radiação elevados.

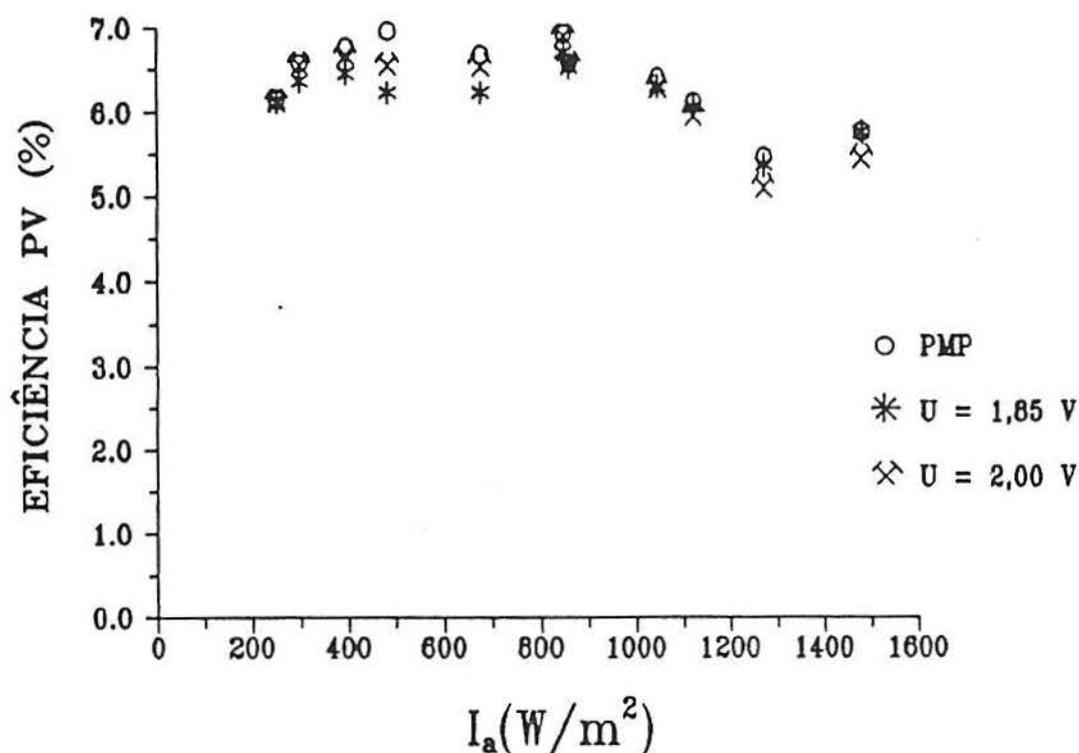


Figura 8.14 Eficiência de conversão para a condição de máxima potência e tensões fixas de 1,85 e 2 Volts.

Por conseguinte, o gerador trabalhando com essas

tensões deverá ter um desempenho bastante próximo ao desempenho do gerador operando na condição PMP. Naturalmente que ajustes mais finos podem ainda ser realizados, para determinar o valor ótimo da tensão fixa. Entretanto, é importante frisar que as condições de operação do gerador para as quais foram determinadas as curvas de eficiência versus irradiância são quase-estáticas. Em condições reais o ponto de operação está sujeito aos efeitos da variação da temperatura e da própria variabilidade da tensão "fixa", definida pelo regulador. Cabe, nesse sentido, analisar mais em detalhe a relação entre potência elétrica e tensão de saída do gerador.

Três regiões podem ser distinguidas no comportamento do gerador fotovoltaico: uma primeira, de variação linear e crescente com a tensão; outra de pequenas variações, na região de máxima potência e uma terceira aproximadamente linear e decrescente (Fig. 8.15). Naturalmente, recomenda-se como região de operação a região de máxima potência. No entanto, seja um dispositivo seguidor do ponto de máxima potência (PMP) ou um dispositivo de tensão fixa, a região de operação esta definida por um intervalo ou janela de tensões, que pode incluir outras regiões. É importante que esse intervalo esteja desviado preferencialmente para a primeira região (linear e crescente com a tensão, denominada, neste trabalho, como região própria), de características mais favoráveis perante variações de temperatura que a terceira região (denominada imprópria), como pode-se deduzir da Fig. 8.15. Na região entre  $V_{mp}$  e  $V_{oc}$ , as variações de temperatura podem resultar em variações importantes da corrente elétrica, o que não acontece na região compreendida no intervalo de tensões entre curto-circuito e  $V_{mp}$ .

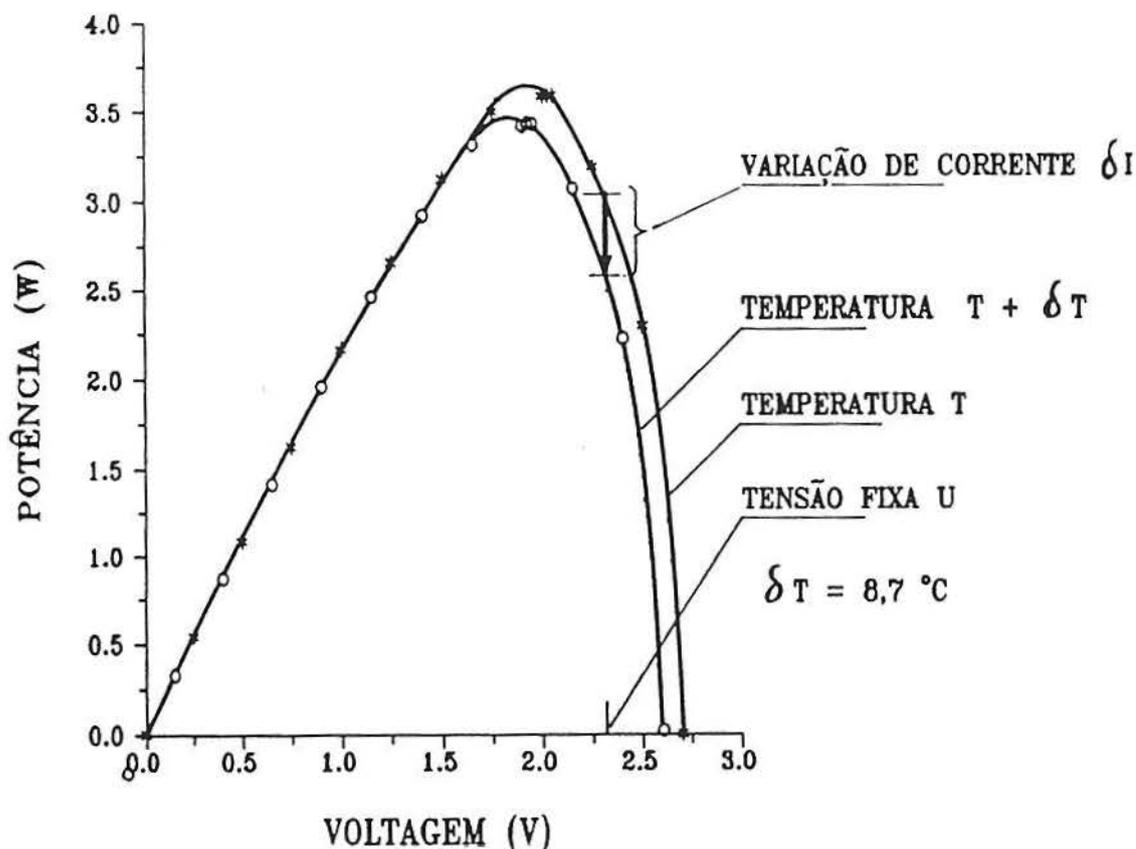


Figura 8.15 Relação entre potência elétrica e tensão no módulo fotovoltaico, para o mesmo nível de irradiância e diferentes temperaturas.

Cabe, portanto, concluir que uma condição a ser estabelecida sobre a melhor tensão fixa é que não supere o menor valor da tensão de máxima potência durante a operação do sistema, determinado pelas condições climatológicas, irradiação, temperatura ambiente e velocidade do vento. No entanto isto implica que o módulo estará produzindo menos que a sua capacidade, de forma que a escolha do ponto de operação deverá ser definida de acordo com a natureza do projeto. Por exemplo,

pode-se adotar uma estratégia de operação tal que quando o sistema supere o ponto de máxima potência permaneça desligado ou se desloque para uma região de menores tensões. Este modo de operar equivale a seguir de forma discreta, com dois degraus apenas, o ponto de máxima potência. A energia elétrica produzida mediante este procedimento pode ser maior que a produzida com uma tensão fixa que não supere em momento nenhum a tensão de máxima potência.

A variabilidade da tensão no ponto de operação do gerador fotovoltaico, devido às características do dispositivo regulador da carga eletrônica pode, para certos pontos de operação, ter efeitos análogos aos resultantes da variação de temperatura. A influencia desses efeitos sobre o comportamento do módulo em condições operacionais, será analisada na Seção 8.6.3. Na próxima seção é quantificada a variabilidade da tensão no intervalo de tensões utilizado nos testes diários.

## 8.5 CARACTERIZAÇÃO DA CARGA ELETRÔNICA

As medições de tensão versus corrente, registradas de 15 em 15 minutos durante os testes diários, estão representadas na Fig. 8.16. O desvio padrão para todos os valores de tensão é igual ou inferior a  $\pm 0,04$  V (Tabela 8.5), com correntes máximas compreendidas entre 3 e 4 A para tensões fixas de 1 e 1,5 V e gradativamente menores para tensões iguais a 2 e 2,5 V. A redução correspondente a estas últimas tensões (2 e 2,5 V) decorre da resposta da curva característica,  $I \times V$ , à medida que a tensão se aproxima da tensão de circuito aberto,  $V_{oc}$ .

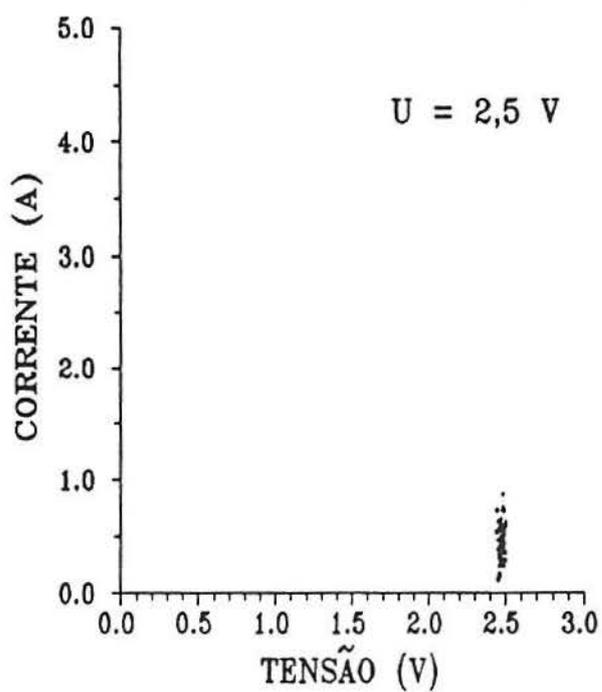
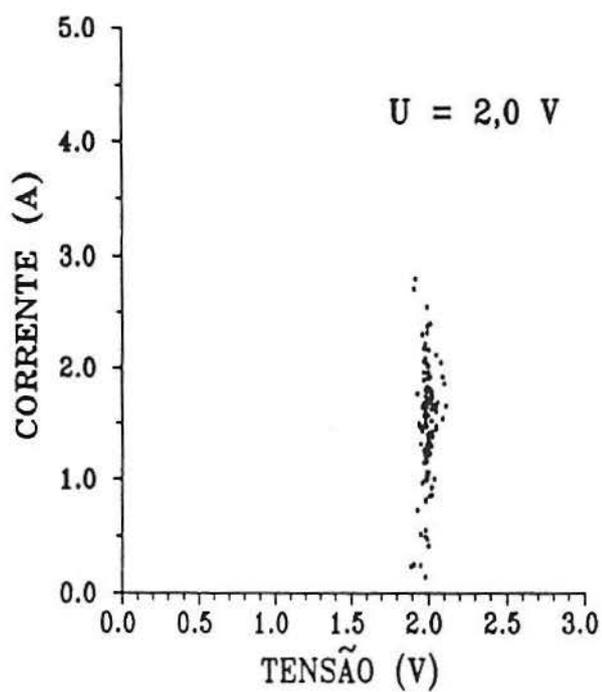
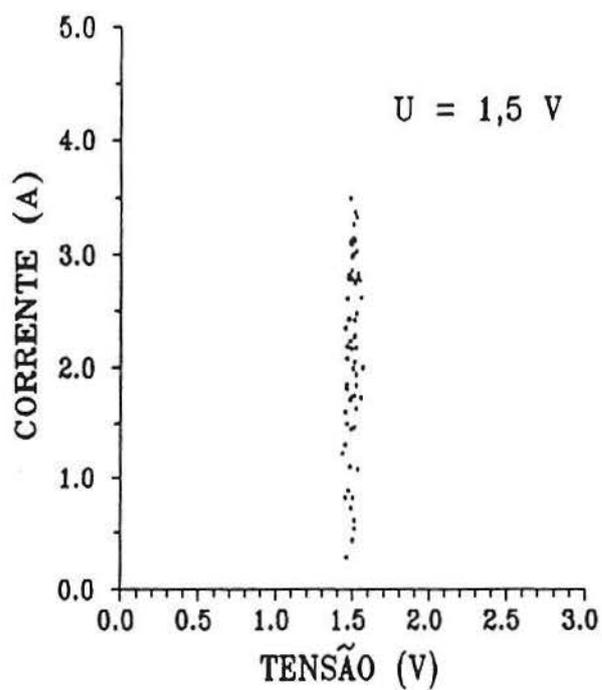
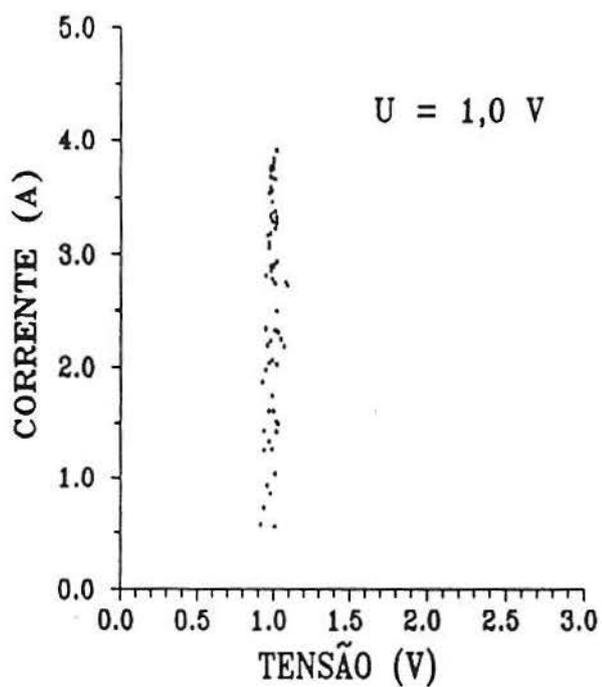


Figura 8.16 Registro das variações de tensão durante os testes diários.

Tabela 8.5 Valores médios e desvios padrão das tensões no ponto de operação

Tensão nominal (V)	$\bar{U}$ (V)	$s_x$ (V)
1,0	0,992	0,033
1,5	1,495	0,027
2,0	1,994	0,036
2,5	2,470	0,035

Na região de operação,  $U \leq V_{mp}$  ( $V_{mp} \approx 2$  V), as variações de tensão, da ordem de  $\pm 2$  %, se traduzem em variações da mesma ordem ou menores da potência elétrica, segundo estejam distantes ou não do ponto de máxima potência. Porém, como ilustrado na Fig. 8.16, flutuações de tensão bem maiores ( $\pm 0,06$  a  $0,1$  V) ocorrem durante os testes. Para certos valores da tensão fixa, como mencionado na seção anterior, essas flutuações de tensão se traduzem em importantes variações de potência.

## 8.6 TESTES DIÁRIOS

A análise apresentada ate agora está baseada nas curvas características dos diversos componentes inseridos no sistema estudado (Seção 7.2). Estas informações tem caráter quase-estático, já que estão definidas para valores fixos dos parâmetros relevantes ao funcionamento do conversor fotovoltaico. Nesta seção serão apresentados os resultados de

funcionamento do sistema em condições reais, eminentemente dinâmicas. Com tal finalidade foram realizados testes diários de 8 horas de duração com o módulo acoplado ou não à cavidade concentradora. As grandezas medidas estão detalhadas na Seção 7.7. Para cada valor da tensão fixa foram realizados testes diários de 8 horas durante períodos de aproximadamente 8 dias. As tensões e períodos de medição estão mostrados na Tabela 8.6.

Tabela 8.6 Valores da tensão fixa e períodos de medição correspondentes

Testes com Concentração			Testes sem Concentração		
Tensão	Período	Total	Tensão	Período	Total
(V)	(dias)	(dias)	V	(dias)	(dias)
1,00	08		1,00	08	
1,50	08		1,50	09	
1,75	09		1,75	08	
1,85	08		2,00	09	
2,00	18		2,30	08	42
2,29	10				
2,50	06	67			

O número maior de dias de testes, correspondente à tensão de 2,00 V, foi devido ao comportamento peculiar do gerador quando a carga operava com essa tensão, comportamento que foi confirmado com os testes adicionais realizados.

### 8.6.1 COMPORTAMENTO ESTATÍSTICO DA RADIAÇÃO COLETADA

Na seção 8.1.1 foi analisada a relação existente entre os benefícios decorrentes do acompanhamento do movimento do sol

e a composição da radiação solar em termos de suas componentes direta e difusa, nas condições de um dia típico de observação. Nesta Seção o mesmo problema será visto a partir dos registros diários de irradiância durante um longo período de observações, cem dias, com o objetivo de quantificar, neste caso com caráter estatístico, o benefício derivado do rastreamento em torno de um eixo Norte-Sul. Como mencionado nas Seções 1.3.2 e 1.3.3, essa configuração cinemática pode aumentar a coleção de radiação solar em aproximadamente 30% (em locais com o tipo de clima que existe na cidade de Recife, e.g.) [6, 24].

As medições realizadas com o protótipo experimental permitem calcular o acréscimo de energia coletada na abertura da cavidade, quando comparada com a energia solar coletada no plano horizontal. Na Fig. 8.17 está representada a radiação global diária incidente no plano de abertura versus a radiação global diária incidente no plano horizontal. Para valores entre 2000 e 5500 Wh a relação  $H_A / H_h$  varia entre 1,13 e 1,17, apresentando um acréscimo médio, para o conjunto de valores observados de 15,8%. A diferença com o valor esperado de 30% deve ser atribuída ao período de observação que foi de 8 horas, entre as 8 e as 16 horas, em lugar da média de 12 horas de sol, existente ao longo do ano. Cabe salientar, tal como foi comentado na Seção 8.1.1, que os períodos iniciais e finais do dia são os que mais contribuem para o aumento na coleção de energia.

Com a finalidade de quantificar o aumento que pode ser esperado ao longo de esse período de observação(8 horas), foi calculada a relação  $H_A / H_h$  com o programa de simulação numérica FV-FAE. Os resultados mostram um acréscimo médio anual da radiação solar coletada de 30,7% e especificamente para o

período de 8 às 16 horas, um aumento na coleção de energia solar de 15,7%, valores que concordam com resultados típicos citados na literatura (30%) e com o valor estimado a partir de nossas medições (13 a 17%).

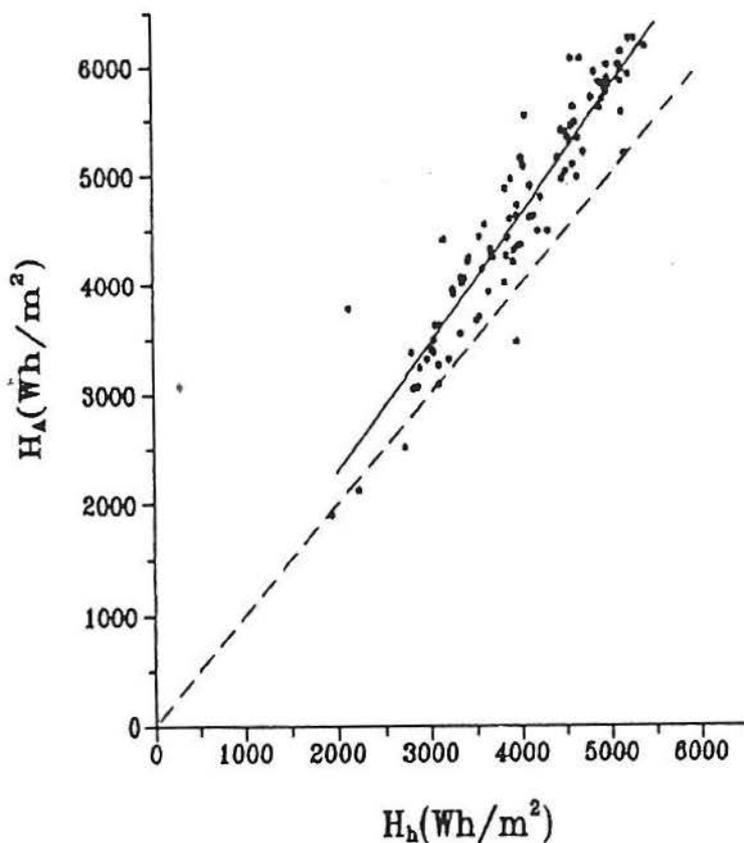


Figura 8.17 Energia solar diária incidente na abertura do rastreador versus a energia solar diária no plano horizontal.  $H_A(\text{Wh}) = -59,95 + 1,17 H_h(\text{Wh})$ , desvio padrão  $s_y = \pm 348 \text{ Wh}$ . As ordenadas da linha tracejada são iguais a  $H_h$ .

Finalmente foi representada a relação entre radiação difusa e total na abertura em função da radiação na abertura (Fig. 8.18), relação que mostra o comportamento decrescente

habitual. Porém, os valores absolutos da radiação difusa no intervalo de observações variam relativamente pouco, entre 1458 e 1116 Wh / m<sup>2</sup> para uma variação de H<sub>A</sub> de 3000 a 6000 Wh / m<sup>2</sup>.

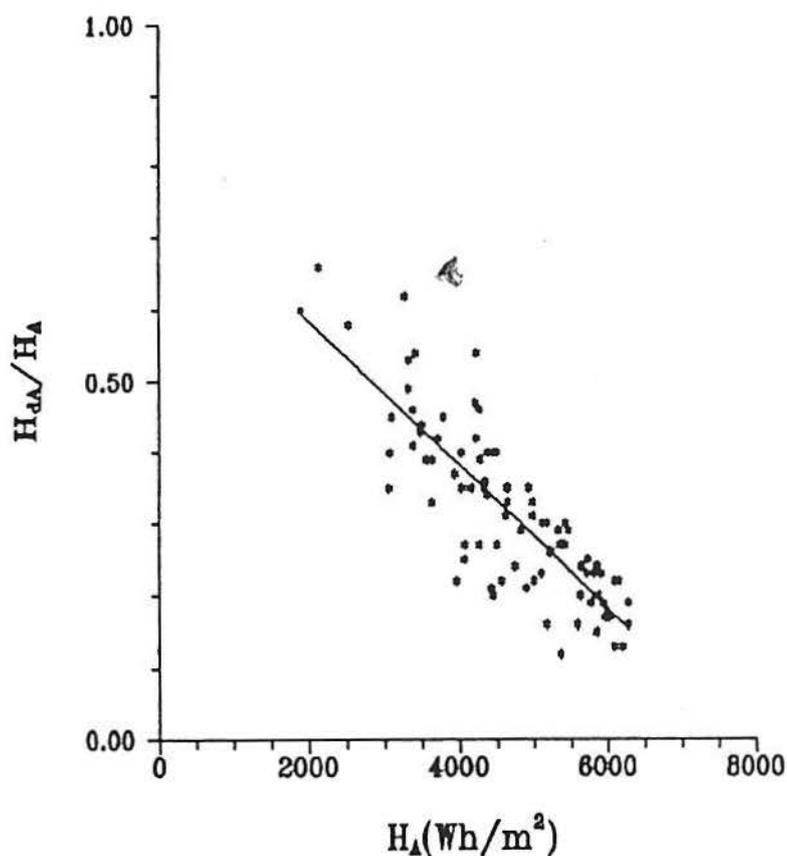


Figura 8.18 Relação entre a componente difusa e total na abertura em função da radiação total na abertura.

$$H_{dA} / H_A = 0,786 - 1,01 \cdot 10^{-3} H_A (\text{Wh}) , s_y = \pm 0,065.$$

### 8.6.2 TEMPERATURA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

As temperaturas medidas foram representadas versus a radiação coletada. De acordo com o que foi comentado, a escolha da radiação coletada (Eq. 7.12) como variável independente para

representar diversas grandezas físicas tais como temperatura, potência e energia elétrica é sugerida pela experiência como um tipo de representação adequada para coletores concentradores com baixa relação de concentração [46].

Na Fig. 8.19 estão mostradas as médias horárias de registros de temperatura do módulo, obtidos de 15 em 15 min.

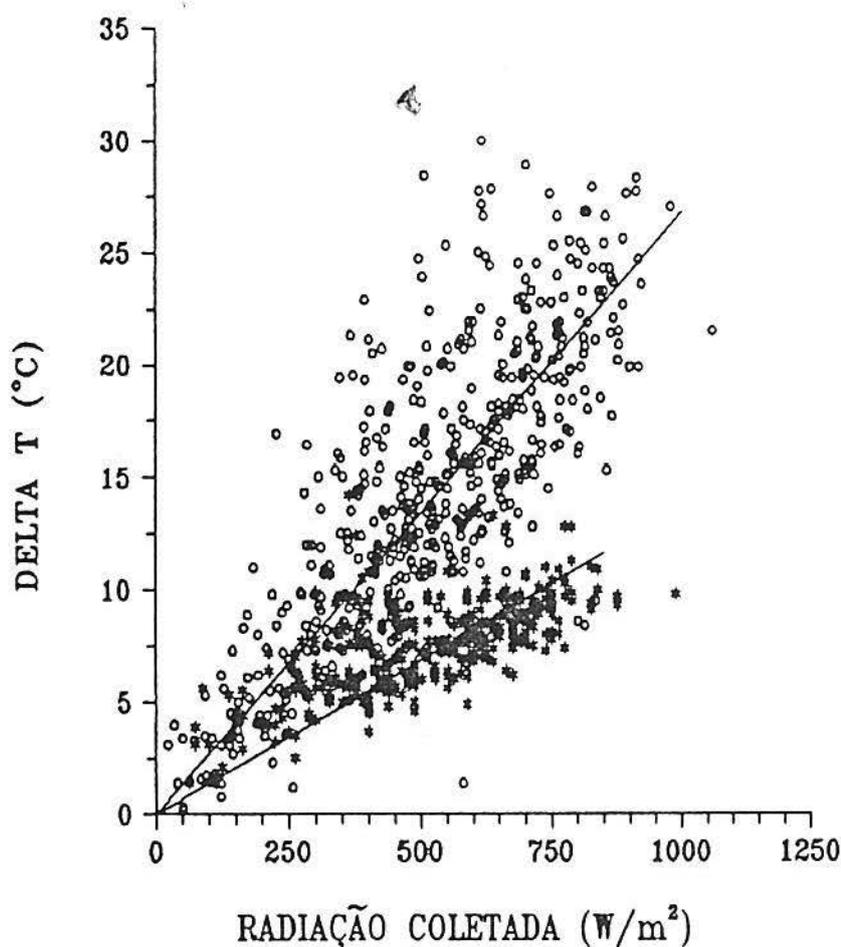


Figura 8.19 Aumento de temperatura do módulo em relação à temperatura ambiente em função da radiação coletada.

Nos testes do módulo com concentração, observa-se uma maior dispersão dos dados para valores crescentes da insolação, fenômeno que pode estar associado a um comportamento análogo das

flutuações da insolação. O módulo sem concentração apresenta uma dispersão homogênea dos dados para os diversos níveis de insolação. Este resultado pode estar relacionado com a montagem do módulo na abertura da cavidade em V, localização na qual estava exposto a uma excelente ventilação.

A expressão das retas de regressão que passam pela origem são as seguintes

Sem concentração

$$\Delta T = 0,014 I_A \text{ (W / m}^2\text{)} \quad , \quad s_y = \pm 1,83^\circ\text{C} \quad (8.37)$$

Com concentração

$$\Delta T = 0,027 I_C \text{ (W / m}^2\text{)} \quad , \quad s_y = \pm 3,77^\circ\text{C} \quad (8.38)$$

onde  $\Delta T = T - T_{am}$

Estes valores diferem das expressões citadas na literatura. Por exemplo na Ref. 41 o aumento de temperatura está relacionado com a radiação solar coletada pelo módulo através da formula empírica

$$\Delta T = 0,02 \text{ a } 0,03 I_A \text{ (W / m}^2\text{)} \quad (8.39)$$

expressão válida para coletores planos.

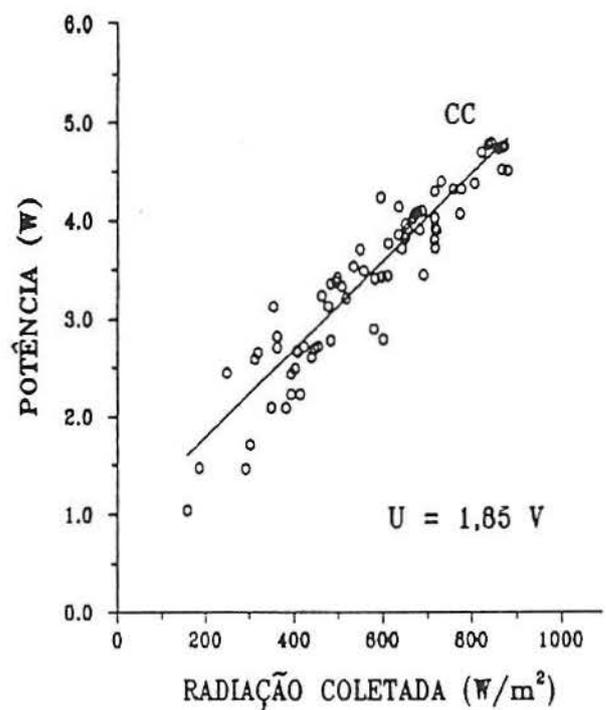
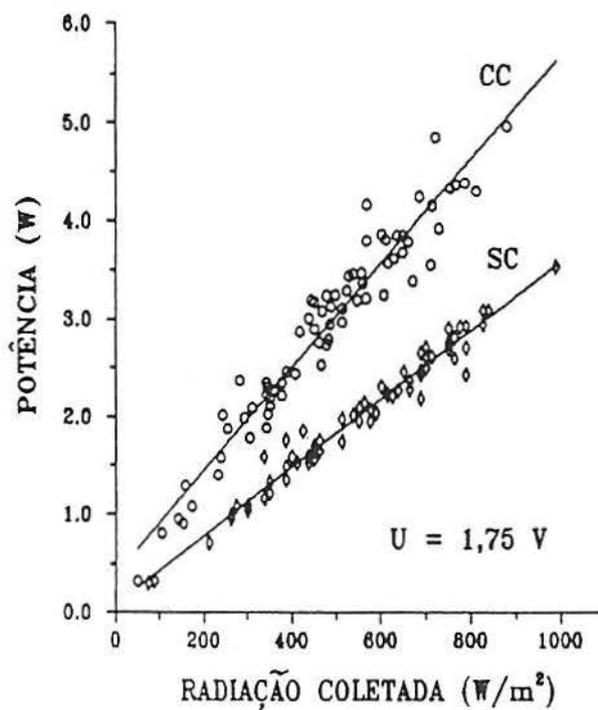
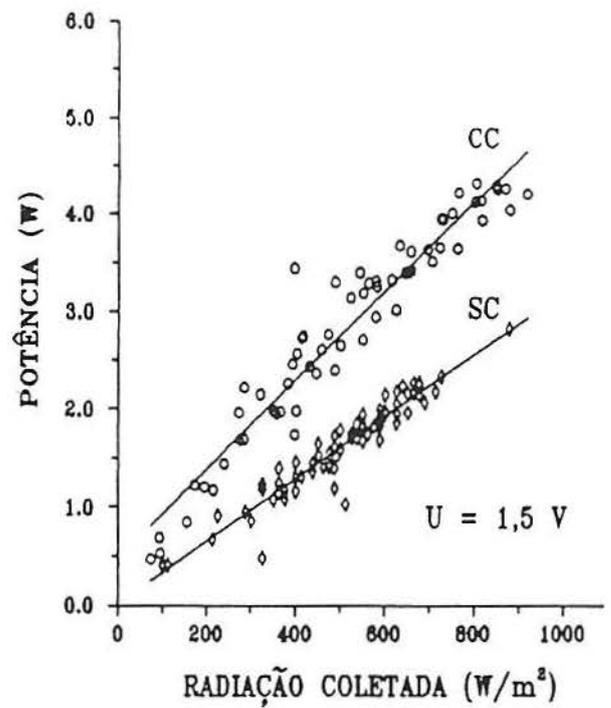
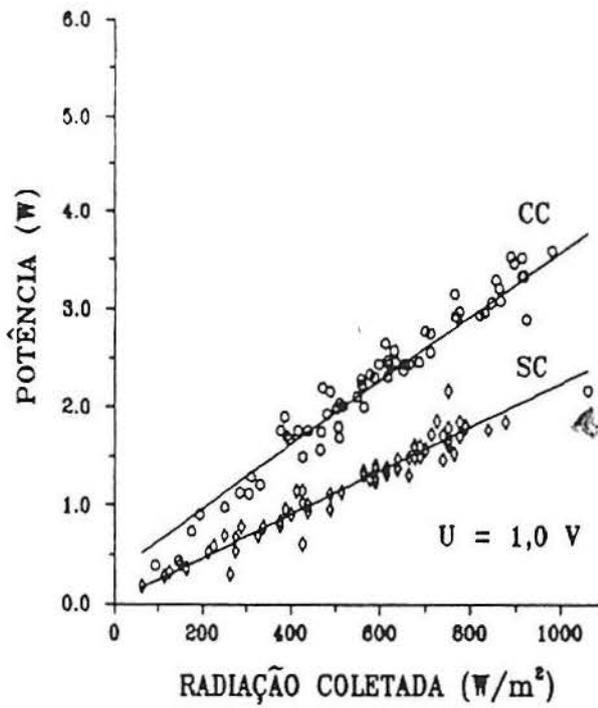
No caso do módulo submetido a concentração de radiação solar verifica-se que a irradiância na sua superfície é da ordem de 1,8 a 2,0 vezes o valor de  $I_C$ , de forma que o aumento de temperatura expressado em função da irradiância efetiva, vista pelo módulo, estaria afetado por um coeficiente angular da ordem de 0,014. Este valor coincide com o coeficiente encontrado para

o módulo sem concentração, ambos inferiores em 30% ao coeficiente 0,02 acima mencionado. Os menores aumentos de temperatura constituem um resultado favorável à utilização de sistemas com baixa relação de concentração e, como já comentado, podem ter relação com a circulação de ar permanente que existe no local dos testes. Outro aspecto que deve ser levado em consideração é o fator de ocupação do módulo utilizado nas experiências, relativamente baixo comparado com os módulos comerciais. As menores temperaturas devido à alta refletividade, na região não ocupada por células, oferece um caminho de transferência lateral de calor, adicional às perdas superiores e inferiores. Módulos com fatores de ocupação mais altos poderão atingir, portanto, temperaturas bem mais elevadas.

### 8.6.3 POTÊNCIA ELÉTRICA PRODUZIDA PELO CONJUNTO FOTOVOLTAICO

A potência elétrica produzida pelo módulo fotovoltaico, acoplado ou não, ao concentrador tipo V, foi representada em função da radiação coletada, para o módulo com concentração, e a radiação na abertura, para o módulo sem concentração. Os resultados para as diversas tensões fixas foram processados em base temporal horária.

De forma geral pode-se afirmar que a potência de saída do módulo fotovoltaico apresenta uma relação linear com a insolação coletada, tanto para o caso com concentração como para o caso sem concentração, para tensões até 1,85 Volts (Fig. 8.20). Com esta última tensão foram realizados testes exclusivamente com concentração.



(cont.)

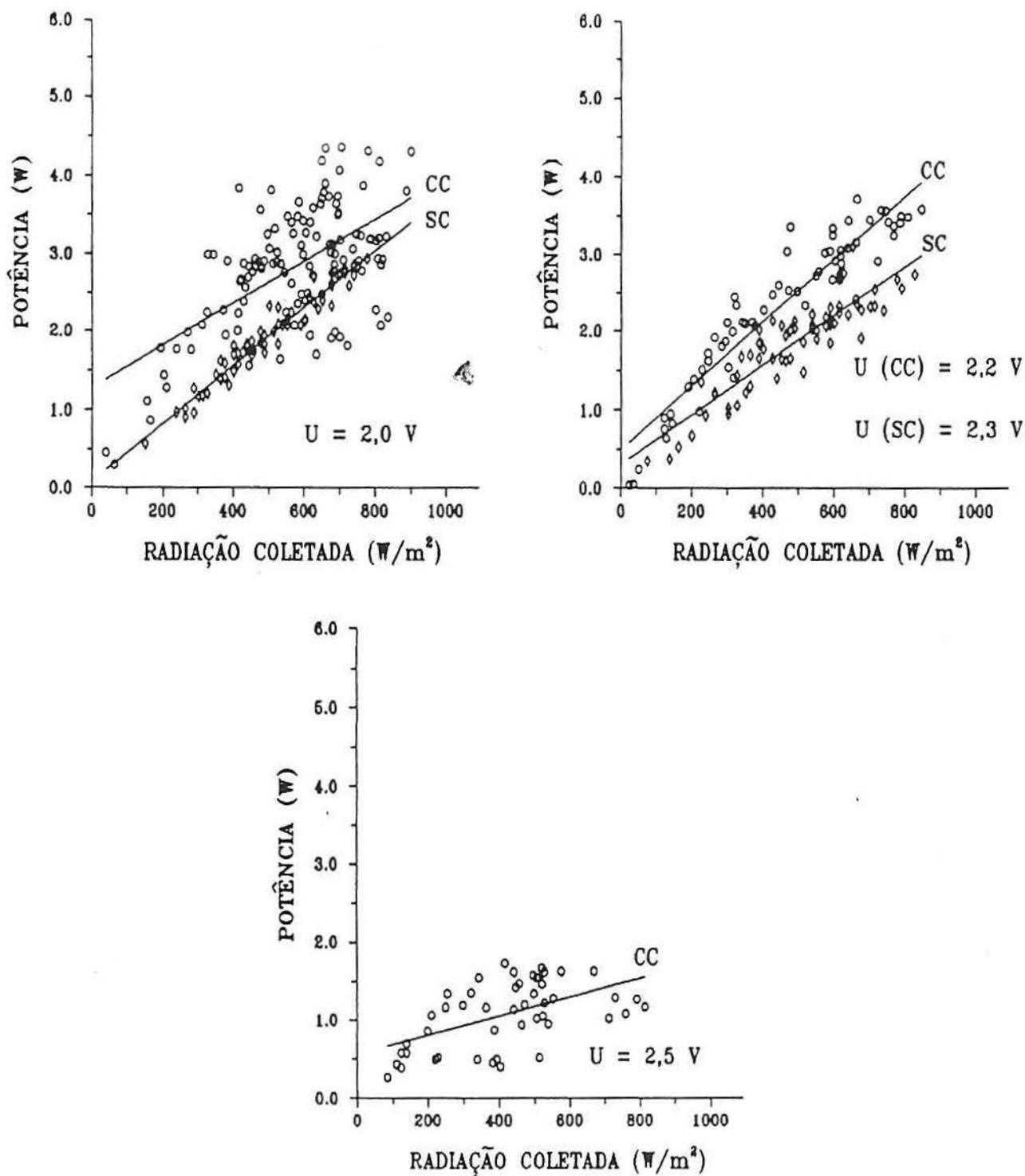


Figura 8.20 Potência elétrica média horária em função da insolação coletada para módulos com e sem concentração e diversas tensões fixas.

Os coeficientes ( $a_r$ ) e ( $b_r$ ) das retas de regressão que expressam a potência em função da radiação coletada,  $P = a_r + b_r I_c$ , são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 8.7 Coeficientes das retas de regressão, desvio padrão da potência e potência elétrica média horária correspondente ao nível de irradiância  $I_c = 800 \text{ W/m}^2$ , para as diversas tensões fixas, com e sem concentração

U(V)	1,00	1,50	1,75	1,85	2,00	2,20	2,30	2,50
<i>Sem concentração</i>								
$a_r$ (W)	0,023	0,016	0,082	---	0,090	---	0,310	---
$b_r$ (W/W/m <sup>2</sup> )	0,0022	0,0032	0,0035	---	0,0037	---	0,0032	---
$s_y$ (W)	0,12	0,15	0,12	---	0,13	---	0,26	---
P(W)	1,80	2,55	2,85	---	3,00	---	2,80	---
<i>Com concentração</i>								
$a_r$ (W)	0,315	0,473	0,384	0,787	1,279	0,496	---	0,561
$b_r$ (W/W/m <sup>2</sup> )	0,0033	0,0046	0,0053	0,0046	0,0027	0,0041	---	0,0012
$s_y$ (W)	0,26	0,28	0,25	0,31	0,64	0,32	---	0,36
P(W)	2,90	4,13	4,58	4,47	3,47	3,75	---	1,45

Quando a tensão fixa é igual a 2 V os valores da potência elétrica do módulo com concentração experimentam importantes variações, especialmente para valores de  $I_c$  superiores a 450-500 W/m<sup>2</sup> (Fig. 8.21). O desvio típico do conjunto de dados representado (Tabela 8.7) aumenta de  $\pm 0,25-0,30 \text{ W}$  para  $\pm 0,64 \text{ W}$  e com relação ao valor da potência

elétrica, de 6,7% para 19%. A variabilidade da potência, para tensões de 2,2 V e 2,5 V (CC), é maior que aquela que corresponde a tensões  $U \leq 1,8$  V, porém menor que no caso de 2V.

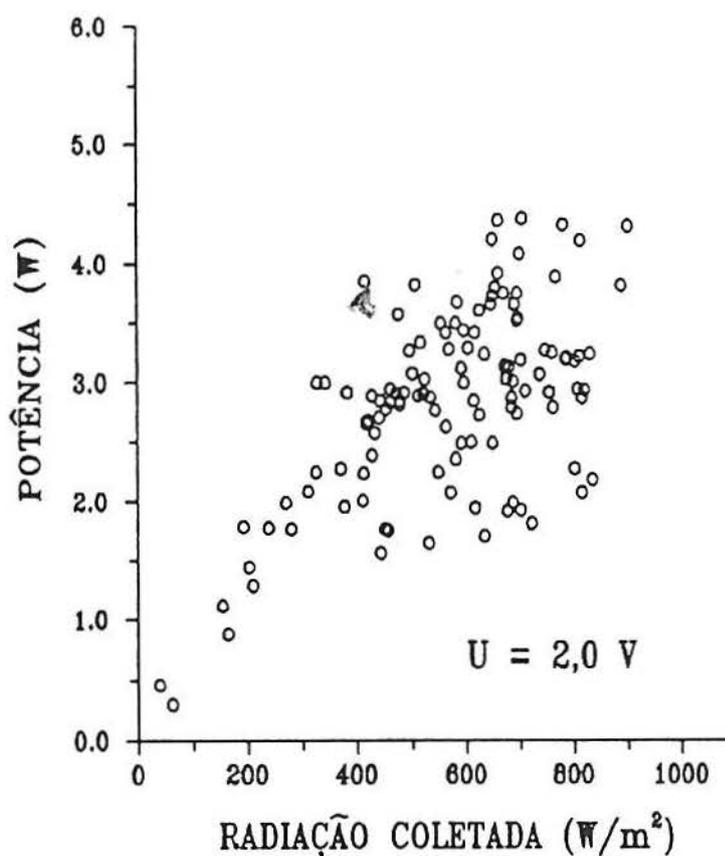


Figura 8.21 Potência elétrica média horária em função da radiação coletada para tensão  $U = 2$  V. Testes com concentração.

O sistema fotovoltaico operando sem concentração apresenta desvios absolutos e relativos menores que quando acoplado ao concentrador. O desvio é uniforme para  $U \leq 2,0$  V ( $S_y = \pm 0,12$  a  $0,15$  W) e aumenta consideravelmente para  $U = 2,3$  V, em forma absoluta e também com relação ao valor da potência indicado na Tab. 8.7 ( $P = 2,8$  W).

## A VARIABILIDADE DA POTÊNCIA ELÉTRICA PRODUZIDA

O aumento da dispersão dos valores da potência produzida pelo gerador fotovoltaico a partir de certas tensões fixas pode ser analisado em função da região da curva característica em que o ponto de operação se encontra, antes ou depois do ponto de máxima potência, tal como mencionado na Seção 8.4.4. Valores da tensão no ponto de máxima potência estão representados na Fig. 8.22, em função da radiação coletada.

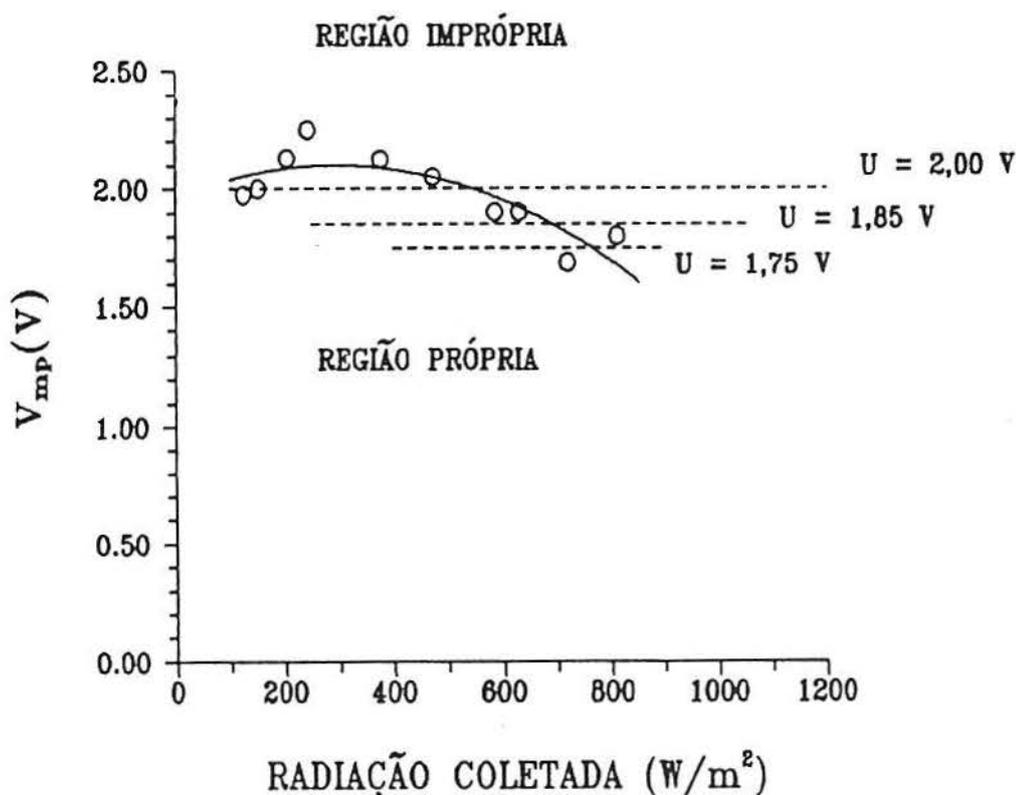


Figura 8.22 Tensão no ponto de máxima potência em função da radiação coletada para o conjunto de dados registrados na Tabela 8.4.

A função  $V_{mp}(I_c)$  divide o plano  $V-I_c$  em duas regiões. Na região de tensões superiores a  $V_{mp}$ , o comportamento do módulo perante variações de temperatura é desfavorável para todo nível

de radiação (Seção 8.4.4). Para a tensão fixa de 2V, verifica-se que o módulo ingressa nessa região a partir de  $I_C$  igual a 530 W/m<sup>2</sup>, próximo ao valor onde começam as flutuações de maior amplitude registradas na Fig. 8.21 (450-500W/m<sup>2</sup>). Para tensões fixas de 1,75 e 1,85 V, a região denominada imprópria começa em valores do nível de radiação mais elevados, de forma que a região própria ocupa uma fração crescente do intervalo total de níveis de radiação aos quais o sistema esta sujeito, fração tanto maior quanto menor seja a tensão fixa.

Os comentários que antecedem se referem a módulos com concentração. Utilizando a relação empírica  $I_a = 1,8.I_C$  e considerando  $I_a = I_A$  a Fig. 8.22 pode ser reinterpretada para módulos sem concentração. Por exemplo a tensão de 2V se encontra na região própria até níveis da ordem de 950 W/m<sup>2</sup> ( $I_C \approx 530$  W/m<sup>2</sup>) o que corrobora o resultado mostrado na Tab. 8.7 onde o módulo sem concentração apresenta a mesma variabilidade para 2 V que para valores inferiores a essa tensão. A tensão de 2,3 V (Fig. 8.22) encontra-se sempre na região imprópria, resultado consistente também com o desvio apresentado na Tab. 8.7 para módulos sem concentração sujeitos a essa tensão.

A curva que expressa a variação da tensão  $V_{mp}$ , com a irradiância (e as variações correlativas de temperatura) tem um valor máximo. Para cada valor da tensão fixa, nas proximidades da função  $V_{mp}$ , existe um nível de radiação que define a transição da região própria para a região imprópria e vice-versa. A variação da tensão  $V_{mp}$  em função da irradiância e da temperatura pode ser reproduzida analiticamente através da expressão

$$V_{mp} = V_{mp,ref} - \alpha_V(T - T_r) + V_t \ln \frac{I_a}{I_r} \quad (8.40)$$

ou

$$V_{mp} = V_{mp,ref} - \alpha_V(T_{am} - T_r) - \alpha_V(T - T_{am}) + V_t \ln \frac{I_a}{I_r} \quad (8.41)$$

onde  $T_r$  é uma temperatura de referência (e.g. 25°C). A diferença de temperatura ( $T - T_{am}$ ) pode ser escrita em função da irradiância de acordo com

$$T - T_{am} = \alpha_T I_a \quad (8.42)$$

onde  $\alpha_T$  é o coeficiente empírico 0,02 da Eq. (8.39) ou o valor encontrado na Seção 8.6.2 deste trabalho. Encontra-se desta forma uma expressão de  $V_{mp}$  em função de  $I_a$  exclusivamente

$$V_{PMP} = V_{PMP,ref} - \alpha_V(T_{am} - T_r) - \alpha_V \alpha_T I_a + V_t \ln \frac{I_a}{I_{ref}} \quad (8.43)$$

Verifica-se que a função  $V_{mp}$  tem um valor máximo ( $V_{mp,M}$ ) para uma irradiância na superfície do módulo igual a

$$I_a(V_{mp,M}) = \frac{V_t}{\alpha_V \alpha_T} \quad (8.44)$$

Introduzindo valores numéricos, encontra-se  $I_a(V_{mp,M}) = 932 \text{ W/m}^2$  ( $I_C = 518 \text{ W/m}^2$ ). No caso de módulos sem concentração ( $I_a = I_A$ ), existe um amplo intervalo de valores de irradiância,  $I_a(V_{mp,M})$  incluído, que possibilita sua operação na região própria desde que tensões fixas, levemente inferiores a  $(V_{mp,M})$  sejam escolhidas. Cabe mencionar, por último, que esta análise assume condições de quase-equilíbrio que em situações reais não se verificam. No entanto, permite identificar alguns dos aspectos qualitativos que determinam o comportamento do módulo na

vizinhança do ponto de máxima potência.

No que antecede foram identificadas duas regiões do plano  $V-I_C$  e analisadas as condições que definem o regime de operação do módulo. Cabe considerar ainda as características operacionais de módulos sujeitos a variações importantes de temperatura.

Assumindo que o módulo está sujeito a um nível de radiação constante e opera com tensão fixa, a variação de corrente,  $\delta I$ , (e da potência elétrica para geradores operando com tensão fixa) para uma variação de temperatura  $\delta T$  em torno de uma temperatura de equilíbrio, pode ser calculada através da expressão

$$\delta I + (I_{CC} - I) \cdot \exp R_s \delta I / V_t \cdot \exp \alpha_V \delta T / V_t = (I_{CC} - I) + \alpha_I \delta T$$

(8.45)

Para sua derivação, foi utilizada a expressão matemática da curva característica das células solares [41].

A Eq. (8.45) é uma função implícita de  $\delta I$  e  $\delta T$  e pode ser calculada numericamente. Para  $U = 2$  V, e assumindo  $I_C = 800$  W / m<sup>2</sup>,  $I_{CC} = 3,73$  A (valores correspondentes à curva B, Seção 8.4), o valor médio da corrente  $I = 1,8$  A (obtida a partir da Fig. 8.20,  $U = 2$  V, para  $I_C = 800$  W / m<sup>2</sup>), foi calculada a variação  $\delta I$  em função de  $\delta T$  (Fig. 8.23). Para  $\delta T$  igual a 8,5 °C (variação da temperatura na região de  $I_C = 800$  W / m<sup>2</sup>, Fig. 8.19),  $\delta I$  resulta igual a 0,36 A, ou seja uma variação igual a 20% da corrente ou da potência original ( $\delta P = 0,72$  W,  $P = 3,6$  W). Esta variação explica, aproximadamente, 50% das flutuações da potência elétrica observadas (Figs. 8.20 e 8.21), para

$I_C = 800 \text{ W} / \text{m}^2$ . Note-se que a variação de tensão que produz essa diminuição da corrente elétrica ( $\delta T \geq 0$ ) é igual a  $\alpha_V \delta T$  que, de acordo com os valores numéricos propostos, é aproximadamente igual a 0,1 V. Esta variação é da mesma ordem que as flutuações em tensão da carga eletrônica e portanto, em conjunto, podem explicar uma parte significativa da variabilidade da potência elétrica produzida.

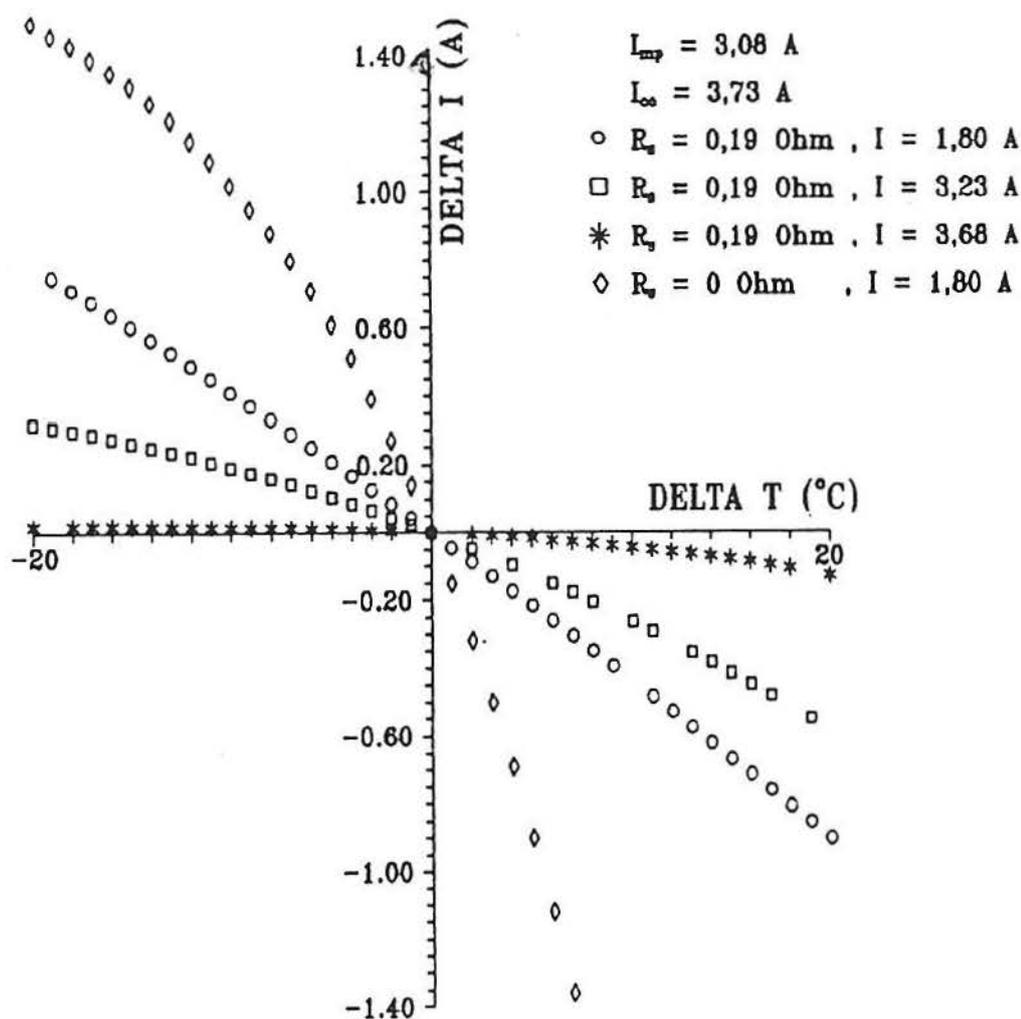


Figura 8.23 Variação da corrente em função da variação de temperatura em torno do ponto de equilíbrio.

É interessante analisar algumas das propriedades da relação entre  $\delta I$  e  $\delta T$ , representadas na Fig. 8.23. O valor da

corrente  $I$  define o ponto de trabalho para uma dada curva característica. A variação de corrente  $\delta I$  em função de  $\delta T$ , para valores da corrente ou pontos de trabalho localizados antes e depois do ponto de máxima potência, PMP, estão ilustrados na mesma figura. A variação de corrente que corresponde a um certo valor  $\delta T$  aumenta uniformemente com a diferença  $I_{cc} - I$ , de forma que as maiores variações ocorrem na região de baixas correntes, a medida que o ponto de operação se aproxima da tensão de circuito aberto. No outro extremo, quando o ponto de operação se aproxima da corrente de curto-circuito, observa-se um comportamento assimétrico com respeito às variações de temperatura. A variação de corrente para valores negativos de  $\delta T$  tende a se estabilizar, como resultado da limitação estabelecida pela corrente de curto circuito (vide Fig. 8.23, caso  $I = 3,68A$ ). Na região próxima da origem, ponto de equilíbrio onde a temperatura tem o valor definido pela radiação solar que incide sobre o módulo,  $\delta I$  tem um comportamento bastante linear. Do ponto de vista analítico, as variações positivas e negativas de  $\delta I$  estão sujeitas aos seguintes limites

$$\delta I \leq I_{cc} - I \qquad \delta T \leq 0 \qquad (8.46)$$

$$|\delta I| \leq I \qquad \delta T \geq 0$$

O primeiro limite é automaticamente satisfeito pela Eq. (8.45); o segundo exclui a inversão de corrente no circuito de carga e deve ser estabelecido como condição externa, já que a Eq. (8.45) não é incompatível com soluções onde a corrente  $I$  mais a variação  $\delta I$  sejam negativas.

As considerações que antecedem permitem inferir a existência de um ponto de operação para o qual as variações  $\delta I$

são máximas. Nesse ponto as variações positivas e negativas devem ser aproximadamente iguais, de modo que a corrente  $I$  satisfaz a relação  $I = I_{cc} / 2$ . Este resultado concorda com os dados registrados na Tab. 8.7 para  $U=2,0; 2,2$  e  $2,5$  V onde se verifica que a máxima dispersão ocorre para  $U=2,0$  V cuja corrente media é precisamente da ordem de  $I_{cc}/2$  ( $I \approx 1,8$  A).

Finalmente é interessante observar que células com menor resistência série que as utilizadas neste trabalho são mais sensíveis ao fenômeno de variabilidade da corrente aqui descrito, devido a que a curva característica dessas células tem maior inclinação na região de baixas correntes e portanto pequenas variações de temperatura se traduzem em variações mais pronunciadas de corrente. Por exemplo para  $R_s = 0,10 \Omega$  (a resistência série do módulo estudado neste trabalho é igual a  $0,19 \Omega$ ),  $I = 1,80$  A e  $\delta T = 8,5$  °C,  $\delta I$  aumenta de  $0,36$  para  $0,58$  A ou seja  $66\%$ . Na Fig. 8.23 está representada também a resposta de um módulo com resistência série nula, verificando-se para esse caso as maiores variações de corrente.

#### 8.6.4 ENERGIA ELÉTRICA DIÁRIA

O comportamento a longo prazo do gerador fotovoltaico pode ser representado a partir dos resultados da energia elétrica diária, produzida por ambos tipos de configurações do gerador, (SC) e (CC). Estes resultados foram representados na forma de potência elétrica média diária, durante o período de oito horas de observação, em função da radiação coletada média diária. A título ilustrativo os resultados para  $U = 1,75$  V estão

mostrados na Fig. 8.24.

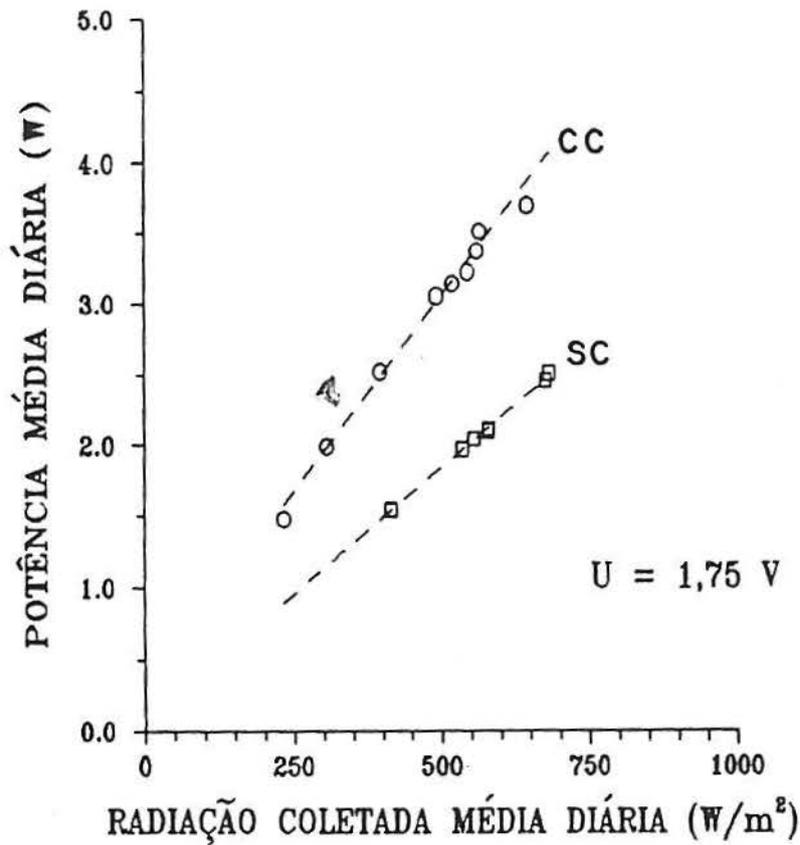


Figura 8.24 Potência média diária em função da radiação coletada para  $U = 1,75 \text{ V}$ , com e sem concentração.

As retas de regressão e o desvio padrão da potência média diária em função da radiação coletada, média diária, são as seguintes:

$$\text{SC} \quad \bar{P}(\text{W}) = 0,064 + 0,0036 \bar{I}_c (\text{W/m}^2) \quad s_y = \pm 0,013 \text{ W}$$

$$\text{CC} \quad \bar{P}(\text{W}) = 0,283 + 0,0056 \bar{I}_c (\text{W/m}^2) \quad s_y = \pm 0,070 \text{ W}$$

A energia elétrica diária para um determinado nível de radiação pode ser calculada simplesmente multiplicando a

potência média diária pelas oito horas de observação, procedendo da mesma forma com a irradiância. Por exemplo para  $\bar{I}_c = 700 \text{ W/m}^2$ , ou seja  $H_c = 5,6 \text{ kWh/m}^2$ , a energia elétrica produzida foi  $E(\text{SC}) = 20,67 \text{ Wh}$ .

A energia elétrica diária em função da tensão fixa está representada na Fig. 8.25, para o valor de  $H_c = 5,77 \text{ kWh/m}^2$  ( $\bar{I}_c = 721 \text{ W/m}^2$ ).

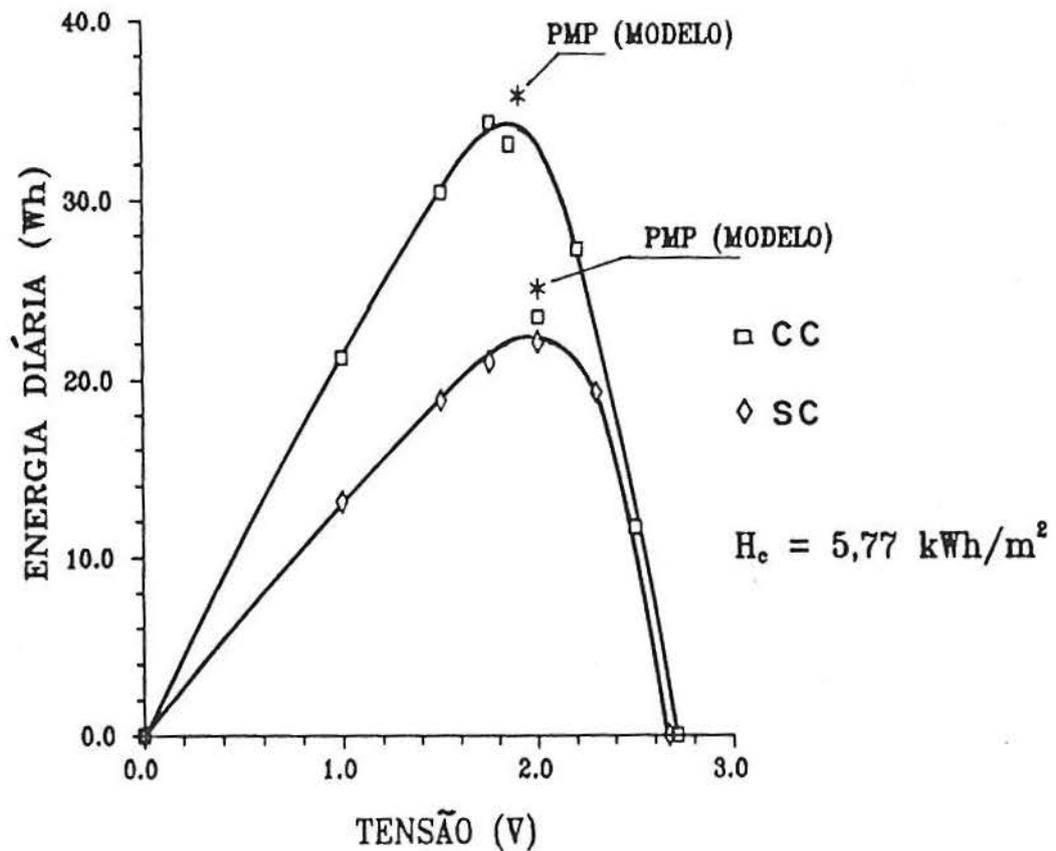


Figura 8.25 Energia elétrica diária em função da tensão fixa para uma radiação coletada média diária igual a  $721 \text{ W/m}^2$  ( $H_c = 5,77 \text{ kWh/m}^2$ ), com e sem concentração.

Os resultados indicam um máximo bem definido para ambas situações, (SC) e (CC). No primeiro caso a tensão que maximiza a energia diária é igual a 2 V e no segundo 1,80 V. A partir dos resultados horários para as tensões  $U = 1,75$  V e 1,85 V (CC), pode verificar-se que não existe diferença experimentalmente significativa entre eles (Fig. 8.26), resultado consistente com a existência de um máximo de energia em torno de uma tensão de aproximadamente 1,80 V. O valor que corresponde a 2 V, quando se utiliza concentrador, encontra-se fora da tendência da curva, tal como foi discutido na Seção 8.6.3.

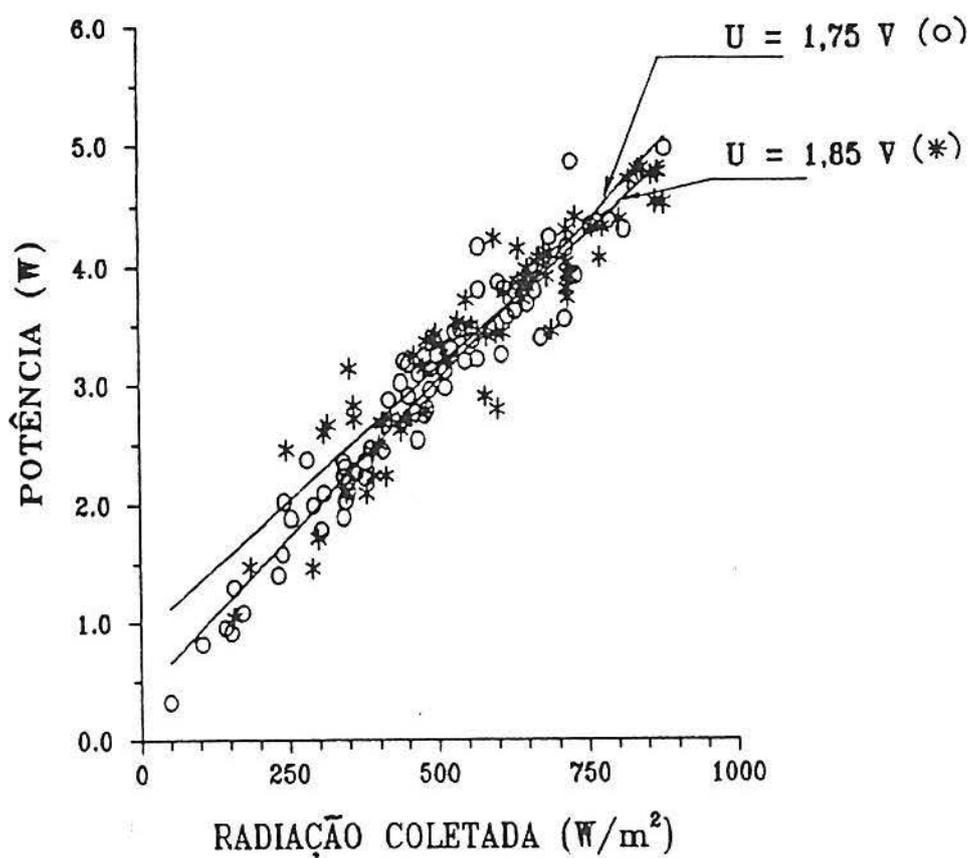


Figura 8.26 Comparação entre a potência elétrica média horária para tensões fixas de 1,75 e 1,85 V do módulo com concentração.

A relação entre os máximos estimados para os casos (CC) e (SC) é igual a 1,51, valor indicativo do benefício a longo prazo, resultante do uso do concentrador. O efeito do rastreamento se traduz em um aumento adicional de 31 a 33% da energia elétrica média diária [7 e 25], resultando em um ganho total de aproximadamente 100% com relação à energia produzida pelos mesmos módulos, fixos e sem concentração. Módulos de melhor qualidade poderão resultar em maiores benefícios ainda.

Finalmente, e a título ilustrativo, pode-se verificar que a metodologia desenvolvida neste trabalho permite estimar de forma simples a produção de energia a longo prazo. Considere-se o caso do gerador operando com a tensão fixa de 1,85 V e  $H_C = 5,77 \text{ kWh/m}^2$ . De acordo com a relação de radiação difusa a total, determinada através das observações constantes na Seção 8.6.1, a radiação total e difusa na abertura são iguais a  $H_A = 6,35 \text{ kWh/m}^2$  e  $H_{dA} = 0,96 \text{ kWh/m}^2$ , respectivamente. A eficiência ótica para radiação direta e difusa podem ser calculadas com as Eqs. (8.29) e (8.30) para  $\theta_i = \theta = 0$ , resultando iguais a

$$\eta_{otb} = 0,698 \quad \text{e} \quad \eta_{otd} = 0,376$$

A eficiência ótica ponderada com as componentes da radiação solar (Eq. 8.28) resulta, portanto, igual a

$$\eta_{ot} = 0,649$$

e assumindo um valor da eficiência fotovoltaica  $\eta_{pv} = 0,054$ , estimada a partir dos resultados apresentados na Fig. 8.14, (para  $U = 1,85 \text{ V}$ , próxima da tensão que maximiza a energia média

diária) obtemos a eficiência global

$$\eta = 0,035$$

que de acordo com a radiação total e área de abertura permite obter uma energia diária (8 horas) igual a

$$E = 35,3 \text{ Wh/dia}$$

valor que apresenta um bom acordo (desvio de 3,8%) com os resultados experimentais (34 Wh/dia).

## CAPÍTULO 9

### CONCLUSÕES

Os estudos teóricos e experimentais realizados ao longo deste trabalho permitem tirar as seguintes conclusões sobre os temas tratados.

#### 9.1 PROPRIEDADES ÓTICAS E RADIANTES DAS CAVIDADES TIPO V

##### A ESTRUTURA ÓTICA DA CAVIDADE

A abordagem desenvolvida neste trabalho permite construir os elementos básicos da estrutura ótica da cavidade, constituída por modos de reflexão, estados dos modos e relações operacionais que descrevem a dinâmica do surgimento, presença e extinção de modos e estados no interior da cavidade. Seu conhecimento conduz a obtenção de soluções analíticas que permitem calcular em forma exata a função de aceitação angular, a eficiência ótica, o perfil de radiação na região do absorvedor e os coeficientes de intercâmbio radiante, no caso em que a refletividade não depende do ângulo de incidência nas paredes. A metodologia de análise desenvolvida permite estudar o

comportamento das frações de radiação aceita e rejeitada, de forma unificada.

O caráter geral da metodologia desenvolvida para estudar a estrutura ótica das cavidades tipo V sugere a possibilidade de sua aplicação ao estudo de concentradores não formadores de imagem de paredes curvas e em especial ao cálculo de suas propriedades óticas e radiantes, que embora contem hoje com procedimentos aproximados bastante satisfatórios para o seu cálculo, admitem ainda aperfeiçoamentos que possam torná-los mais rigorosos.

## **B SOLUÇÕES ANALÍTICAS E SOLUÇÕES EXATAS**

As propriedades óticas e radiantes foram calculadas para um conjunto de cavidades, caracterizadas por uma variedade de combinações  $C, \psi$ . A comparação do caso em que a refletividade varia ao longo das paredes refletoras com o ângulo de incidência com o caso em que essa refletividade é constante mostra que os resultados não diferem significativamente (menos de 1%), valor que define o desvio das soluções analíticas obtidas considerando a refletividade das paredes constante.

## **C EFICIÊNCIA ÓTICA PARA RADIAÇÃO DIFUSA E CRITÉRIOS DE PROJETO**

O cálculo das propriedades óticas para radiação difusa mostram que a eficiência ótica depende basicamente da concentração e é pouco sensível a variação do ângulo do vértice. Por conseguinte, cavidades de ângulos grandes e portanto menor superfície de espelhos são as mais favorecidas do ponto de vista

da relação de custo-benefício. Precisamente custos mínimos são encontrados para ângulos do vértice entre 25 e 30°.

#### D LARGURA DA REGIÃO DE ILUMINAÇÃO UNIFORME

As características das cavidades com iluminação uniforme sugerem a conveniência de reduzir a largura do "plateau" ( $\mu$ ) da cavidade, com a finalidade de aumentar a fração de radiação aceita e por conseguinte a sua eficiência ótica. A utilização de sistemas de rastreamento com acompanhamento discreto e ajustes periódicos cada 20 minutos (cavidades de intervalo angular  $\mu = 2,6^\circ$ ), podem aumentar a eficiência ótica em 13% (de 70 para 79%) com relação à cavidade estudada neste trabalho. Benefícios mais importantes ainda podem resultar da utilização de sistemas com acompanhamento contínuo.

#### 9.2 METODOLOGIA DE PROJETO DAS CAVIDADES TIPO V

As soluções analíticas encontradas para as propriedades óticas das cavidades tipo V possibilitaram o desenvolvimento de uma metodologia geral para a definição da geometria mais adequada dessas cavidades quando integradas em sistemas fotovoltaicos.

O correto acoplamento ótico da cavidade com o módulo fotovoltaico, definido pela uniformidade de iluminação da região absorvedora, constitui parte essencial da metodologia de projeto. Este requisito, associado a critérios de custo mínimo possibilita a escolha da cavidade que apresenta as melhores condições operacionais e relação de custo-benefício.

O estudo da variação da energia com a inclinação do eixo de rastreamento permite concluir que o plano horizontal é a melhor opção em termos de custos de instalação para sistemas localizados em regiões de pequenas latitudes, tal como a cidade de Recife.

### 9.3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

#### A A ESCALA DE TEMPO DAS OBSERVAÇÕES E O REGIME DE TRABALHO DOS EQUIPAMENTOS

Com relação à importância da escala de tempo nas observações experimentais, constata-se um aumento substancial na magnitude das grandezas físicas relevantes, irradiação e corrente elétrica, quando os registros passam de uma hora para períodos de 15 minutos. Verifica-se, portanto, a existência de um regime de trabalho do sistema fotovoltaico fortemente dinâmico, em presença de grandes flutuações. Estas considerações são relevantes no que diz respeito à metodologia de projeto e manutenção dos equipamentos, com a finalidade de dotá-los de um adequado grau de confiabilidade

A temperatura das células do módulo situa-se em torno dos 20°C acima da temperatura ambiente, quando o módulo está acoplado ao concentrador, e em torno dos 11°C para o módulo sem concentração. A temperatura média ambiente durante os testes varia entre 26 e 28°C, de forma que os módulos estão expostos à temperaturas máximas que não superam os 50°C. Ao contrário de outras grandezas físicas, não se observam importantes diferenças nas temperaturas registradas quando a escala de tempo diminui.

As maiores temperaturas mencionadas podem ser consideradas moderadas, apesar de não haverem sido utilizados dispositivos de dissipação de calor. Estes podem chegar a ser necessários em condições climatológicas mais exigentes que as da cidade de Recife, local onde existe uma brisa permanente que sopra do mar em direção noroeste ou sudoeste durante o ano todo e que explica os resultados observados.

## **B PERFIL DE ILUMINAÇÃO NO ABSORVEDOR**

A viabilidade técnica da proposta de uso de módulos fotovoltaicos acoplados a concentradores tipo V está estritamente associada ao grau de uniformidade do perfil de iluminação no absorvedor. Os testes realizados tem sido decisivos nesse sentido, mostrando que esse atributo, exclusivo desse tipo de cavidades, se verifica com grande precisão, salvo pequenas não uniformidades associadas a deformações de caráter estrutural, assimetrias e defeitos de alinhamento, que podem ser toleradas ou minimizadas a partir de um adequado desenho estrutural da cavidade e procedimentos de controle de sua qualidade ótica.

## **C A QUALIDADE DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

A utilização de concentradores aumenta a irradiância vista pelos conversores fotovoltaicos. Torna-se necessário, portanto, uma correta adaptação entre a qualidade das células fotovoltaicas e o nível de radiação a que estarão submetidas. Neste aspecto, o parâmetro mais importante é a resistência série das células fotovoltaicas, cujo valor deve ser reduzido

substancialmente (com relação às utilizadas neste trabalho, de duas a três vezes), para poder converter a radiação solar em energia elétrica com boa eficiência.

#### D O DESEMPENHO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO E SUA VIABILIDADE ECONÔMICA

As medidas de insolação na abertura da cavidade confirmam o aumento esperado na coleção de energia solar devido ao acompanhamento do movimento do Sol (30%). Ao mesmo tempo, o aumento da produção de energia diária, ou a longo prazo, do sistema com concentração em relação ao sistema sem concentração é igual a 50%. O resultado combinado de ambos efeitos é um aumento global de 96% com relação a coletores fixos. Um projeto cuidadoso do sistema, que admita valores do intervalo angular ( $\mu$ ) inferiores ao adotado e portanto valores da relação de concentração (C) menores, pode se traduzir em redução de custos de investimento e benefícios adicionais às condições de viabilidade econômica já verificadas em nosso estudo. A utilização de células fotovoltaicas de melhor qualidade, hoje já disponíveis, deverão contribuir significativamente para melhorar a relação de custo-benefício do sistema estudado.

#### E A METODOLOGIA DE ANÁLISE

Os procedimentos desenvolvidos para análise de sistemas fotovoltaicos com e sem concentração permitem, do ponto de vista conceitual, adquirir uma adequada compreensão dos fenômenos que ocorrem durante o processo de conversão de energia

solar em elétrica e do ponto de vista quantitativo mostram boa exatidão na predição do desempenho desses sistemas.

Particular importância deve ser dada à influência das propriedades óticas dos sensores de radiação solar e da cobertura dos módulos fotovoltaicos, quando são utilizados concentradores de radiação. Estes equipamentos modificam a trajetória dos raios luminosos, de forma que o ângulo de incidência na superfície absorvedora aumenta consideravelmente com relação ao ângulo de incidência dos raios na abertura da cavidade, reduzindo, em alguma medida, a eficiência ótica para radiação direta. Os resultados obtidos com as ferramentas teóricas desenvolvidas reproduzem adequadamente os resultados experimentais.

## RECOMENDAÇÃO

Em virtude dos resultados favoráveis obtidos ao longo deste estudo recomenda-se a realização de um projeto de demonstração de um sistema fotovoltaico de maior porte (da ordem de vários Kilowatts de potência elétrica), de características similares às do sistema fotovoltaico utilizado neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Boes, E. C., "A summary of recent photovoltaic concentrator technology developments". 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, Nevada, EEUU, págs. 21-30 (1988).
  
- [2] Welford, T. and Winston, R., "High collection nonimaging optics". Academic Press, San Diego (1989).
  
- [3] Rabl, A., "Comparison of solar concentrators". Solar Energy, Vol. 18, págs. 93-111 (1976).
  
- [4] Collares Pereira, M.; Rabl, A. and Winston, R., "Lens-mirror combinations with maximal concentration". Applied Optics, Vol. 16, págs. 2677-2683 (1977).
  
- [5] Hollands, K. G. T., "A concentrator for thin-film solar cells". Solar Energy, Vol. 13, págs. 149-163 (1971).
  
- [6] Nann, S., "Potentials for tracking photovoltaic systems and V-troughs in moderate climates". Solar Energy, Vol. 45, págs. 385-393 (1990).

- [7] Fraidenraich, N., "Modelo de simulação de geradores fotovoltaicos com rastreamento em torno de um eixo Norte-Sul acoplados a cavidades tipo V". Publicação Interna, Departamento de Energia Nuclear, UFPE, Recife-PE (1990).
- [8] Williamson, D. E., "Cone chanel condenser optics". Journal of the Optical Society of America, Vol. 42, págs. 712-715 (1952).
- [9] Hinterberger, H. and Winston, R., "Efficient light coupler for threshold Cerenkov counters". Review of Scientific Instruments, Vol. 37, págs. 1094-1095 (1966).
- [10] Winston, R., "Light collection within the framework of geometrical optics". Journal of the Optical Society of America, Vol. 60, págs. 245-247 (1970).
- [11] Baranov, V. K. and Melnikov, G. K., "Study of the illumination characteristics of hollow focons". Soviet Journal of Optics Technology, Vol. 33, págs. 408-411 (1966)
- [12] Baranov, V. K., Original publicado na revista Geliotekhnika, Vol. 2, págs. 11-14 (1966). Tradução com o título, "Parabolotoroidal mirrors as elements of solar energy concentrators", Applied Solar Energy, Vol.2, págs.9-12.

- [13] Ploke, M., "Lichtführungseinrichtungen mit starker Konzentrationswirkung". *Optik*, Vol. 25, págs. 31-43 (1967).
- [14] Tabor, H., "Stationary mirror systems for solar collectors". *Solar Energy*, Vol. 2, págs. 27-33 (1958).
- [15] Howell J. R. and Bannerot, R. B., "Trapezoidal grooves as moderately concentrating solar energy collectors". *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 49, págs. 277-289 (1976).
- [16] Mannan, K. D. and Bannerot, R. B., "Optimal geometries for one and two faced symmetric side wall booster mirrors". *Solar Energy*, Vol. 21, págs. 385-391 (1978)
- [17] Burkhard, D. G.; Strobel, G. L. and Burkhard, D. R., "Flat sided rectilinear trough as a solar concentrator: an analytical study". *Applied optics*, Vol. 17, págs. 1870-1883 (1978).
- [18] Fraidenraich, N. e Almeida, G. J. de, "Propriedades óticas de concentradores tipo V". *Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM)*, Florianópolis, SC, Vol.I, págs. 451-454, dezembro (1987).
- [19] Fraidenraich, N. and Almeida, G. J. de, "Optical properties of V-trough concentrators". *Solar Energy*, Vol. 47, No. 3, págs. 147-155 (1991).

- [20] Fraidenraich, N., "Analytic solutions for the optical properties of V-trough concentrators". *Applied Optics*, Vol. 31, págs. 131-139 (1992).
- [21] Fraidenraich, N., "Analytic solutions for the optical and radiative properties of non-accepted light radiation of V-trough concentrators". Aceito para publicação na revista *Applied Optics*.
- [22] Stacey, R. W. and McCormick, P. G., "Effect of concentration on the performance of flat plate photovoltaic modules". *Solar Energy*, Vol. 33, págs. 565-569 (1984).
- [23] Freilich, J. and Gordon, J. M., "Case study of a central station grid-intertie photovoltaic system with V-trough concentration". *Solar Energy*, Vol. 46, págs. 131-139 (1991).
- [24] Collares Pereira, M. and Rabl, A., "Simple procedure for predicting long term average performance of nonconcentrating and concentrating solar collectors". *Solar Energy*, Vol. 23, págs. 235-253 (1979).
- [25] Lyra, F. J. M., "Simulação numérica de uma central fotovoltaica interligada com a rede de energia elétrica". Tese de Mestrado, Curso de Mestrado em Ciência e Tecnologia Nuclear, Departamento de Energia Nuclear, UFPE, Recife-PE (1992).

- [26] Perez, R.; Seals, R.; Ineichen, I.; Stewart, R. and Menicucci, D., "A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces". *Solar Energy*, Vol. 39, págs. 221-231 (1987).
- [27] Berman, E. and Mitchell, K. W., "Photovoltaic power plants: present and future". Proceedings of the 4th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Sidney, NSW Australia, fevereiro (1989). Editado por The Institution of Radio and Electronics Engineers of Australia, Edgecliff, NSW, Australia 2027.
- [28] Cuddihy, E. F.; Coulbert, C. D.; Liang, R. H.; Gupta, A.; Willis, P. and Baum, B., "Applications of ethylene vinyl acetate as an encapsulation material for terrestrial photovoltaic modules". J.P.L. Publication 83-35, DOE/JPL Publication 1012-87, April, 1983. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California (1983).
- [29] Gordon, J. M. and Reddy, T. A., "Generalized capacity factors for grid-intertie solar photovoltaic systems". *Solar Cells*, Vol. 23, págs. 127-137 (1988).
- [30] Barnett, M. E., "The geometrical vector flux field within a compound elliptical concentrator". *Optik*, Vol.54, págs. 429-432 (1980).

- [31] Gordon, J. M., and Rabl, A., "Uniform and efficient illumination from pair overlap flux maps using nonimaging reflectors". *Optical Engineering*, Vol. 32, págs. 1057-1062 (1993).
- [32] Carvalho, M. J.; Collares Pereira, M.; Gordon, J. M. and Rabl, A., "Truncation of CPC solar collectors and its effect on energy collection". *Solar Energy*, Vol. 35, págs. 393-399 (1985).
- [33] Georlette, O. and Gordon, J. M., "Generalized nonimaging compound elliptical and compound hyperbolic luminaire designs for pair-overlap illumination applications". *Applied optics*, Vol. 33, págs. 4171-4178 (1994).
- [34] Rabl, A., "Optical and thermal properties of compound parabolic concentrators". *Solar Energy*, Vol 18, págs. 497-511 (1976).
- [35] Rabl, A., "Radiation transfer through specular passages - A simple approximation". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 20, págs. 323-330 (1977).
- [36] Fraidenraich, N. and Salcedo, I. H., "Multimode analysis of compound parabolic concentrators with flat absorber". *Applied Optics*, Vol. 32, págs. 2891-2900 (1993).

- [37] Sparrow, E. M. and Cess, R. D., "Radiation heat transfer". Hemisphere Publishing Corporation, Washington, London (1978).
- [38] Rabl, A., "Active solar collectors and their applications", Oxford University Press, New York, Oxford (1985).
- [39] Silva Fraga, A. N. da e Fraidenraich, N., "Programa computacional para o cálculo das propriedades óticas e radiantes das cavidades tipo V". Software desenvolvido no Departamento de Energia Nuclear, UFPE, Recife-PE (1993).
- [40] Collares Pereira, M. and Rabl, A., "The average distribution of solar radiation. Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values". Solar Energy, Vol. 22, pág. 155-164 (1979).
- [41] Green, M. A., "Solar Cells. Operating principles, technology and system applications". Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 07632 (1982).
- [42] Fraidenraich, N., "Estudo de viabilidade técnico-econômica da utilização de concentradores tipo V em conjunto com módulos fotovoltaicos". Relatório Técnico, Convênio CHESF/UFPE, Recife, PE (1987).

- [43] Fraidenraich, N.; Silva Fraga, A. N. da e Costa, H. S., "Teste de desempenho de conversores fotovoltaicos acoplados a concentradores elástico-compostos". Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM), Florianópolis, SC, Vol. 1, págs. 455-458, dezembro (1987).
- [44] Silva Fraga, A. N. da, "Sistema de micro-irrigação utilizando gerador CEC-Fotovoltaico (Análise técnica e econômica). Tese de Mestrado, Curso de Mestrado em Ciência e Tecnologia Nuclear, Departamento de Energia Nuclear, UFPE (1989).
- [45] Fraidenraich, N. e Costa, H. S., "Experimental set up for recording radiation profiles of compound parabolic concentrators". Publicação Técnica do Departamento de Engenharia Eletrônica e Sistemas, UFPE, Recife, PE, Ano I, Nº 3 (1979).
- [46] Rabl, A.; O'Gallagher, J. and Winston, R., "Design and test of non-evacuated solar collectors with compound parabolic concentrators". Solar Energy, Vol. 25, págs. 335-351 (1980).
- [47] Suehrcke, H. and McCormick, P. G., "The frequency distribution of instantaneous insolation values", Solar Energy, Vol. 40, págs. 413-422 (1988).

- [48] Fraidenraich, N.; Silva Fraga, A. N. da e Lyra, F. J. M., "Software para previsão do desempenho de sistemas fotovoltaicos, FV-FAE". Software desenvolvido no Grupo FAE, Departamento de Energia Nuclear, UFPE, Recife-PE (1993).
- [49] Siegel, M. D.; Klein, S. A. and Beckman, W. A., "A simplified method for estimating the monthly-average performance of photovoltaic systems". Solar Energy, Vol. 26, págs. 413-418 (1981).
- [50] Jet Propulsion Laboratory, "A solar cell array design handbook". Vol.II, Nº JPL Sp 43-48 (1976).
- [51] Rauschenbach, H. S., "Solar cell array design handbook", Van Nostrand Reinhold Company, New York (1980).
- [52] Van Overstraeten, R. J. and Mertens, R. P., "Physics, technology and use of photovoltaics", Adam Hilger Ltd, Bristol and Boston (1986).

## APÊNDICE A

### CAVIDADES TIPO V COMO CASO PARTICULAR DOS CONCENTRADORES HIPERBÓLICOS COMPOSTOS

No Cap. 2 foi mencionado que as cavidades tipo V podem ser obtidas como um caso particular dos concentradores hiperbólicos compostos, quando a relação  $\overline{R_E R_D} = \overline{R_D F_D}$  é satisfeita (Fig. 2.6). A seguir será derivada a expressão que relaciona a concentração (C) com o ângulo do vértice ( $\psi$ ) [Eq. (2.2)], válida para essa subclasse de cavidades.

A inspeção da Fig. 2.7 mostra que o ângulo  $ABR_D$  é igual a  $2\psi$ . A partir dessa constatação pode-se escrever

$$\operatorname{tg} 2\psi = \frac{H}{1 + \frac{C-1}{2}} \quad (\text{A1})$$

onde o parâmetro H representa a altura da cavidade e é igual a

$$H = \frac{C-1}{2 \operatorname{tg}\psi} \quad (\text{A2})$$

A substituição da Eq. (A2) em (A1) permite obter a [Eq.(2.2)], ou seja

$$\operatorname{tg}^2\psi = \frac{C-1}{3C+1}$$

## APÊNDICE B

### SOLUÇÕES ANALÍTICAS PARA OS MODOS DE REFLEXÃO DA RADIAÇÃO REJEITADA NA REGIÃO DE TRANSIÇÃO

CASO  $\alpha_{N+1} < \delta_N$

Modo  $2N+1$

*Estado ascendente*

$$P_{2N+1} = \frac{C-1}{2C} \frac{\text{sen}(\alpha_{N+1} + \psi)}{\cos \theta_i \text{sen} \psi} \left[ \frac{\text{sen}(\theta_i + \psi)}{\text{sen}(\alpha_{N+1} + \psi)} - \frac{\cos[\theta_i + (N+1)\psi]}{\cos[\alpha_N + (N+1)\psi]} \right]$$

$$\alpha_{N+1} \leq \theta_i \leq \delta_N \quad (\text{B1})$$

*Estado descendente*

$$P_{2N+1} = \frac{C-1}{2C} \frac{\text{sen}(\epsilon_N + \psi)}{\cos \theta_i \text{sen} \psi} \left[ \frac{\text{sen}(\theta_i + \psi)}{\text{sen}(\epsilon_N + \psi)} - \frac{\cos[\theta_i + (N+1)\psi]}{\cos[\epsilon_N + (N+1)\psi]} \right]$$

$$+ \frac{\text{sen}(2N\psi) \cos[\epsilon_N + (2N+1)\psi]}{\text{sen} \psi \cos \theta_i} \left[ \frac{\cos[\theta_i + (2N+1)\psi]}{\cos[\epsilon_N + (2N+1)\psi]} - \frac{\cos[\theta_i + (N+1)\psi]}{\cos[\epsilon_N + (N+1)\psi]} \right]$$

$$\delta_N \leq \theta_i \leq \epsilon_N \quad (\text{B2})$$

**Modo 2N****Estado ascendente**

$$P_{2N} = - \frac{\text{sen}(2N\psi)}{\text{sen}\psi \cos\theta_i} \cos [\theta_i + (2N + 1)\psi] \quad \delta_N \leq \theta_i \leq \varepsilon_N \quad (\text{B3})$$

**Estados intermediários**

$$P_{2N} = \frac{C - 1}{2C} \frac{\text{sen}(\alpha_{N+1} + \psi)}{\cos\theta_i \text{sen}\psi} \left[ \frac{\text{sen}(\theta_i + \psi)}{\text{sen}(\alpha_{N+1} + \psi)} - \frac{\cos [\theta_i + (N + 1)\psi]}{\cos [\alpha_{N+1} + (N + 1)\psi]} \right] \\ \varepsilon_N \leq \theta_i \leq \gamma_N \quad (\text{B4})$$

$$P_{2N} = \frac{1}{C} + \frac{C - 1}{2C} \frac{\text{sen}(\beta_{N-1} - \psi)}{\cos\theta_i \text{sen}\psi} \left[ \frac{\text{sen}(\theta_i + \psi)}{\text{sen}(\beta_{N-1} - \psi)} - \frac{\cos [\theta_i + (N - 1)\psi]}{\cos [\beta_{N-1} + (N - 1)\psi]} \right] \\ + \frac{\text{sen}[(2N - 1)\psi]}{\text{sen}\psi \cos\theta_i} \cos (\theta_i + 2N\psi) \quad \gamma_N \leq \theta_i \leq \beta_{N-1} \quad (\text{B5})$$

**Estado descendente**

$$P_{2N} = \frac{\text{sen}(2N\psi)}{\text{sen}\psi \cos\theta_i} \cos [\theta_i + (2N - 1)\psi] \quad \beta_{N-1} \leq \theta_i \leq \delta_{N-1} \quad (\text{B6})$$

CASO  $\delta_N \leq \alpha_{N+1}$ **Modo 2N****Estado ascendente**

$$P_{2N} = \frac{C - 1}{2C} \frac{\text{sen}(\alpha_{N+1} + \psi)}{\cos\theta_i \text{sen}\psi} \left[ \frac{\text{sen}(\theta_i + \psi)}{\text{sen}(\alpha_{N+1} + \psi)} - \frac{\cos [\theta_i + (N + 1)\psi]}{\cos [\alpha_{N+1} + (N + 1)\psi]} \right] \\ \alpha_{N+1} \leq \theta_i \leq \gamma_N \quad (\text{B7})$$

**Estado descendente**

$$P_{2N} = \frac{C-1}{2C} \frac{\text{sen}(\epsilon_N + \psi)}{\cos \theta_i \text{sen } \psi} \left[ \frac{\text{sen}(\theta_i + \psi)}{\text{sen}(\epsilon_N + \psi)} - \frac{\cos(\theta_i + N\psi)}{\cos(\epsilon_N + N\psi)} \right] - \frac{\text{sen}[(2N-1)\psi]}{\text{sen } \psi \cos \theta_i} \cos(\epsilon_N + 2N\psi) \left[ \frac{\cos(\theta_i + N\psi)}{\cos(\epsilon_N + N\psi)} - \frac{\cos(\theta_i + 2N\psi)}{\cos(\epsilon_N + 2N\psi)} \right]$$

$$\gamma_N \leq \theta_i \leq \epsilon_N \quad (\text{B8})$$

**Modo 2N-1****Estado ascendente**

$$P_{2N-1} = - \frac{\text{sen}[(2N-1)\psi]}{\text{sen } \psi \cos \theta_i} \cos(\theta_i + 2N\psi) \quad \gamma_N \leq \theta_i \leq \epsilon_N \quad (\text{B9})$$

**Estados intermediários**

$$P_{2N-1} = \frac{1}{C} + \frac{C-1}{2C} \frac{\text{sen}(\beta_{N-1} - \psi)}{\cos \theta_i \text{sen } \psi} \left[ \frac{\text{sen}(\theta_i + \psi)}{\text{sen}(\beta_{N-1} - \psi)} - \frac{\cos[\theta_i + (N-1)\psi]}{\cos[\beta_{N-1} + (N-1)\psi]} \right]$$

$$\epsilon_N \leq \theta_i \leq \delta_{N-1} \quad (\text{B10})$$

$$P_{2N-1} = \frac{1}{C} + \frac{C-1}{2C} \frac{\text{sen}(\beta_{N-1} - \psi)}{\cos \theta_i \text{sen } \psi} \left[ \frac{\text{sen}(\theta_i + \psi)}{\text{sen}(\beta_{N-1} - \psi)} - \frac{\cos[\theta_i + (N-1)\psi]}{\cos[\beta_{N-1} + (N-1)\psi]} \right] + \frac{\text{sen}[(2N-1)\psi]}{\text{sen } \psi \cos \theta_i} \cos[(\theta_i + (2N-1)\psi)]$$

$$\delta_{N-1} \leq \theta_i \leq \beta_{N-1} \quad (\text{B11})$$

**Estado descendente**

$$P_{2N-1} = \frac{\text{sen}[(2N-1)\psi]}{\text{sen } \psi \cos \theta_i} \cos[\theta_i + 2(N-1)\psi]$$

$$\beta_{N-1} \leq \theta_i \leq \gamma_{N-1} \quad (\text{B12})$$

## APÊNDICE C

### REGISTRO DE DADOS AO LONGO DE UM DIA TÍPICO

Tabela C.1. Informações diárias processadas

Local:	Recife	Intervalo Horário	Concentração
		Padrão: 08-16hs	do gerador: 2,5
Data:	04/11/92	Intervalo entre	Ângulo do
		leituras: 15 min	Vértice: 30°
Hora		Modo de	Inclinação
Inicial:	08:00hs	Operação: U = cte	do Gerador: 0°
Hora		Tensão de	Área de
Final:	16:00hs	Operação: 1.85 V	Coleção: 0,159 (m <sup>2</sup> )

#### Dados Médios em Intervalos de 15 Minutos

Hora	Radiação no plano			Grandezas elétricas			Efic.	Temperatura		
	Horiz.	Coletor		Abs.				de	do	
	Total	Total	Dif.	Total	Tensão	Corr.	Pot.	conv.	Mód.	Amb.
	Ih	IA	IdA	Ia	U	I	P	η	T	Tamb
(h)	(W/m <sup>2</sup> )			(V)	(A)	(W)	(%)	(°C)		
8:15	304	451	200	642	1.85	0.88	1.63	2.27	39.1	25.0
8:30	400	351	150	505	1.86	1.40	2.60	4.66	42.1	25.0
8:45	536	601	200	914	1.84	1.64	3.02	3.16	43.5	25.3
9:00	664	801	200	1276	1.84	2.28	4.18	3.28	46.2	25.5
9:15	824	952	250	1506	1.86	2.56	4.76	3.14	50.0	25.8
9:30	616	701	150	1138	1.85	1.96	3.63	3.26	47.6	26.0
9:45	816	902	200	1459	1.84	2.40	4.42	3.08	47.2	26.0

(cont.)

(cont.)

10:00	528	551	250	780	1.84	1.56	2.86	3.26	45.2	26.0
10:15	580	651	150	1048	1.83	1.68	3.07	2.97	42.5	26.0
10:30	764	801	150	1319	1.84	2.32	4.27	3.35	43.8	26.0
10:45	788	902	150	1502	1.85	2.68	4.96	3.46	47.2	26.0
11:00	736	902	200	1459	1.85	2.44	4.50	3.14	49.1	26.0
11:15	944	1052	200	1730	1.81	3.00	5.43	3.25	49.0	26.5
11:30	844	952	150	1593	1.81	2.60	4.71	3.11	49.7	27.0
11:45	952	1002	200	1640	1.83	2.88	5.26	3.30	48.8	27.0
12:00	792	751	150	1229	1.81	2.20	3.98	3.33	46.0	27.0
12:15	696	751	200	1185	1.82	2.00	3.63	3.04	45.1	27.0
12:30	720	751	150	1229	1.82	2.12	3.85	3.22	45.0	27.0
12:45	796	902	150	1502	1.80	2.60	4.69	3.27	44.9	27.0
13:00	760	1352	301	2185	1.84	4.00	7.34	3.41	45.7	27.0
13:15	616	250	50	409	1.84	0.40	0.74	1.86	43.0	27.0
13:30	676	851	150	1410	1.81	2.40	4.34	3.21	42.9	27.0
13:45	532	701	150	1138	1.81	2.00	3.62	3.25	45.0	27.0
14:00	632	902	200	1459	1.82	2.80	5.10	3.56	45.2	27.0
14:15	576	851	150	1410	1.84	2.40	4.40	3.25	46.3	27.0
14:30	532	851	150	1410	1.85	2.40	4.43	3.27	46.3	27.0
14:45	468	801	200	1276	1.84	2.80	5.14	4.04	44.1	27.0
15:00	424	801	150	1319	1.83	1.60	2.92	2.29	42.0	27.0
15:15	388	801	200	1276	1.82	2.40	4.36	3.42	41.8	26.5
15:30	280	551	150	867	1.83	1.60	2.93	3.34	40.1	26.0
15:45	312	701	200	1095	1.84	2.00	3.68	3.30	39.0	26.0
16:00	172	401	100	639	1.82	1.20	2.18	3.42	39.0	26.0

## Dados Médios Horários

Hora (h)	Insolação no Plano			Grandezas Elétricas			Efic. de conv.	Temperatura do		
	Horiz.	Coletor		Abs.	Tensão U (V)	Corr. I (I)		Pot. P (W)	Mód. T (°C)	Amb. Tamb
	Total Ih	Total IA	Difus. IdA	Total Ia						
		(W/m <sup>2</sup> )								
08-09	476	551	188	834	1.85	1.55	2.86	3.26	43.1	25.2
09-10	696	776	213	1219	1.84	2.12	3.91	3.17	47.2	25.9
10-11	717	814	163	1332	1.84	2.28	4.19	3.24	45.5	26.0
11-12	883	939	175	1547	1.81	2.67	4.84	3.24	47.9	26.8
12-13	743	939	200	1526	1.82	2.68	4.88	3.27	45.0	27.0
13-14	614	676	138	1104	1.82	1.90	3.63	3.26	44.3	26.0
14-15	500	826	163	1353	1.83	2.30	4.21	3.21	44.4	27.0
15-16	288	614	163	970	1.82	1.80	3.28	3.36	39.9	26.2

## Dados Médios Diários

Total Ih	Insolação no Plano			Grandezas Elétricas			Efic. de conv.	Temperatura do	
	Horiz.	Coletor		Abs.	Tensão U (V)	Corr. I (I)		Pot. P (W)	Mód. T (°C)
	Total IA	Total IdA	Total Ia						
		(W/m <sup>2</sup> )							
615	767	175	1236	1.83	2.16	3.96	3.25	44.7	26.39