

**Nº 104
TESE DE
DOUTORADO**

**NOVA ABORDAGEM PARA A DETERMINAÇÃO DA
DENSIDADE DE FLUXO SOLAR NO ABSORVEDOR
DE CONCENTRADORES SOLARER**

AUTOR: MANOEL HENRIQUE DE OLIVEIRA PEDROSA FILHO

**RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL
NOVEMBRO – 2013**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

**NOVA ABORDAGEM PARA A DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE
FLUXO SOLAR NO ABSORVEDOR DE CONCENTRADORES
LINEARES**

Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho

Orientador: Prof. Dr. Naum Fraidenraich
Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Olga de Castro Vilela

Recife, PE
Novembro, 2013

Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho

**NOVA ABORDAGEM PARA A DETERMINAÇÃO DA
DENSIDADE DE FLUXO SOLAR NO ABSORVEDOR DE
CONCENTRADORES LINEARES**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Tecnologias Energéticas e Nucleares para
obtenção do título de Doutor em Ciências, Área
de Concentração: Fontes Renováveis de
Energia.

Orientador: Prof. Dr. Naum Fraidenaich
Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Olga de Castro Vilela

Recife, PE
Novembro, 2013

Catálogo na fonte
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

P372n Pedrosa Filho, Manoel Henrique de Oliveira.
Nova abordagem para a determinação da densidade de
fluxo solar no absorvedor de concentradores lineares. / Manoel
Henrique de Oliveira Pedrosa Filho. - Recife: O Autor, 2013.
102 f. : il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Naum Fraidenaich.

Coorientadora: Profa. Dra. Olga de Castro Vilela.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas
e Nucleares, 2013.

Inclui referências.

1. Concentração solar. 2. Densidade de fluxo concentrado.
3. Erros ópticos. 4. Parâmetros ópticos do concentrador
solar 5. Energia solar. I. Fraidenaich, Naum (orientador).
II. Vilela, Olga de Castro (coorientadora). III. Título.

CDD 621.47 (21. ed.)

UFPE
BDEN/2013-25

**NOVA ABORDAGEM PARA A DETERMINAÇÃO DA
DENSIDADE DE FLUXO SOLAR NO ABSORVEDOR DE
CONCENTRADORES LINEARES**

Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho

APROVADA EM: 26.11.2013

ORIENTADOR: Prof. Dr. Naum Fraidenaich

COORIENTADORA: Profa. Dra. Olga de Castro Vilela

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Milton Matos Rolin – Gerência Regional de Educação – Sertão Araripe

Prof. Dr. Mário Augusto Bezerra da Silva - DEN/UFPE

Prof. Dr. Chigueru Tiba – DEN/UFPE

Prof. Dr. Paulo Roberto Maciel Lyra – Departamento de Engenharia Mecânica/UFPE

Prof. Dr. Naum Fraidenaich – DEN/UFPE

Visto e permitida a impressão

Coordenador(a) do PROTEN/DEN/UFPE

AGRADECIMENTOS

Ao professor Naum e a professora Olga e pela dedicação, estímulo, compromisso e amizade e pelo companheirismo nas horas difíceis.

Ao CNPq pelo incentivo por meio da concessão da bolsa de pesquisa.

Aos professores Chigueru Tiba, Paulo Lyra, Mário Augusto, Carlos Brayner, Carlos Antônio e Milton Rolim por todas as contribuições.

Aos colegas e amigos do grupo FAE: Carlos Antônio, Antônio, Rodrigo, Douglas, Francisco, Urbano, Milton, Prof. André Felipe, Prof. Alexandre, Profa. Elieusa, Rinaldo e Marcelo, pela ajuda e amizade.

Aos colegas e amigos do IFPE Campus Pesqueira: Valdemir, Glauco, Mário Monteiro, Alexandre, Ygo, José Roberto, Bruno, e tantos outros pelo apoio e compreensão.

A todos os amigos e familiares, em especial a minha mãe (Lia), ao meu pai (Neco), ao meu filho (Pedro) e a minha filha (Adriana) que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Pernambuco e ao Departamento de Energia Nuclear pela oportunidade da realização do curso de doutorado.

RESUMO

O desempenho de sistemas de conversão solar, que utilizam o fluxo concentrado, depende da forma com a qual este fluxo atinge a superfície do absorvedor. Diversos autores têm estudado fatores que influenciam na eficiência da coleção desse fluxo solar, sendo os desvios mecânicos um exemplo desses fatores. Vários modelos foram propostos para a determinação da distribuição do fluxo solar em absorvedores de concentradores. Alguns desses modelos apresentam limitações em sua utilização quando se necessita simular a influência simultânea de desvios ópticos de forma que seja possível obter parâmetros operacionais do concentrador. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um novo método para a determinação da densidade de fluxo solar concentrado em absorvedores e utiliza uma forma analítica, por meio de uma equação geométrica e uma convolução em conjunto com uma forma gráfica – gráfico de isolinhas. Os resultados obtidos permitiram comprovar a possibilidade de utilizar uma representação dos fenômenos que ocorrem em um concentrador (2D) por meio do diagrama de isolinhas, que expressa a relação entre o local de incidência da radiação no concentrador, dado pelo ângulo (θ), e a região do Sol que ilumina esse local (ângulo φ), para diversos valores do ponto de incidência no absorvedor (y). É possível reunir, ao longo de uma isolinha, o conjunto de pares ($\theta - \varphi$) que iluminam um único ponto (y) do absorvedor. No desenvolvimento deste método, utilizou-se a calha parabólica com um absorvedor plano, embora seja possível a sua utilização com outras geometrias. Essa metodologia permite a utilização de qualquer modelo de distribuição de brilho solar, sendo possível a simulação de desvios ópticos que alteram a distribuição angular da energia refletida em direção ao absorvedor. Pode-se também determinar os parâmetros ópticos do sistema concentrador, que permitem caracterizar sua qualidade óptica. O diagrama de isolinhas desenvolvido permite visualizar claramente a contribuição de cada ponto da superfície refletora na iluminação do absorvedor, sendo possível simular facilmente, em diferentes geometrias de concentradores, os efeitos dos desvios ópticos determinísticos e estocásticos. A metodologia desenvolvida é constituída por um conjunto de procedimentos simples, porém precisos, baseados inicialmente em uma equação de intercâmbio radiativo entre as superfícies (refletora e absorvedora) e na geometria do concentrador e de seu absorvedor. Permite trabalhar com qualquer tipo de função de distribuição de brilho, determinística ou estocástica.

Palavras-chave: concentração solar; densidade de fluxo concentrado; desvios ópticos; parâmetros ópticos do concentrador solar; energia solar.

ABSTRACT

Concentrating collector's performance depends, among other factors, on the flux density distribution at the absorber. The influence of various factors, that finally shape the flux density profile have been studied by several authors. Material's gross and fine structure, deviations of the absorber localization within the collector's cavity are examples of problems which have been analyzed. Several models have been proposed to determine the flux density on the absorber. Deviations of the solar concentrator assembly from ideal and its influence on the operational parameters have to be estimated simultaneously. Some models have restrictions or are inherently unable to calculate them. With the purpose of overcoming those restrictions this thesis presents the development of a new approach to determine the concentrated solar flux. It is obtained an exact analytic equation for the flux density distribution in two dimensional solar concentrators. Its main results are: a) A convolution equation between sun radiance and a geometrical equation which represents the transfer function of the concentrator and absorber geometry and b) A diagram of isolines that gives an overall representation of the collector's behavior under different conditions of operation. The diagram expresses the relationship between the place where light rays reach the absorber, given by an angle (θ), the sun rays defined by an angle (φ) reaching the point (y) at the absorber where the flux density is being calculated. The method was developed initially for a parabolic trough with a plane absorber, although it can be used with other geometries. It allows a) The use of any solar bright distribution model, b) Simulate optical deviations which modify the angular distribution reflected towards the absorber and c) It can determine the optical parameters of a concentrator system in order to check its optical quality. The method developed enables to treat alternatively deterministic and stochastic variables, taking into account materials' deviations from ideal (stochastic) and assembling problems that, depending on circumstances, can be treated as deterministic or stochastic.

Keywords: solar concentration, concentrated flux density, optical deviation, solar concentrator optical parameters, solar energy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Apresentação.....	17
1.2	Justificativa	19
1.3	Objetivo	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Conceitos Gerais	23
2.1.1	Limites da concentração solar	24
2.1.2	Distribuição do brilho solar.....	25
2.1.3	Propriedades dos concentradores solares.....	27
2.1.4	Desvios ópticos.....	32
2.2	Modelos de distribuição de energia em absorvedores de concentradores solares	36
2.2.1	Modelos de distribuição de energia para absorvedores planos	36
2.2.2	Modelos de distribuição de energia para absorvedores cilíndricos	45
3	METODOLOGIA	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1	Utilização do modelo de isolinhas com erros ópticos.....	69
4.1.1	Desalinhamento do eixo da parábola.....	69
4.1.2	Deslocamento vertical do absorvedor.....	72
4.1.3	Erros estocásticos	75
4.1.4	Ocorrência simultânea de desalinhamentos e erros estocásticos.....	78
4.2	Função de aceitação angular e fator de interceptação.....	82
4.3	Aplicação do modelo com outras geometrias.....	89
4.3.1	Calha parabólica com absorvedor circular.....	89
4.3.2	Fresnel com absorvedor circular	93
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
6	PERSPECTIVAS	98
	REFERÊNCIAS	99

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA	PÁGINA
Figura 1 - Formação do cone solar.	25
Figura 2 - Gráfico dos 5 modelos de distribuição do brilho solar	27
Figura 3 - Trajetória de três raios com ângulos de incidência diferentes	28
Figura 4 - Gráfico da função de aceitação angular	29
Figura 5 - Exemplo de distribuição de fluxo ao longo de um absorvedor AB.....	29
Figura 6 - Descrição dos erros do coletor parabólico	33
Figura 7 - Efeito dos desvios sobre o tamanho efetivo do Sol visto pelo absorvedor	34
Figura 8 - Posição do Sol em relação a um concentrador do tipo calha parabólica.....	35
Figura 9 - Distribuição de energia no absorvedor utilizando o modelo disco não uniforme, para cinco diferentes ângulos de borda (15°, 30°, 45°, 60° e 75°)	38
Figura 10 - Distribuição da imagem devido a erros de alinhamento para ângulos de borda 30° e 75°	39
Figura 11 - Caminho reverso dos raios, desde o absorvedor até o Sol	39
Figura 12 - Concentração local em função da posição normalizada no absorvedor para vários ângulos de borda	41
Figura 13 - Projeção do cone solar no plano xz	42
Figura 14 - Concentração local de uma calha parabólica para vários valores de k.....	43
Figura 15 - Distribuição normalizada para uma calha parabólica com absorvedor plano para cinco ângulos de borda diferentes.....	44
Figura 16 - Geometria básica do coletor parabólico com absorvedor cilíndrico.....	45
Figura 17 - Diâmetro mínimo do absorvedor para diferentes configurações geométricas	48
Figura 18 - Relação entre a área da superfície refletora e o ângulo de borda	48
Figura 19 - Relação fundamental do fluxo refletido.....	49
Figura 20 - Geometria generalizada da calha parabólica no plano xy, com vista lateral, paralela a pyz.....	50
Figura 21 - Trecho dC da superfície parabólica	51
Figura 22 - Concentração local em absorvedor cilíndrico para ângulo de borda de 90° e vários ângulos de incidência.....	52
Figura 23 - Distribuição de energia para a configuração 1, sob vários valores de desvio óptico	54
Figura 24 - Distribuição de energia para a configuração 2, sob vários valores de desvio óptico	55
Figura 25 - Curva da eficiência ótica X desvio total	56
Figura 26 - Configuração dos ângulos de um concentrador parabólico visto em perfil	58
Figura 27 - Conjunto de valores ($\theta - \varphi$) que atingem o absorvedor em um ponto ($y=cte$) utilizado como parâmetro de cada curva.....	60
Figura 28 - Detalhes da iluminação da região focal	62
Figura 29 - Gráfico de isolinhas completo da parábola	62
Figura 30 - Representação completa do corte transversal da parábola e do cone solar.....	63
Figura 31 - Distribuição de energia ao longo do absorvedor	65
Figura 32 - Reflexão dos raios de borda da parábola	66
Figura 33 - Distribuição de energia no absorvedor, utilizando-se duas distribuições de brilho diferentes.	67

Figura 34 - Distribuição de energia utilizando-se três distribuições de brilho diferentes em todo o comprimento do absorvedor.	68
Figura 35 - Comparação da distribuição de energia utilizando o modelo de Evans (1977) e com este modelo (a) distribuição de brilho de José (1957) (b) distribuição de brilho constante	68
Figura 36 - Percentual de iluminação em cada ponto do absorvedor.	69
Figura 37 - Parábola com desalinhamento em relação ao vetor solar	70
Figura 38 - Configuração dos ângulos da parábola com desalinhamento.....	71
Figura 39 - Gráfico de isolinhas da parábola desalinhada.	71
Figura 40 - Distribuição de energia sobre o absorvedor na situação alinhada e com 1° de desalinhamento	72
Figura 41 - Configuração dos ângulos da parábola mediante um deslocamento do absorvedor	73
Figura 42 - Gráfico das isolinhas ($\theta - \varphi$) para uma parábola com absorvedor deslocado de 1% da distância focal	74
Figura 43 - Distribuição de energia no absorvedor de uma parábola com deslocamento no sentido $x=0, 1, 2$ e 3% da distância focal.....	75
Figura 44 - Distribuição de brilho, para vários modelos de Sol, considerando os erros ópticos estocásticos ($\sigma_{\text{Sol}} = 4,65$ mrad e $\sigma_{\text{tot}} = 10$ mrad)	76
Figura 45 - Distribuição de energia sobre o absorvedor, sem erros ópticos e considerando desvios de $1, 5$ e 20 mrad.....	78
Figura 46 - Distribuição de energia sobre o absorvedor considerando a ocorrência simultânea de desvios ópticos determinísticos e estocásticos.....	79
Figura 47 - Distribuição de energia no absorvedor de uma parábola com deslocamento no sentido $x=0, 1, 2$ e 3% da distancia focal e $\sigma_{\text{tot}} = 10$ mrad.....	80
Figura 48 - Distribuição de energia no absorvedor de uma parábola considerando a ocorrência de todos os desvios ópticos (x e $y = 0$ e 3% da distância focal e $\sigma_{\text{tot}} = 10$ mrad).....	81
Figura 49 - Isolinha que representa o ponto limite do absorvedor (y_m).....	82
Figura 50 - Determinação da área útil de acordo com o ângulo de incidência dos raios paralelos	83
Figura 51 - Determinação da abertura útil e da abertura total em função dos parâmetros geométricos da parábola.....	84
Figura 52 - Função de aceitação angular para dois tamanhos de absorvedor	87
Figura 53 - Diferença entre os valores do fator de interceptação calculado com a função de aceitação angular de Rabl (1985) e a deste modelo para vários valores de desvios ópticos....	88
Figura 54 - parâmetros do concentrador parabólico com absorvedor cilíndrico.....	90
Figura 55 - gráfico de isolinhas concentrador parabólico com absorvedor cilíndrico	91
Figura 56 - Distribuição da energia sobre o absorvedor cilíndrico de um concentrador parabólico	92
Figura 57 - Parâmetros do concentrador Fresnel linear com absorvedor cilíndrico.....	93
Figura 58 - Gráfico das isolinhas de um concentrador Fresnel com espelhos facetados e absorvedor cilíndrico	94
Figura 59 - Distribuição de energia em um absorvedor cilíndrico de um concentrador Fresnel de espelhos facetados	95

LISTA DE TABELAS

TABELA	PÁGINA
Tabela 1 - Concentração em função do ângulo de borda e desvio angular.....	47
Tabela 2 - Dados dos coletores para elaboração da distribuição.....	53

LISTA DE SÍMBOLOS ARÁBICOS

a	Metade da abertura total de um concentrador parabólico (m)
A	Abertura total de um concentrador parabólico (m)
$A_{abertura}$	Área da abertura do concentrador (m ²)
$A_{absorvedor}$	Área do absorvedor (m ²)
$B(\varphi)$	Intensidade da radiação solar na direção angular φ (W/m ² .rad)
$B_{eff}(\varphi)$	Função de brilho efetivo (W/m ²)
C_{cid}	Taxa de concentração local, utilizando o modelo de brilho disco constante (sois)
C_{flux}	Concentração de fluxo (sois)
$C_{fluxo}(y)$	Taxa de concentração de fluxo no ponto 'y' (sois)
C_{geom}	Concentração geométrica (sois)
$C_{ideal2D}$	Limite de concentração em coletores bidimensionais (sois)
$C_{idel\ 3D}$	Limite de concentração em coletores tridimensionais (sois)
C_{nud}	Taxa de concentração local, utilizando o modelo não uniforme (sois)
C_{sq}	Taxa de concentração local, utilizando modelo de brilho constante (sois)
dA	Elemento de área (m ²)
dC	Elemento de arco da superfície refletora (graus)
dl	Comprimento de uma seção estreita do concentrador (m)
dq	Densidade de fluxo em um elemento de área (W/m ²)
dQ	Fluxo incidente em um elemento de área (W)
$dI_r(x')$	Densidade de fluxo no plano do absorvedor, produzida pela seção dl (W/m ²)
dx	Elemento de comprimento longitudinal (m)
$d\Omega$	Ângulo sólido (sr)
$E(\varphi - \varphi_{in})$	Distribuição de probabilidade dos desvios do concentrador
f	Distância focal (m)
$f(z)_\varphi$	Função de densidade de probabilidade do fluxo originado de um ângulo φ .
F	Ponto focal
$F(\varphi)$	Função de aceitação angular

h_0	Distância entre os espelhos e o ponto focal de um concentrador Fresnel (m)
i_{nud}	Intensidade da radiação solar no centro do Sol (W/m ²)
i_s	Intensidade da radiação solar ao longo do disco solar (W/m ²)
$I_{abertura}$	Fluxo incidente na abertura do concentrador (W/m ²)
$I_{absorvedor}$	Fluxo incidente no absorvedor (W/m ²)
I_{cid}	Distribuição de brilho solar, modelo disco constante (W/m ²)
I_{nud}	Distribuição de brilho solar, modelo não uniforme (W/m ²)
I_{sq}	Distribuição de brilho solar, modelo constante (W/m ²)
$I(y)$	Radiação solar incidente no ponto (y) do absorvedor (W/m ²)
$I(y,\theta)$	Contribuição que um raio de ângulo 'φ' provoca no ponto 'y' ao ser refletido com ângulo 'θ' (W/m ²)
k	Ângulo entre o vetor solar e o plano (xz) transversal do concentrador solar (graus)
$K(\theta)$	Modificador do ângulo de incidência
L	Deslocamento do absorvedor no sentido do eixo 'x' (m)
\hat{n}	Vetor normal à superfície
$P(\theta)$	Probabilidade de que um fóton seja refletido em um ponto na superfície refletora designado por θ
Q	Irradiação distribuída ao longo do absorvedor (W)
$Q_{abertura}$	Irradiação que ingressa na abertura do coletor (W)
$Q_{absorvedor}$	Irradiação solar que chega ao absorvedor (W)
$Q_{incidente}$	Irradiação solar refletida em direção ao absorvedor (W)
r	Distância entre um ponto 'P' da superfície refletora e o ponto focal (m)
r_{abs}	Raio do absorvedor circular (m)
r_r	Raio de borda de um concentrador parabólico (m)
R	Coordenada radial do Sol medida a partir do centro (m)
R_0	Raio do Sol ou de sua imagem (m)
R_1	Raio que deixa o absorvedor em direção à superfície refletora
R_2	Raio que parte da superfície refletora ao Sol
R_{min}	Menor diâmetro do absorvedor que permite interceptar todos os raios refletidos (m)
S	Comprimento da superfície refletora (m)

u_{yz}	Distância entre o elemento de arco (dC) e o foco da parábola (m)
x', y'	Coordenadas do fóton que chega à região focal (m)
y	Ponto localizado no absorvedor
y_m	Ponto limite do absorvedor plano
W	Largura total do absorvedor (m)
W_i	Fator de peso para os raios R_2 , produzido pelo modelo disco circular
(a,b)	Semieixo maior e menor da elipse (m)
(x_c, y_c)	Coordenadas de um ponto na superfície refletora

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

α	Absortividade
β	Posição angular no absorvedor circular (graus)
γ	Fator de interceptação
Γ	Intervalo angular do brilho efetivo (graus)
δ	Ângulo entre o eixo da parábola e o vetor solar (graus)
ε	Ângulo que um raio refletido qualquer faz em relação ao raio central (graus)
η_o	Eficiência óptica
θ	Ângulo entre o eixo central da parábola e o segmento ligando o foco ao ponto onde um raio foi refletido no concentrador parabólico (graus)
θ_a	Meio ângulo de aceitação do coletor (graus)
θ_r	Ângulo de borda do concentrador parabólico (graus)
ρ	Refletividade
ρ_0	Distância no plano longitudinal entre O' e F (m)
$\sigma_{\text{desalinhamento}}$	Desvio padrão angular do desalinhamento das estruturas ópticas (graus)
$\sigma_{\text{geometria}}$	Desvio padrão dos erros de contorno de uma superfície refletora (graus)
σ_{rastreo}	Desvio padrão angular dos erros de rastreamento (graus)
$\sigma_{\text{rugosidades}}$	Desvio padrão em relação às microrrugosidades de uma superfície refletora (graus)
σ_{sol}	Desvio padrão angular do Sol (graus)
$\sigma_{\text{sol,médio}}$	Desvio padrão médio do Sol para um dia de 8h (graus)
$\sigma_{\text{Solx,y}}$	Desvio padrão angular do Sol visto pelo plano longitudinal do

	concentrador solar (graus)
σ_{tot}	Desvio padrão total (graus)
τ	Transmissividade
φ	Ângulo entre o eixo central do feixe solar e um raio solar contido no feixe (graus)
φ_D	Ângulo entre o raio R_2 e o vetor solar (graus)
φ_{in}	Ângulo de incidência de um raio de abertura do concentrador (graus)
φ_{lim1}	Limite angular para o qual $F(\varphi) = 1$ (graus)
φ_{lim2}	Limite angular para o qual $F(\varphi) > 0$ (graus)
φ_s	Semiângulo do cone solar (raio angular do sol) (graus)
$\varphi_{s\ x,y}$	Semiângulo do cone solar visto pelo plano longitudinal do concentrador (graus)
$\varphi_{ }$	Ângulo entre o vetor solar e o plano longitudinal do concentrador solar (graus)
Φ_d	Fluxo solar oriundo exclusivamente do disco solar (W/m^2)
Φ_{cs}	Fluxo solar contido na região circunsolar (W/m^2)
Φ_i	Fluxo solar total (W/m^2)
χ	Taxa de radiação circunsolar

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Até meados da década de 1980, o tema fontes renováveis de energia era pouco comentado e difundido, apesar de as pesquisas apresentarem resultados sobre viabilidade técnica de suas possíveis aplicações. O que prevalecia era o consumo, de forma desenfreada, de recursos não renováveis e de fontes primárias potencialmente perigosas, como a energia nuclear.

Com a falta de chuvas nos grandes reservatórios, ocorreu a crise do apagão em 2001. A diversificação da matriz energética brasileira foi uma das soluções encontradas para minimizar a situação na época. Com o lançamento do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) em 2002, seguiram-se os leilões específicos para fontes alternativas, como biomassa e eólica. No último leilão ocorrido em 2013, foram selecionadas 66 usinas eólicas, com preço médio de R\$ 110,51 / MWh.

Outro motivo para a realização de diversos leilões de compra de energia é a manutenção do crescimento econômico do País. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2011), as projeções para o crescimento do PIB brasileiro para o horizonte 2012-2016 são da ordem de 4%. Para dar sustentação a essa projeção e à manutenção de um padrão elevado de crescimento, são necessários investimentos em infraestrutura. Um mapeamento dos investimentos realizados pelo banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES) aponta que a taxa de crescimento do setor energético deva ser da ordem de 34% no período citado, ou 6% ao ano.

Energia Solar

Em seu primeiro leilão, previsto para ser realizado em novembro de 2013, a energia solar (fotovoltaica e heliotérmica) ficou em segundo lugar em número de projetos apresentados (119) e na potência ofertada (3019 MW), segundo EPE (2013). Esse leilão visa abastecer o mercado consumidor do país a partir do ano de 2016.

Outro fato que também contribuiu para o desenvolvimento, emprego e difusão da tecnologia solar fotovoltaica no Brasil foi a aguardada Resolução Normativa N° 482, em 17

de abril de 2012, que permite a conexão de empreendimentos com potência de até 1MW diretamente à rede das distribuidoras de energia, permitindo que haja a compensação da energia consumida pela energia gerada. Em último levantamento, realizado pela Associação Brasileira das Distribuidoras de Energia Elétrica (ABRADEE), 107 projetos foram contabilizados.

Concentradores solares e energia heliotérmica

Os concentradores solares, cujo uso é muito antigo, são a base do funcionamento de uma central de geração heliotérmica. Registros de suas aplicações remontam ao início do século II a.C., com o trabalho de Diocles, “*Burning mirrors*” (“Espelhos radiantes”). Suas bases científicas, porém, só foram estabelecidas em meados dos anos 1960, por Baranov e Melnikov (1966), e por Winston (1970). Diversos autores deram contribuições importantes ao desenvolvimento da teoria da concentração de radiação e às aplicações à energia solar, como Rabl (1976), Biggs e Vittitoe (1979), Bendt *et al.* (1979).

As centrais termosolares, que utilizam a tecnologia dos concentradores solares, estão bastante difundidas em países como a Espanha e Estados Unidos da América (OLIVEIRA, 2012). Em solo brasileiro, dos 119 empreendimentos citados para o leilão 2013, 10 são de centrais heliotérmicas, que totalizam uma potência de 290 MW.

Existem projetos de instalação de centrais termosolares experimentais que fazem parte de convênios entre universidades públicas e empresas de geração de energia elétrica, como a Central Termo Solar de 1 MW, em Petrolina-PE, projeto fruto de convênio entre três instituições: UFPE, CEPEL e a CHESF.

Recentemente, a chamada MCTI/CNPq, nº 74/2013, propõe capacitar recursos humanos e laboratoriais nas áreas de energia eólica e heliotérmica. Nesta última, procura oferecer apoio para pesquisa em sistemas de concentração solar com tecnologias cilindro-parabólica, Fresnel, disco parabólico e torre solar.

1.2 Justificativa

Os sistemas concentradores de radiação solar têm sido utilizados com o objetivo de diminuir a quantidade necessária de material ativo, como silício, amplamente empregado na conversão fotovoltaica, ou para permitir que sejam atingidas altas temperaturas em sistemas heliotérmicos, com o propósito de converter energia térmica em elétrica com determinada eficiência.

Um dos aspectos centrais relativo ao desempenho dos sistemas solares que utilizam o recurso da concentração de radiação solar é prever a fração de energia incidente na abertura do concentrador que consegue alcançar efetivamente a superfície do absorvedor. Existem inúmeros fatores que influenciam na propagação de radiação, os quais podem resultar em radiação solar perdida, que retorna ao meio ambiente após atravessar a abertura do concentrador e se propagar no interior da cavidade.

Na conversão fotovoltaica, as células conectadas em série requerem que o fluxo incidente seja o mais uniforme possível, de forma que operem fornecendo a mesma corrente fotogerada. Caso contrário, a corrente produzida pelo módulo estará limitada àquela produzida pela célula com menor radiação incidente, quando as células estiverem ligadas em série.

Nos sistemas heliotérmicos, existem diversos aspectos, sejam relativos a fatores físicos ou a questões de projeto, influenciados pela distribuição de fluxo no absorvedor: a) a não uniformidade, a qual produz gradientes de temperatura que podem ser inaceitáveis devido ao estresse mecânico ao qual o absorvedor é submetido; b) a incidência de uma parcela da radiação refletida sobre a fase do vapor em absorvedores em cujo interior circula um fluido bifásico, que provoca perda de eficiência na transmissão de calor; c) o dimensionamento do absorvedor, o qual deve ser de tal forma que aproveite a maior parte da radiação incidente (fator de interceptação) sem aumentar excessivamente, as perdas térmicas (MOYA, 2004).

Diversos autores (RABL, 1976; NICOLÁS e DURÁN, 1980; RABL *et al.*, 1982; FRAIDENRAICH, 1992; PEDROSA FILHO, 2010; GLENN e HO, 2012) têm analisado fatores que influenciam na eficiência da coleção do fluxo solar, ou seja, no transporte ou transmissão desse fluxo ao longo do caminho que vai desde a abertura do coletor até a superfície do absorvedor.

Segundo Rabl (1985), a influência dos desvios mecânicos – como o desalinhamento dos sistemas de rastreamento, desalinhamento do refletor ou do absorvedor durante a montagem; e a influência dos desvios ópticos, como as imperfeições no refletor, dispersão dos raios na atmosfera, entre outros – altera, de alguma maneira, a forma como o absorvedor “enxerga” o Sol, provocando a dispersão da imagem formada no absorvedor.

A distribuição de fluxo concentrado em um coletor parabólico com absorvedor plano ou com absorvedor cilíndrico tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores, seja de forma analítica (RABL, 1976; EVANS, 1977; NICOLÁS e DURÁN, 1980; HARRIS e DUFF, 1981; JETER, 1986;), seja utilizando o procedimento criado por Spencer e Murty (1962), denominado traçamento de raios (BENDT *et al.*, 1979; DALY, 1979; PEDROSA FILHO, 2010).

Todos apresentam soluções para o seguinte problema: como obter a distribuição de fluxo sobre o absorvedor quando a radiação incidente está sujeita a diversos fenômenos que aumentam a dispersão angular do cone solar o qual atinge a superfície de abertura de um concentrador solar.

Em resumo, os problemas abordados na literatura científica são os seguintes: a) como obter a distribuição de fluxo no absorvedor; b) como simular a influência de fatores que contribuem para modificar a imagem do Sol, vista pelo absorvedor, influenciando na eficiência de coleção de radiação pelo mesmo.

Dois temas merecem consideração. O primeiro, assunto pouco abordado na literatura, diz respeito à **otimização** do concentrador com as ferramentas que o cálculo da distribuição de fluxo oferece. Conhecida a distribuição de fluxo, as dimensões do absorvedor podem ser modificadas aceitando certa perda na coleção de radiação, porém aumentando a relação da concentração geométrica. Em coletores térmicos isso tem importância, dado que a redução das dimensões do absorvedor permite minimizar as perdas térmicas e obter maiores temperaturas, maximizando, assim, a eficiência térmica na região de operação (ROLIM, 2007). O segundo tema refere-se ao fato de a **abertura angular do Sol não ser constante**, já que depende do cosseno do ângulo zenital do Sol, variável ao longo do dia e dos meses de operação do coletor, e das condições da atmosfera. Esse efeito, que depende da localização geográfica do coletor, tem consequências importantes para seu desempenho, com manifestações menos danosas em baixas latitudes.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma nova abordagem para obter-se a distribuição de fluxo em absorvedores planos ou cilíndricos. Essa abordagem permitiu que fossem obtidos diversos modelos para diferentes geometrias, utilizando-se definições já

conhecidas que incorporam a influência de diferentes parâmetros, geométricos e físicos, de um sistema concentrador que possam influenciar na formação da imagem na região absorvedora.

A partir dos resultados obtidos, será possível definir uma configuração otimizada do conjunto refletor e absorvedor, baseada na qualidade da construção e da montagem, e nas condições de operação do sistema.

A metodologia está baseada na geometria parabólica, embora uma de suas vantagens seja a de que ela pode ser generalizada para diversas geometrias, tais como concentradores de espelhos facetados, concentradores tipo Fresnel, dentre outras.

O desenvolvimento dessa metodologia permitiu também que se determinassem parâmetros relacionados à óptica do sistema como fator de interceptação, aceitação angular, eficiência óptica, entre outros. Esses parâmetros permitem caracterizar-se, em conjunto, a qualidade óptica do concentrador.

Essencialmente, os procedimentos existentes para a determinação da distribuição de energia em absorvedores de concentradores solares foram desenvolvidos em função de determinada geometria particular. Dentre eles, citam-se os trabalhos de Evans (1977) e Nicolás e Durán (1980). Esses autores se valeram da simetria tanto da superfície parabólica como da imagem do cone solar refletido no absorvedor para definição de seus modelos.

O problema que originou este trabalho de tese foi a seguinte questão: existe uma forma analítica e gráfica de expressar a relação entre os três elementos principais de um concentrador solar, o cone solar, a superfície refletora e o absorvedor do concentrador por meio de um procedimento que permita tratar diversas geometrias, de maneira que, definindo-se a interação entre os mesmos, seja permitido obter-se a distribuição de energia no absorvedor sob situações diversas de operação do sistema concentrador, como a ocorrência de erros ópticos, desalinhamento angular e deslocamento do absorvedor da região focal?

Pode se afirmar, em síntese, que o aspecto fundamental do problema resolvido consiste em identificar o conjunto dos raios solares que, depois de refletidos na superfície do concentrador, atingem um ponto (y) do absorvedor. A solução descrita baseia-se numa forma particular de contagem que apresenta certas vantagens: simplicidade, versatilidade, transparência e exatidão.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo matemático que permita obter-se uma representação gráfica e analítica da relação entre o cone solar, a superfície refletora e o absorvedor de um concentrador solar constituído por diferentes geometrias utilizadas na tecnologia de concentração solar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica desta tese está dividida em duas partes: a primeira constitui-se dos conceitos gerais que integram este trabalho e de definições básicas dos termos mais importantes; a segunda dedica-se à descrição de trabalhos publicados na literatura científica que abordam o tema da distribuição de energia em absorvedores de concentradores.

2.1 Conceitos Gerais

A óptica solar é uma área da física que trata, de maneira geral, dos fenômenos referentes à transmissão, reflexão e absorção dos raios solares. Em particular, essas propriedades são utilizadas para a obtenção de determinados objetivos inerentes à tecnologia solar, como: concentração da radiação, colimação dos raios solares e obtenção de um determinado perfil de distribuição em uma região predeterminada do espaço físico.

Esse tema tem-se expandido consideravelmente e vem sendo aplicado em dispositivos fotoelétricos que utilizam a radiação solar, podendo ser empregadas regiões particulares do espectro solar.

Este trabalho dedica-se, em particular, à concentração da radiação solar, cujo processo define-se a partir de seus componentes mais básicos: a fonte (Sol) e a superfície refletora ou refratora, que provoca a convergência dos raios para uma determinada região, denominada absorvedor.

No caso da concentração da radiação solar, pode-se viabilizar um aumento do desempenho do sistema pelo aumento da intensidade da luz solar incidente sobre a região absorvedora (SALA *et al.*, 1999). Entretanto, esses sistemas utilizam parcialmente a radiação incidente, pois uma parte da radiação difusa não chega ao absorvedor. Para sistemas de alta concentração, praticamente toda a radiação difusa pode ser descartada. Quando comparado a um coletor plano, sua eficiência ótica também é reduzida pela incorporação de novos componentes.

Em um sistema concentrador, a especificação de taxa de concentração possui duas definições que são amplamente utilizadas. A primeira é a concentração geométrica, também

denominada concentração média (Eq. 1), definida como a relação entre a área da abertura ($A_{abertura}$) e a área da superfície do absorvedor ($A_{absorvedor}$) (RABL, 1985).

$$C_{geom} = \frac{A_{abertura}}{A_{absorvedor}} \quad (1)$$

A segunda, chamada concentração de fluxo (Eq. 2), leva em consideração os efeitos das perdas do fluxo energético, dada pela relação entre a densidade de fluxo de energia em W/m^2 que chega ao absorvedor ($I_{absorvedor}$) e a densidade de fluxo de energia em W/m^2 que entra pela abertura no concentrador ($I_{abertura}$).

$$C_{flux} = \frac{I_{absorvedor}}{I_{abertura}} \quad (2)$$

Quanto ao processo utilizado para concentração do fluxo solar, os concentradores podem ser classificados como refletores e refratores. E, quanto à configuração da formação do fluxo concentrado, esses concentradores podem ser classificados como formadores de imagem ou não formadores de imagem.

2.1.1 Limites da concentração solar

A segunda lei da termodinâmica estabelece os limites para a concentração de coletores bidimensionais ($C_{ideal2D}$) e tridimensionais ($C_{ideal3D}$) em função do meio ângulo de aceitação do coletor (φ_a) (RABL, 1985), como:

$$C_{ideal2D} = \frac{1}{sen(\varphi_a)} \quad (3)$$

Para concentradores tridimensionais:

$$C_{ideal3D} = \frac{1}{sen^2(\varphi_a)} \quad (4)$$

Sendo o meio ângulo de aceitação (φ_a) medido entre os raios solares extremos e o eixo normal à abertura do concentrador, todos ou quase todos os raios com ângulo menor que (φ_a) serão aceitos pelo coletor.

Considerando-se o raio angular do Sol (meio ângulo) como $\varphi_s = 4,6497$ mrad (PULIAEV *et al.*, 2000), pode-se calcular o limite superior de concentração como aproximadamente 215 sóis para concentradores bidimensionais e 46.254 sóis para

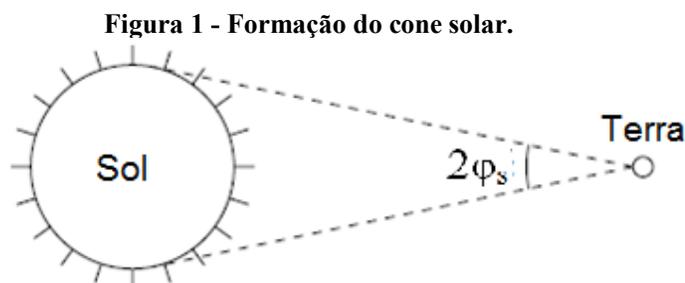
concentradores tridimensionais. Os concentradores que satisfazem as equações (3) e (4) são denominados concentradores ideais.

Segundo Rabl (1976), nos concentradores ideais, todos os raios que ingressam pela abertura, dentro do intervalo do ângulo de aceitação, são refletidos para o absorvedor. Os raios que chegam com ângulo maior que o ângulo de aceitação se propagam ao longo da cavidade e retornam ao ambiente. A superfície refletora possui refletância unitária, absorvidade e transmitância nulas.

Concentradores não ideais têm taxas de concentração menores do que as calculadas utilizando-se as equações (3) e (4). A título de exemplo, um concentrador do tipo calha parabólica pode chegar a um máximo de 106 sóis, o que representa apenas 49,3% do valor da concentração limite para geometrias 2D. Já em um disco parabólico, a concentração atinge no máximo 2.863 sóis, 6,2% da concentração limite para geometrias 3D.

2.1.2 Distribuição do brilho solar

Segundo Chaves (2008), o Sol emite luz em todas as direções. Ao atingir a Terra, a luz está confinada em um pequeno cone de ângulo ($2\phi_s$), chamado de cone solar (Figura 1). Porém a intensidade de cada raio depende do seu ângulo dentro do cone solar. Existem diversos modelos teóricos ou experimentais utilizados para definir como está distribuída a intensidade da energia dentro do feixe solar.



Adaptado de Chaves (2008)

José (1957) elaborou um modelo de distribuição de energia (Eq. 5) baseado nos dados apresentados por Abetti (1938).

$$i_s = i_{NUD} \frac{R_0 + 1,5641\sqrt{R_0^2 - R^2}}{2,5641R_0} \quad (5)$$

Na Eq. 5, R_0 é o raio do Sol ou de sua imagem; R é a coordenada radial medida a partir do centro e i_{NUD} é a intensidade de radiação no centro do sol, ou seja, para $R = 0$.

Rabl e Bendt (1982), baseados nas medições da radiação circunsolar efetuadas pelo Laboratório Lawrence Berkeley e apresentadas por Grether e Hunt (1977), tomaram a média das medições e elaboraram uma função de brilho solar experimental.

Buie *et al.* (2003) definiram um cone solar virtual, utilizando os resultados de Neumann *et al.* (2002). Foi, então, elaborada uma equação a partir da qual se define mais precisamente a distribuição de energia com a variação do ângulo radial do Sol, desde (0 mrad) até aproximadamente (100 mrad). Esses autores mostram que a distribuição apresentada não depende da localidade geográfica avaliada.

A equação do cone virtual depende da taxa de radiação circunsolar (CSR em inglês), definida como a relação entre o fluxo solar contido na região circunsolar do céu (Φ_{cs}) e a soma do fluxo total direto (Φ_d) e o fluxo da região circunsolar (Φ_{cs}) ($\Phi_i = \Phi_d + \Phi_{cs}$) (Eq. 6).

$$\chi = \frac{\Phi_{cs}}{\Phi_i} \quad (6)$$

A Eq. 7 define a função de distribuição angular de energia do Sol: $B(\varphi)$, onde φ é o ângulo que um raio solar faz com o eixo do feixe solar (BUIE *et al.*, 2003).

$$B(\varphi) = \begin{cases} \cos(0,326\varphi) & \text{Se } 0 \leq \varphi \leq 4,65 \text{ mrad} \\ \cos(0,308\varphi) & \text{Se } \varphi > 4,65 \text{ mrad} \\ e^k \varphi^b & \end{cases} \quad (7)$$

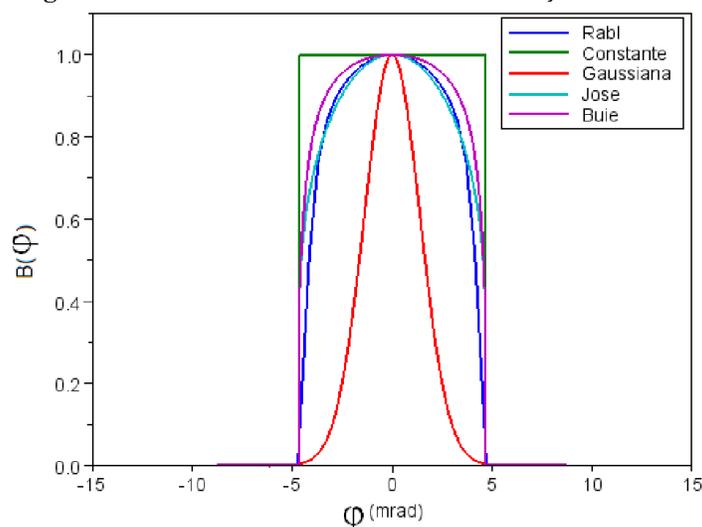
Onde k e b são dados por:

$$k = 0,9 \ln(13,5\chi) \chi^{-0,3} \quad (8)$$

$$b = 2,2 \ln(0,52\chi) \chi^{-0,45} - 0,1 \quad (9)$$

Além das duas distribuições de brilho acima citadas, existe a distribuição de brilho constante, que considera a intensidade uniforme dos raios ao longo de todo o disco solar e a distribuição de brilho gaussiana, representada por uma função de densidade de probabilidade normal em torno do centro do Sol, com desvio padrão igual ao raio angular do Sol ($\varphi_s = 4,6497$ mrad).

Figura 2 - Gráfico dos 5 modelos de distribuição do brilho solar



No gráfico apresentado na Figura 2, vê-se a forma de cinco modelos de brilho solar descritos. Observa-se que apenas a distribuição de brilho gaussiana ($\sigma = 0,8$ mrad) apresenta uma diferença considerável em relação às demais, fato que faz a mesma não representar adequadamente a distribuição da intensidade do brilho solar ao longo do cone solar, por ser mais estreita. Nota-se também que todas têm como limite angular o valor aproximado de 4,7 mrad.

2.1.3 Propriedades dos concentradores solares

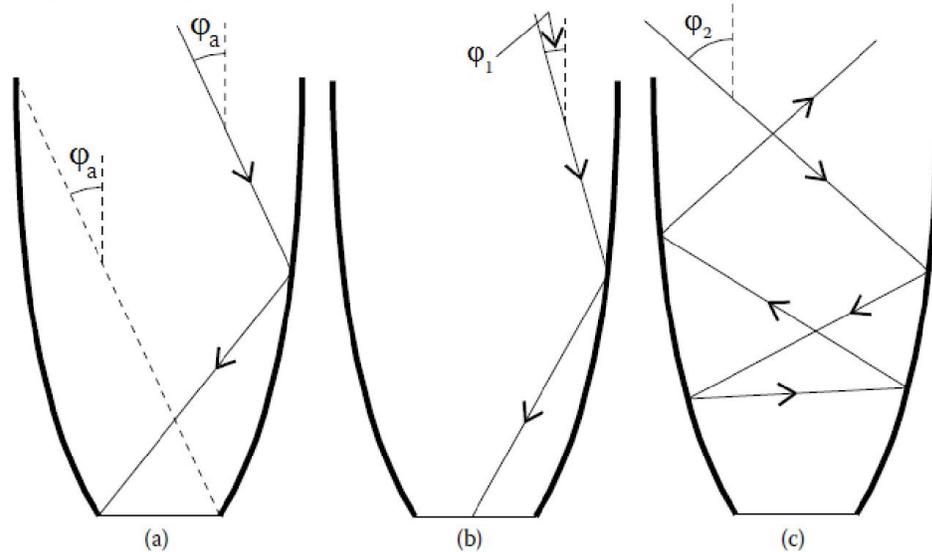
A literatura solar apresenta como características dos concentradores solares a função de aceitação angular, o fator de interceptação, a concentração média e a eficiência óptica do concentrador. Essas propriedades serão descritas nos próximos parágrafos.

2.1.3.1 Função de aceitação angular

De acordo com Rabl (1985), a função de aceitação angular $F(\varphi)$ é a fração dos raios solares que incidem em determinado ângulo na abertura do concentrador e conseguem atingir o absorvedor do concentrador.

Na Figura 3, ilustra-se o comportamento da função de aceitação angular para o concentrador CPC (Concentrador Parabólico Composto). Esse conceito pode ser estendido a qualquer concentrador solar.

Figura 3 - Trajetória de três raios com ângulos de incidência diferentes

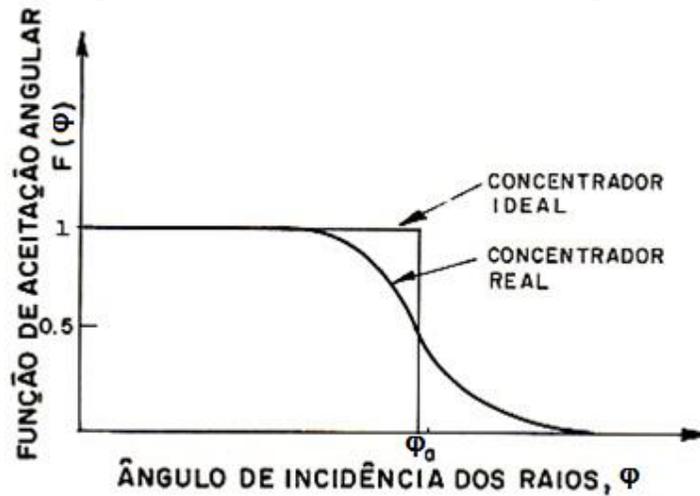


Adaptada de Chaves (2008)

Na Figura 3a, o ângulo φ_a representa o ângulo de corte da aceitação angular do concentrador utilizado. Todos os raios que incidirem na abertura com ângulo $|\varphi| < \varphi_a$ atingirão o absorvedor (Figura 3b), já os raios que incidirem na abertura com ângulo $|\varphi| > \varphi_a$, sofrerão reflexões na superfície refletora até saírem do concentrador sem atingirem o absorvedor (Figura 3c) (CHAVES, 2008).

Uma das características do concentrador CPC é que esse tipo de concentrador aceita todos os raios que incidem com ângulo $|\varphi| < \varphi_a$, sendo este considerado um concentrador ideal.

Figura 4 - Gráfico da função de aceitação angular



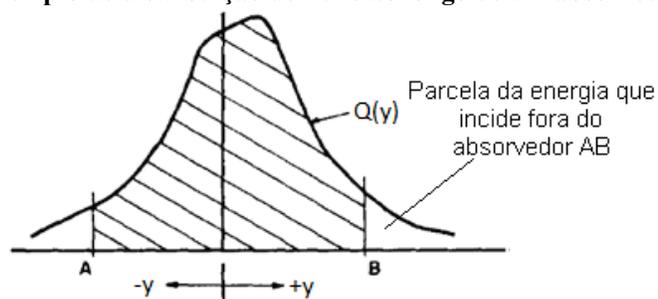
Fonte: Fraidenach e Lira (1995)

O gráfico registrado na Figura 4 representa a propriedade descrita anteriormente. Em um concentrador real, uma parcela dos raios com ângulos $|\varphi| < \varphi_a$, será rejeitada, ou seja, vão se propagar pela cavidade e retornarão ao meio ambiente, e uma parcela dos raios com ângulos $|\varphi| > \varphi_a$ será aceita, ou seja, chegará ao absorvedor.

2.1.3.2 Fator de interceptação

Duffie e Beckman (1991) definem o fator de interceptação (γ) como sendo a fração da radiação refletida que incide sobre a superfície absorvedora de um coletor solar (Figura 5). Esse conceito só é aplicado a concentradores formadores de imagem.

Figura 5 - Exemplo de distribuição de fluxo ao longo de um absorvedor AB



Adaptado de Duffie e Beckman (1991)

Com a ocorrência dos desvios ópticos que provocam a dispersão dos raios que se dirigem ao absorvedor (RABL, 1985), uma parcela da energia que adentra o coletor por sua abertura não chegará ao absorvedor. O fator de interceptação permite contabilizar essa perda, possibilitando uma otimização na determinação do tamanho do absorvedor.

A Eq. 10 permite o cálculo do fator de interceptação (RABL, 1985).

$$\gamma = \frac{Q_{\text{absorvedor}}}{Q_{\text{incidente}}} = \frac{\int_{-A}^B Q(y)dy}{\int_{-\infty}^{\infty} Q(y)dy} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} Q(\varphi)F(\varphi)d\varphi}{\int_{-\infty}^{\infty} Q(\varphi)d\varphi} \quad (10)$$

Na Eq. 10, $Q_{\text{absorvedor}}$ representa a irradiação total que chega ao absorvedor, já considerados todos os desvios ópticos, e $Q_{\text{incidente}}$, a radiação total que foi refletida em direção ao absorvedor, $Q(y)$ representa a irradiação que incide no ponto (y) ao longo da linha focal, enquanto que $Q(\varphi)$ representa a irradiação distribuída ao longo do espaço angular do cone solar.

O máximo valor de γ é igual a 1. Se $\gamma < 1$, a concentração aumenta, porém uma parcela da energia que chega à cavidade concentradora retorna ao meio ambiente, não sendo aproveitada. Se γ é próximo a 1, a coleção de energia é maior, porém haverá a diminuição da concentração, com conseqüente diminuição, por exemplo, da temperatura do fluido térmico em sistemas heliotérmicos.

2.1.3.3 Concentração geométrica

Segundo Rabl (1985), a concentração geométrica para concentradores do tipo calha parabólica é calculada a partir da Eq. 11; para concentradores disco parabólicos, é utilizada a Eq. 12, ambas para absorvedores planos.

$$C_{\text{geom}} = \left(\frac{\text{sen}\theta_r \cdot \cos(\theta_r + \varphi_s)}{\text{sen}(\varphi_s)} \right) - 1 \quad (11)$$

$$C_{\text{geom}} = \left(\frac{\text{sen}^2\theta_r \cdot \cos^2(\theta_r + \varphi_s)}{4 \cdot \text{sen}^2(\varphi_s)} \right) - 1 \quad (12)$$

Nas Eq. 11, 12 e 13, θ_r é o ângulo de borda do concentrador e φ_s é o meio ângulo do cone solar.

O critério utilizado para obterem-se essas equações consiste em que todos os raios com ângulo de incidência menor ou igual a φ_s atingem o absorvedor. Verifica-se que, para as geometrias citadas, C_{geom} é máxima para $\theta_r = 45^\circ$

Para concentradores do tipo calha parabólica com absorvedores cilíndricos,

$$C_{geom} = \frac{\text{sen}\theta_r}{\pi \cdot \text{sen}\varphi_s} \quad (13)$$

Nesse caso, a concentração geométrica é máxima para $\theta_r = 90^\circ$.

2.1.3.4 Eficiência óptica

De acordo com Rabl (1985), eficiência óptica (η_o) é a fração da radiação solar ($Q_{abertura}$) que ingressa na abertura do coletor e é absorvida ($Q_{absorvida}$) pelo absorvedor (Eq. 14).

$$\eta_o = \frac{Q_{absorvida}}{Q_{abertura}} \quad (14)$$

Em relação aos concentradores solares, a eficiência óptica pode ser calculada como sendo

$$\eta_o = \rho^n \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \gamma \quad (15)$$

Onde:

ρ^n representa a refletividade da superfície refletora, considerando-se n reflexões;

τ representa a transmissividade da cobertura, caso haja;

α representa a absorvidade do absorvedor;

γ representa o fator de interceptação do concentrador.

Como todos os parâmetros apresentados na Eq. 15 variam em função do ângulo de incidência (θ) dos raios solares, recorre-se a uma expressão mais geral que relaciona o produto desses parâmetros para ângulo de incidência (θ) nulo ao valor adotado para ângulo de incidência igual a θ . Essa relação denomina-se modificador do ângulo de incidência ($K(\theta)$), representada por uma função matemática que depende da geometria do concentrador e do absorvedor.

A eficiência óptica para um concentrador com uma reflexão, portanto, é calculada utilizando-se a Eq. 16.

$$\eta_o(\theta) = (\rho.\tau.\alpha.\gamma)_N.K(\theta) \quad (16)$$

O termo $(\rho.\tau.\alpha.\gamma)_N$ corresponde à eficiência óptica do sistema, quando o ângulo de incidência dos raios solares é normal ao plano da abertura do concentrador ($\theta = 0$).

Quanto aos materiais utilizados, as superfícies refletoras dos concentradores são formadas por materiais reflexivos ou espelhos, cuja refletividade está em torno dos 98,5%.

A absorvidade depende da aplicação (fotovoltaica ou térmica) e da geometria do absorvedor (plano ou cilíndrico). Para aplicações fotovoltaicas, considera-se 99,2% como um valor de absorvidade típica (FRAIDENRAICH e VILELA, 2000). Para aplicações térmicas (absorvedor cilíndrico), Dudley (1994) apresenta como valor típico 96% de absorvidade e 95% de transmissividade para o vidro Pyrex com cobertura antirreflexiva.

O fator de interceptação, conforme comentado anteriormente, depende do tamanho do absorvedor e dos desvios ópticos do concentrador, o que o difere da eficiência óptica.

2.1.4 Desvios ópticos

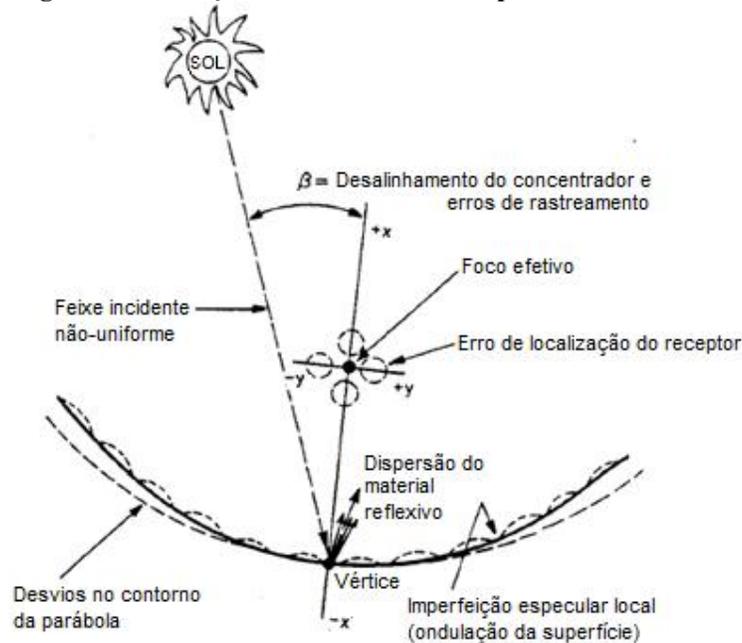
Os desvios ópticos são imperfeições nos elementos que compõem o concentrador e produzem alterações na formação da imagem no absorvedor. De acordo com Güven e Bannerot (1986), as imperfeições podem ser agrupadas de acordo com as causas que as provocaram. Assim, podem ser classificadas como:

- materiais: imperfeições provocadas pelos materiais utilizados (deficiência na qualidade refletiva do material);
- produção e montagem: imperfeições provocadas durante a montagem dos coletores; erros de contorno ou ondulação da superfície; erros do perfil geométrico da superfície; desalinhamento do refletor causado pela rotação do refletor sobre o seu eixo; e deslocamento do absorvedor em relação ao foco da parábola;
- operação: erros induzidos ao longo da utilização do concentrador – erro de rastreamento do Sol; intensificação dos desvios do perfil geométrico devido à carga de vento e aos efeitos da temperatura; aumento da não especularidade do refletor provocado pela sujeira e pela água; desalinhamento do receptor decorrente da flexão devido à expansão

térmica; aumento das dimensões do tubo em decorrência do ciclo térmico; e mudança na localização do foco efetivo advinda da intensificação dos erros do perfil geométrico.

A Figura 6 mostra a localização e a ocorrência de alguns dos erros citados.

Figura 6 - Descrição dos erros do coletor parabólico



Adaptado de Güven e Bannerot (1986)

Güven e Bannerot (1986) também classificam os erros de um sistema concentrador quanto aos efeitos sobre a formação da imagem no absorvedor. Definem erros determinísticos como os que provocam uma degradação no desempenho do concentrador, deslocam a imagem formada e podem causar a completa perda da imagem que seria formada sobre o absorvedor. Como exemplos desses erros, podem-se citar: os erros do perfil geométrico, que causam a mudança permanente do foco do refletor; desalinhamento permanente do coletor com o Sol provocado por um erro constante do rastreamento (erro médio de rastreamento não nulo); deslocamento do absorvedor em relação ao foco efetivo do coletor.

Os erros randômicos podem ser representados por uma distribuição de probabilidade (na maioria dos casos, a gaussiana). São tratados estatisticamente e provocam a dispersão da imagem sobre o absorvedor. Como exemplo desses erros tem-se os seguintes: mudança do tamanho do Sol decorrente de mudanças na distância entre a Terra e o Sol, e de efeitos atmosféricos (σ_{Sol}); efeitos de dispersão associados ao material óptico utilizado ($\sigma_{\text{rugosidade}}$),

também associado a distorções variáveis da superfície refletora ($\sigma_{\text{geometria}}$) e ao desalinhamento variável do rastreador (σ_{rastreo}).

Nesse caso, o tratamento estatístico utilizado consiste em obter-se um valor de desvio padrão médio calculado, considerando-se todos os efeitos randômicos mencionados. Bendt *et al.* (1979) apresentaram a seguinte expressão (Eq. 17) para o cálculo descrito:

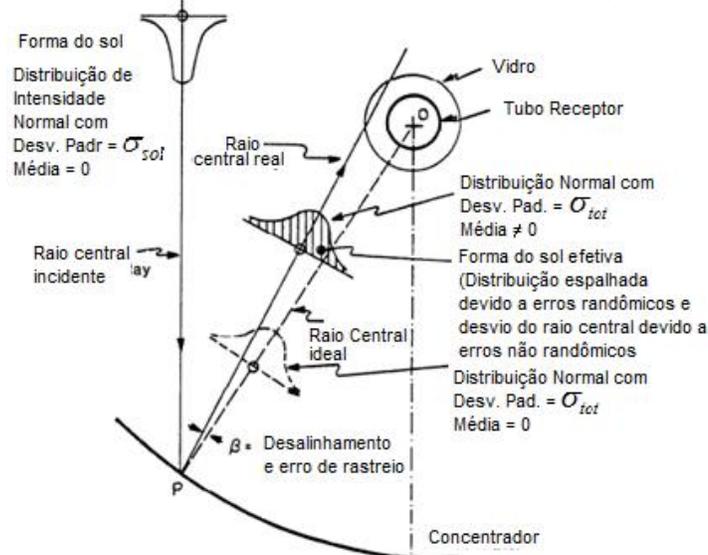
$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{\sigma_{\text{Sol}}^2 + \sigma_{\text{rugosidades}}^2 + 2\sigma_{\text{geometria}}^2 + \sigma_{\text{rastreo}}^2 + \sigma_{\text{desalinhamento}}^2} \quad (17)$$

Na Eq. 17, observa-se que, com a consideração dos desvios randômicos, a abertura angular do Sol torna-se maior, ou seja, o tamanho efetivo do Sol visto pelo absorvedor (plano ou cilíndrico) é maior.

O desvio de desalinhamento ($\sigma_{\text{desalinhamento}}$) pode ser considerado tanto como sendo determinístico, erro médio não nulo – que provoca o deslocamento da imagem –, quanto randômico, ao longo de um intervalo de tempo ou de um campo de coletores.

Na Figura 7, vê-se a consequência desse efeito: uma maior dispersão da imagem na região focal, se o tamanho do absorvedor for mantido; o fator de interceptação será baixo; muita energia será desperdiçada, pois não incidirá sobre o mesmo. Caso o absorvedor seja projetado para que possua um fator de interceptação máximo, ocorrerá a diminuição da concentração e, em sistemas heliotérmicos, aumento das perdas térmicas.

Figura 7 - Efeito dos desvios sobre o tamanho efetivo do Sol visto pelo absorvedor

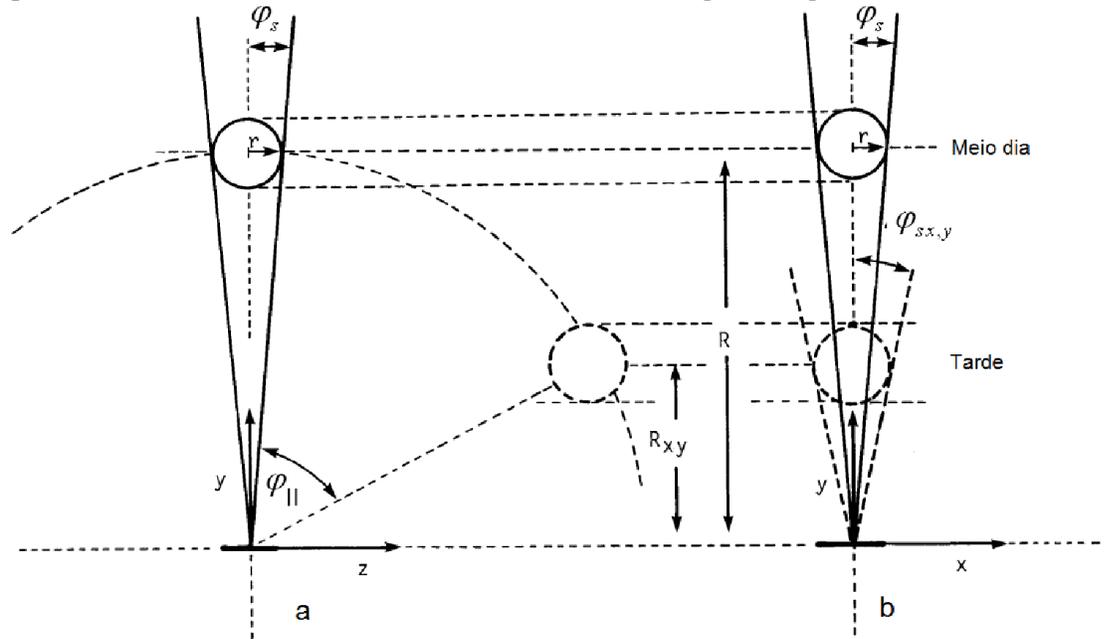


Adaptado de Güven e Bannerot (1986)

Pedrosa Filho (2010) mostrou que existe um compromisso entre estas três características: a energia absorvida, o tamanho aparente do Sol e a concentração média. Isso permite aperfeiçoar o sistema, ou seja, dado um tamanho aparente do Sol, existe uma configuração ótima que maximiza a concentração e a energia absorvida.

Bendt *et al.* (1979) analisaram a variação do meio ângulo solar em relação à posição do Sol durante o dia. Os autores definiram um plano (xy) paralelo ao eixo transversal de uma calha parabólica e, a partir da posição do Sol em relação ao plano (Figura 8a), definiram o ângulo ($\varphi_{||}$) que permite determinar o valor do meio ângulo solar em um horário qualquer, tomando como referência o valor do meio ângulo solar obtido pela projeção do Sol no plano (xy) no meio dia solar.

Figura 8 – Posição do Sol em relação a um concentrador do tipo calha parabólica



Adaptado de Bendt *et al.* (1979)

Na Eq. 18, vê-se como varia o meio ângulo solar em função da altura do Sol ao longo do dia (Figura 8b).

$$\varphi_{s,x,y} = \frac{\varphi_s}{\cos(\varphi_{||})} \quad (18)$$

Na Eq. 18, ($\varphi_{s,x,y}$) representa o valor do meio ângulo solar visto pelo concentrador, quando o Sol está em uma posição diferente do meio dia solar. Os autores concluíram que o desvio do Sol (σ_{Sol}) também varia da mesma forma apresentada na Eq. 19:

$$\sigma_{Sol,x,y} = \frac{\sigma_{Sol}}{\cos(\varphi_{\parallel})} \quad (19)$$

Para concentradores 2D com eixo de rotação norte-sul, o ângulo máximo será o valor da declinação solar, 23,5°, para um coletor situado na linha do equador, produzindo um efeito de no máximo 1,08 vezes o tamanho do Sol no meio dia solar.

A Eq. 20 apresenta a relação média do desvio angular do Sol para um dia médio de 8h, quando um concentrador 2D está alinhado com o eixo leste-oeste (BENDT *et al.*, 1979).

$$\sigma_{Sol,m\u00e9dio}^2 = 1,5 \cdot \sigma_{Sol}^2 \quad (20)$$

2.2 Modelos de distribuição de energia em absorvedores de concentradores solares

Esta parte da revisão bibliográfica agrupa os trabalhos relacionados ao tema da distribuição de energia em absorvedores de concentradores em duas categorias: a primeira trata dos modelos de distribuição de energia em absorvedores planos; a segunda apresenta modelos desenvolvidos para absorvedores cil\u00e2ndricos.

2.2.1 Modelos de distribuição de energia para absorvedores planos

Evans (1977) desenvolveu um modelo que calcula a contribuição de todos os raios dentro do feixe solar em cada ponto do absorvedor plano por meio da integração mostrada na Eq. 21:

$$I(y) = 2 \cdot \rho \cdot \text{sen}(\varphi_s) \cdot \int_{-\theta_r}^{\theta_r} G(\varphi) \cdot \cos(\theta) \cdot d\theta \quad (21)$$

Na Eq. 21, θ_r foi definido como o \u00e2ngulo de borda, φ_s \u00e9 o meio \u00e2ngulo do cone solar e ρ \u00e9 a refletividade do espelho parab\u00f3lico. A fun\u00e7\u00e3o $G(\varphi)$ depende da distribui\u00e7\u00e3o de brilho solar utilizada. Foram utilizadas tr\u00eas distribui\u00e7\u00f5es de brilho: intensidade quadrada constante (I_{sq}) que equivale \u00e0 distribui\u00e7\u00e3o constante; intensidade disco constante (I_{cid}), considera que a

distribuição assume a forma de um disco; e intensidade disco não uniforme (I_{nud}), que equivale à distribuição de Rabl e Bendt (1982).

Cada uma dessas distribuições dá origem a uma interseção com o absorvedor. O autor trata a interseção do cone solar refletido com o absorvedor que, por exemplo, no caso da distribuição de disco constante, é uma elipse com centro no foco da parábola. O eixo menor da elipse é adotado como medida da distribuição de radiação.

Para cada uma das distribuições, o autor desenvolveu uma equação que leva em consideração a geometria parabólica utilizada (calha parabólica) e a função matemática da distribuição de brilho.

Resolvendo a integração para a posição central da região focal ($y = 0$), Evans (1977) obteve os seguintes resultados:

- para a distribuição de brilho denominada intensidade quadrada constante, a Eq. 22:

$$C_{sq}(y = 0) = 214 \cdot \rho \cdot \text{sen}(\theta_r) \quad (22)$$

- para a distribuição de brilho denominada intensidade disco constante, a Eq. 23:

$$C_{CID}(y = 0) = 273 \cdot \rho \cdot \text{sen}(\theta_r) \quad (23)$$

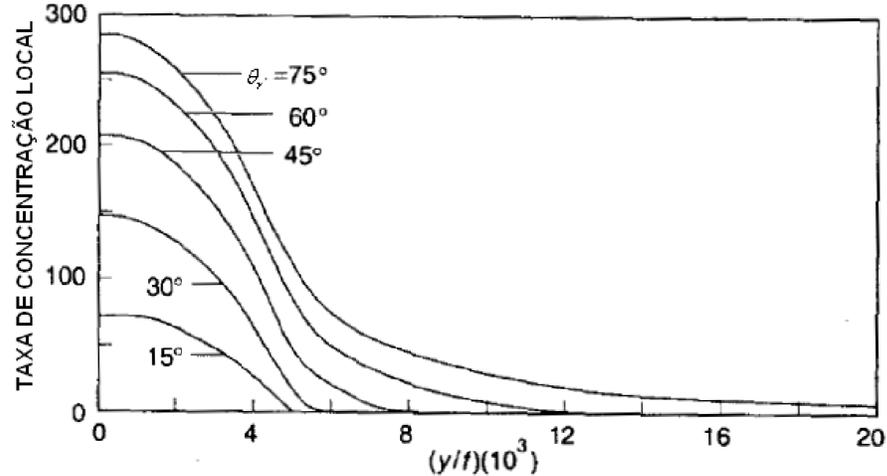
- para a distribuição de brilho denominada intensidade disco não uniforme, a Eq. 24:

$$C_{NUD}(y = 0) = 298 \cdot \rho \cdot \text{sen}(\theta_r) \quad (24)$$

em que θ_r representa o ângulo de borda de concentrador.

Como resultado da distribuição de energia sobre o absorvedor, esse autor obteve o gráfico apresentado na Figura 9 para vários ângulos de borda.

Figura 9 - Distribuição de energia no absorvedor utilizando o modelo disco não uniforme, para cinco diferentes ângulos de borda (15°, 30°, 45°, 60° e 75°)



Adaptado de Evans (1977)

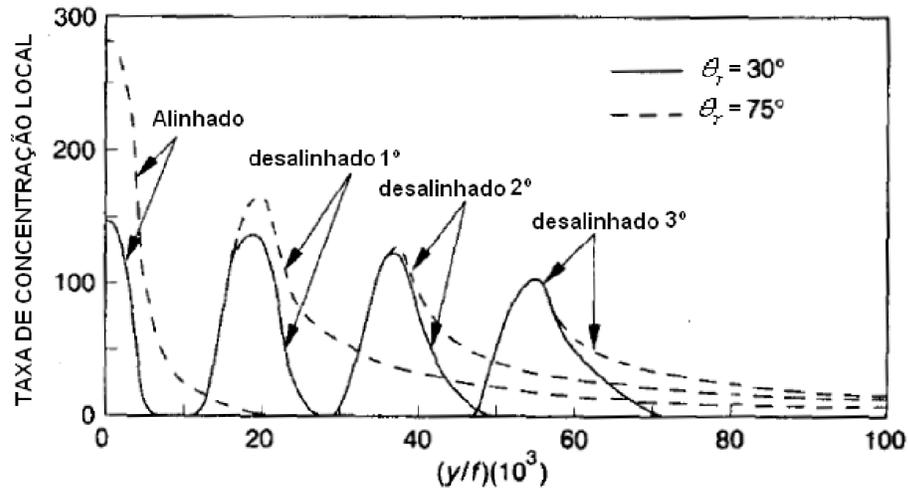
No gráfico da Figura 9, vê-se a distribuição de energia no absorvedor plano de um concentrador tipo calha parabólica, em que y/f indica a relação entre a posição y sobre o absorvedor e a distância focal, permitindo que a posição efetiva sobre o absorvedor possa ser obtida para diferentes valores de distância focal.

As distribuições, centralizadas na origem, apresentadas na Figura 9 confirmam que quanto maior o ângulo de borda, maior será a taxa de concentração e o tamanho da imagem criada pelos raios refletidos incidentes no coletor plano (DUFFIE e BECKMAN, 1991).

Evans (1977) também avaliou o que acontece com a distribuição do fluxo de energia quando não há um perfeito alinhamento entre a normal do refletor parabólico e a normal do disco solar, ou seja, quando existe algum erro de rastreamento.

Foi demonstrado que quanto maior o ângulo de incidência dos raios solares sobre um refletor parabólico, menor é o fluxo de energia incidente em um absorvedor plano posicionado no foco da parábola e maior é o tamanho da imagem formada no mesmo. Na Figura 10, verifica-se a influência desse tipo de erro na formação da imagem.

Figura 10 - Distribuição da imagem devido a erros de alinhamento para ângulos de borda 30° e 75° .



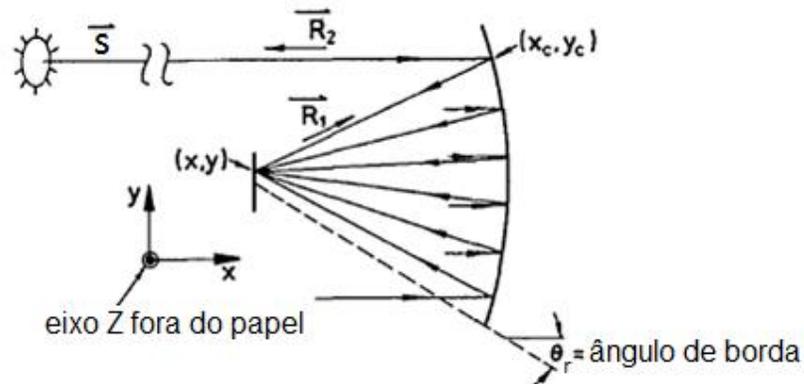
Adaptada de Evans (1977)

Conforme se pode observar na Figura 10, extraída de Evans (1977), a imagem obtida por um refletor parabólico situa-se no centro do plano focal; $y/f = 0$ no gráfico, quando o erro de alinhamento é zero, ou seja, os raios incidentes na parábola são paralelos ao seu eixo.

Já com a presença de desalinhamento, a imagem formada, além de não estar mais posicionada no centro do plano focal, sofrerá um espalhamento maior, o que causa uma menor densidade de energia que incidirá sobre um absorvedor que esteja no centro do plano focal, ou seja, um menor fator de interceptação.

Daly (1979) descreve um procedimento de obtenção da distribuição de fluxo em um coletor parabólico linear com absorvedor plano, baseado no traçamento de raios reverso.

Figura 11 - Caminho reverso dos raios, desde o absorvedor até o Sol



Adaptado de Daly (1979)

Determinando inicialmente o caminho – desde o absorvedor, passando pelo refletor e terminando no Sol (Figura 11) –, cada trecho é representado por equações com a finalidade de distinguir-se um raio que sai do absorvedor.

Um raio que deixa o absorvedor em direção à superfície refletora é determinado pela Eq. 25:

$$R_1 = (x_c - x) \hat{x} + (y_c - y) \hat{y} \quad (25)$$

O raio que parte da superfície refletora em direção ao Sol é obtido pela Eq. 26, onde \hat{n} é para vetor normal à superfície.

$$\vec{R}_2 = \vec{R}_1 - 2(\vec{R}_1 \cdot \hat{n}) \hat{n} \quad (26)$$

Se o raio refletido R_2 não atingir o Sol, o raio não pode se propagar do Sol para o ponto do concentrador, dado por (x_c, y_c) , e também para o ponto (x, y) do absorvedor. Isso ocorrerá quando o ângulo (φ_D) (Eq. 27) entre R_2 e o raio do centro do disco solar, indicado pelo vetor (\vec{S}) , for maior que $0,266^\circ$.

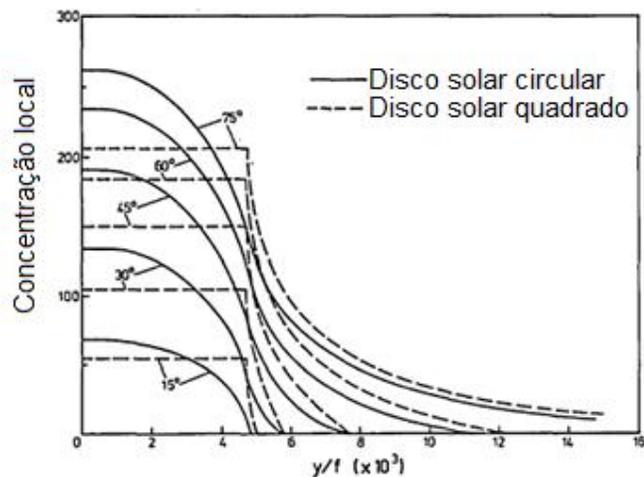
$$\varphi_D = \cos^{-1}(\vec{R}_2 \cdot \vec{S}) \quad (27)$$

A intensidade do fluxo no absorvedor é obtida por meio de um fator de peso dado para cada raio que parte de determinada posição, o que depende também da distribuição de brilho utilizada. O modelo disco circular é calculado com a Eq. 28, na qual (φ_s) é o valor do meio ângulo do cone solar.

$$W_i = \frac{4}{\pi} \left[1 - \left(\frac{\varphi_D}{\varphi_s} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (28)$$

Como resultados, Daly (1979) traçou a concentração local em função da distância normalizada para parábolas com 15° , 30° , 45° , 60° e 75° de ângulo de borda (Figura 12).

Figura 12 - Concentração local em função da posição normalizada no absorvedor para vários ângulos de borda



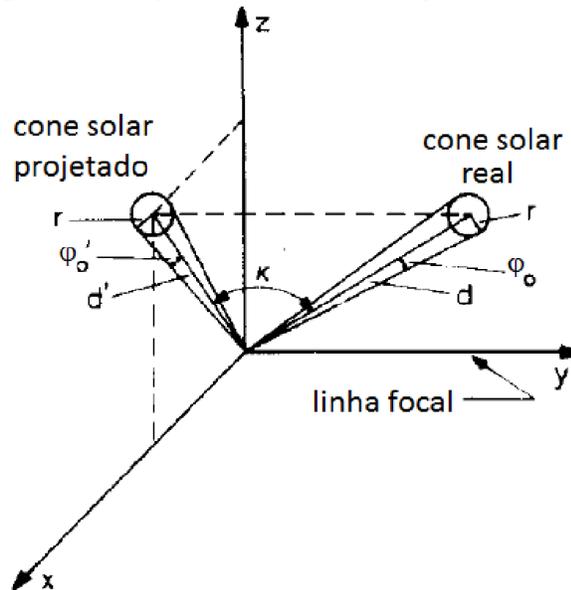
Adaptado de Daly (1979)

As distribuições mostradas na Figura 12 foram elaboradas utilizando-se as distribuições de brilho descritas por Evans (1977): intensidade quadrada constante e intensidade disco não uniforme. Os resultados apresentam boa adequação aos resultados obtidos por Evans (1977).

Nicolás e Durán (1980) analisaram a óptica do concentrador solar em duas dimensões a fim de propor um procedimento para a obtenção da distribuição de energia sobre o absorvedor plano de concentradores solares 2D.

O tratamento, em duas dimensões apresentado, consiste em considerar a projeção do cone solar em um plano perpendicular ao eixo do concentrador, sendo necessária a definição do ângulo (k) como sendo o ângulo entre o raio central do cone solar e o plano (xz) da Figura 13.

Figura 13 - Projeção do cone solar no plano xz.



Adaptado de Nicolás e Durán (1980)

Na Figura 13, o cone solar real é representado por um raio da base (r), por seu ângulo interno (φ_0) e a distância (d) entre sua base e o centro do eixo de coordenado. Quando o cone solar é projetado no plano (xz), perpendicular à linha focal, o ângulo interno do cone se torna (φ_0') e a distância da base projetada torna-se (d').

Os autores apresentaram expressões para três orientações distintas do concentrador: leste-oeste, norte-sul horizontal e norte-sul polar.

Da mesma forma que Evans (1977), os autores consideraram que a reflexão do cone projetado no plano (xz), em direção ao plano do absorvedor, forma uma elipse. Porém, considerando-se elementos de superfície ao longo da direção (y), elipses com mesmo tamanho são formadas, estando cada elipse deslocada no sentido (y) em relação à outra.

Uma seção estreita do concentrador com comprimento (dl) contribui com uma densidade de fluxo $dI_r(x')$ no plano do absorvedor, dada pela Eq. 29:

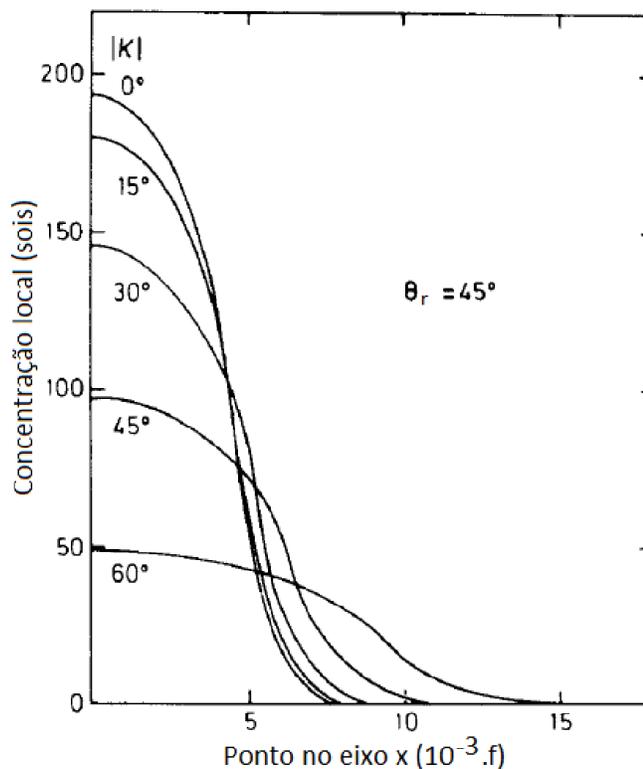
$$dI_r(x') = \frac{I_0 \cdot \cos(k) \cdot \cos(\alpha) \cdot L}{\pi \cdot a \cdot b} dl \quad (29)$$

Na Eq. 29, (α) representa o ângulo entre o raio projetado e a normal do elemento (ds), (a) e (b) são o semieixo maior e menor, respectivamente, da elipse formada e (L) é o deslocamento do elemento de superfície (ds).

Efetuando-se a integração da Eq. 29, em relação à (dl), obtém-se a distribuição da radiação sobre o plano do absorvedor no sentido transversal.

Dentre outros resultados, Nicolás e Durán (1980) apresentaram o gráfico da Figura 14, que mostra a variação da concentração local ao longo do sentido (x) do plano focal para valores do ângulo (k).

Figura 14 - Concentração local de uma calha parabólica para vários valores de k.



Adaptado de Nicolás e Durán (1980)

Observa-se, na Figura 14, que ocorre uma maior dispersão do tamanho da imagem e, conseqüentemente, da energia sobre o absorvedor, com o aumento do ângulo (k). Nota-se que com o aumento do ângulo (k) desde 0° até 60°, o tamanho da imagem praticamente dobrou de valor.

Observou-se, nos trabalhos apresentados, que os autores utilizaram abordagens diferentes para tratar do problema. Evans (1977), Daly (1979) e Nicolás e Durán (1980) utilizaram expressões obtidas a partir da geometria. Verificou-se que, para que seja possível obter-se a distribuição de energia sobre o absorvedor, considerando-se os desvios ópticos randômicos, faz-se necessário utilizar alguma ferramenta para complementar seus modelos, porém apresentam-se soluções simples para tratamento de erros determinísticos (não randômicos). Nicolás e Durán (1980) e Daly (1979) utilizaram um tratamento que considera o

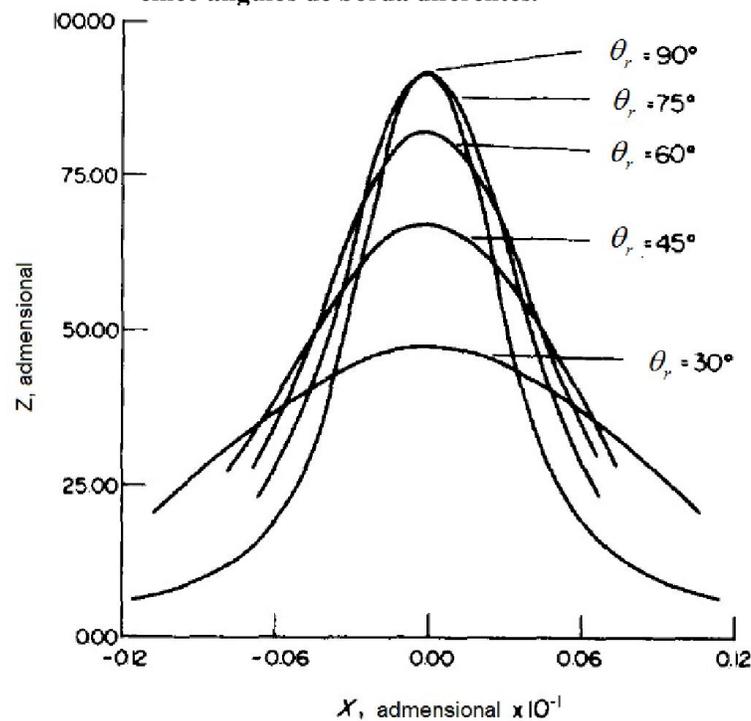
cone solar bidimensional, enquanto Evans (1977) considerou inicialmente o cone tridimensional, contudo, em seu modelo, também o utilizou de forma bidimensional.

Além dos trabalhos apresentados, pode-se citar também, de forma mais resumida, devido à sua complexidade, o trabalho de Harris e Duff (1981). Esses autores propuseram um método numérico para o cálculo da distribuição do fluxo no plano focal que considera a qualidade da superfície refletora e a precisão do contorno desta. A metodologia desenvolvida leva em conta, primeiramente, o fato de a superfície refletora possuir um comportamento randômico em relação ao caminho do raio refletido pela mesma, o qual é caracterizado por uma densidade de probabilidade gaussiana bivariada, com desvios da normal da superfície nas duas direções da superfície refletora.

O cone solar também foi modelado segundo uma densidade de probabilidade gaussiana bivariada com os desvios típicos ($\sigma_x = \sigma_y = 2,2$ mrad). Segundo esses autores, o cone refletido pela superfície é formado pela convolução das duas densidades de probabilidade. Devido ao fato de ambas as distribuições serem gaussianas, a distribuição obtida a partir da convolução também será gaussiana.

Harris e Duff (1981) obtiveram a distribuição de fluxo na região focal de uma calha parabólica para cinco diferentes ângulos de borda (Figura 15).

Figura 15 - Distribuição normalizada para uma calha parabólica com absorvedor plano para cinco ângulos de borda diferentes.



Adaptado de Harris e Duff (1981)

A Figura 15 apresenta a variação da concentração ao longo da região focal produzida por uma calha parabólica com fator de interceptação de 80%, desvios de 4 mrad, alinhada com o vetor solar ($\varphi = 0$).

No trabalho, os autores apresentaram, além do concentrador calha parabólica com absorvedor plano, a formulação para três outros tipos de concentradores: calha parabólica com absorvedor circular, Fresnel linear e disco parabólico.

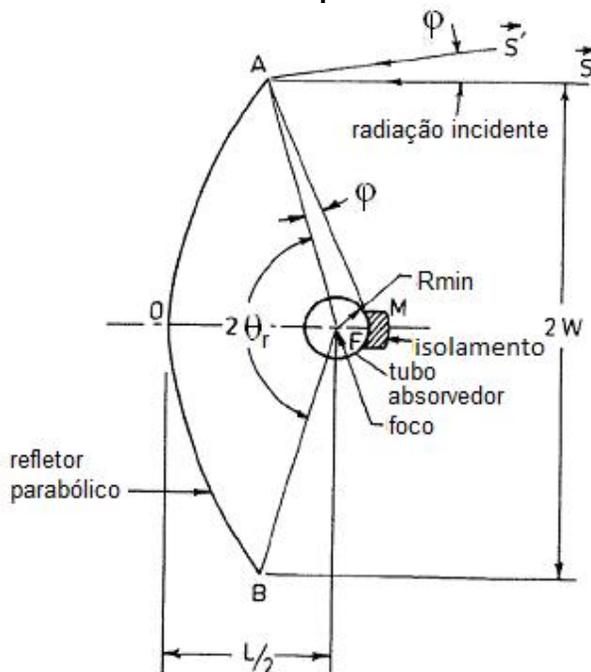
Pode-se concluir que Harris e Duff (1981) utilizaram distribuições de probabilidade para desenvolver o seu modelo, porém este apresenta característica inversa quanto à consideração dos desvios ópticos. Para desvios randômicos seu modelo está adaptado, contudo não propõe tipo algum de artifício para o tratamento dos erros determinísticos.

Em relação aos resultados apresentados pelos trabalhos citados, observa-se que estes chegam a resultados coerentes, obtendo distribuições de energia idênticas, utilizando, por vezes, métodos complexos, mas que levam ao mesmo resultado final.

2.2.2 Modelos de distribuição de energia para absorvedores cilíndricos

Kandlikar e Vij (1978) elaboraram um resumo das características geométricas de um coletor parabólico com absorvedor cilíndrico, tomando como base a Figura 16, que apresenta os ângulos mais importantes para o estudo da concentração desta configuração.

Figura 16 – Geometria básica do coletor parabólico com absorvedor cilíndrico.



Adaptado de Kandlikar e Vij (1978)

Na Figura 16, (φ) representa o ângulo que um raio solar faz com o eixo do cone solar, (2W) indica a abertura total do coletor parabólico e (L/2) a distância focal da superfície parabólica.

A partir da geometria básica do coletor parabólico (Figura 16), esses autores desenvolveram a equação do comprimento da superfície refletora (Eq. 30).

$$2S = L \left[\sec\left(\frac{\theta_r}{2}\right) \cdot \tan\left(\frac{\theta_r}{2}\right) + \ln\left(\sec\left(\frac{\theta_r}{2}\right) + \tan\left(\frac{\theta_r}{2}\right)\right) \right] \quad (30)$$

Onde $L = 2.f$ e θ_r é o ângulo de borda da parábola.

Considerando (2. φ) como o ângulo através do qual um feixe paralelo refletido na superfície terá todos os seus raios interceptados pelo absorvedor, Kandlikar e Vij (1978) apresentaram a equação do menor diâmetro do absorvedor que permite interceptar todos os raios (Eq. 31).

$$2R_{\min} = \frac{2L \operatorname{sen}(\varphi)}{1 + \cos(\varphi)} \quad (31)$$

Esses autores desenvolveram a equação da concentração geométrica (Eq. 32), considerando a região não iluminada do absorvedor como isolada termicamente, ou seja, não contribui nem na absorção dos raios e nem na emissão de calor para o ambiente.

$$C_{\text{geom}} = \frac{1 - \left(\frac{\operatorname{sen}(\varphi)}{\operatorname{sen}(\theta_r)} \right)}{\pi \frac{\operatorname{sen}(\varphi)}{\operatorname{sen}(\theta_r)} \left(\frac{\theta_r + 90 - \varphi}{180} \right)} \quad (32)$$

Foram identificados também os principais aspectos relativos a um coletor parabólico: concentração desejada, movimentação do arranjo de rastreamento, custo da superfície refletora, da estrutura de suporte e do sistema de rastreamento.

Para que tais aspectos possam ser avaliados, foram identificados os seguintes parâmetros da geometria parabólica que funcionam como fatores de decisão:

- área efetiva (igual à abertura da parábola subtraída da sombra provocada pelo absorvedor);
- ângulo de borda;
- área da superfície reflexiva;
- aceitação angular;

- diâmetro mínimo do absorvedor;
- taxa de concentração;
- tempo de rastreo.

Como resultado, Kandlikar e Vij (1978) elaboraram a Tabela 1 com valores do ângulo de borda e do desvio. Eles observaram que, para qualquer desvio, a máxima concentração ocorre para um ângulo de borda de 70°.

Tabela 1 - Concentração em função do ângulo de borda e desvio angular.

φ (grau)	1	2,5	5	7,5
θ_r (grau)				
90	17,70	7,06	3,28	2,21
80	18,70	7,39	3,57	2,31
70	19,10	7,50	3,60	2,33
60	18,60	7,32	3,54	2,27
50	17,70	6,88	3,30	2,11
40	16,00	6,00	2,82	1,77
30	13,90	5,10	2,36	1,44
20	9,80	3,66	1,60	1,06

Fonte: Kandlikar e Vij (1978)

Esses autores elaboraram o gráfico registrado na Figura 17, que relaciona o diâmetro mínimo do absorvedor a diferentes configurações de ângulo de borda e de desvio angular, e chegaram ao gráfico registrado na Figura 18, a qual apresenta a relação entre a área da superfície refletora e o ângulo de borda do concentrador.

Figura 17 - Diâmetro mínimo do absorvedor para diferentes configurações geométricas.

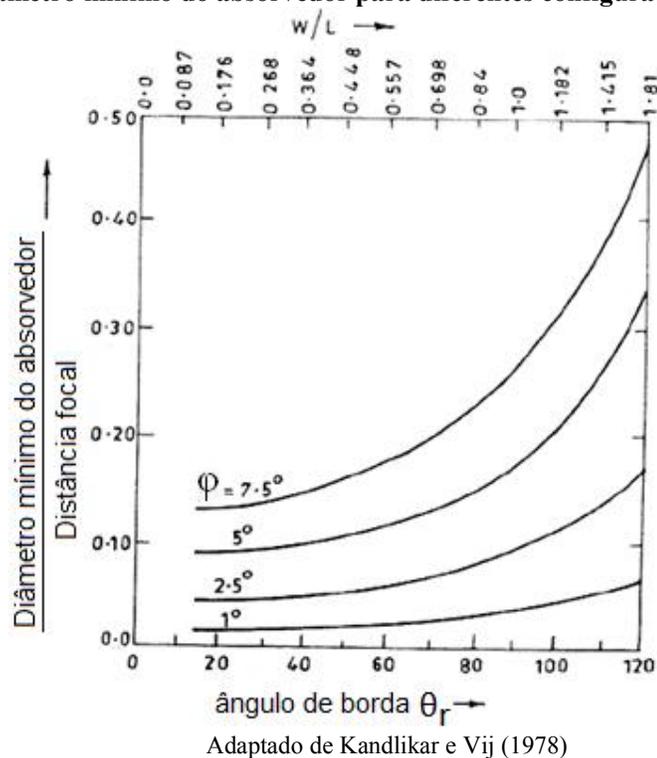
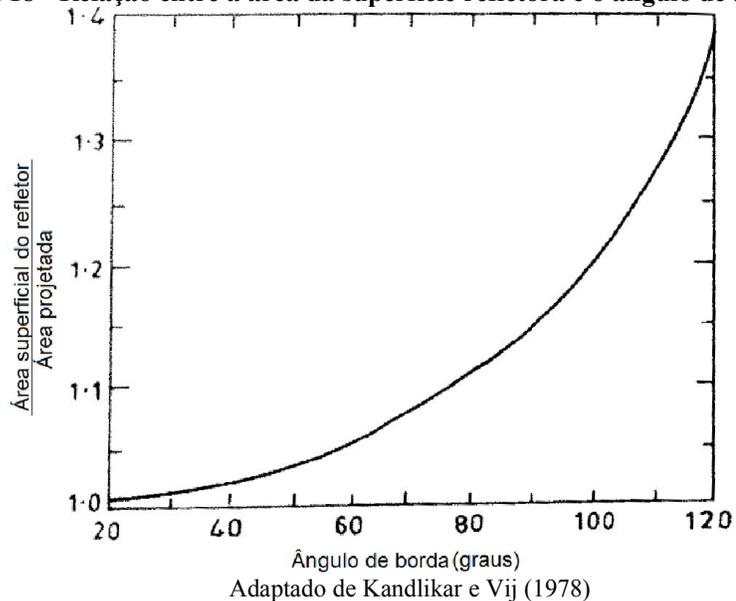
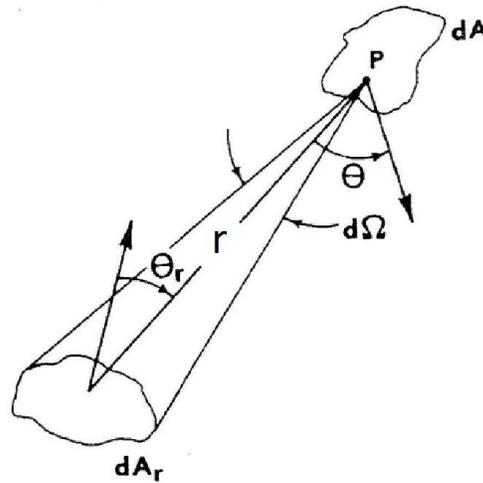


Figura 18 - Relação entre a área da superfície refletora e o ângulo de borda.



Jeter (1986) desenvolveu um método no espaço (3D) que utiliza formulação semifinita para obter a distribuição de energia em absorvedores planos e cilíndricos. De forma resumida, esse método baseia-se inicialmente no fluxo de energia que um elemento infinitesimal de uma superfície concentradora reflete na direção de um elemento (dA), indicado na Figura 19.

Figura 19 - Relação fundamental do fluxo refletido.



Fonte: Jeter (1986)

A Eq. 33 apresenta o cálculo da energia que chega ao ponto (P), originada da reflexão na superfície (dA_r).

$$d^4Q = I \cdot d\Omega \cdot \cos \theta \cdot dA \quad (33)$$

O ângulo sólido ($d\Omega$) pode ser expresso pela Eq. 34.

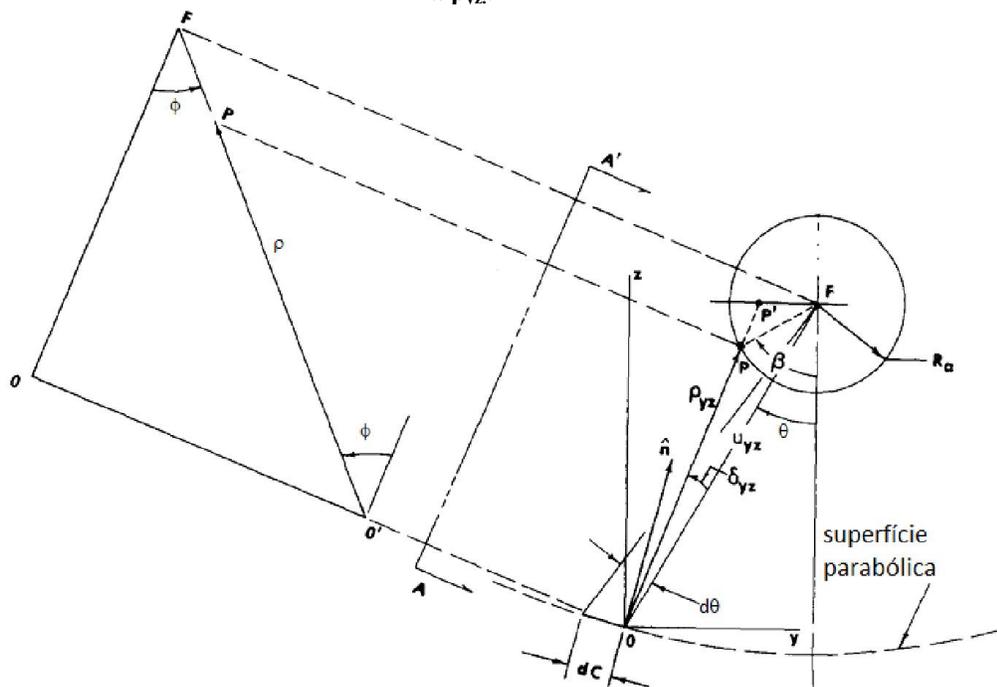
$$d\Omega = \frac{dA_r \cos(\theta_r)}{r^2} \quad (34)$$

Substituindo a Eq. 33 pela Eq. 34, é possível exprimir a equação da densidade de fluxo (Eq. 35).

$$d^2q = \frac{d^4Q}{dA} = I \cdot d\Omega \cdot \cos \theta \quad (35)$$

Para o desenvolvimento do modelo, Jeter (1986) tomou como base a simetria da geometria parabólica que permite definir um elemento de arco da superfície parabólica (dC) (na direção do plano transversal), indicado na Figura 20, e um elemento de comprimento (dx) na direção longitudinal.

Figura 20 - Geometria generalizada da calha parabólica no plano xy, com vista lateral, paralela a ρ_{yz} .



Adaptada de Jeter (1986)

Baseado na Figura 20, esse autor obteve as seguintes expressões para os elementos diferenciais da superfície da parábola: a Eq. 36, que apresenta o elemento de arco da superfície (dC), e a Eq. 37, em que se vê o elemento de comprimento longitudinal (dx).

$$dC = \frac{u_{yz} d\theta}{\cos(\theta/2)} \quad (36)$$

$$dx = \frac{\rho_0 d\phi}{\cos \phi} \quad (37)$$

Na Eq. 36, (u_{yz}) representa a distância entre o elemento de arco (dC), e o foco da parábola e (θ) é o ângulo entre o segmento (OF) e o eixo da parábola (Figura 20).

Na Eq. 37, (ρ_0) é a distância no plano longitudinal entre os pontos (O'), e (F), (ϕ) é o ângulo formado entre os segmentos ($O'F$) e (OF) no plano longitudinal (Figura 20).

Baseado no modelo uniforme de distribuição do brilho solar, representado na Eq. (38),

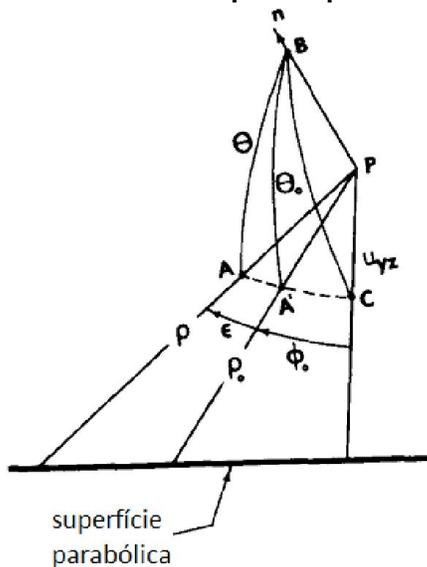
$$B(\varphi) = \begin{cases} \frac{I_{nud}}{\pi \sin^2(\varphi)} & \varphi \leq \varphi_s \\ 0 & \varphi > \varphi_s \end{cases} \quad (38)$$

o autor, em enfoque, definiu a integral geral que permite obter a concentração local, seja em concentradores com absorvedor plano, seja em concentradores com absorvedor cilíndrico (Eq. 39).

$$dq = \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} B(\varphi) d\Omega \cos(\theta) \quad (39)$$

Na Eq. 39, (ε) representa o ângulo que um raio refletido qualquer faz em relação ao raio central refletido, conforme Figura 21.

Figura 21 - Trecho dC da superfície parabólica.



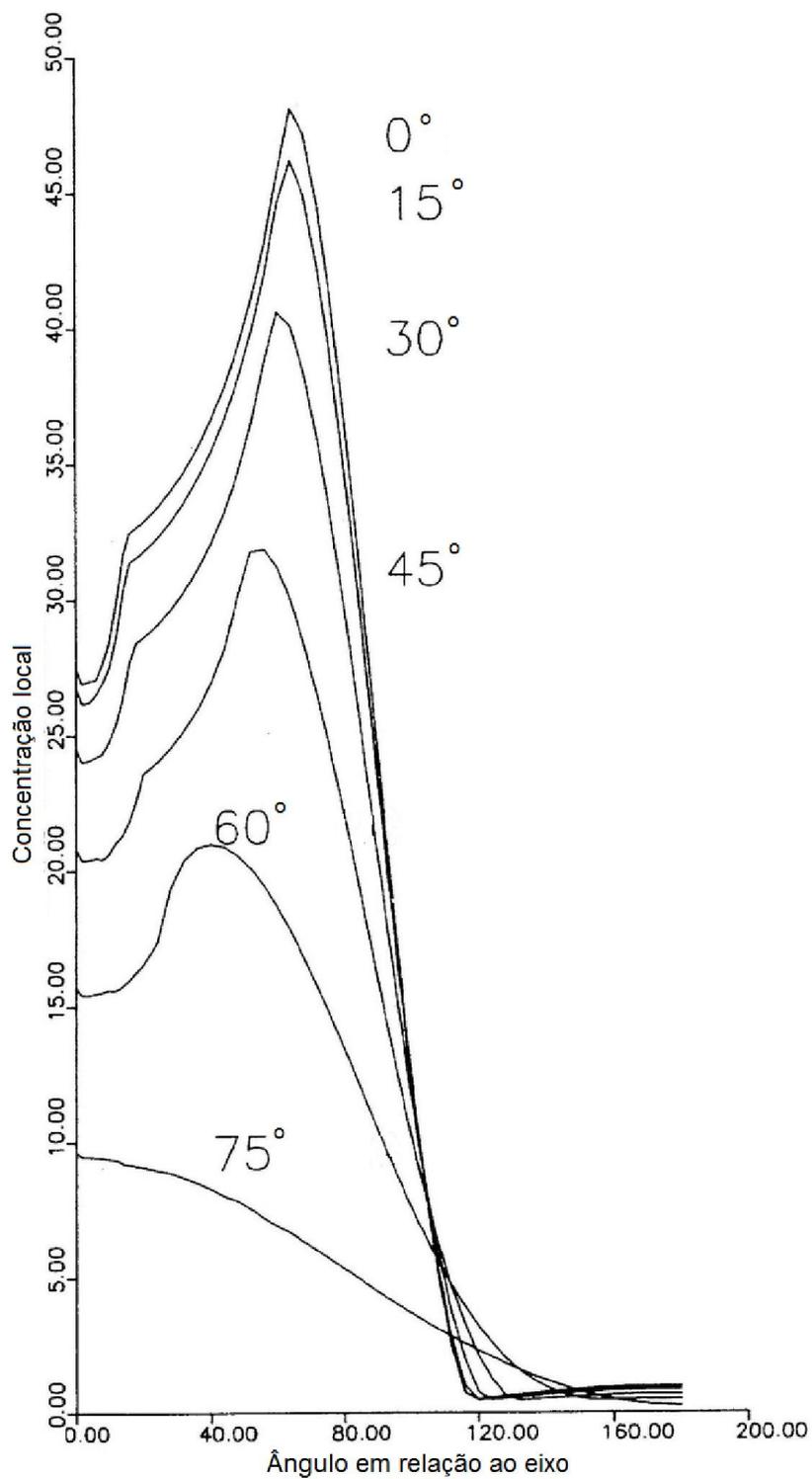
Adaptada de Jeter (1986)

Considerando a geometria do concentrador cilindro parábola com absorvedor circular, o autor em destaque definiu a Eq. 40, que permite obter a distribuição de energia no absorvedor circular, considerando-se a sombra provocada pelo absorvedor sobre a superfície refletora.

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{abs}}{4f \cdot \sin(\theta_r)} \cdot \frac{1}{1 + \cos(\theta_r)} \quad (40)$$

Como resultado para o absorvedor cilíndrico, foi obtido o gráfico mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Concentração local em absorvedor cilíndrico para ângulo de borda de 90° e vários ângulos de incidência.



Adaptado de Jeter (1986)

Os gráficos da Figura 22 apresentam a concentração local ao redor do absorvedor cilíndrico de um concentrador com ângulo de borda de 90° e para vários ângulos de incidência. Observa-se que, próximo ao eixo do concentrador, o valor da concentração sofre uma diminuição devido ao sombreamento provocado pelo absorvedor.

Homas e Güven (1994) utilizaram um modelo óptico e um programa de computador baseado na técnica de traçamento de raios para se determinar a distribuição de energia em um absorvedor tubular de um coletor parabólico linear, considerando a incidência dos raios, normal à abertura do concentrador.

As simulações foram efetuadas com o objetivo de se verificar a forma e a intensidade da distribuição mediante a variação dos desvios ópticos. Foram utilizadas três configurações de coletor parabólico com absorvedor tubular. Essas configurações estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados dos coletores para elaboração da distribuição.

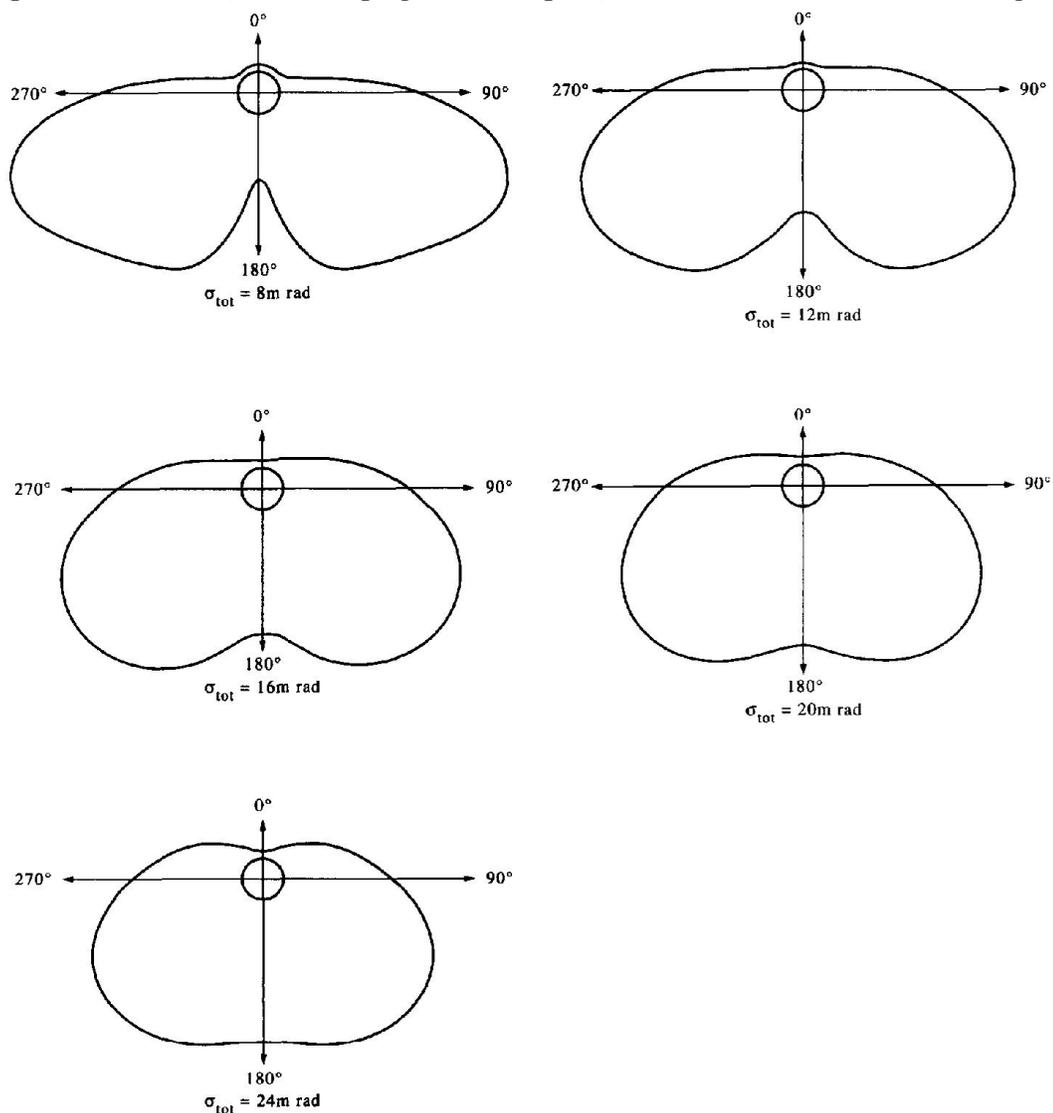
Parâmetros	Config. 1	Config. 2	Config. 3
Raio do tubo absorvedor (cm) R1	1,4	1,4	1,65
Raio interno do tubo de vidro (cm) R2	2,475	2,475	2,75
Raio externo do tubo de vidro (cm) R3	2,675	2,675	2,95
Tamanho do foco (cm)	24,1	50,56	50,55
Refletividade	0,92	0,92	0,92
Transmissividade do envelope de vidro	0,9	0,9	0,9
Absortância do absorvedor	0,92	0,92	0,92
Ângulo de borda do refletor ($^\circ$)	92	52	92
Tamanho da abertura (cm)	100	100	209,4
Ângulo de desalinhamento ($^\circ$)	0	0	0
Erro de rastreamento (rad)	0	0	0
Desvio padrão dos raios (rad)	0,00001 e 0,016	0,004; 0,008; 0,020 e	0,012

Adaptada de Homas e Güven (1994)

Como resultados, foram obtidos os perfis de distribuição de energia ao longo do absorvedor circular, considerando-se 5 valores de desvios ópticos.

Os gráficos registrados na Figura 23 apresentam os perfis de distribuição de energia para o coletor com configuração 1, sob influência de 5 valores de desvio ópticos diferentes.

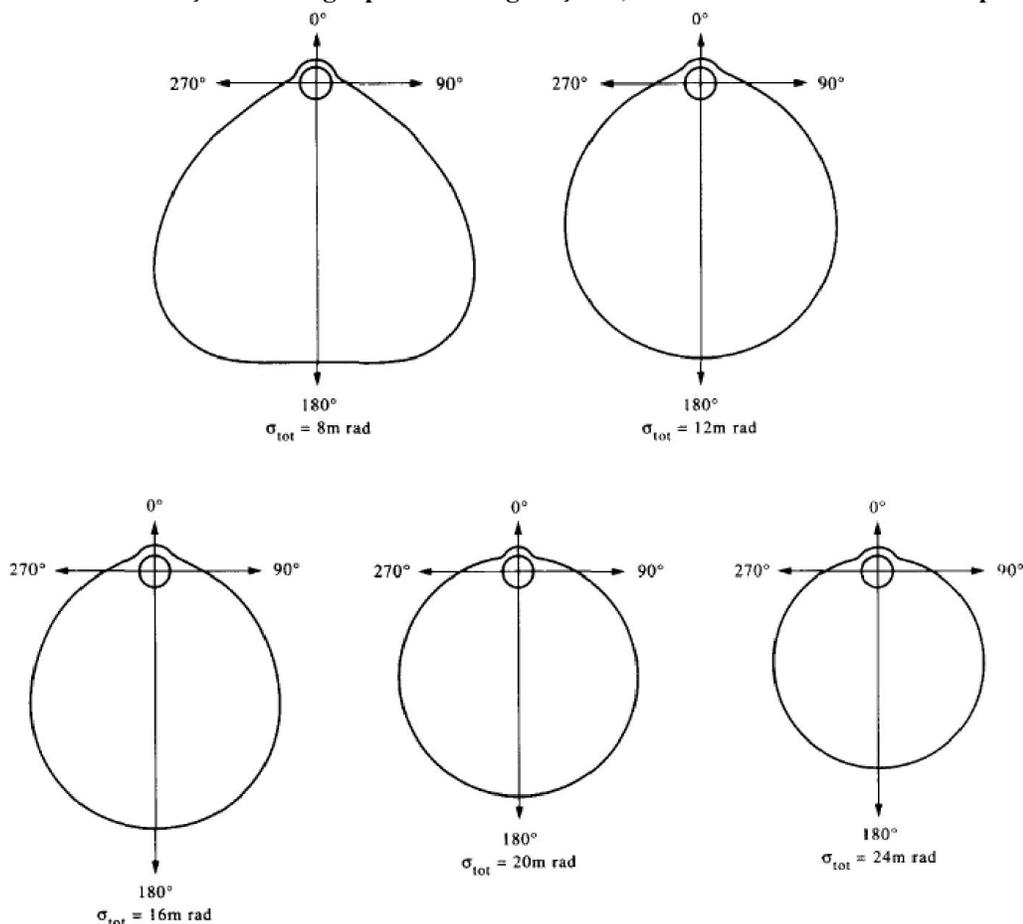
Figura 23 - Distribuição de energia para a configuração 1, sob vários valores de desvio óptico.



Adaptado de Homas e Güven (1994)

Os gráficos apresentados na Figura 24 mostram os perfis de distribuição de energia para o coletor com configuração 2 sob influência de 5 valores de desvios ópticos diferentes.

Figura 24 - Distribuição de energia para a configuração 2, sob vários valores de desvio óptico.



Adaptado de Homas e Güven (1994)

Observam-se, em ambas as figuras (Figura 23 e Figura 24), que, para valores baixos de desvio ópticos, o perfil de distribuição de energia tem aspecto triangular (pouco uniforme), e à medida que os valores dos desvios aumentam, o perfil tende a um formato circular (mais uniforme). A distribuição obtida com a configuração 2 é mais uniforme que a da configuração 1.

A localização dos pontos de máxima intensidade varia com o σ_{tot} . Para valores baixos de σ_{tot} , existe um afundamento da intensidade ao redor de 180°, devido ao efeito da sombra do tubo; para valores mais altos, a distribuição é mais uniforme; com o aumento de σ_{tot} , a eficiência da coleção de energia é menor.

Homas e Güven (1994) determinaram a eficiência ótica dos sistemas baseados na Eq. 41.

$$\eta_o = \frac{\text{Energia total absorvida pelo absorvedor}}{\text{Energia total na abertura do concentrador}} = \frac{I_{\text{absorvido}} \cdot A_{\text{absorvedor}}}{I_{\text{abertura}} \cdot A_{\text{abertura}}} \quad (41)$$

Onde:

I_{abertura} – fluxo solar em W/m^2 , foi utilizado arbitrariamente o valor de 1000 W/m^2 ;

$I_{\text{absorvido}}$ – fluxo absorvido pelo absorvedor (W/m^2) foi obtido pela integração angular do fluxo solar distribuído ao redor do tubo absorvedor;

A_{abertura} - área da abertura em m^2 ;

$A_{\text{absorvedor}}$ – área do absorvedor em m^2 .

O fator de interceptação foi outro parâmetro avaliado e foi obtido utilizando-se a Eq. 42.

$$\gamma = \frac{\eta_0}{\rho \cdot \tau \cdot \alpha} \quad (42)$$

Onde:

η_0 – eficiência óptica;

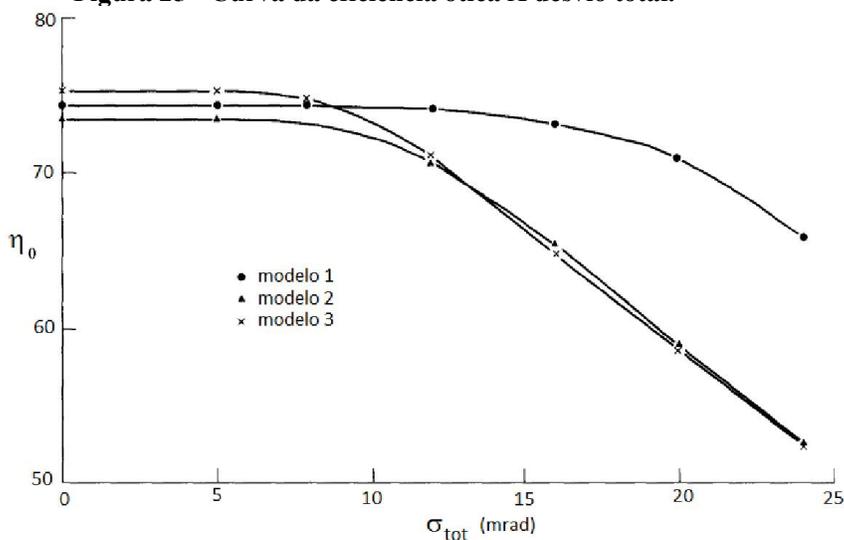
ρ – refletividade;

τ – transmissividade da cobertura de vidro do tubo;

α – absorvidividade do absorvedor.

Foi traçada também a curva da eficiência óptica em relação à σ_{tot} (Figura 25).

Figura 25 - Curva da eficiência ótica X desvio total.



Adaptado de Homas e Güven (1994)

No gráfico registrado na Figura 25, observa-se que, para valores até aproximadamente 8 mrad, os desvios angulares não afetam a eficiência ótica, mas, após 8 mrad, a eficiência ótica decresce linearmente com o aumento de σ_{tot} , para os modelos 2 e 3.

Nos trabalhos apresentados, verificou-se que, de forma idêntica aos trabalhos com absorvedores planos, é possível utilizar outras metodologias (distribuição de probabilidade,

formulação semifinita, traçamento de raios) para se analisar a distribuição de energia sobre o absorvedor cilíndrico.

Kandlikar e Vij (1978) utilizaram a geometria do absorvedor para elaborar um método de projeto de concentradores que considera o comportamento de algumas características do concentrador quando os desvios ópticos randômicos estão presentes. Os autores não obtiveram a distribuição de energia no absorvedor e nem mencionaram a possibilidade de considerar os desvios não randômicos. Jeter (1986) utilizou uma formulação diferencial para abordar o problema, porém não considerou os desvios ópticos. O trabalho de Homas e Güven (1994) foi o que apresentou uma solução mais completa para o problema, pois, utilizando-se do traçamento de raios, apresentou resultado de simulações da distribuição de energia ao longo do absorvedor cilíndrico, considerando os desvios ópticos randômicos.

Em nenhum dos três trabalhos, os autores abordam a influência dos desvios determinísticos (não randômicos) sobre a distribuição de energia ao longo do absorvedor cilíndrico. De todos os trabalhos apresentados, apenas o de Evans (1977) apresenta esta abordagem para absorvedores planos.

Outro fato constatado em todos os trabalhos é que os autores não fazem menção à influência da geometria do Sol sobre o comportamento da distribuição de energia sobre o absorvedor, pois todos consideram a função de brilho como sendo uma função bidimensional, ou seja, julgaram não haver influência das componentes longitudinais da calha parabólica sobre a formação da distribuição de brilho na região focal.

3 METODOLOGIA

Como comentado, o trabalho visa desenvolver as relações existentes entre a fonte (forma e intensidade da radiação), geometria do concentrador e densidade de fluxo e radiação na superfície do absorvedor.

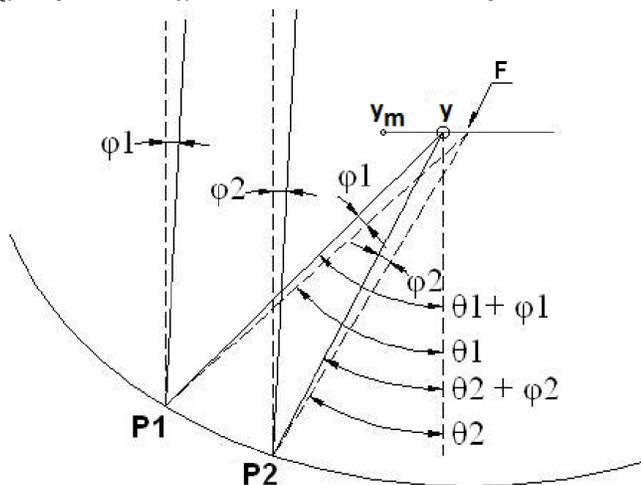
Como resultado, são obtidas soluções analíticas exatas do mapa de densidade para qualquer função conhecida da radiação solar incidente e para as principais geometrias (2D) de concentradores solares: cilindro parábola, Fresnel e V-troughs. Para simplificar, foram escolhidas geometrias com uma única reflexão na superfície concentradora.

Primeiramente, o desenvolvimento do modelo foi realizado para o concentrador cilindro parabólico com absorvedor plano. Posteriormente, o desenvolvimento foi estendido ao concentrador cilindro parabólico e Fresnel com absorvedor cilíndrico.

Para o desenvolvimento do modelo, considerou-se que a radiação incidente na cavidade parabólica pode ser representada por um cone plano ($+\varphi_s$, $-\varphi_s$) simetricamente distribuído ao redor de um raio central, denominado cone solar.

A Figura 26 apresenta os elementos de um concentrador parabólico com absorvedor plano, visto pelo plano transversal.

Figura 26 – Configuração dos ângulos de um concentrador parabólico visto em perfil.



Analisando o plano transversal da parábola, cada raio de um pacote é identificado pelo ângulo (φ), formado entre o raio e o eixo do seu feixe (Figura 26). Na cavidade da superfície parabólica, o ângulo (θ) está definido entre o eixo do feixe e o eixo da parábola; (P1) e (P2) são pontos onde o vértice do cone solar atinge a superfície refletora da parábola. O absorvedor

considerado é plano de largura ($W = 2.y_m$), comprimento infinito, perpendicular ao eixo da parábola e que contém seu foco (F).

Na Figura 26, por convenção, o ângulo (φ) é positivo para raios situados à esquerda do eixo do feixe e negativo para raios que estão à direita do feixe. Os ângulos (θ) são considerados positivos à direita da linha focal da parábola e negativos à esquerda. Os valores de (y) são positivos à direita e negativos à esquerda do foco.

Observando-se o cone refletido pela superfície parabólica, um raio (φ_1) atinge o ponto (y) na superfície do absorvedor com ângulo de incidência ($\theta_1 + \varphi_1$) (Figura 26). Identifica-se outro raio (φ_2) que, uma vez refletido no ponto (P2), atinge o mesmo ponto (y) com ângulo ($\theta_2 + \varphi_2$).

Nota-se que existe um conjunto de pares ($\theta - \varphi$) que iluminam o mesmo ponto (y) do absorvedor e que estão relacionados a uma função geral (Eq. 43).

$$\varphi = \varphi(\theta, y) \quad (43)$$

Essa função depende exclusivamente da interação entre três elementos: o conjunto dos raios do cone solar, representados pelos ângulos (φ); os pontos da superfície refletora parabólica, representada pelos ângulos (θ); e um ponto do absorvedor plano, representado pela posição (y). Os pares ($\theta - \varphi$) são caracterizados pela posição (y) no absorvedor, que os define.

Para um concentrador parabólico linear, com absorvedor plano, a obtenção da função representada pela Eq. 47 baseou-se na Eq. 44 (HASSAN e EL-REFAIE, 1973 e EVANS, 1977).

$$y = \frac{r \cdot \sec(\theta) \cdot \tan(\varphi)}{1 + \tan(\varphi) \cdot \tan(\theta)} \quad (44)$$

Na Eq. 44, (r) é o raio vetor da parábola e representa a distância entre um ponto (P) da superfície refletora e o foco (F) do concentrador parabólico, calculada pela Eq. 45 (DUFFIE E BECKMAN, 1991).

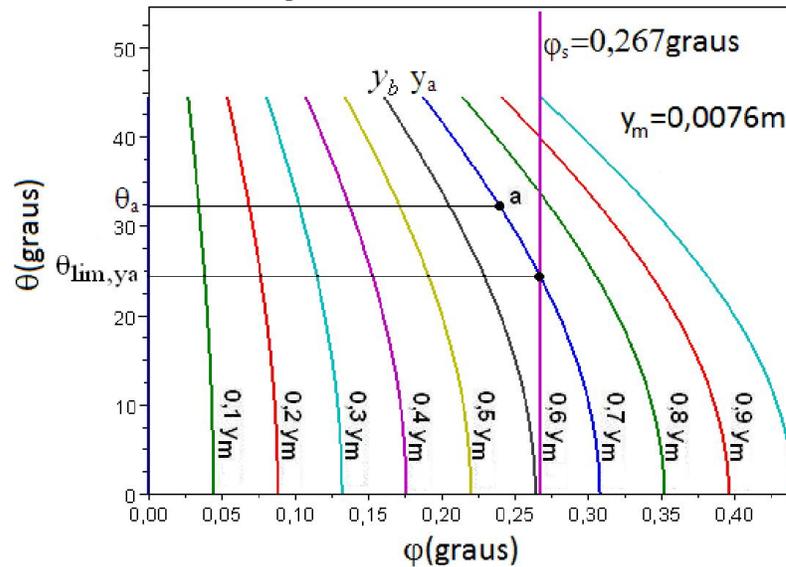
$$r = \frac{2 \cdot f}{1 + \cos(\theta)} \quad (45)$$

Após manipulação algébrica, obtém-se a Eq. 46, que representa a Eq. 43.

$$\tan(\varphi) = \frac{y}{|y \cdot \tan(\theta)| + r \cdot \sec(\theta)} \quad (46)$$

A representação diagramática, denominada gráfico de isolinhas, mostrada na Figura 27, permite visualizar o comportamento dos raios que atingem um ponto (y).

Figura 27 - Conjunto de valores ($\theta - \varphi$) que atingem o absorvedor em um ponto ($y=cte$) utilizado como parâmetro de cada curva.



O gráfico da Figura 27 foi obtido considerando-se um concentrador parabólico com ângulo de borda de 45° , um cone solar com ângulo de abertura de $0,267^\circ$ e um absorvedor com tamanho de $0,0076 \text{ m}$. A Figura 27 apresenta apenas um dos quadrantes do gráfico de isolinhas completo. Esse quadrante corresponde à faixa de ângulos (θ) entre 0° e 45° ($\theta > 0$, lado direito), à faixa de ângulos (φ) entre 0° e $0,5^\circ$ ($\varphi > 0$) e à faixa do absorvedor entre 0 e $0,0076 \text{ m}$, que correspondem ao lado esquerdo do foco (F).

No eixo vertical da Figura 27, representa-se o ângulo (θ) e, no eixo horizontal, o ângulo (φ). As curvas traçadas constituem o lugar geométrico dos pares ($\theta - \varphi$) que atingem o local (y) no absorvedor (isolinhas). O parâmetro correspondente a cada isolinha é precisamente o local (y) de incidência dos raios ($\theta - \varphi$). Para cada valor do ângulo (θ) existe um único valor do ângulo (φ), que incide no local (y) do absorvedor.

No diagrama da Figura 27, foram traçadas 10 isolinhas referentes aos valores de (y) desde (0) até ($y_m = 0,0076 \text{ m}$) em passos de $0,1 y_m$. Esses pontos são atingidos por raios, depois da reflexão, com ângulo, definido em sentido anti-horário em relação ao eixo do feixe (lado esquerdo). Para ângulos ($\theta < 0$), o diagrama pôde ser obtido por meio de simetria em relação ao eixo representado pela linha ($\varphi = 0$).

A linha vertical, mostrada no gráfico da Figura 27, indica o máximo semiângulo solar do feixe ($\varphi_s = 0,267$ graus). Essa linha define duas regiões importantes do gráfico. À esquerda (abscissa, $\varphi \leq \varphi_s$), as isolinhas de (y) que não cruzam a linha vertical representam regiões do absorvedor que recebem contribuição da radiação refletida ao longo de toda a parábola.

As isolinhas que intersectam a linha ($\varphi = \varphi_s$) representam regiões que recebem contribuição parcial da parábola. Na Figura 27, para $y = 0,7 \cdot y_m$, o ângulo (θ_{lim, y_a}) separa as regiões da parábola que contribuem iluminando o local (y_a) com ($\theta > \theta_{\text{lim}, y_a}$), da região que não contribui, ($\theta < \theta_{\text{lim}, y_a}$). Todos os pontos localizados à direita da abscissa ($\varphi > \varphi_s$) recebem iluminação parcial da parábola.

As regiões de iluminação total e parcial no absorvedor podem ser definidas da seguinte forma: no intervalo ($0 \leq y \leq y_b$) o absorvedor recebe iluminação plena da parábola. O local (y_b) pode ser calculado usando a Eq. 47, para ($\theta = 0$).

$$y_b = f \cdot \tan(\varphi_s) \quad (47)$$

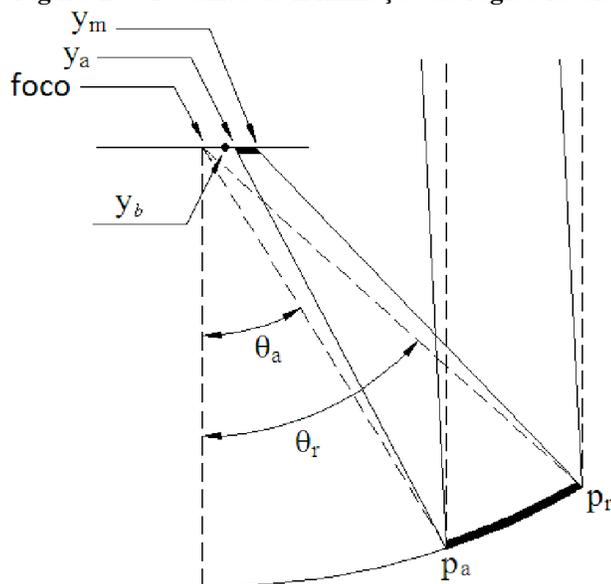
Na Eq. 47, (f) é a distância focal da parábola. Essa posição do absorvedor é definida pela curva tangente à linha vertical ($\varphi_s = 0,267$ graus) para a parábola utilizada no exemplo ($f = 1$), $y_b = 0,606 \cdot y_m$.

O limite superior da região iluminada do absorvedor está definido pelo valor de (y) igual a y_m (semilargura do absorvedor) e corresponde à interseção da linha vertical (φ_s) com a curva de parâmetro (y_m) (Eq. 46). Essa região do absorvedor é iluminada apenas pelos raios extremos que incidem na borda do concentrador.

A região do absorvedor compreendida entre os pontos (y_b) e (y_m) é iluminada parcialmente pelos raios incidentes na parábola e dá origem, em todos os casos, independentemente da distribuição de brilho da radiação incidente, a um perfil de iluminação declinante. Isso vale também, por exemplo, para um perfil de brilho uniforme.

Essas considerações estão ilustradas graficamente na Figura 28, que apresenta como se dá a contribuição de determinada região da superfície refletora da parábola.

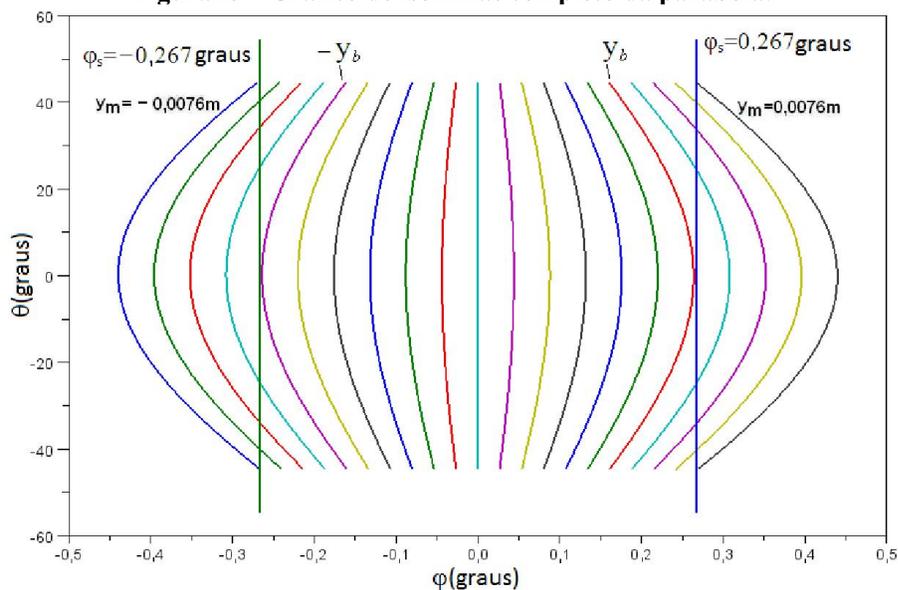
Figura 28 - Detalhes da iluminação da região focal.



A região do absorvedor localizada entre o foco e (y_b) recebe contribuições de todos os pontos da superfície refletora da parábola. A região do absorvedor com ($y \geq y_b$), representada pelas curvas que cruzam a linha vertical ($\varphi_s = 0,267$ graus), é atingida por raios que incidiram em apenas uma parte da parábola. Por exemplo, o intervalo ($y_a - y_m$), distante do foco da parábola (região destacada), é iluminado apenas por raios provenientes da região ($p_a - p_r$).

As curvas da Figura 29 mostram, de uma forma completa, toda a superfície da parábola, desde $-\theta_r$ até θ_r , apresentando o absorvedor em sua extensão total, desde $(-y_m)$ até (y_m).

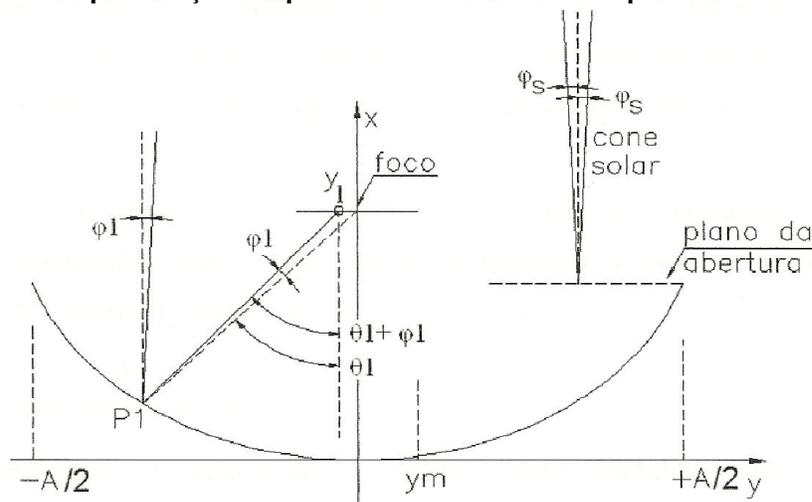
Figura 29 - Gráfico de isolinhas completo da parábola.



De um modo geral, as curvas da Figura 29, que estão totalmente inseridas na faixa situada entre as duas linhas verticais, as quais indicam os limites do cone solar ($-\varphi_s$ a φ_s), representam pontos do absorvedor (y) atingidos por todos os raios dentro do feixe solar. Porém, as curvas que cruzam as referidas linhas representam os pontos do absorvedor em ambos os lados, que são parcialmente atingidos pelo feixe solar (região entre y_b e y_m na Figura 29). Por outro lado, as curvas que estão situadas fora dos limites do cone solar ($-\varphi_s$ a φ_s) representam as regiões do absorvedor que não serão iluminadas.

A Figura 30 apresenta, de forma mais completa, a interação entre os três elementos do concentrador parabólico, destacados anteriormente: o cone solar, a superfície refletora e o absorvedor.

Figura 30 - Representação completa do corte transversal da parábola e do cone solar.



Em relação ao balanço de energia e baseando-se nos elementos apresentados na Figura 30, observa-se que a energia a qual chega ao plano da abertura provém do cone solar que tem como limitação o meio ângulo solar (φ_s).

O raio refletido no concentrador atinge o absorvedor com ângulo $(\theta + \varphi)$ (Figura 30), portanto, para um determinado raio que foi refletido em um ponto P_1 , a contribuição deste em um ponto y_1 do absorvedor pode ser calculada pela Eq. 48.

$$I(y, \theta) = B(\varphi) \cdot \cos(\theta + \varphi) \quad (48)$$

A Eq. 48 mostra que cada ponto da superfície refletora da parábola contribui com a intensidade da radiação em determinado ponto y . $B(\varphi)$ representa a distribuição da intensidade do brilho solar para cada posição angular (φ) do cone solar, podendo ser utilizadas quaisquer distribuições comentadas no item 2.1.2 deste texto.

Substituindo-se a Eq. 43 na Eq. 48 e somando-se as contribuições de todos os pontos da superfície refletora, por meio de uma integração, determina-se a equação que calcula a intensidade da radiação em cada ponto y do absorvedor (Eq. 49).

$$I(y) = \int_{-\theta_r}^{\theta_r} B[\varphi(\theta, y)] \cdot \cos[\theta + \varphi(\theta, y)] \cdot d\theta \quad (49)$$

Para se determinar a concentração local em cada ponto y , foi utilizada a definição de concentração de fluxo (C_{fluxo}), descrita por Rabl (1985) como sendo a relação entre o fluxo no absorvedor ($I(y)$) (Eq. 49) e o fluxo na abertura (I_{abertura}).

$$C_{\text{fluxo}}(y) = \frac{I(y)}{I_{\text{abertura}}} \quad (50)$$

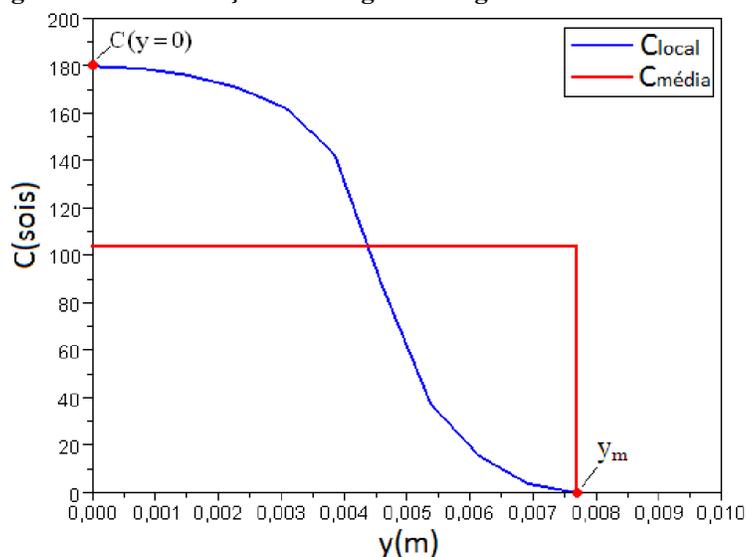
Para o cálculo do fluxo que incide no plano de abertura do concentrador (I_{abertura}), considerou-se a soma das contribuições de cada raio, definido por (φ) dentro do feixe solar, onde $B(\varphi)$ ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{rad}$) representa a distribuição de brilho solar, que depende do modelo considerado, como verificado no item 2.1.2 desta tese.

$$I_{\text{abertura}} = \int_{-\varphi_s}^{\varphi_s} B(\varphi) \cos(\varphi) \cdot d\varphi \quad (51)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando-se o modelo descrito, foi obtida a distribuição de energia em um absorvedor plano localizado na região focal de uma calha parabólica, com distância focal de 1m, abertura de 1,64m e ângulo de borda de 44,5 graus. A Figura 31 mostra o gráfico da distribuição de intensidade. Os desvios ópticos não foram considerados.

Figura 31 - Distribuição de energia ao longo do absorvedor.

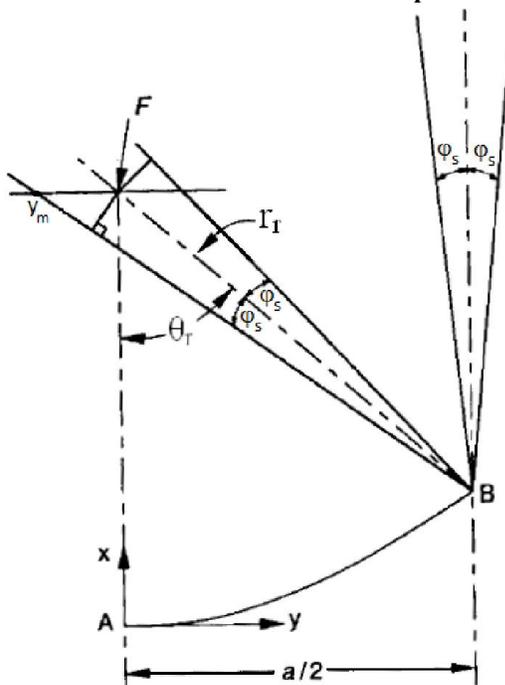


O gráfico da distribuição em azul (Figura 31) foi obtido utilizando-se a distribuição de brilho apresentada por Rabl e Bendt (1982). O gráfico em vermelho representa a concentração média obtida, 104,8 sois, valor equivalente ao fornecido pela Eq. 52 (DUFFIE e BECKMAN, 1991).

$$C_{geom} = \frac{\text{sen}\theta_r \cos(\theta_r + 0,267)}{\text{sen}(0,267)} - 1 \quad (52)$$

Observa-se que a concentração máxima calculada é de 179,8 sois (ponto C(y=0), Figura 31). A energia se distribui até o comprimento máximo (y_m), o qual é definido pela reflexão dos raios na borda da parábola, como indica a Figura 32.

Figura 32 - Reflexão dos raios de borda da parábola.



Adaptado de Duffie e Beckman (1991)

O valor do ponto (y_m) é 0,0076 m (Figura 31 e Figura 32), fornecendo um comprimento total da imagem de 0,015m, como calculado pela Eq. 53, obtida após manipulação algébrica da Eq. 52.

$$2 \cdot y_m = \frac{2 \cdot r_r \cdot \text{sen}(0,267)}{\cos(\theta_r + 0,267)} = \frac{a \cdot \text{sen}(0,267)}{\text{sen}(\theta_r) \cdot \cos(\theta_r + 0,267)} \quad (53)$$

A concentração local no centro do absorvedor ($C(y=0)$) pode ser determinada utilizando-se a Eq. 54.

$$C(y=0) = \frac{B(\varphi=0) \cdot \sin(\theta_r)}{\int_0^{\varphi_s} B(\varphi) \cdot \cos(\varphi) d\varphi} \quad (54)$$

O resultado depende do modelo de distribuição de brilho utilizado ($B(\varphi)$). Para a distribuição de brilho constante, obtém-se a Eq. 55.

$$C(y=0) = 214,5 \cdot \rho \cdot \sin(\theta_r) \quad (55)$$

Utilizando-se a distribuição de brilho definida por Rabl e Bendt (1982), define-se a Eq. 56.

$$C(y = 0) = 257,3 \cdot \rho \cdot \sin(\theta_r) \quad (56)$$

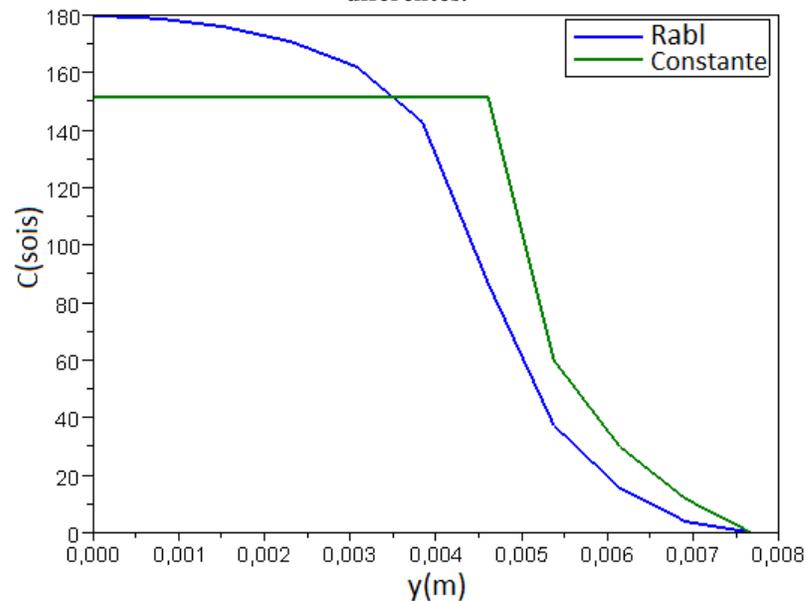
Para a distribuição de brilho definida por Abetti (1938), determina-se a Eq. 57.

$$C(y = 0) = 248,3 \cdot \rho \cdot \sin(\theta_r) \quad (57)$$

Nas Eq. 55, 56 e 57, (ρ) representa a refletividade da superfície refletora do concentrador parabólico. Observa-se que a Eq. 55, obtida por meio desse procedimento, é idêntica à Eq. 22 apresentada por Rabl (1976).

As distribuições de energia sobre o absorvedor, utilizando-se as funções de brilho constante e a fornecida por Rabl e Bendt (1982), são mostradas na Figura 33.

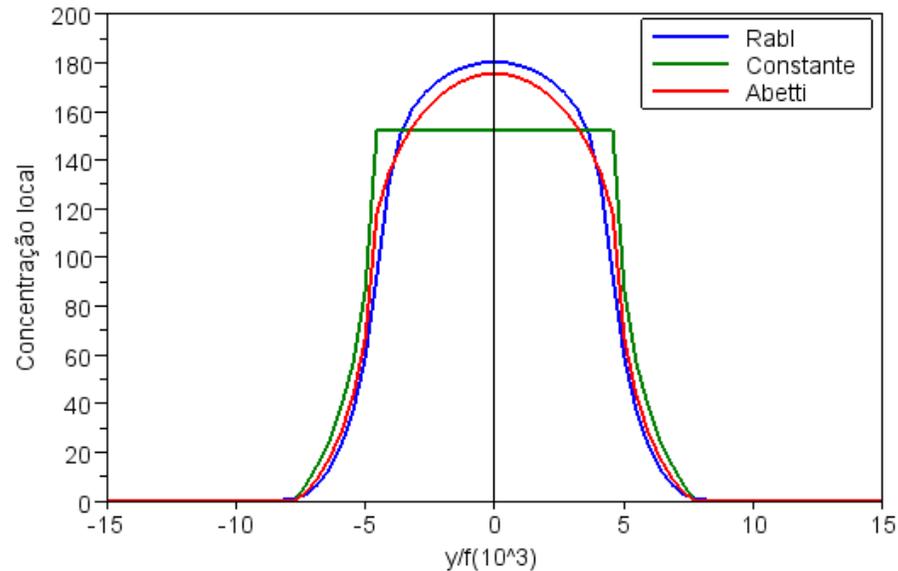
Figura 33 - Distribuição de energia no absorvedor, utilizando-se duas distribuições de brilho diferentes.



Para ambas, foi utilizado o mesmo valor da integral expressa pela Eq. 49 e as mesmas características da parábola anteriormente descritas.

A Figura 34 mostra a distribuição de energia ao longo de todo o absorvedor, utilizando-se três distribuições de brilho: Rabl e Bendt (1982), constante e Abetti (1938). Pode-se verificar que a distribuições de energia obtidas com as funções de brilho de Rabl e Abetti são similares.

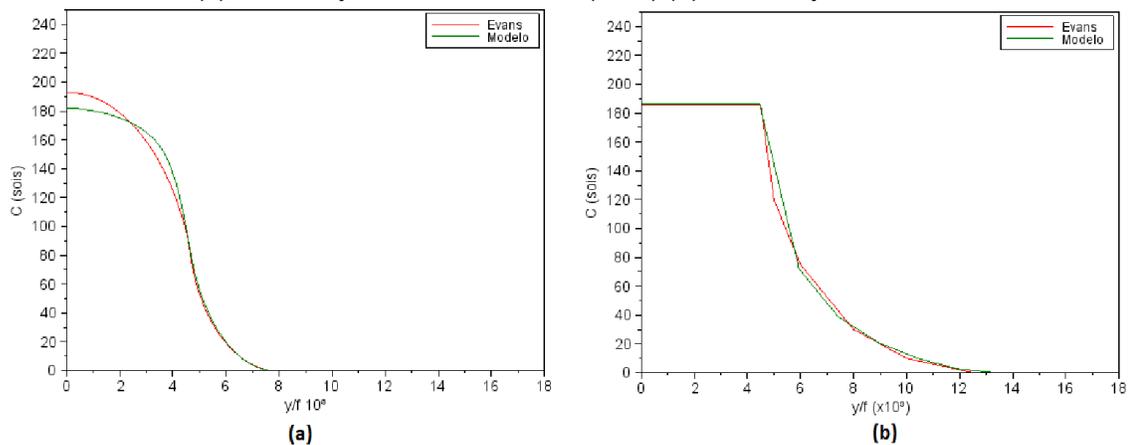
Figura 34 - Distribuição de energia utilizando-se três distribuições de brilho diferentes em todo o comprimento do absorvedor.



Na Figura 34, observa-se que a distribuição de energia indicada por Rabl apresenta o maior valor de energia no centro do absorvedor, e será utilizada como referência para as comparações que seguem. No centro do absorvedor, verifica-se que a distribuição de brilho constante produziu um valor 15% menor que a de Rabl. A distribuição de Abetti alcançou, em seu pico, 3,4% menos energia que Rabl.

A Figura 35 apresenta os resultados da comparação das distribuições de energia no absorvedor, obtidas com duas distribuições de brilho diferentes (constante e José (1957)) com os resultados apresentados por Evans (1977).

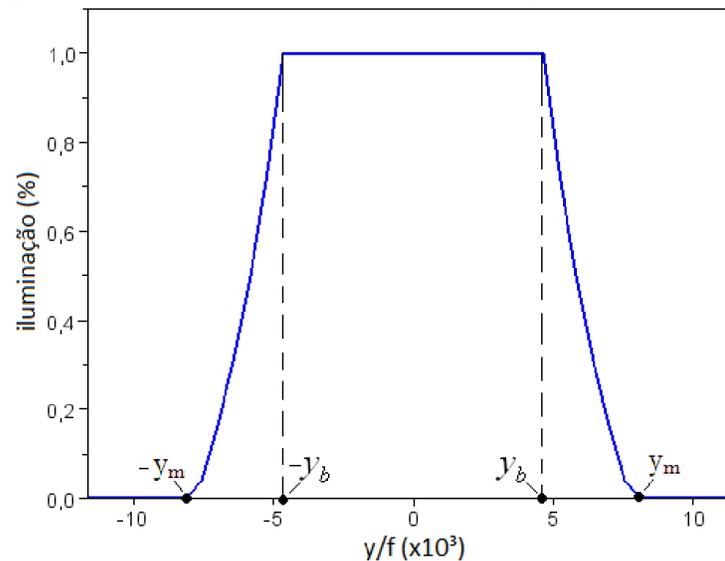
Figura 35 - Comparação da distribuição de energia utilizando o modelo de Evans (1977) e com este modelo (a) distribuição de brilho de José (1957) (b) distribuição de brilho constante.



Observa-se, na Figura 35, que o modelo desenvolvido apresenta boa concordância com os resultados obtidos por Evans (1977), tanto para a distribuição de brilho constante quanto para a distribuição de brilho descrita por José (1957), o erro médio quadrático ficou em torno de 3,5% e 7,4%, respectivamente.

A Figura 36 apresenta o resultado da avaliação do percentual de contribuição da superfície refletora na iluminação do absorvedor do concentrador parabólico linear.

Figura 36 - Percentual de iluminação em cada ponto do absorvedor.



O gráfico da Figura 36 destaca as três regiões comentadas anteriormente: a região entre o foco ($y = 0$) e $(\pm y_b)$ recebe contribuição de toda a superfície refletora; as regiões laterais entre os pontos $(\pm y_b)$ e $(\pm y_m)$ recebem uma contribuição decrescente da superfície refletora à medida que o ponto (y) se aproxima de $(\pm y_m)$; e as regiões com $(|y| > +y_m)$ não recebem contribuição de parte alguma da superfície refletora.

4.1 Utilização do modelo de isolinhas com erros ópticos

4.1.1 Desalinhamento do eixo da parábola

Como verificado no item 2.1.4 desta tese, os desvios ópticos são classificados em determinísticos e estocásticos. Dentre os erros determinísticos citados, existe o

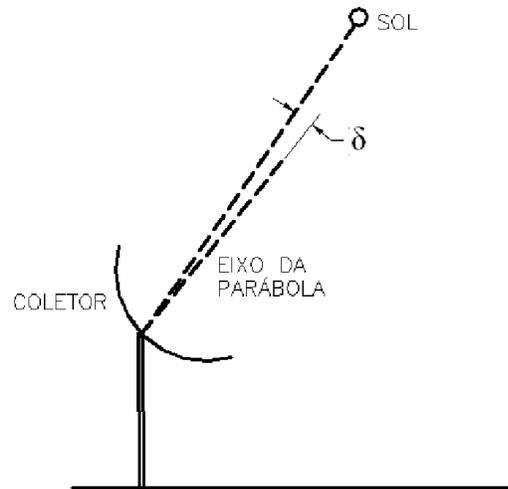
desalinhamento angular entre o eixo da parábola e o vetor solar, e o deslocamento do absorvedor no sentido vertical ou horizontal do plano transversal.

O modelo de isolinhas permite o desenvolvimento de uma solução para representar o efeito desses erros determinísticos na formação da imagem no absorvedor de um concentrador solar.

Inicialmente e conforme analisado por Evans (1977) e por Pedrosa Filho (2010), o desalinhamento do eixo da parábola em relação ao vetor solar provoca o deslocamento e consequente dispersão da distribuição de energia no absorvedor plano localizado na região focal de uma parábola.

Para que seja possível a simulação desse efeito, foi definido um novo ângulo (δ) (Figura 37) como sendo o ângulo entre o eixo da parábola e o vetor solar.

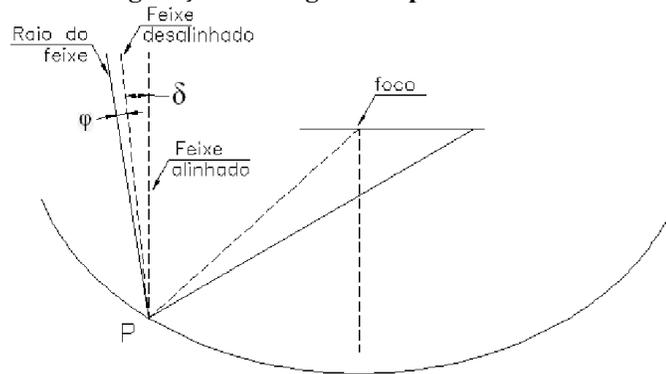
Figura 37 - Parábola com desalinhamento em relação ao vetor solar.



Considerando-se um ângulo de desalinhamento (δ) e a Figura 37, pode-se observar que os raios que compõem a distribuição de brilho solar terão seus ângulos alterados, quando comparados com a situação de eixo alinhado.

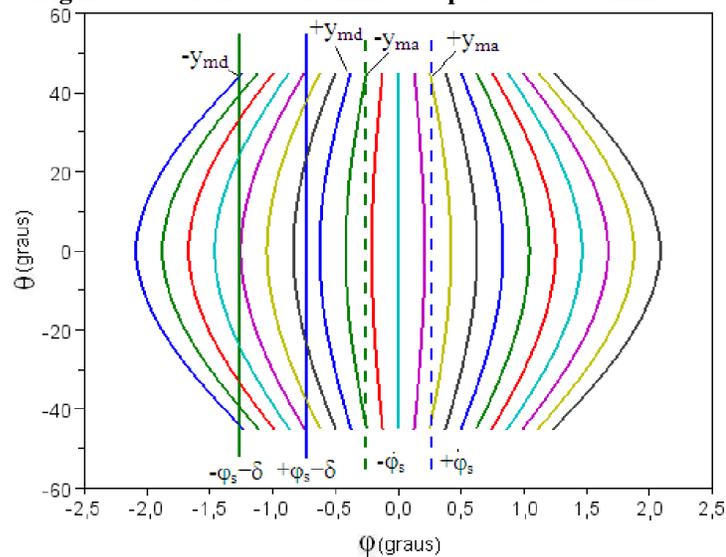
Considerando-se positivo um desalinhamento para a direita e negativo para a esquerda do eixo da parábola, o deslocamento mostrado na Figura 37 fará que os raios do feixe solar incidente na abertura sejam identificados pelo ângulo ($\varphi + \delta$) e os simétricos como ($-\varphi + \delta$), com relação aos raios refletidos quando alinhados (Figura 38).

Figura 38 - Configuração dos ângulos da parábola com desalinhamento.



Portanto, para que seja possível analisar o efeito de um desalinhamento sobre a formação da imagem, faz-se necessário definir uma nova faixa de ângulos para o feixe solar. Considerando-se o alinhamento, a faixa seria $(-\varphi_s$ até $+\varphi_s)$ para um desalinhamento (δ) negativo, a nova faixa será de $(-\varphi_s-\delta)$ até $(+\varphi_s-\delta)$. Esse efeito pode ser visualizado na Figura 39.

Figura 39 - Gráfico de isolinhas da parábola desalinhada.

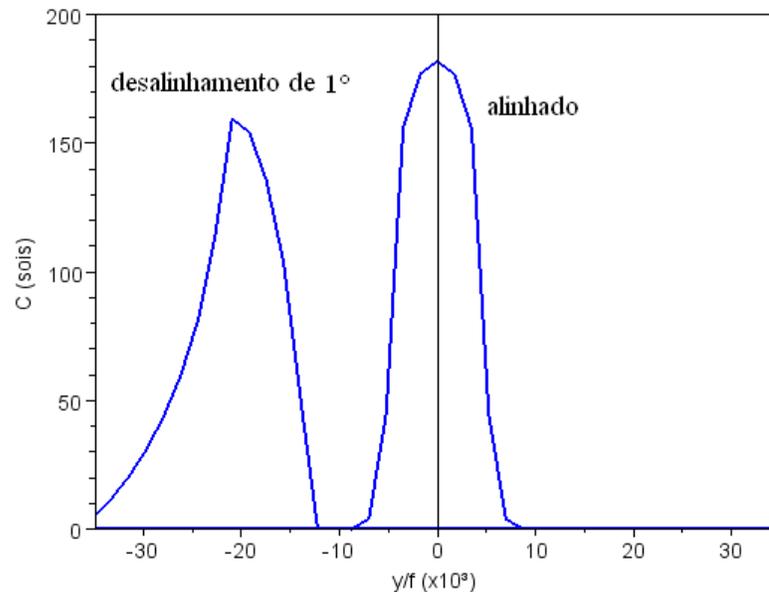


As linhas verticais tracejadas da Figura 39 representam a faixa $(-\varphi_s)$ até $(+\varphi_s)$ que ocorre quando o eixo da parábola está alinhado com o vetor solar. Considerando-se um desalinhamento positivo (δ), a faixa a ser considerada será de $(-\varphi_s+\delta)$ até $(+\varphi_s+\delta)$.

As isolinhas mostram a parábola completa, porém, para o desalinhamento de 1 grau, a região iluminada foi deslocada de sua posição original desde a posição $-0,0076$ ($-y_{ma}$) até $0,0076$ ($+y_{ma}$) para a região desde a posição $-0,0358$ ($-y_{md}$) até $-0,020$ ($+y_{md}$).

O tamanho original absorvedor (0,015 m) teve que ser aumentado para (0,071 m), ou seja, 4,6 vezes o tamanho inicial, para que seja possível visualizar a distribuição de energia no mesmo. Nesta, observa-se o deslocamento da faixa para a esquerda, o que significa que apenas aqueles pontos y do absorvedor (entre $-y_{md}$ e $+y_{md}$) os quais estão dentro da nova faixa é que serão atingidos pelos raios do feixe solar.

Figura 40 - Distribuição de energia sobre o absorvedor na situação alinhada e com 1° de desalinhamento.

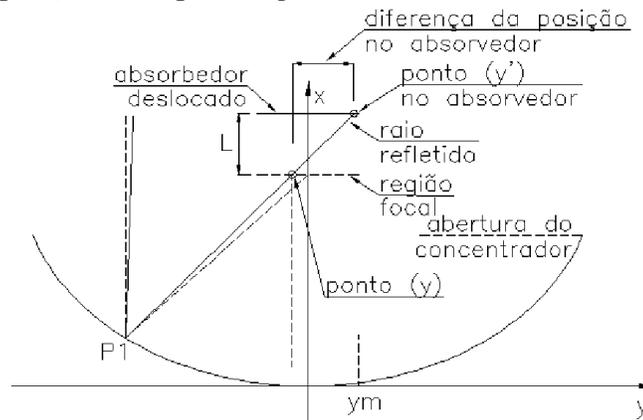


A Figura 40 apresenta o resultado da integração ponto a ponto, considerando-se a parábola alinhada e com desalinhamento de 1 (um) grau. Observa-se como previsto o deslocamento da imagem, a diminuição da concentração e uma maior dispersão da mesma ao longo do absorvedor.

4.1.2 Deslocamento vertical do absorvedor

O deslocamento do absorvedor em relação ao foco efetivo do concentrador (outro exemplo de desvio óptico determinístico) consiste no posicionamento do absorvedor fora da região focal (Figura 41).

Figura 41 - Configuração dos ângulos da parábola mediante um deslocamento do absorvedor.



A Figura 41 mostra um deslocamento (L) do absorvedor no sentido do eixo (x). A posição (y') atingida pelo raio, no absorvedor deslocado, é diferente do ponto (y) que este alcançaria se o absorvedor estivesse centralizado na região focal. Evans (1977) determinou essa diferença como sendo $L \cdot \tan(\theta - \varphi)$, onde (θ) se refere ao local de incidência de um raio na superfície refletora e (φ) está relacionado à posição do raio dentro do cone solar.

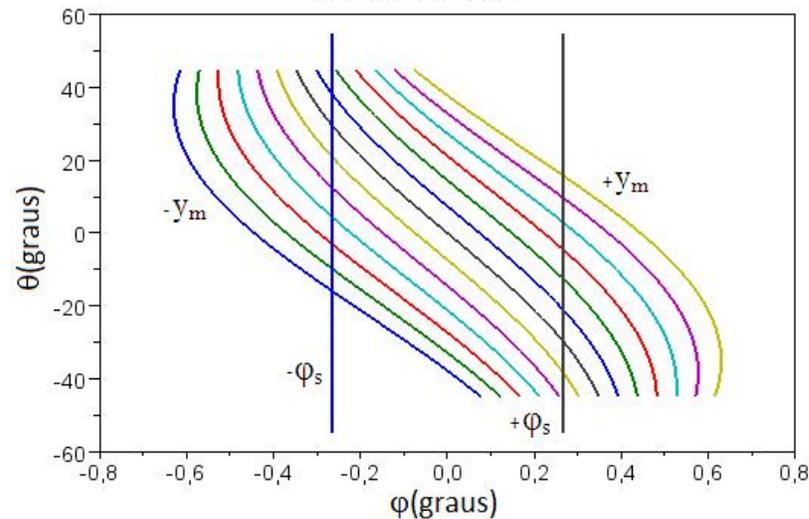
Levando-se em conta a relação geométrica apresentada na Eq. 46, com a consideração de um deslocamento (L) do absorvedor na direção do eixo (x), a Eq. 58 apresenta a nova relação entre os ângulos (θ), (φ) e a posição (y) no absorvedor.

$$\tan(\varphi) = \frac{y - L \tan(\theta)}{|y \cdot \tan(\theta)| + r \cdot \sec(\theta) - L \tan^2(\theta)} \quad (58)$$

No gráfico de isolinhas correspondente a uma parábola com distância focal de 1m e ângulo de borda de 45° , com o absorvedor corretamente posicionado, as curvas de (θ (φ , y)) comportam-se de maneira simétrica em relação ao centro do feixe e ao eixo da parábola (Figura 29).

Considerando-se a mesma parábola, simulou-se um deslocamento do absorvedor no sentido do eixo (x) (vertical) de 0,01 m (1% da distância focal) (Figura 42).

Figura 42 - Gráfico das isolinhas ($\theta - \varphi$) para uma parábola com absorvedor deslocado de 1% da distância focal.



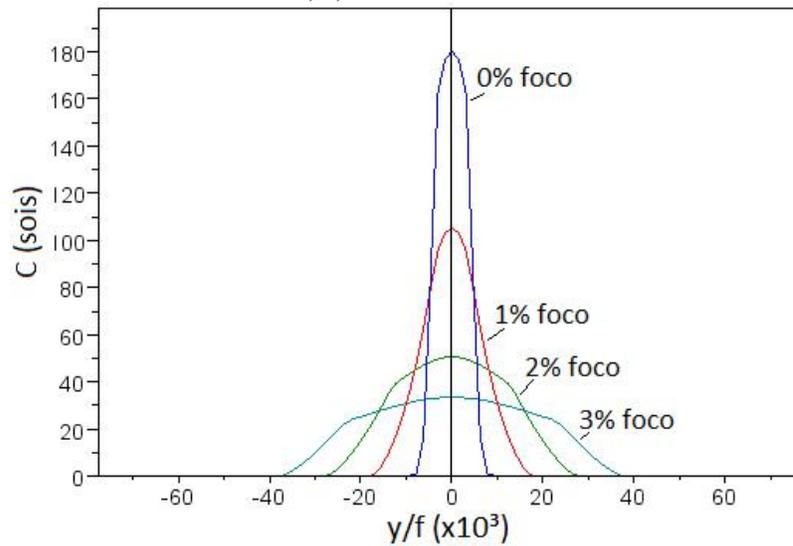
O gráfico apresentado na Figura 42 mostra que a simetria da função ($\theta(\varphi, y, L)$) foi significativamente modificada em relação à simetria do diagrama da Figura 29. A mudança é produto de um deslocamento do absorvedor de 1% da distância focal, afastando-se da superfície da parábola (+ x).

Esse deslocamento torna a isolinha ($y = 0$) inclinada (curva preta do gráfico da Figura 42), podendo receber a contribuição de raios entre ($-\varphi_s$ e φ_s), enquanto, na Figura 29, a isolinha ($y = 0$) (curva preta) é vertical e recebe só a contribuição de raios ($\varphi = 0$).

Por outro lado, enquanto no caso da Figura 29 todas as isolinhas, salvo ($y = 0$), são iluminadas por raios com ângulo (φ) maiores ou menores que zero, o afastamento (L) provoca a iluminação com raios (φ) tanto maiores quanto menores que zero. Essa modificação se traduz em um aumento do intervalo de raios (φ) que incidem num determinado local (y) e numa diminuição da região do concentrador (ângulos θ) que emite raios em direção a esse local.

Os gráficos da Figura 43 apresentam o comportamento da distribuição de energia com o deslocamento do absorvedor no sentido do eixo (x) (vertical, afastando-se do foco), para vários valores de deslocamento do absorvedor. O ângulo de borda do concentrador é de 45° e a distância focal de 1m.

Figura 43 - Distribuição de energia no absorvedor de uma parábola com deslocamento no sentido $x=0, 1, 2$ e 3% da distância focal.



A Figura 43 apresenta o efeito desse deslocamento (sentido x), quando os desvios ópticos estocásticos não são considerados, sendo utilizado apenas o tamanho do cone solar original ($\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{Sol}} = 4,65$ mrad). O aumento do deslocamento do absorvedor no sentido (x) provoca dispersão da energia, e a distribuição dela no absorvedor torna-se mais uniforme, como indicado pela curva da distribuição de energia quando o absorvedor está deslocado 3% da distância focal. Quanto maior for o deslocamento do absorvedor no sentido do eixo (x), maior será o espalhamento da energia sobre o absorvedor. Os valores encontrados na Figura 43 concordam com os apresentados por Evans (1977).

A diminuição da concentração significa que o concentrador opera com uma menor eficiência óptica, na prática, as consequências desta diminuição são: a redução da temperatura do fluido térmico em sistemas heliotérmicos e o decréscimo da corrente fotogerada em sistemas fotovoltaicos.

4.1.3 Erros estocásticos

A utilização do modelo de isolinhas com erros estocásticos foi desenvolvida, baseando-se na Eq. 17 (BENDT *et al.*, 1979), que permite determinar a forma efetiva do brilho do Sol, 'visto' pelo absorvedor de um concentrador, quando submetido a desvios ópticos estocásticos. A expressão proposta (Eq. 59) é uma convolução entre a distribuição de probabilidade dos desvios, $E(\varphi - \varphi_{\text{in}})$ e o brilho do Sol, $B(\varphi_{\text{in}})$. O ângulo (φ_{in}) se refere ao

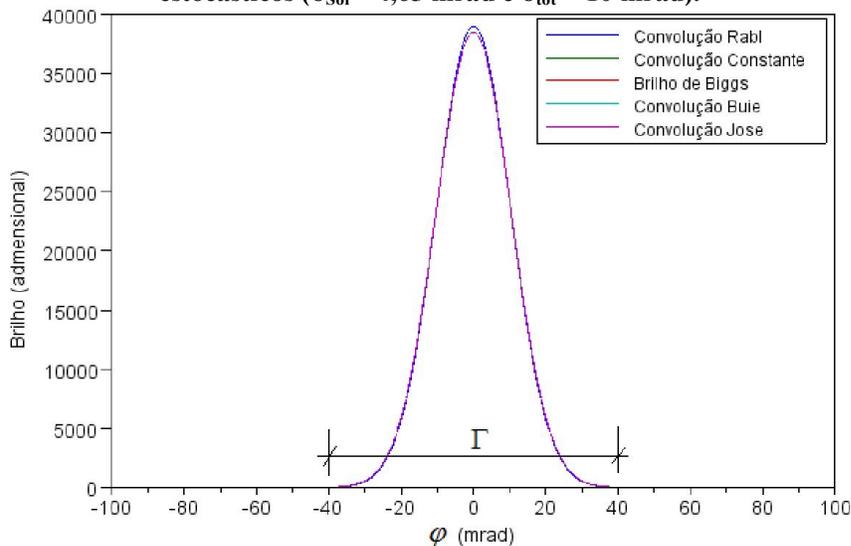
ângulo de incidência na superfície do concentrador, (φ) é o ângulo de reflexão na mesma superfície.

$$B_{eff}(\varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} E(\varphi - \varphi_{in}) \cdot B(\varphi_{in}) \cdot d\varphi_{in} \quad (59)$$

A distribuição de probabilidade dos desvios (na maioria dos casos, gaussiana) utiliza a letra (σ) que alude ao desvio padrão da densidade de probabilidade. A distribuição mede a densidade de probabilidade de encontrar um raio que se reflete com ângulo (φ) na superfície concentradora.

Como o modelo de isolinhas permite a utilização de qualquer distribuição de brilho, foi efetuada a convolução entre diferentes distribuições de brilho $B(\varphi_{in})$, citadas no item 2.1.2 desta tese, e a distribuição de probabilidade gaussiana $E(\varphi)$ com média nula e desvio padrão igual a (σ_{tot}) (definido pela Eq. 17). Os resultados são apresentados na Figura 44.

Figura 44 - Distribuição de brilho, para vários modelos de Sol, considerando os erros ópticos estocásticos ($\sigma_{sol} = 4,65$ mrad e $\sigma_{tot} = 10$ mrad).



A Figura 44 apresenta o resultado da convolução das funções de brilho: Rabl (RABL *et al.*, 1982), Buie (BUIE *et al.*, 2003), Jose (JOSE, 1957) e distribuição de brilho constante, considerando $\sigma_{tot} = 10$ mrad. Na prática e devido à tecnologia empregada na construção das superfícies refletoras, os coletores parabólicos operam com o valor do desvio óptico menor, da ordem de 8 mrad (KHANNA *et. al.*, 2013).

Esses resultados estão comparados com a convolução obtida por Vittitoe e Biggs (1981), indicada no gráfico por “Brilho de Biggs”. Observa-se que todas as funções de brilho convoluídas concordam com o resultado analítico de Vittitoe e Biggs (1981). As simulações realizadas mostram que, para o valor (σ_{tot}) utilizado (10 mrad), não há diferença entre as

distribuições de brilho convoluídas, já que a função desvio mascara totalmente os detalhes da função original ($\sigma_{\text{sol}} = 4,65$ mrad). Devido a esse resultado, nas próximas simulações será utilizada apenas a distribuição descrita por Rabl *et al.* (1982) convoluída com uma dispersão de 10 mrad. Observa-se também que o fenômeno de dispersão estende o intervalo angular da distribuição, originalmente de aproximadamente (4,65 mrad), até (± 40 mrad).

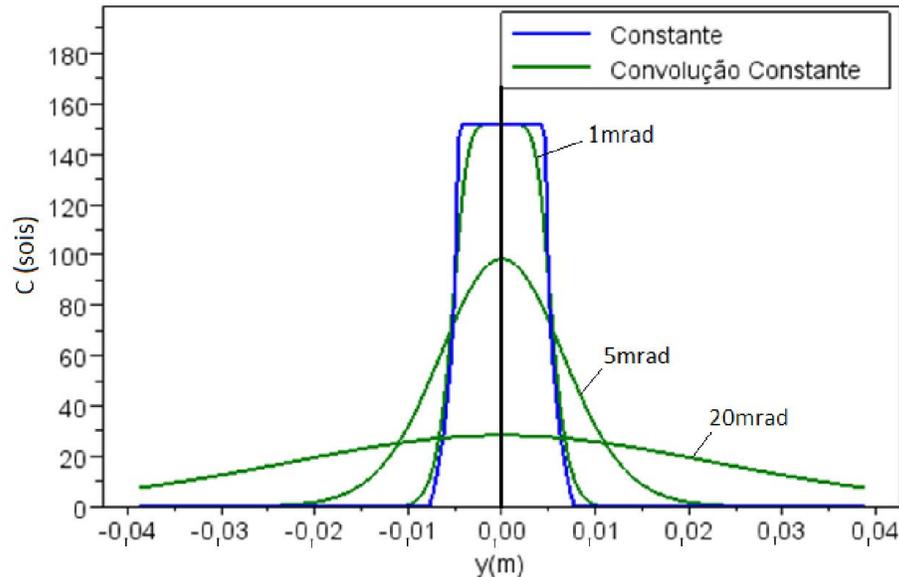
Considerando (Γ), indicado na Figura 44, como o intervalo angular do brilho efetivo, o parâmetro ($\Gamma = 2 \times 3 \cdot \sigma_{\text{tot}}$) representa a dispersão angular do cone que contém, teoricamente, 99,73%, da energia total, e a distribuição de erros ópticos estocásticos como gaussiana, é possível determinar a Eq. 60, derivada de Duffie e Beckman (1991). Essa equação relaciona o intervalo angular visto pelo absorvedor ($3 \cdot \sigma_{\text{tot}}$) com o tamanho da imagem formada nele. Na Eq. 60, (a) é a metade da abertura total da parábola e (θ_r) o ângulo de borda do concentrador.

$$y_m = \frac{a \cdot \text{sen}(3 \cdot \sigma_{\text{tot}})}{\text{sen}(\theta_r) \cdot \cos(\theta_r + 3 \cdot \sigma_{\text{tot}})} \quad (60)$$

Com a Eq. 60, é possível determinar um tamanho de absorvedor que intercepte aproximadamente 100% da energia que chega à abertura do concentrador em função da qualidade e geometria da superfície refletora. Resultados de simulações realizadas mostraram que o percentual médio de energia interceptada é de 99,97%, quando se define o tamanho do absorvedor com esta equação. O desvio padrão dos resultados das simulações foi de 0,02% em relação ao percentual médio.

A Figura 45 apresenta os resultados da utilização desta metodologia na obtenção da forma da distribuição de energia sobre o absorvedor de um concentrador parabólico linear na condição sem erros ópticos e com desvios ópticos estocásticos.

Figura 45 - Distribuição de energia sobre o absorvedor, sem erros ópticos e considerando desvios de 1, 5 e 20 mrad.



Observa-se, na Figura 45, o efeito provocado na distribuição de energia incidente sobre o absorvedor de uma calha parabólica quando não são considerados os erros ópticos e na situação oposta, quando eles estão presentes no sistema óptico. Para a elaboração dos gráficos da Figura 45, utilizou-se o ângulo de borda de 45° , distância focal de 1m, distribuição constante de brilho do cone solar.

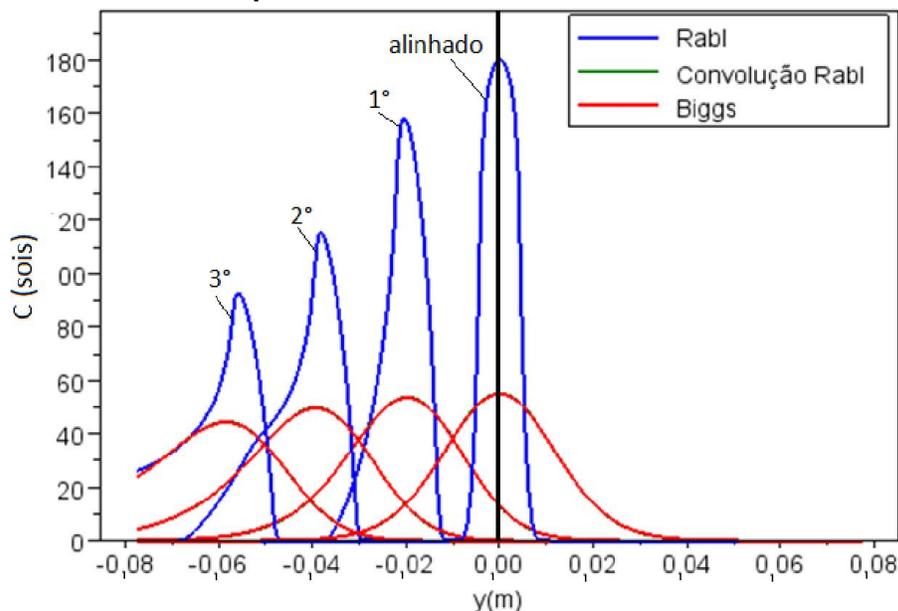
Como verificado por diversos autores (EVANS, 1977; RABL, 1985; PEDROSA FILHO, 2010), a ocorrência dos desvios ópticos em um sistema concentrador solar provoca uma dispersão da energia na região focal: quanto maiores são os desvios, maior é o espalhamento.

Outra constatação que pode ser feita, a partir da Figura 45, é que, para pequenos desvios, como 1mrad, a forma do gráfico da distribuição de energia se assemelha à situação de quando não há erros ópticos. Nas simulações efetuadas, observou-se essa característica até um valor de desvio de aproximadamente 2 mrad.

4.1.4 Ocorrência simultânea de desalinhamentos e erros estocásticos

Considerando-se a ocorrência simultânea de desvios estocásticos e de desalinhamento do rastreador, foram elaborados os gráficos da Figura 46 como resultado da aplicação desta metodologia.

Figura 46 - Distribuição de energia sobre o absorvedor considerando a ocorrência simultânea de desvios ópticos determinísticos e estocásticos.

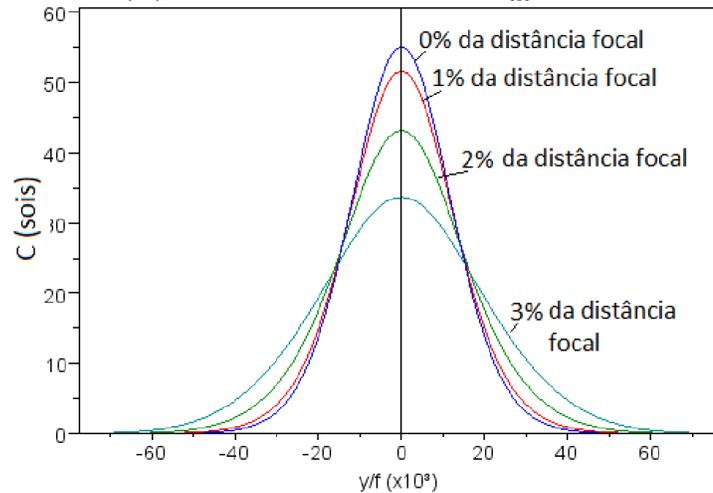


As curvas em azul apresentadas na Figura 46 representam apenas o efeito do desalinhamento angular entre o sistema de rastreamento e o vetor solar, para 1, 2 e 3 graus, e para a situação de alinhamento. As curvas em vermelho e verde, que estão sobrepostas, representam a dispersão da distribuição de energia sobre a região absorvedora, quando o concentrador solar está submetido a um desvio óptico de 10mrad e, simultaneamente a esse desvio, o eixo do concentrador está desalinhado em relação ao vetor solar em 1, 2 e 3 graus. O ângulo de borda da parábola considerado foi de 45° e a distância focal de 1m.

Nota-se que, de acordo com os gráficos da Figura 46, a ocorrência simultânea desses erros citados degrada acentuadamente a coleção de energia por um absorvedor situado na região focal do concentrador solar, pois, além da dispersão da energia, o pacote de energia ainda é deslocado do foco, causando uma redução mais acentuada do fator de interceptação.

Os resultados apresentados na Figura 46 consideram a ocorrência simultânea dos desvios ópticos estocásticos e do desalinhamento angular do rastreador solar. Levando-se em conta a ocorrência dos desvios ópticos estocásticos e do deslocamento do absorvedor no sentido vertical, foram elaborados os gráficos da Figura 47.

Figura 47 - Distribuição de energia no absorvedor de uma parábola com deslocamento no sentido $x=0, 1, 2$ e 3% da distância focal e $\sigma_{\text{tot}} = 10$ mrad.

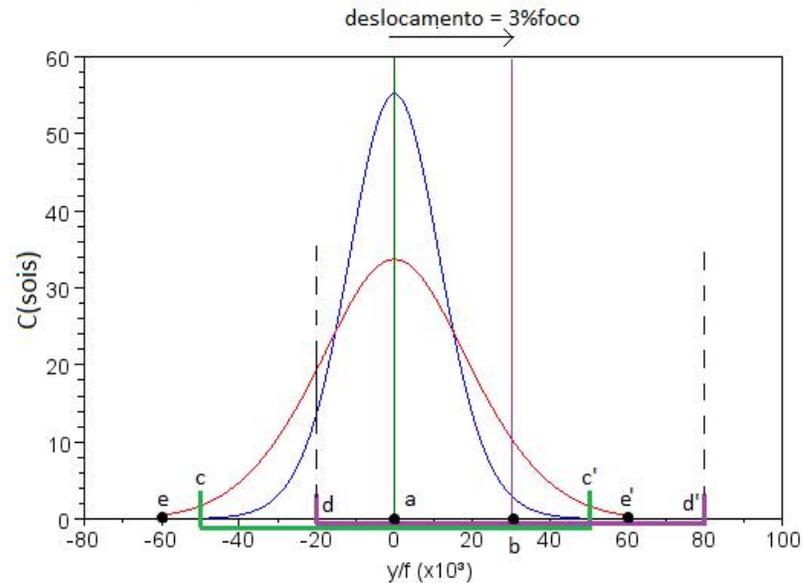


Quando a presença dos desvios ópticos estocásticos ($\sigma_{\text{tot}} = 10$ mrad) é considerada em conjunto com o deslocamento do absorvedor no sentido vertical (Figura 47), a imagem do Sol passa a ter um diâmetro angular maior (10 mrad) quando comparado com o cone solar (4,65 mrad), fato observado anteriormente. Como consequência, o espalhamento de energia sobre o absorvedor é intensificado, prevalecendo a influência desses desvios ($\sigma_{\text{tot}} = 10$ mrad) em relação ao deslocamento do absorvedor no sentido do eixo “x”. Por exemplo, na Figura 43, a distribuição que se afasta 3% da distância focal estende-se entre (y) igual a $-40.f.10^{-3}$ e $+40.f.10^{-3}$. Já na Figura 47, o afastamento de 3% da distância focal (f) abarca a região compreendida entre $(-60.f.10^{-3}$ a $+60.f.10^{-3})$.

Observa-se também que ocorre uma redução significativa da concentração local em todo o absorvedor devido à dispersão da energia por uma faixa angular maior (cone solar efetivo).

Outra possibilidade de deslocamento do absorvedor em relação ao foco efetivo do concentrador é no sentido horizontal da Figura 41. Dessa forma, considerando-se o deslocamento no sentido vertical e o deslocamento no sentido horizontal, o modelo permite a simulação simultânea dos mesmos em conjunto com os desvios ópticos estocásticos. A Figura 48 apresenta a distribuição de energia no absorvedor de um concentrador em que são considerados os desvios simultâneos, situação próxima do que acontece na realidade.

Figura 48 - Distribuição de energia no absorvedor de uma parábola considerando a ocorrência de todos os desvios ópticos (x e $y = 0$ e 3 % da distância focal e $\sigma_{\text{tot}} = 10$ mrad).



O gráfico apresentado na Figura 48 mostra duas distribuições de energia no absorvedor. A curva em azul apresenta a distribuição de energia que considera apenas a ocorrência de desvios ópticos estocásticos ($\sigma_{\text{tot}} = 10$ mrad), o ponto (a) indica o centro do absorvedor que coincide com o ponto focal da parábola. A curva vermelha mostra a forma da distribuição de energia no absorvedor de uma parábola, considerando-se a ocorrência de desvios ópticos estocásticos com ($\sigma_{\text{tot}} = 10$ mrad) simultaneamente à ocorrência do deslocamento do absorvedor nos sentidos horizontal e vertical ao mesmo tempo. O ponto (b) do gráfico da Figura 48 representa o centro do absorvedor deslocado no sentido do eixo horizontal.

Em ambas as situações, um tamanho de absorvedor de 0,1 m foi definido e está indicado pelos segmentos entre os pontos (c) e (c') e entre os segmentos (d) e (d'). Estes últimos indicam o deslocamento do absorvedor no sentido positivo do eixo horizontal.

Nota-se que a distribuição de energia em azul está totalmente contida no absorvedor definido (c - c'), o qual intercepta 100% desta energia. Devido à combinação do deslocamento do absorvedor no sentido dos dois eixos, a distribuição de energia em vermelho não é interceptada totalmente pelo absorvedor pontos (d) e (d'). O trecho da curva em vermelho entre os pontos (c) e (d) não incidirá sobre o absorvedor deslocado. No ponto (d'), não há incidência de radiação. Neste lado do absorvedor, existirá uma região que não será iluminada, trecho entre o ponto (e') e o ponto (d').

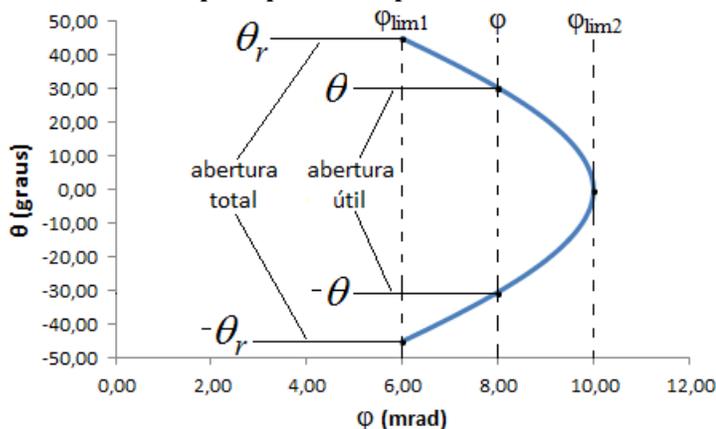
Observa-se, na curva vermelha da Figura 48, que três efeitos ocorrem ao mesmo tempo: 1) aumento do tamanho da imagem (maior dispersão) com o deslocamento no sentido do eixo vertical e perda de energia, devido à incidência de uma parte desta fora do absorvedor, trechos da curva vermelha entre os pontos (e) e (c) e entre os pontos (e') e (c'); 2) diminuição da concentração local, provocado pelo deslocamento no sentido do eixo (x); e 3) perda de uma parcela maior de energia devido ao deslocamento do absorvedor no sentido do eixo (y), pois o trecho da curva vermelha entre os pontos (e) e (d) não incidirá sobre o absorvedor. Na prática, esses três efeitos farão o absorvedor interceptar menos energia, pois uma parte é perdida por incidir fora de seus limites.

4.2 Função de aceitação angular e fator de interceptação

Como verificado no capítulo 2 desta tese, Rabl (1985) define a função de aceitação angular $F(\varphi)$ como a fração de raios paralelos incidentes na abertura do concentrador com ângulo (φ) que chegam ao absorvedor.

Utilizando-se o gráfico das isolinhas do modelo, mostrado na Figura 29, é possível obter a função de aceitação angular do concentrador. Para tal, imagina-se agora a incidência de feixes de raios paralelos de igual intensidade. A pergunta que se formula é a seguinte: para um dado ângulo (φ), qual é a fração de raios que atinge o absorvedor? O gráfico da Figura 49 apresenta a isolinha que representa o ponto (y) limite do absorvedor (y_m , na Figura 31). O eixo horizontal representa o valor do ângulo de incidência (φ) e o eixo vertical representa o ângulo (θ) da superfície refletora onde o feixe incide.

Figura 49 - Isolinha que representa o ponto limite do absorvedor (y_m).



No gráfico da Figura 49, estão indicados três valores de ângulo de incidência e a isolinha correspondente à $(+y_m)$ (curva preta do lado direito da Figura 29).

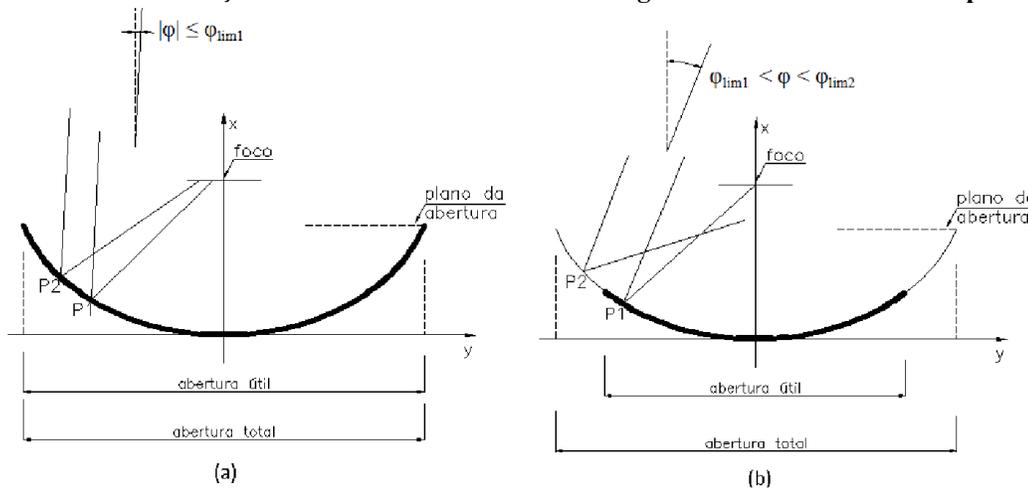
Pode-se identificar o ângulo de incidência (φ_{lim1}) como sendo o ângulo até o qual, para todo (θ) (Figura 49), todos os raios que incidem na abertura do concentrador atingirão algum ponto do absorvedor (isolinha) ($|\varphi| \leq \varphi_{lim1} \rightarrow F(\varphi) = 1$).

(φ_{lim2}) é um valor de ângulo de incidência tal que, para raios que incidam com ângulo maior que (φ_{lim2}), nenhum ponto da superfície refletora do concentrador, definida pelos ângulos (θ), fará que os raios atinjam algum ponto do absorvedor ($|\varphi| > \varphi_{lim2} \rightarrow F(\varphi) = 0$). Esses dois valores particulares dependem da geometria do concentrador e de seu absorvedor.

Para raios que incidam com ângulos entre (φ_{lim1}) e (φ_{lim2}), apenas uma parcela destes será refletida para o absorvedor. Essa parcela está representada, na Figura 49, pela “abertura útil”, ou seja, a região da superfície refletora que contribuirá para a iluminação do absorvedor. A fração dos raios que será aceita é igual à relação entre “abertura útil” e “abertura total”.

A Figura 50 apresenta duas das três condições possíveis de aceitação de um feixe de raios paralelos.

Figura 50 - Determinação da área útil de acordo com o ângulo de incidência dos raios paralelos.



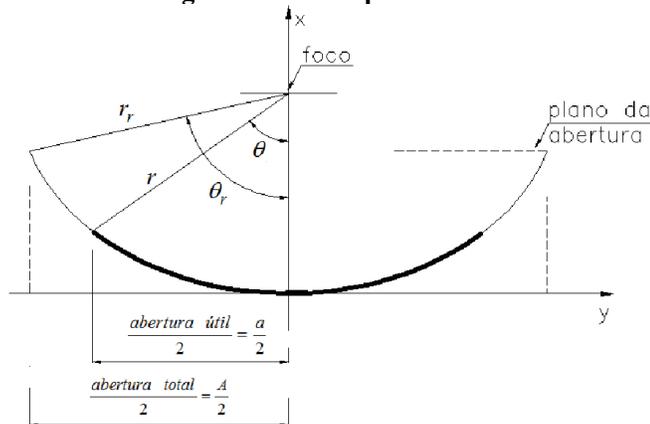
Na Figura 50a, os raios incidem na abertura com ângulo $|\varphi| \leq \varphi_{lim1}$. Nessa condição, todos eles são refletidos para o absorvedor. Toda a extensão da superfície refletora é utilizada, ou seja, a abertura útil coincide com a abertura total ($F(\varphi) = 1$).

Na Figura 50b, os raios incidem com ângulo entre φ_{lim1} e φ_{lim2} ($\varphi_{lim1} < \varphi < \varphi_{lim2}$). Nessa situação, apenas uma parcela dos raios é refletida e atinge o absorvedor. Essa parcela está relacionada à região destacada em negrito na superfície da parábola da Figura 50b. Apenas os raios refletidos por essa região são aceitos. Os raios que atingem a região não

destacada são direcionados para fora do coletor parabólico. Assim, a proporção de raios aceitos está relacionada à proporção da abertura útil em relação à abertura total.

Já para a situação na qual os raios adentram o coletor parabólico com ângulo $|\varphi| \geq \varphi_{lim2}$ (não apresentada na Figura 50), nenhum raio será refletido e atingirá o absorvedor. Não existe abertura útil, portanto ($F(\varphi) = 0$).

Figura 51 - Determinação da abertura útil e da abertura total em função dos parâmetros geométricos da parábola.



A Figura 51 mostra, com maiores detalhes, a relação entre as aberturas total e útil, e os parâmetros geométricos da parábola. O ângulo (θ), indicado, está relacionado com a faixa de ângulos entre $(-\theta$ e $\theta)$ mostrada na Figura 49. A faixa $(-\theta, \theta)$ determina a região da superfície da parábola (destacada em negrito na Figura 51), que reflete os raios para o absorvedor. Na Figura 51, o símbolo (r) representa a distância entre o ponto focal e o ponto limite da superfície da parábola relacionada com o ângulo (θ); (r_r) é o raio de borda e (θ_r) o ângulo de borda da parábola.

Observa-se que o tamanho da abertura útil e da abertura total pode ser escrito como:

$$\frac{abertura\ útil}{2} = \frac{a}{2} = r \cdot \text{sen}(\theta) \quad (61)$$

$$\frac{abertura\ total}{2} = \frac{A}{2} = r_r \cdot \text{sen}(\theta_r) \quad (62)$$

Como a relação entre as duas aberturas (a/A) determina a proporção dos raios que atinge o absorvedor e conhecendo-se a função ($\theta(\varphi, y)$), é possível escrever a função de aceitação angular apresentada na Eq. 63.

$$F(\varphi) = \begin{cases} 1 & \text{se } \varphi \leq \varphi_{\text{lim1}} \\ \frac{r \cdot \text{sen}(\theta(\varphi, y_m))}{r_r \cdot \text{sen}(\theta_r)} & \text{se } \varphi_{\text{lim1}} < \varphi < \varphi_{\text{lim2}} \\ 0 & \text{se } \varphi \geq \varphi_{\text{lim2}} \end{cases} \quad (63)$$

Na Eq. 63, (y_m) é a metade do tamanho do absorvedor, (φ_{lim1}) é o ângulo de incidência de um raio solar que atinge a extremidade do absorvedor (y_m) na borda do concentrador (θ_r) e (φ_{lim2}) o ângulo de incidência de um raio que atingirá a base da superfície refletora ($\theta = 0$) e é refletido para a extremidade do absorvedor (y_m).

Portanto, o ângulo (φ_{lim1}) é determinado pela seguinte equação (Eq. 64).

$$\tan(\varphi_{\text{lim1}}) = \frac{y_m}{|y_m \cdot \tan(\theta_r)| + r_r \cdot \sec(\theta_r)} \quad (64)$$

O ângulo (φ_{lim2}) é determinado pela Eq. 65, obtida substituindo-se na Eq. 46 com ($y = y_m$), ($\theta = 0$) e (f), a distância focal.

$$\tan(\varphi_{\text{lim2}}) = \frac{y_m}{f} \quad (65)$$

Rabl (1985) apresenta uma forma aproximada da Eq. 64 (função de aceitação angular) e também dos ângulos limites (φ_{lim1}) e (φ_{lim2}). Utilizando-se a Eq. 64, é possível determinar, após manipulações algébricas, a Eq. 66.

$$\tan(\varphi_{\text{lim1}}) = \frac{y_m}{|y_m \cdot \tan(\theta_r)| + r_r \cdot \sec(\theta_r)} = \frac{y_m \cdot \cos(\theta_r) \cdot \text{sen}(\theta_r)}{y_m \cdot \text{sen}^2(\theta_r) + A} \quad (66)$$

Considerando que

1) a aproximação $y_m \cdot \text{sen}^2(\theta_r) + A \approx A$ é válida para altas concentrações geométricas ($C > 10$, O`Gallagher (2008)) e

2) $\tan(\varphi_{\text{lim1}}) \approx \varphi_{\text{lim1}}$ é válida para pequenos valores do ângulo de incidência; Rabl (1985) apresenta a Eq. 67 como aproximação da equação exata.

$$\varphi_{\text{lim1}} = \frac{\cos(\theta_r) \cdot \text{sen}(\theta_r)}{C_{\text{geom}}} \quad (67)$$

A expressão que permite o cálculo de (φ_{lim2}) (Eq. 65) também permite, após manipulações algébricas, chegar à expressão indicada por Rabl (1985) (Eq. 68), que também considerou a aproximação $\tan(\varphi_{lim2}) \approx \varphi_{lim2}$, válida para pequenos valores do ângulo de incidência.

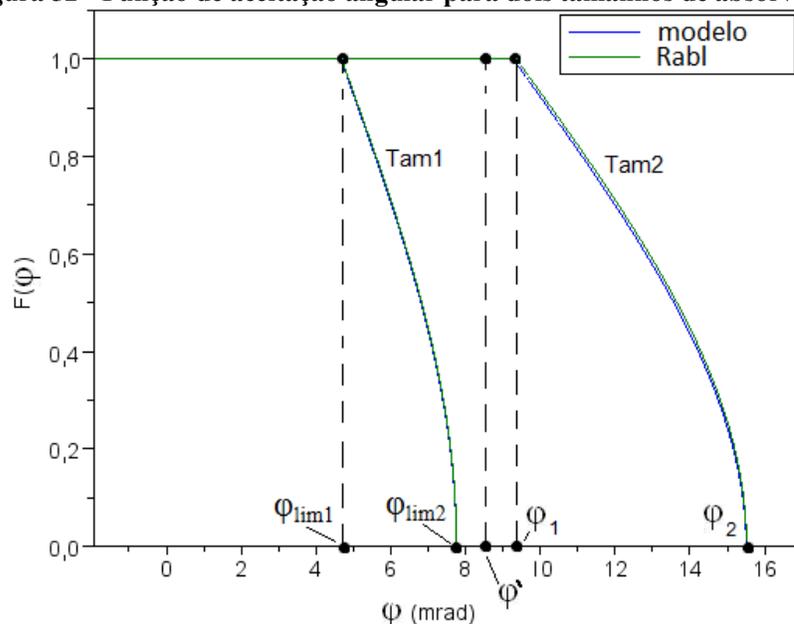
$$\tan(\varphi_{lim2}) = \frac{y_m}{f}, \text{ considerando } r_r = \frac{2.f}{1 + \cos(\theta_r)} \rightarrow \varphi_{lim2} \approx \frac{2}{C_{goem}} \tan\left(\frac{\theta_r}{2}\right) \quad (68)$$

As aproximações utilizadas por Rabl (1985) são válidas para o cálculo de $F(\varphi)$. Entretanto, como será visto na próxima sessão, essas aproximações podem dar origem a desvios importantes quando se trata de utilizar $F(\varphi)$ para calcular outras funções, como o fator de interceptação.

Baseado no desenvolvimento descrito, foram traçadas duas funções de aceitação angular obtidas por simulação para uma parábola com ângulo de borda de 45° e foco de 1m, para dois tamanhos de absorvedor diferentes (Figura 52).

No gráfico da Figura 52, a curva (Tam1) corresponde a um tamanho de absorvedor de 155,1 mm, definido de forma que o absorvedor intercepte 100% da distribuição de energia do cone solar, sem considerar desvios ópticos. (Tam2) refere-se a um absorvedor com tamanho duas vezes maior do que (Tam1) (310,2 mm). Para a curva (Tam1) apresentada no gráfico da Figura 52, são apresentados os valores de (φ_{lim1}) e (φ_{lim2}) que delimitam as condições da função de aceitação angular (Eq. 64 e Eq. 65). Para a curva (Tam2), (φ_1) e (φ_2) têm o mesmo significado, respectivamente. Observa-se que, para um valor de ângulo de incidência (φ') , indicado na Figura 52, 100% dos raios ($F(\varphi) = 1$) serão aceitos pelo concentrador com o tamanho do absorvedor (Tam2), porém, como consequência, a concentração geométrica deste será menor. Por outro lado, para o mesmo valor de (φ') ocorrerá aceitação nula ($F(\varphi') = 0$) pelo concentrador com o tamanho do absorvedor (Tam1) que tem maior valor de concentração geométrica.

Figura 52 - Função de aceitação angular para dois tamanhos de absorvedor.



Na Figura 52, está mostrada também a função de aceitação angular traçada a partir da função analítica publicada em Rabl (1985) (verde). A diferença entre os valores das duas funções de aceitação angular é da ordem de 0,1%, diferença que pode ser considerada desprezível. Verifica-se, portanto, uma boa concordância entre os resultados de Rabl (1985) e as funções obtidas com a Eq. 63.

A função de aceitação angular obtida pelo modelo não precisa ser deduzida para cada caso, pois surge a partir da função algorítmica apresentada neste trabalho ($\theta(\varphi, \gamma)$, Eq. 46) que, embora particular para cada tipo de concentrador e forma geométrica do absorvedor, uma vez obtida, permite obter $F(\varphi)$ rapidamente.

Como verificado no Capítulo 2 desta tese, o fator de interceptação (γ) é definido como sendo a fração de energia que incide nos limites da superfície do absorvedor em relação à energia total que atinge a região absorvedora, considerado infinitamente extenso na direção ($\pm y$) (DUFFIE; BECKMAN, 1991).

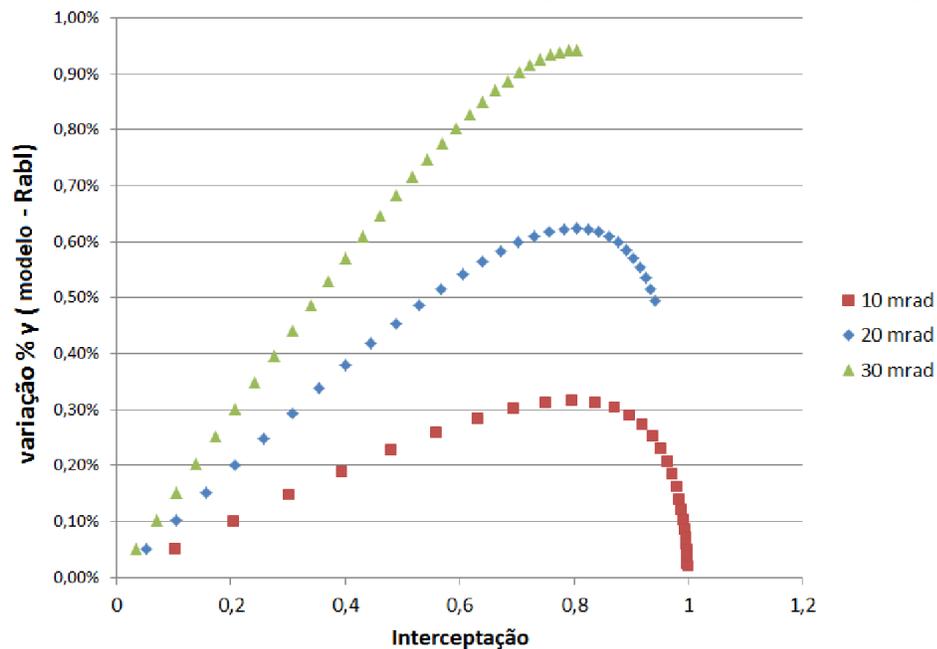
Segundo Rabl (1985), o fator de interceptação (γ) pode ser calculado como a energia que incide na abertura do concentrador ponderada com a função de aceitação angular em relação à energia total que incide na abertura (Eq. 69), $B(\varphi)$ é a radiação que incide na abertura do concentrador.

$$\gamma = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} B(\varphi)F(\varphi)d\varphi}{\int_{-\infty}^{\infty} B(\varphi)d\varphi} \quad (69)$$

Utilizando-se a Eq. 69 (Rabl, 1985) e a função de aceitação angular definida anteriormente pela Eq. 63, nota-se que o modelo permite determinar o fator de interceptação (γ), de maneira geral, bastando para isso que se conheça apenas a função ($\theta(\varphi, y)$) do concentrador.

O gráfico da Figura 53 apresenta o comportamento da diferença encontrada quando o fator de interceptação é calculado utilizando-se a função de aceitação angular apresentada por Rabl (1985) e a função calculada com este modelo.

Figura 53 - Diferença entre os valores do fator de interceptação calculado com a função de aceitação angular de Rabl (1985) e a deste modelo para vários valores de desvios ópticos.



As curvas do gráfico da Figura 53 mostram a diferença entre o valor do fator de interceptação calculado, empregando-se a função de aceitação angular (função analítica aproximada) publicada por Rabl (1985) e a função (analítica exata) calculada com Eq. 63. Eles diferem de um valor menor que 1% para um valor de desvio óptico de 30 mrad e menor que 0,4% para um valor de desvio óptico de 10 mrad, que é a faixa de valores práticos de desvio óptico utilizado.

Por outro lado, para valores elevados do fator (γ), as diferenças tendem a se anular. A ocorrência de erros maiores do que aqueles verificados no cálculo da função de aceitação angular deve-se ao fato de que o cálculo do fator de interceptação utiliza uma integração numérica a qual, de acordo com a natureza do argumento da integral, pode acrescentar erros.

Foi demonstrado que o modelo desenvolvido nesta tese permite a obtenção e simulação dos parâmetros operacionais de um concentrador solar. Será apresentada, a seguir, de forma simplificada, a aplicação do modelo a outras geometrias e configurações de concentradores solares, a saber: calha parabólica com absorvedor circular, Fresnel com absorvedor plano, Fresnel com absorvedor circular.

4.3 Aplicação do modelo com outras geometrias

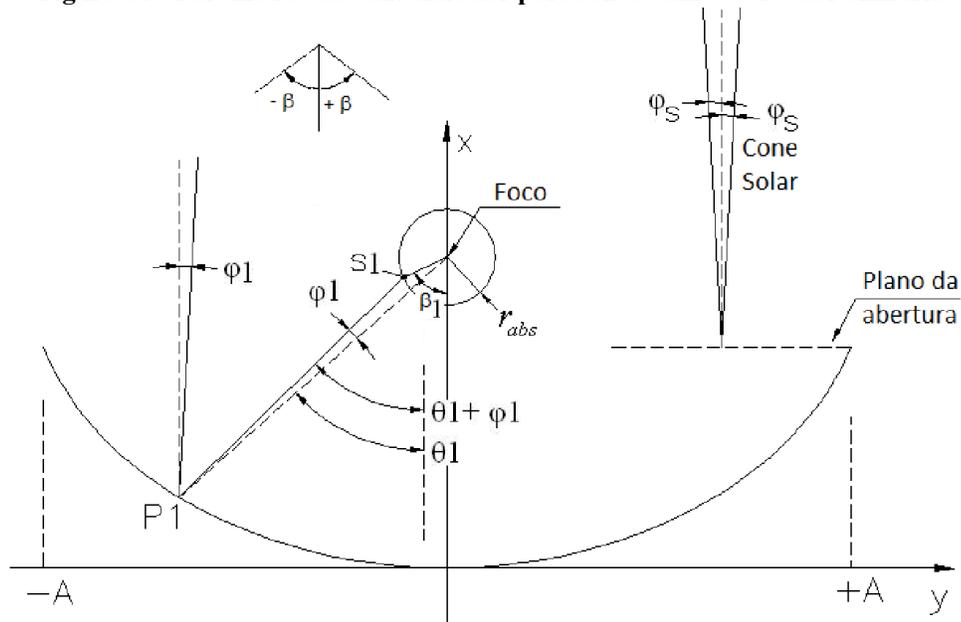
Como exemplo de aplicação dos conceitos utilizados para o desenvolvimento do modelo, serão apresentados exemplos aplicados a outras geometrias. Limitou-se aqui à obtenção do gráfico de isolinhas e da distribuição de energia no absorvedor, ficando as demais características como sugestões para futuros trabalhos.

4.3.1 Calha parabólica com absorvedor circular

As mesmas considerações feitas para o desenvolvimento do modelo para a calha parabólica com absorvedor plano foram utilizadas para a obtenção da distribuição de energia no absorvedor cilíndrico de um concentrador do tipo calha parabólica.

A Figura 54 apresenta os principais parâmetros desta geometria que são relevantes para a aplicação do modelo.

Figura 54 - Parâmetros do concentrador parabólico com absorvedor cilíndrico.



Segundo a Figura 54, um raio identificado por (φ_1) atinge a superfície refletora parabólica em um ponto (p_1) que, da mesma forma que na geometria anterior, corresponde a um ângulo (θ_1) . O absorvedor tem raio (r_{abs}) , o ângulo (β) indica a posição angular do ponto em sua superfície, sendo tomado como positivo no sentido anti-horário e negativo no sentido horário. O raio refletido atinge o absorvedor cilíndrico no ponto (s_1) , que corresponde à posição angular (β_1) .

Considerando-se os parâmetros indicados, é possível obter-se a função $\varphi = \varphi(\theta, \beta)$ (Eq. 70) na qual β é um parâmetro que permite obterem-se os pares (θ, φ) , os quais vão compor o gráfico das isolinhas desta geometria.

$$\tan(\varphi) = \frac{r_{abs} \sin(\theta - \beta)}{r - r_{abs} \cdot \cos(\theta - \beta)} \quad (70)$$

Onde:

φ é o ângulo que identifica um raio dentro do cone solar;

θ representa o ângulo definido entre o eixo do cone solar refletido e o eixo da parábola;

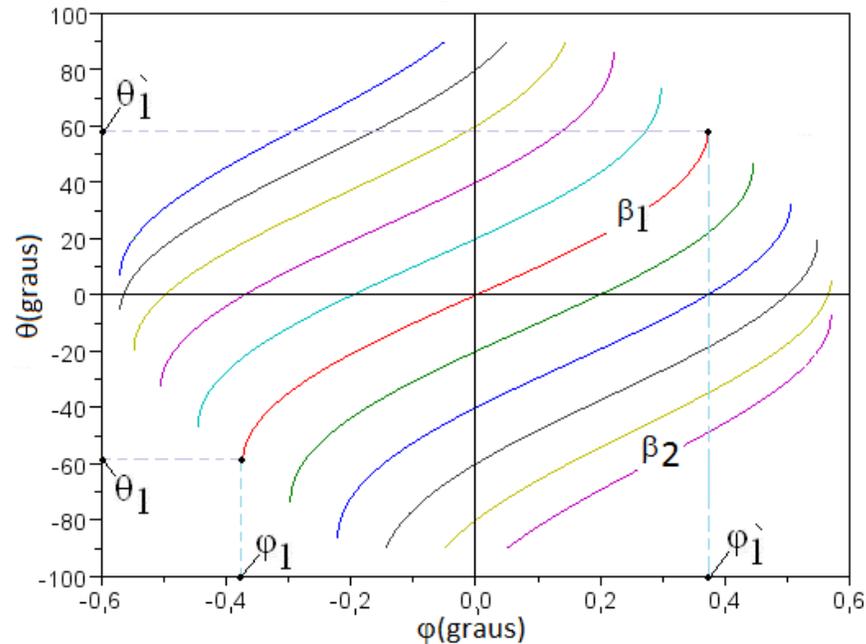
r_{abs} é o raio do absorvedor;

β representa a posição angular de um ponto no absorvedor;

r é a distância entre o foco da parábola e um ponto na superfície refletora atingido por um feixe específico.

O gráfico das isolinhas de um concentrador parabólico com absorvedor circular é apresentado na Figura 55. Para a obtenção desse gráfico, considerou-se que o raio do absorvedor é 0,01 m, a distância focal é de 1m, o ângulo de borda do concentrador é 90°.

Figura 55 - Gráfico de isolinhas concentrador parabólico com absorvedor cilíndrico.



Observa-se, na Figura 55, que, como cada isolinha representa um ponto na superfície do absorvedor, neste caso representado por sua posição angular, cada ponto é atingido por uma faixa angular do cone solar. O ponto (β_1) na Figura 55, que para a configuração da geometria apresentada corresponde a ($\beta = 0^\circ$), é atingido, de forma simétrica, por raios do cone solar entre (φ_1) e (φ_1'), recebendo contribuições dos pontos da superfície da parábola que estão entre (θ_1) e (θ_1').

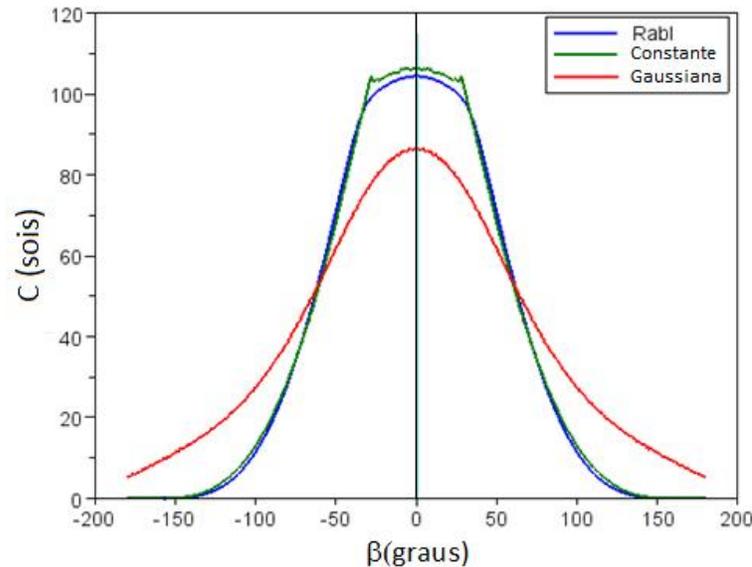
Conforme a posição angular se distancia do centro ($\beta = 0^\circ$) (β_2) na Figura 55, uma menor porção do cone solar é aproveitada. Além disso, verifica-se uma menor contribuição da superfície refletora para a iluminação de determinado ponto.

Para que seja possível contabilizar a energia incidente em cada ponto da superfície do absorvedor, efetua-se a soma das contribuições de cada ponto da superfície refletora, utilizando-se a Eq. 71, análoga à Eq. 49 utilizada no desenvolvimento do modelo.

$$I(\beta) = \int_{-\theta_c}^{\theta_c} B(\varphi(\theta, \beta) \cdot \cos(\theta + \varphi(\theta, \beta))) \cdot d\theta \quad (71)$$

O resultado da integração é apresentado no gráfico da Figura 56, que mostra a forma da distribuição de energia em cada posição angular da superfície do absorvedor cilíndrico de um concentrador parabólico.

Figura 56 - Distribuição da energia sobre o absorvedor cilíndrico de um concentrador parabólico.



A Figura 56 apresenta, como resultado da aplicação desta metodologia, a forma da distribuição da energia em cada posição angular de um absorvedor cilíndrico de um concentrador parabólico. Foram utilizadas três distribuições de brilho: constante, a distribuição do brilho solar descrita por Rabl e Bendt (1982) e a gaussiana considerando erros ópticos estocásticos com desvio (σ_{tot}) de 6mrad.

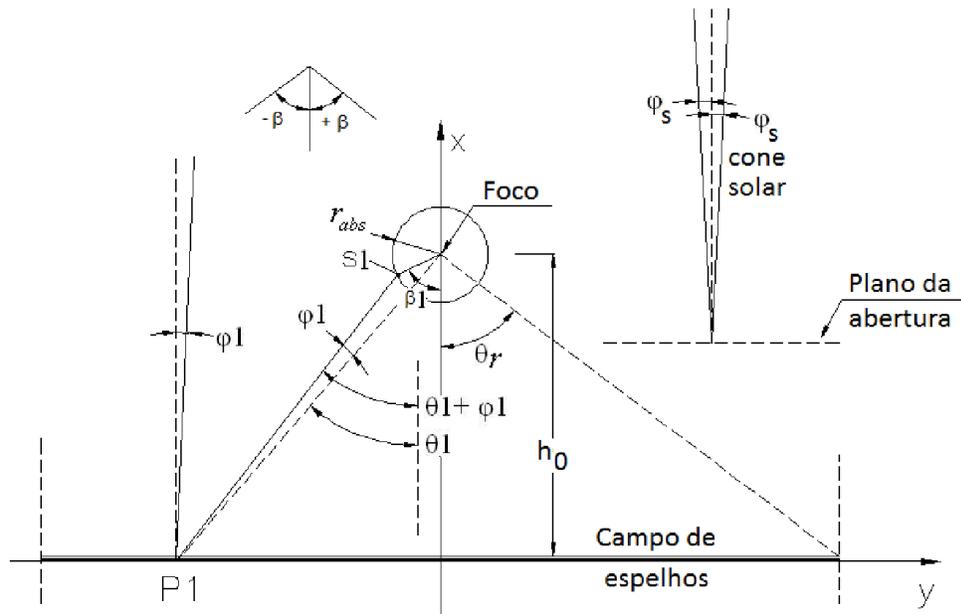
Observa-se que, quando os erros ópticos não são considerados, a energia, que está distribuída entre as posições angulares -150° e $+150^\circ$, atinge o máximo de aproximadamente 104 sóis, quando se utiliza a distribuição de Rabl e Bendt (1982), e 106 sóis para a distribuição de brilho constante. Todos os máximos foram localizados na posição angular 0° . Quando existe a incidência de erros ópticos gaussianos, a radiação refletida envolve o absorvedor, e a energia está distribuída ao redor de todo o absorvedor, com um máximo de 86 sóis.

4.3.2 Fresnel com absorvedor circular

A metodologia descrita foi aplicada a concentradores solares com geometrias sem refletor parabólico, como o concentrador Fresnel de espelhos facetados dispostos em linha com altura (h_0) constante, do absorvedor em relação aos espelhos, e absorvedor cilíndrico.

A Figura 57 apresenta a configuração e os parâmetros utilizados para a aplicação do modelo com este tipo de concentrador solar.

Figura 57 - Parâmetros do concentrador Fresnel linear com absorvedor cilíndrico.



De forma idêntica à aplicação desta metodologia com o concentrador parabólico com absorvedor cilíndrico e baseando-se na Figura 57, considera-se que um raio pode ser identificado por seu ângulo dentro do cone solar (φ_1), o qual atinge a superfície refletora em um ponto (P1). O eixo do cone solar refletido no ponto (P1) faz com a vertical um ângulo (θ_1). O absorvedor tem raio (r_{abs}), o ângulo (β) indica a posição angular do ponto em sua superfície. O raio refletido (φ_1) atinge o absorvedor cilíndrico no ponto (S1) que corresponde à posição angular (β_1).

Efetuando-se as mesmas considerações do desenvolvimento do modelo, é possível obter a função $\varphi = \varphi(\theta, \beta)$ (Eq. 72), na qual β é o parâmetro descrito e que permite obter os pares (θ, φ), que vão compor o gráfico das isolinhas desta geometria. Tem-se, então,

$$\tan(\varphi) = \frac{r_{abs} \cdot \text{sen}(\theta - \beta) \cdot \cos(\theta)}{h - r_{abs} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\theta - \beta)} \quad (72)$$

onde

φ é o ângulo que identifica um raio dentro do cone solar;

θ representa o ângulo definido entre o eixo do cone solar refletido e o eixo vertical (x);

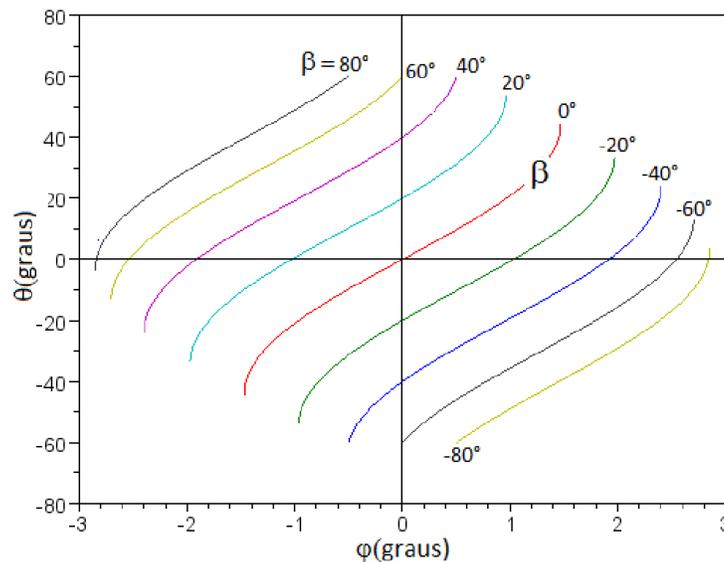
r_{abs} é o raio do absorvedor;

β representa a posição angular de um ponto no absorvedor;

h é a altura do absorvedor em relação ao plano dos espelhos.

O gráfico das isolinhas de um concentrador Fresnel de espelhos facetados com absorvedor cilíndrico é apresentado na Figura 58. Para a obtenção desse gráfico, considerou-se que o raio do absorvedor é 0,1 m, a altura entre o absorvedor e os espelhos é de 4m, e o ângulo de borda do concentrador é 60° .

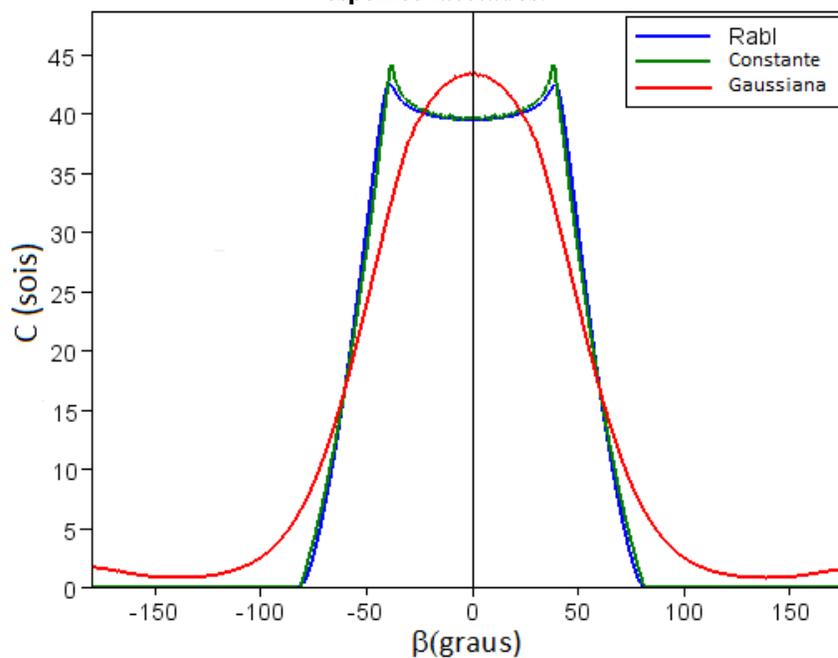
Figura 58 - Gráfico das isolinhas de um concentrador Fresnel com espelhos facetados e absorvedor cilíndrico.



O gráfico da Figura 58 apresenta as isolinhas de um concentrador Fresnel com espelhos facetados e absorvedor cilíndrico. Observa-se que ele tem a mesma forma que o concentrador parabólico com absorvedor cilíndrico e aceita, portanto, a mesma interpretação. Devido a esse fato, a determinação da distribuição de energia sobre o absorvedor é obtida utilizando-se a mesma Eq. 71 do concentrador parabólico com absorvedor cilíndrico.

A Figura 59 apresenta a distribuição de energia sobre os pontos do absorvedor. Para a determinação dela, foram utilizadas a distribuição de brilho do cone solar de Rabl e Bendt (1982), a distribuição constante e uma distribuição gaussiana que representa os erros ópticos com desvio total de 6mrad.

Figura 59 - Distribuição de energia em um absorvedor cilíndrico de um concentrador Fresnel de espelhos facetados.



Observa-se, na Figura 59, a distribuição de energia ao redor de um absorvedor circular de um concentrador do tipo Fresnel plano, com altura fixada em 4m. Nota-se que a energia está contida em uma faixa angular que vai desde -80° até 80° , quando são utilizadas distribuições de brilho sem considerar os erros ópticos. A máxima concentração não se encontra no centro ($\beta = 0^\circ$), mas em dois pontos situados nas posições angulares -50° e 50° .

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um novo método para a obtenção da distribuição de energia sobre o absorvedor de concentradores solares.

Foi definido um espaço $(\theta - \varphi)$ que permite visualizar o comportamento geométrico do concentrador, permitindo utilizar-se qualquer distribuição de brilho do Sol incidente na abertura do coletor. Para tal, foi definida uma função $\varphi = \varphi(\theta, y)$ ou sua inversa $\theta = \theta(\varphi, y)$, em que o local (y) no absorvedor, objeto do cálculo da intensidade de radiação, foi definido por isolinhas no diagrama no espaço $(\theta - \varphi)$.

A análise do diagrama, dividido em duas regiões, permitiu identificar que parte do absorvedor é iluminada total ou parcialmente pela superfície parabólica. A parte iluminada parcialmente apresenta sempre, ainda que esteja sendo considerada a distribuição de brilho constante, um perfil de iluminação declinante.

Os resultados obtidos para o perfil de iluminação do absorvedor apresentam pequenas diferenças em comparação com outros autores, quando são utilizadas diferentes funções de brilho do Sol. As diferenças verificadas não são significativas, pois, na ocorrência de erros estocásticos com desvio padrão maior que 5 mrad, foi observado que as diferentes funções de brilho se transformam em uma mesma função, após a convolução.

Como o atual estágio da tecnologia da construção de concentradores, é possível alcançar desvios ópticos estocásticos da ordem de 8 mrad e os rastreadores solares mais modernos, trabalhando-se com erros de alinhamento da ordem de $0,1^\circ$. A utilização desse modelo permite que sejam elaboradas ferramentas de diagnóstico tanto no momento do projeto quanto na operação do sistema concentrador, pois, com a sua flexibilidade em simular os diversos tipos de erros ópticos, é possível comparar os valores operacionais.

Foram apresentadas algumas aplicações do modelo, as quais permitem a determinação do perfil de iluminação no absorvedor, simular os efeitos da ocorrência de desvios ópticos randômicos (espalhamento da imagem formada) e determinísticos (deslocamento da imagem formada).

O diagrama $(\theta - \varphi)$ permite visualizar claramente o significado geométrico do desalinhamento na formação da imagem na região focal do concentrador. Com o auxílio de equações válidas para a geometria do coletor solar utilizado como base no desenvolvimento,

foi obtido o perfil de radiação no absorvedor, quando existe um desalinhamento (δ) do eixo da parábola com relação ao vetor solar.

Foi desenvolvida uma nova formulação para a determinação da função de aceitação angular, a qual utiliza a função $(\theta(\varphi, \gamma))$. Os resultados apresentados mostram que a expressão obtida é exata (sem aproximações) e tem boa concordância com as equações descritas por Rabl (1985), sendo a sua validade bem maior, já que permite a sua utilização com outras geometrias.

A função de aceitação angular definida com o modelo foi utilizada para calcular o fator de interceptação. Observou-se que, para valores do fator de interceptação baixos, ocorrem diferenças da ordem de 1%, quando se comparam com o cálculo do fator de interceptação, utilizando-se a função de aceitação angular descrita por Rabl (1985). Nota-se, portanto, que as aproximações efetuadas por Rabl (1985) na definição de $F(\varphi)$ podem provocar desvios importantes, quando utilizada para calcular outras funções, como o fator de interceptação, por exemplo.

O método desenvolvido pode ser utilizado para qualquer geometria de concentrador, desde que a radiação incidente realize uma única reflexão no caminho da abertura ao absorvedor. Foram apresentadas outras aplicações do modelo para duas diferentes geometrias de concentradores solares, cilindro parábola e Fresnel com absorvedor cilíndrico. Isso demonstra que o método desenvolvido pode ser aplicado de forma genérica a outras geometrias de concentradores. Embora os princípios utilizados no desenvolvimento do modelo permitam seu emprego com geometrias nas quais um raio sofra mais de uma reflexão antes de atingir o absorvedor, essa possibilidade pode ser desenvolvida em trabalhos futuros.

6 PERSPECTIVAS

Como o modelo desenvolvido apresenta grande versatilidade, pode-se citar as seguintes perspectivas para a realização de novos trabalhos:

- aplicar o modelo desenvolvido para a simulação da distribuição de energia no absorvedor em concentradores com absorvedor circular (cilindro parábola e Fresnel);
- obter a função de aceitação angular, fator de interceptação, eficiência óptica com as geometrias citadas;
- realizar, utilizando-se o modelo em conjunto com outras metodologias, a simulação do funcionamento de uma planta solar;
- desenvolver o modelo para concentradores com mais de uma reflexão (V-trough, aplanáticos e CPC);
- aplicar o modelo com concentradores 3D, a saber: disco parabólico e torre solar;
- estudar a aplicação do modelo com geometrias não convencionais, como concentrador cilíndrico e com concentradores por refração;
- desenvolver o caso inverso, ou seja, dada a distribuição de energia em um absorvedor e a distribuição do brilho do cone solar, definir a geometria da superfície refletora;
- validar o modelo com experimentos reais;
- desenvolver método de otimização baseado no modelo.

REFERÊNCIAS

ABETTI, G. **The Sun**. D. Van Nostrand, Princeton, New Jersey, 1938.

BARANOV, V. K.; MELNIKOV, G. K. **Soviet Journal of Optical Technology**, n. 33, p. 408, 1966.

BENDT, P., RABL, A., GAUL, H., REED, K. A., Optical Analysis and optimization of line focus solar collectors, **Relatório SERI/TR 34-092**, Solar Energy Research Institute, Golden, EUA, 1979.

BIGGS, F.; VITTITOE, C. N. The helios model for the optical behavior of reflecting solar concentrators. **Relatório SAND 76-0347**. Laboratório Sandia, 1979.

BUIE, D., DEY, C. J., BOSI, S., The effective size of solar cone for solar concentrating systems. **Solar Energy**, v. 74, 2003.

CHAVES, J., **Introduction to nonimaging optics**. New York: CRC Press, 2008.

DALY, J. C. Solar concentrator flux distributions using backward ray tracing. **Applied Optics**, v. 18, n 15, 1979.

DUDLEY, VERNON E., **SEGS LS-2 Solar Collector Report**, Laboratório Sandia, 1994.

DUFFIE, J. A. e BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 2^a ed. New York: Wiley-Interscience, 1991.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética) **Caracterização do cenário macro econômico para os próximos 10 anos**. Nota técnica DEA 15/11, 2011.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética) **Informe à imprensa – Leilão A-3**, 2013.

EVANS, D. L. On the performance of cylindrical parabolic solar concentrators with flat absorbers. **Solar Energy**, EUA, v. 19, p. 379 – 385, 1977.

FRAIDENRAICH, N., Analytic solutions for the optical properties of V-trough concentrators. **Applied Optics**, v. 31, n. 1, 1992.

FRAIDENRAICH, N. e LYRA, F. J. M. **Energia Solar: fundamentos e tecnologia de conversão heliotérmica e fotovoltaica**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 1995.

FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O. C., Exact solution for multilayer optical structures applications to PV modules. **Solar Energy**, v. 69, p. 357-362, 2000.

GLENN, K. W.; HO, C. K. Impact of aperture size, receiver diameter, and loop length on parabolic trough performance with consideration of heat loss, pumping parasitics, and optics for a typical meteorological year, **Proc. Solar PACES**, Marrakech, Marrocos, 2012.

GRETHER, D. F.; HUNT, A., Description of the LBL reduced data base. **Informal report**, 1977.

GÜVEN, H. M., BANNEROT, R. B., Determination of error tolerances for optical design of parabolic troughs for developing countries, **Solar Energy**, n. 36, p. 535-550, 1986.

HARRIS, J. A.; DUFF, W. S. Focal plane flux distributions produced by solar concentrating reflectors. **Solar Energy**, v. 27, p. 403-411, 1981.

HASSAN, K.; EL-REFAIRE, M. F. Teoretical performance of cylindrical parabolic solar concentrators. **Solar Energy**, EUA, v. 15, p. 291-244, 1973.

HOMAS, A.; GÜVEN, H. M. Effect of optical errors on flux distribution around the absorber tube of a parabolic trough concentrator. **Energy Conver and Managment**, v. 35, n° 7, p. 575-582, 1994.

JETER, S. M. Calculation of the concentrated flux density distribution in parabolic trough collectors by a semifinite formulation. **Solar Energy**, v. 37, p. 335-345, 1986.

JOSE, P. D., The flux distribution through the focal spot of a solar furnace. **Solar Energy**, n. 1, p. 19-22, 1957.

KANDLIKAR, S. G.; VIJ, S. K. Geometrical aspects of a cylindrical parabolic collector, **Proc. ISES Congress**, New Delhi, 1978.

KHANNA, S.; KEDARE, S. B.; SINGH, S. Analytical expression for circumferential and axial distribution of absorbed flux on a bent absorber tube of solar parabolic trough concentrator. **Solar Energy**, n. 92, p. 26-40, 2013.

MOYA, E. Z. Generación directa de vapor con colectores solares cilindro parabólicos, **Proyecto Direct Solar Steam (DISS)**, CIEMAT, 2004.

NEUMANN, A., WITZKE, A., JONES, S. A., SCHMITT, G., Representative terrestrial solar brightness profile, **J. Solar Energy Eng.**, v. 124, p. 198-204, 2002.

NICOLÁS, R. O., DURÁN, J. C. Generalization of the two-dimensional optical analysis of cylindrical concentrators. **Solar Energy**, v. 25, p. 21-31, 1980.

O'GALLAGHER, J. J. **Nonimaging optics in solar energy**. Ed. Morgan & Claypool, 2008.

OLIVIERA, C. A. A. **Modelagem analítica de uma planta termosolar com geração direta de vapor em coletores cilindro parabólicos**. (Tese de doutorado em Tecnologias energéticas e nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

PEDROSA FILHO, M. H. O. **Simulação e análise de sistemas de alta concentração de radiação solar**. (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

PULIAEV, S.; PENNA, J. L.; JILINSKI, E.G.; ANDREI, A. H., Solar diameter observations at Observatório Nacional in 1998-1999. **Astronomy & Astrophysics Supplement Series**, v. 143, p. 265-267, 2000.

RABL, A., **Active solar collectors and their applications**. New York: Oxford University Press, 1985.

RABL, A., Comparison of solar concentrators. **Solar Energy**, v. 18, p. 93-111, 1976.

RABL, A.; BENDT, P., Effect of circumsolar radiation on performance of focusing collectors. **Journal of Solar Energy Eng**, v. 104, p. 237-250, 1982.

RABL, A.; BENDT, P.; GAUL, H. W. Optimization of parabolic trough solar collectors. **Solar Energy**, v. 29, n. 5, p. 407-427, 1982.

ROLIM, M. M. **Modelagem analítica de geração solar térmica de eletricidade, com concentradores parabólicos de foco linear**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Departamento de Energia Nuclear, UFPE, 2007.

SALA, G.; PANCHÓN, D.; ANTÓN, I. Test, rating and specification of pv concentrator components and systems. In: _____. **Report**, 1999. Madrid: Instituto de Energía Solar, 1999.

SPENCER, G. H.; MURTY, M. V. R. K., General ray-tracing procedure. **J. Optical Soc. of America**, n. 52, p. 672, 1962.

VITTITOE, C. N; BIGGS, F. Six-gaussian representation of the angular brightness distribution for solar radiation, **Solar Energy**, v. 27, p. 469-489, 1981.

WINSTON, R. Light collection within the framework of geometrical optics. **Journal of the Optical Society of America**, v. 60, p. 245-247, 1970.