

UTILIZAÇÃO DO MODELO DE IDENTIFICAÇÃO DE RAIOS (RIAID) PARA DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE NA REGIÃO DO ABSORVEDOR E PARÂMETROS ÓTICO DE UM CONCENTRADOR CILINDRO PARABÓLICO.

M. H. O. Pedrosa Filho^{1,2}, N. Fraidenraich,¹ O. C. Vilela¹

¹ Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Pesqueira. BR 232, km 208, Prado, Pesqueira-PE, Brasil.

² Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear. Av. Prof. Luiz Freire, s/n, Recife-PE, Brasil. e-mail: manojhenrique@yahoo.com.br

Recibido: 13-8-2012; Aceptado: 25-9-2012.

RESUMEN.- Este trabajo describe aplicaciones del modelo analítico (RIAID), propuesto inicialmente para la obtención de la distribución de brillo en el absorbedor de concentradores solares, al cálculo de parámetros y funciones relativas al comportamiento óptico de los mismos. La geometría analizada corresponde a un concentrador cilíndrico parabólico. Simulaciones realizadas muestran que la influencia de errores ópticos, causados por la ocurrencia simultánea de fenómenos determinísticos y estocásticos, promueven la dispersión y el desplazamiento de la imagen del sol. Consecuentemente, surgen pérdidas de energía debido a radiación que ya no incide más sobre el absorbedor. Una nueva forma de obtención de la función de aceptación angular ($F(\varphi)$) fue derivada y puede ser utilizada para diversas geometrías de concentradores solares. Utilizada para el cálculo del factor de interceptación (γ), mostró ser precisa, simple y general. Los resultados de las simulaciones se comparan con resultados de la literatura científica.

Palabras claves: Concentración solar, función de aceptación angular, distribución de energía, errores ópticos.

THE UTILIZATION OF THE RAY IDENTIFY MODEL (RIAID) TO OBTAIN THE INTENSITY DISTRIBUTION IN THE ABSORBER REGION AND OPTICAL PARAMETERS OF A PARABOLIC CYLINDRICAL CONCENTRATOR

ABSTRACT.- This work describes applications of the analytical model (RIAID), proposed initially to obtain the intensity profile along the absorber of solar concentrators, to calculate optical parameters and functions related to the optical behavior of concentrating collectors. The geometry analyzed corresponds to a parabolic cylindrical concentrator. The influence of optical errors promoted by both, deterministic and stochastic phenomenon, results into spread and shift of the sun's image. Consequently, energy losses arise because of light missing the absorber. A new procedure to obtain the angular acceptance function ($F(\varphi)$) has been developed. The method can be applied for very general geometries of concentrating collectors. Used to calculate the interception factor (γ) showed to be precise, simple and general. Results agree fairly well with those published in the scientific literature.

Keywords: Solar Concentrators, Acceptance function, Energy distribution, Optical errors.

1. INTRODUÇÃO

A forma com a qual a radiação chega ao absorvedor permite definir o tamanho de absorvedor de modo que toda ou uma grande parcela da energia seja interceptada (Rabl, 1985). Diversos autores (Evans, 1977; Daly, 1979; Harris e Duff, 1981; Fraidenraich, 1992) têm estudado formas de obtenção da distribuição de energia ao longo do absorvedor do concentrador solar. Em seus trabalhos, utilizam abordagens diferentes para tratar o problema.

Definido um local do absorvedor e o cone de radiação que atinge a abertura da cavidade concentradora, pode-se identificar a região da superfície do concentrador que contribui para iluminar e concentrar a radiação no ponto escolhido. Com esse fundamento, descreve-se o modelo denominado (RIAID) "Ray Identification for Absorber Intensity Distribution". Desenvolvido por Fraidenraich (2009) com base na geometria de uma calha parabólica, pode ser utilizado com diversas geometrias de absorvedor (cilíndrico, plano, elíptico, espelhos facetados, disco parabólico). Permite também avaliar a influência de

diferentes parâmetros, geométricos ou físicos, como por exemplo, as diversas formas de desvios ópticos.

Pedrosa Filho et. al (2011) descreveram os fundamentos utilizados no desenvolvimento do modelo RIAID. Naquele trabalho foram apresentadas as duas equações que compõem o modelo e a representação gráfica das isolinhas ($\theta - \varphi$) que relaciona o raio dentro do feixe (φ) com a posição que ele atinge na superfície refletora (θ) e o ponto no qual o raio refletido atinge o absorvedor (y). Como exemplo de aplicação do modelo citado pelos autores, foi calculada a distribuição de energia em um concentrador com absorvedor plano na condição de alinhamento e desalinhamento do eixo do concentrador com o vetor solar.

Neste trabalho são expostas mais duas aplicações do modelo (RIAID): 1) vários modelos de brilho de Sol são utilizados para calcular distribuições de brilho afetadas pela existência simultânea de diversos mecanismos de dispersão da luz solar vistos pelo absorvedor. As influências dos desvios óticos, originados pelo deslocamento do absorvedor de sua posição

centralizada, são também apresentadas; 2) uma nova forma de obtenção da função de aceitação angular ($F(\varphi)$), a partir do modelo (RIAID), é determinada. Utilizando a definição proposta por Rabl (1985), em função de ($F(\varphi)$), determina-se o fator de interceptação (γ).

2. BREVE DESCRIÇÃO DO MODELO

A metodologia está baseada em: a) Uma equação de balanço que relaciona a energia que ingressa no plano de abertura do concentrador e a energia que chega ao absorvedor (Figura 1). b) Uma relação geométrica ($\theta(\varphi, y)$) que pode ser desenvolvida para cada raio dentro do feixe solar e que relaciona o raio ou a região do sol de onde os raios procedem (ângulo φ), com o local de incidência destes na superfície refletora do concentrador (ângulo θ) e o local de incidência (y) no absorvedor.

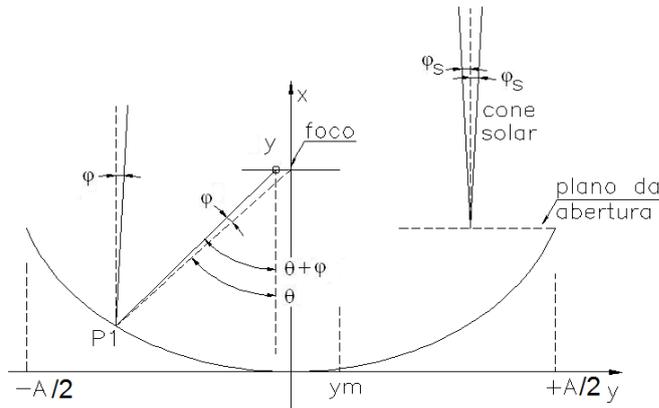


Fig. 1: Perfil de concentrador parabólico e feixe de raios que atingem a superfície do concentrador. Indica-se um raio φ que pertence ao cone de largura φ_s , onde φ_s é o raio angular do Sol

Uma representação diagramática da função ($\theta(\varphi)$) permite visualizar o comportamento detalhado dos raios que atingem a região focal do concentrador ou qualquer outro ponto de interesse (ponto y) (Pedrosa Filho et. al, 2011). Organizado na forma de isolinhas, o diagrama identifica o intervalo de raios que alcançam uma determinada região (Figura 2). Por exemplo, na isolinha (y) está indicado o intervalo de raios

(φ) que incidem nele. Pode se observar também que todas as regiões do concentrador caracterizadas pelo ângulo (θ) iluminam a isolinha (y). Esta configuração muda drasticamente quando se produzem pequenas alterações na região focal do concentrador, como será mostrado na Seção "Aplicação do modelo com desvios óticos".

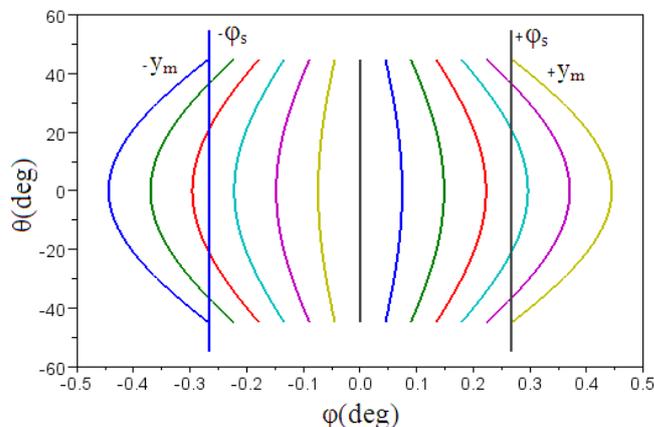


Fig. 2: Gráfico ($\theta - \varphi$) de isolinhas (y) para uma parábola (Pedrosa Filho et al., 2011)

Considerando a contribuição de cada raio dentro do feixe de energia incidente em determinado ponto (y) no absorvedor, é possível escrever a equação (1) (Pedrosa Filho et. al, 2011).

$$I(y) = \int_{-\theta_r}^{\theta_r} B[\varphi(\theta, y)].\cos[\theta + \varphi(\theta, y)]d\theta \quad (1)$$

Dado que o modelo foi inicialmente desenvolvido para um concentrador parabólico tipo calha com absorvedor plano, a equação (2) representa a relação geométrica citada.

$$\tan(\varphi) = \frac{y}{|y.\tan(\theta)| + r.\sec(\theta)} \quad (2)$$

Na equação (2), o ângulo (φ) representa a posição de um raio dentro do feixe, (θ) é o ângulo definido entre o raio central do cone de abertura (φ_s) refletido pela superfície da parábola e o eixo do concentrador e (y) a posição na região focal atingida pelo raio (φ) (Figura 01). A função (φ(θ,y)), apresentada na equação (2), é específica para concentradores cilindro parabólicos. Esta função é o constituinte principal do algoritmo a ser utilizado para o cálculo da função de distribuição no absorvedor.

3. APLICAÇÃO DO MODELO COM DESVIOS ÓPTICOS

Os desvios ópticos ou erros ópticos são imperfeições nos elementos que compõem o concentrador, que produzem alterações na formação da imagem no absorvedor. Dois tipos de desvios óticos podem ser distinguidos: estocásticos ou randômicos e determinísticos.

Segundo Güven e Bannerot (1986), os desvios estocásticos ou randômicos são causados pela mudança do tamanho do sol decorrente de mudanças na distância entre Terra e Sol, efeitos atmosféricos (σ_{sol}), e efeitos de espalhamento

associados ao material óptico utilizado (σ_{rugosidade}). Também estão associados a distorções variáveis da geometria da superfície refletora (σ_{geometria}) e ao desalinhamento variável do rastreador (σ_{rastreio}). Podem ser representados por uma distribuição de probabilidade (na maioria dos casos, gaussiana). A letra (σ) alude ao desvio padrão da densidade de probabilidade. A distribuição mede a densidade de probabilidade de encontrar um raio que incide com ângulo (φ) na superfície concentradora.

Bendt et al. (1979) apresentaram a seguinte expressão (Eq. 03) para o cálculo do desvio total.

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{sol}^2 + \sigma_{rugosidades}^2 + 2\sigma_{geometria}^2 + \sigma_{rastreio}^2 + \sigma_{desalinhamento}^2} \quad (3)$$

Bendt et al. (1979) também desenvolveram uma formulação matemática para a determinação da forma efetiva do sol, vista pelo absorvedor e afetado pelos desvios mencionados na equação (4). A expressão proposta é uma convolução entre a distribuição de probabilidade dos desvios, E(φ - φ_{in}) e o brilho do sol, B(φ_{in}). O ângulo (φ_{in}) se refere ao ângulo de incidência na superfície do concentrador, (φ) é o ângulo de reflexão na mesma superfície.

$$B_{eff}(\varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} E(\varphi - \varphi_{in}).B(\varphi_{in}).d\varphi_{in} \quad (4)$$

Como o modelo (RIAD) permite a utilização de qualquer distribuição de brilho, foi efetuada a convolução entre diferentes distribuições de brilho B(φ_{in}) citadas por Pedrosa Filho et al. (2011) e a distribuição de probabilidade gaussiana E(θ) com média nula e desvio padrão igual a σ_{tot}. Os resultados são apresentados na Figura 3.

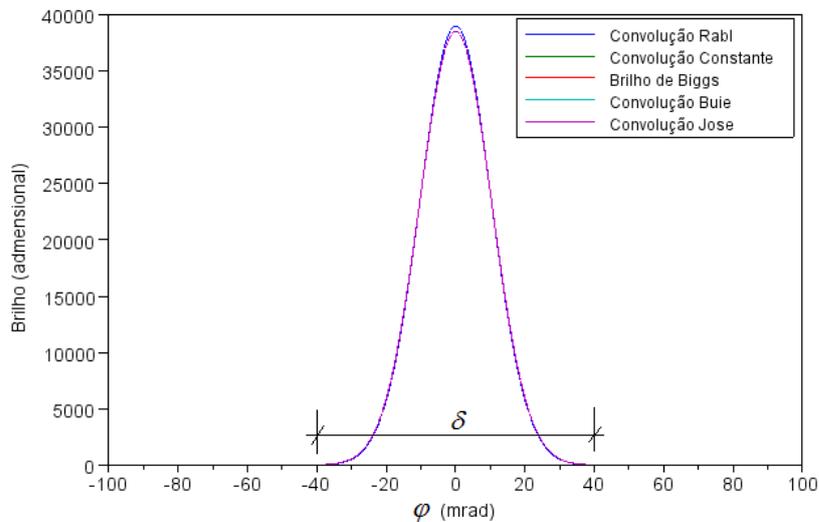


Fig. 3: Distribuição de brilho, para vários modelos de Sol, considerando os efeitos de dispersão da luz devidos a fatores atmosféricos e irregularidades dos materiais interpostos na trajetória da radiação no interior da cavidade concentradora (σ_{sol} = 4,65 mrad e σ_{tot} = 10 mrad).

A Figura 3 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 $\sigma_{tot} = 10\text{mrad}$. Estes 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 ($\sigma_{sol} = 4,65\text{ mrad}$). Devido a este 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 ($\pm 40\text{ mrad}$).

Considerando (δ), indicado na Figura 3, como o intervalo angular do brilho efetivo (o parâmetro $\delta = 2 \times 3\sigma_{tot}$) representa a dispersão angular do cone que contém 99,73% da energia total, e a distribuição de erros ópticos estocásticos como gaussiana, é possível determinar a Eq. 05, derivada de Duffie e Beckman (1991). Esta equação relaciona o intervalo angular visto pelo absorvedor ($3\sigma_{tot}$) com o tamanho da imagem formada nele. Na equação (5), (a) é a metade da abertura total da parábola e (θ_r) o ângulo de borda do concentrador.

$$y_m = \frac{a \cdot \text{sen}(3 \cdot \sigma_{tot})}{\text{sen}(\theta_r) \cdot \cos(\theta_r + 3 \cdot \sigma_{tot})} \quad (5)$$

Com a equação (5), 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, quando se define o tamanho do absorvedor utilizando a equação (5), é de 99,97%, o desvio padrão dos resultados das simulações foi de 0,02%.

Os desvios ópticos determinísticos podem ser causados por erros do perfil geométrico, provocando a mudança permanente do foco do refletor, desalinhamento permanente do eixo do concentrador em relação ao vetor solar, determinado por um erro constante de rastreamento (erro médio de rastreamento não nulo) e outros. Resultados deste modo de desalinhamento foram apresentados por Pedrosa Filho et. al (2011).

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 4).

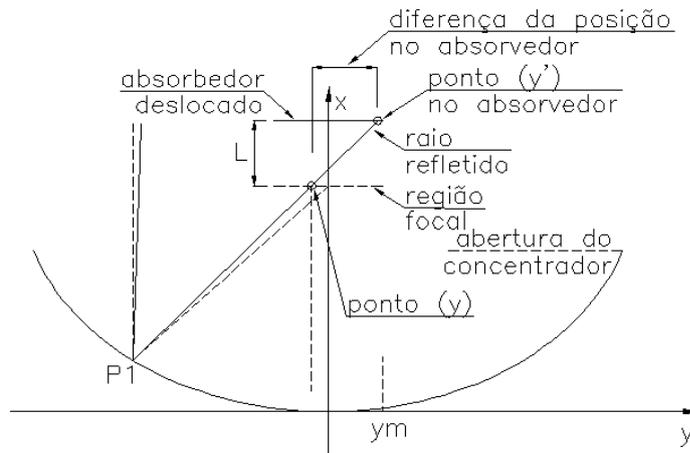


Fig. 4: Configuração dos ângulos da parábola no plano focal.

A Figura 4 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 esta diferença como sendo $L \cdot \tan(\theta - \varphi)$, onde θ refere-se ao local de incidência de um raio na superfície refletora e φ está relacionado com a posição do raio dentro do cone solar.

Considerando-se a relação geométrica apresentada na equação (2), com a consideração de um deslocamento L do absorvedor na direção do eixo “x”, a equação (6), apresenta a nova relação entre os ângulos (θ), (φ) e a posição (y) no absorvedor.

$$\tan(\varphi) = \frac{y - L \tan(\theta)}{|y \cdot \tan(\theta)| + r \cdot \sec(\theta) - L \tan^2(\theta)} \quad (6)$$

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 ($\theta(\varphi, y)$) comportam-se de maneira simétrica em relação ao centro do feixe e ao eixo da parábola (Pedrosa Filho et al., 2011) (Figura 2). Considerando-se a mesma parábola, simulou-se um deslocamento do absorvedor no sentido do eixo “x” (vertical) de 0,01 m (Figura 5).

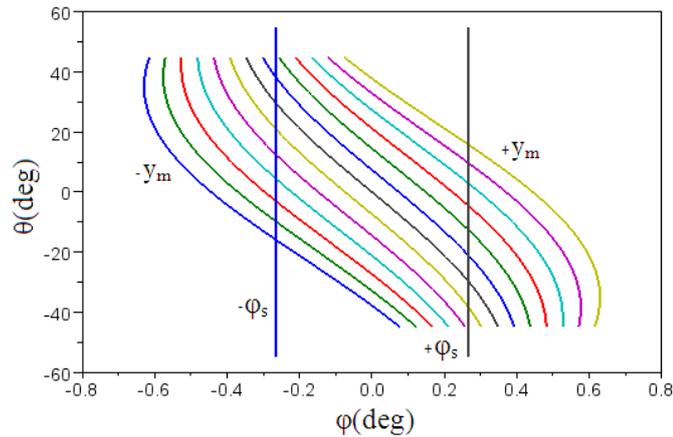


Fig. 5 – Gráfico das isolinhas ($\theta - \phi$) para uma parábola com absorvedor deslocado de 1% da distância focal.

O gráfico apresentado, na Figura 5 mostra a simetria da função ($\theta(\phi, y, L)$), significativamente modificada em relação à simetria do diagrama da Figura 2. A mudança é produto de um deslocamento do absorvedor de 1% da distância focal, se afastando da superfície da parábola (+x). Este deslocamento torna a isolinha ($y = 0$) inclinada (curva preta do gráfico da Figura 5, podendo receber a contribuição de raios entre $(-\phi_s$ e ϕ_s) enquanto na Figura 2 a isolinha ($y = 0$) (curva preta) é vertical e recebe só a contribuição de raios ($\phi = 0$). Por outro lado, enquanto no caso da Figura 2 todas as isolinhas, salvo ($y = 0$), são iluminadas por raios com ângulo (ϕ) maiores ou menores que zero (0), o afastamento (L) provoca a iluminação com raios (ϕ) tanto maiores

quanto menores que zero (0). Esta 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 das Figura 6a e Figura 6b apresentam o comportamento da distribuição de energia com o deslocamento do absorvedor no sentido do eixo (x) (vertical, se afastando do foco), para vários valores de deslocamento do absorvedor. O ângulo de borda do concentrador é de 45° e a distância focal de 1m.

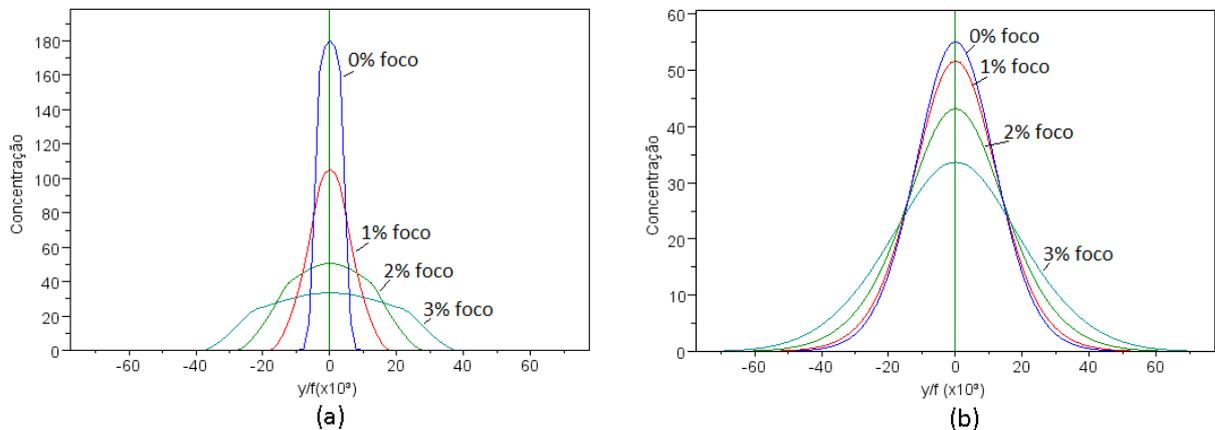


Fig.6: Distribuição de energia no absorvedor de uma parábola com deslocamento no sentido $x=0, 1, 2$ e 3% da distância focal, (a) para $\sigma_{tot} = \sigma_{sol} = 4,65$ mrad e (b) para $\sigma_{tot} = 10$ mrad.

A Figura 06a apresenta o efeito deste deslocamento (sentido x) quando os desvios ópticos estocásticos não são considerados, sendo utilizado apenas o tamanho do cone solar original ($\sigma_{tot} = \sigma_{sol} = 4,65$ mrad). O aumento do deslocamento do absorvedor no sentido (x) provoca espalhamento da energia e sua distribuição no absorvedor torna-se mais uniforme (Figura 6a, ex.: 3%). 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 6a concordam com os apresentados por Evans (1977).

Quando a presença dos desvios ópticos estocásticos ($\sigma_{tot} = 10$ mrad) é considerada (Figura 6b), a imagem do sol passa a ter um diâmetro angular maior (10 mrad vs 4,65 mrad). Em consequência, o espalhamento de energia sobre o absorvedor é intensificado, prevalecendo a influência destes desvios ($\sigma_{tot} = 10$ mrad) em relação ao deslocamento do absorvedor no sentido do eixo "x". Por exemplo, na Fig. 06a, a distribuição que se afasta 3% da distância focal se estende entre (y) igual a $-40f \cdot 10^{-3}$ e $+40f \cdot 10^{-3}$. Já na Figura 6b, o afastamento de 3% da distância focal (f) abarca a região compreendida entre $(-60f \cdot 10^{-3}$ a $+60f \cdot 10^{-3})$. Observa-se também que ocorre uma redução significativa da concentração local em todo o

absorvedor devido ao espalhamento da energia por uma faixa angular maior (cone solar efetivo). Nos gráficos das Figura 6a e Figura 6b, curvas em azul (0% foco), a concentração máxima diminuiu de aproximadamente 180 sois para 60 sois.

Outra possibilidade de deslocamento do absorvedor em relação ao foco efetivo do concentrador é no sentido “y” da

Figura 4. Desta forma, considerando-se o deslocamento no sentido “x” e o deslocamento no sentido “y”, o modelo permite a simulação simultânea dos mesmos em conjunto com os desvios ópticos estocásticos. A Figura 7 apresenta a distribuição de energia no absorvedor de um concentrador em que são considerados os desvios simultâneos, situação próxima do que acontece na realidade.

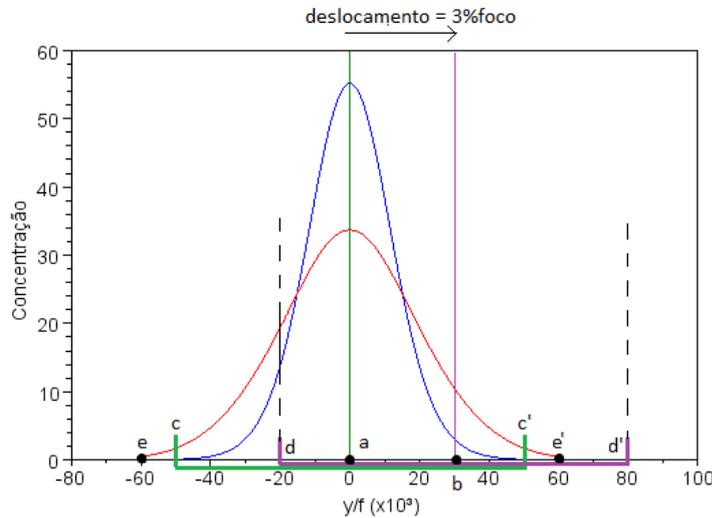


Fig. 7: Distribuição de energia no absorvedor de uma parábola considerando a ocorrência de todos os desvios ópticos (x e $y = 0$ e 3 % da distância focal e $\sigma_{tot} = 10$ mrad).

O gráfico, apresentado na Figura 7, 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 ($\sigma_{tot} = 10$ 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 ($\sigma_{tot} = 10$ mrad) simultaneamente com a ocorrência do deslocamento do absorvedor nos sentidos “x” e “y” ao mesmo tempo. O ponto “b” do gráfico da Figura 7 representa o centro do absorvedor deslocado no sentido do eixo “y”.

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 “y”.

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 7, que três efeitos ocorrem ao mesmo tempo: 1) Aumento do tamanho da imagem (maior espalhamento) com o deslocamento no

sentido do eixo “x” 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) Com o deslocamento do absorvedor no sentido do eixo (y), ocorre a perda de uma parcela maior de energia, pois o trecho da curva vermelha entre os pontos (e) e (d) não incidirá sobre o absorvedor. Na prática, estes três efeitos farão com que o absorvedor intercepte menos energia, pois uma parte é perdida por incidir fora de seus limites.

4. FUNÇÃO DE ACEITAÇÃO ANGULAR E FATOR DE INTERCEPTAÇÃO

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 (RIAID), mostrado na Figura 2, 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, para um dado ângulo (φ), qual é a fração de raios que atinge o absorvedor. O gráfico da Figura 8 apresenta a isolinha que representa o ponto “y” limite do absorvedor (y_m , na Figura 2). 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.

No gráfico da Figura 8, estão indicados três valores de ângulo de incidência e a isolinha correspondente à ($+y_m$) (curva amarela do lado direito da Figura 2). Pode-se

identificar o ângulo de incidência (φ_{lim1}) como sendo o ângulo até o qual, para todo (θ) (Figura 2), todos os raios que adentrem a 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}), haverá uma fração do concentrador definida pelos ângulos (θ) que não atingirão ponto algum do absorvedor ($|\varphi| > \varphi_{lim2} \rightarrow F(\varphi) = 0$). Estes 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. Esta parcela está relacionada, na Figura 8, 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”.

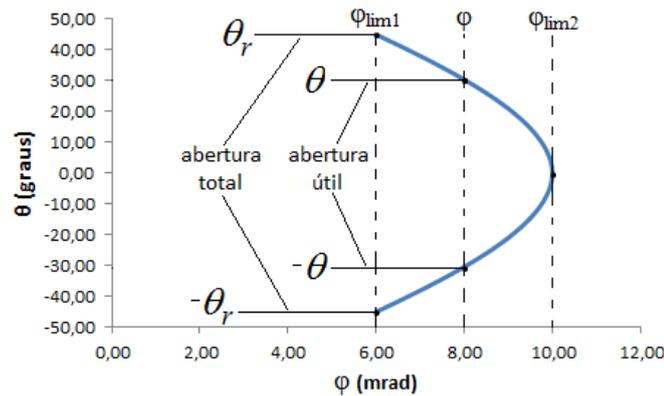


Fig. 8: Isolinha que representa o ponto limite do absorvedor (y_m).

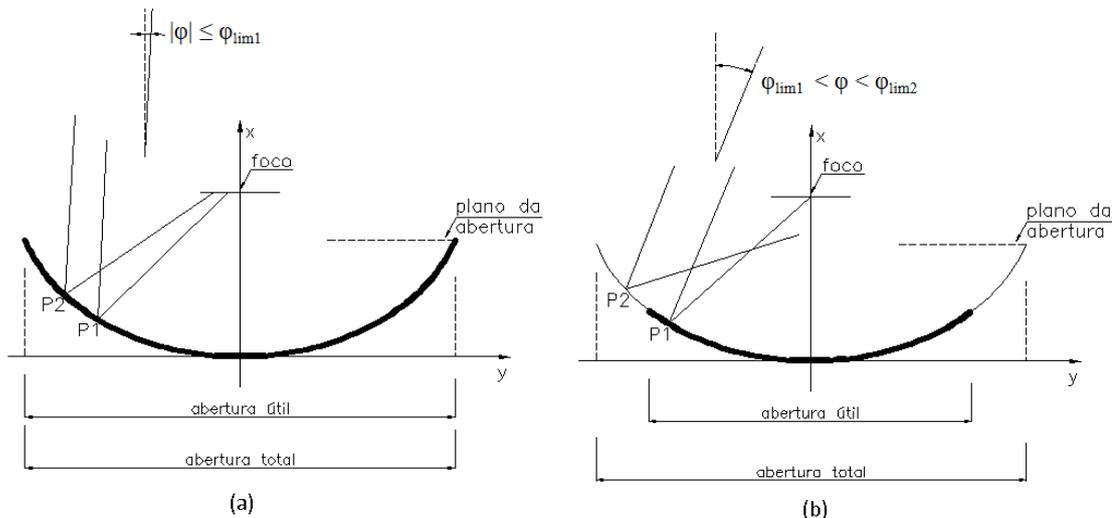


Fig. 9: Determinação da área útil de acordo com o ângulo de incidência dos raios paralelos.

A Figura 9 apresenta duas das três condições possíveis de aceitação de um feixe de raios paralelos. Na Figura 9a, os raios incidem na abertura com ângulo $|\varphi| \leq \varphi_{lim1}$. Nesta 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 9b, os raios incidem com ângulo entre φ_{lim1} e φ_{lim2} ($\varphi_{lim1} < \varphi < \varphi_{lim2}$). Nesta situação, apenas uma parcela dos raios é refletida e atinge o absorvedor, esta parcela está relacionada com a região destacada em negrito na superfície da parábola da Figura 9b. Apenas os raios que são refletidos por esta região são aceitos, os raios que atingem a região não destacada, são direcionados para fora do coletor parabólico. Assim, a proporção de raios que são aceitos está relacionada com a 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 9), nenhum raio será refletido e atingirá o absorvedor. Não existe abertura útil, portanto ($F(\varphi) = 0$).

A Figura 10 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 8. A faixa $(-\theta, \theta)$ determina a região da superfície da parábola (destacada em negrito na Figura 10) que reflete os raios para o absorvedor. Na Figura 10, 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.

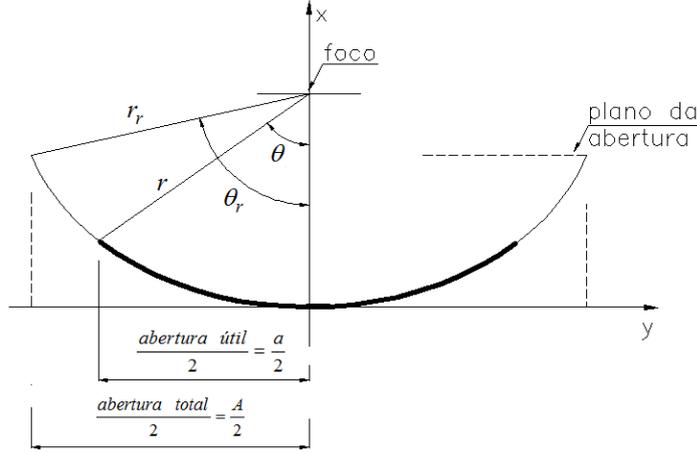


Fig. 10: Determinação da abertura útil e da abertura total em função dos parâmetros geométricos da parábola.

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

$$\frac{\text{abertura útil}}{2} = \frac{a}{2} = r \cdot \text{sen}(\theta) \quad (7)$$

$$\frac{\text{abertura total}}{2} = \frac{A}{2} = r_r \cdot \text{sen}(\theta_r) \quad (8)$$

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 equação (9).

$$F(\varphi) = \begin{cases} 1 & \text{se } \varphi \leq \varphi_{\text{lim}1} \\ r \cdot \text{sen}(\theta(\varphi, y_m)) & \text{se } \varphi_{\text{lim}1} < \varphi < \varphi_{\text{lim}2} \\ 0 & \text{se } \varphi \geq \varphi_{\text{lim}2} \end{cases} \quad (9)$$

Na equação (9), (y_m) é a metade do tamanho do absorvedor. $(\varphi_{\text{lim}1})$ é o ângulo de incidência de um raio solar que atinge a extremidade do absorvedor (y_m) na borda do concentrador (θ_r) e $(\varphi_{\text{lim}2})$ 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).

Por tanto, o ângulo $(\varphi_{\text{lim}1})$ é determinado pela seguinte equação (10).

$$\tan(\varphi_{\text{lim}1}) = \frac{y_m}{|y_m \cdot \tan(\theta_r)| + r_r \cdot \sec(\theta_r)} \quad (10)$$

O ângulo $(\varphi_{\text{lim}2})$ é determinado pela equação (11) que foi obtida substituindo-se na equação (2): ($y = y_m$), ($\theta = 0$) e f a distância focal.

$$\tan(\varphi_{\text{lim}2}) = \frac{y_m}{f} \quad (11)$$

Rabl (1985) apresenta uma forma aproximada da equação (10) (função de aceitação angular) e também dos ângulos limites $(\varphi_{\text{lim}1})$ e $(\varphi_{\text{lim}2})$. Utilizando a equação (10), é possível determinar, após manipulações algébricas a equação (12).

$$\tan(\varphi_{\text{lim}1}) = \frac{y_m}{|y_m \cdot \tan(\theta_r)| + r_r \cdot \sec(\theta_r)} = \frac{y_m \cdot \cos(\theta_r) \cdot \text{sen}(\theta_r)}{y_m \cdot \text{sen}^2(\theta_r) + A} \quad (12)$$

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) $\tan(\varphi_{\text{lim}1}) \approx \varphi_{\text{lim}1}$ é válida para pequenos valores do ângulo de incidência; Rabl (1985) apresenta a equação (13) como aproximação, com pequeno erro, da equação exata.

$$\varphi_{\text{lim}1} = \frac{\cos(\theta_r) \cdot \text{sen}(\theta_r)}{C_{\text{geom}}} \quad (13)$$

A expressão que permite o cálculo de $(\varphi_{\text{lim}2})$, equação (11) também permite, após manipulações algébricas, chegar à expressão indicada por Rabl (1985) equação (14), onde também considerou a aproximação $\tan(\varphi_{\text{lim}2}) \approx \varphi_{\text{lim}2}$, válida para pequenos valores do ângulo de incidência.

$$\tan(\varphi_{\text{lim}2}) = \frac{y_m}{f}, \text{ considerando } r_r = \frac{2 \cdot f}{1 + \cos(\theta_r)} \rightarrow \varphi_{\text{lim}2} \approx \frac{2}{C_{\text{geom}}} \tan\left(\frac{\theta_r}{2}\right) \quad (14)$$

As aproximações utilizadas por Rabl (1985) são válidas para o cálculo de $F(\varphi)$. Entretanto, como será visto na próxima seção, 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 11).

No gráfico da Figura 11, 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 11, são apresentados os valores de (φ_{lim1}) e (φ_{lim2}) que delimitam as condições da função de aceitação angular, equação (9). 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 11, 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.

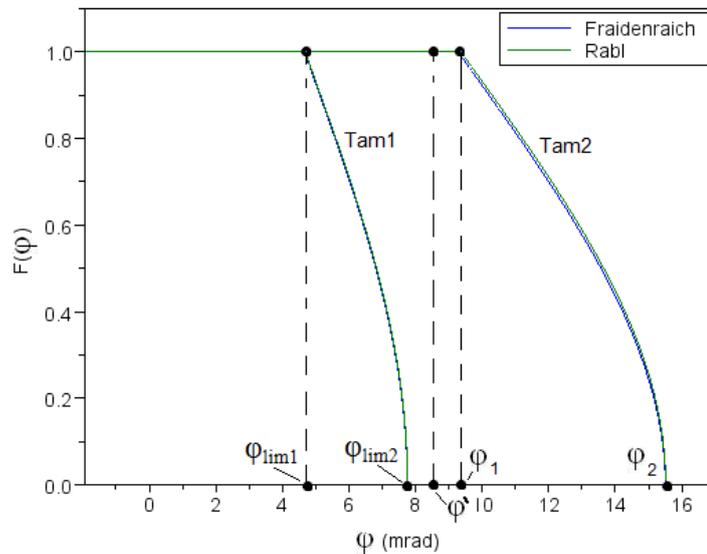


Fig. 11 - Função de aceitação angular para dois tamanhos de absorvedor

Na Figura 11, 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) com as funções obtidas com a equação (9).

A função de aceitação angular obtida pelo modelo (RIAID) não precisa ser deduzida para cada caso e surge a partir da função algorítmica apresentada neste trabalho $(\theta(\varphi, y))$, equação (2) que, embora particular para cada tipo de concentrador e forma geométrica do absorvedor, uma vez obtida permite obter $(F(\varphi))$ rapidamente.

O fator de interceptação (γ) é definido como sendo a fração de energia que incide dentro dos limites da superfície do absorvedor em relação à energia total que atinge o absorvedor, considerado infinitamente extenso na direção $(\pm y)$ (Duffie e Beckman, 1991). Segundo Rabl (1985), 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, equação (15), $B(\varphi)$ é a radiação que incide na abertura do concentrador.

$$\gamma = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} B(\varphi) F(\varphi) d\varphi}{\int_{-\infty}^{\infty} B(\varphi) d\varphi} \quad (15)$$

Utilizando-se a equação (15) (Rabl, 1985) e a função de aceitação angular definida anteriormente pela Eq. 09, nota-se que, o modelo (RIAID) permite determinar o fator de interceptação (γ) , de maneira geral, bastando para isto, que se conheça apenas a função $(\theta(\varphi, y))$ do concentrador.

O gráfico da Figura 12 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 o modelo (RIAID).

As curvas, do gráfico da Figura 12, 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 equação (9) (RIAID). 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 devem-se a que, o cálculo do fator de interceptação utiliza uma integração

numérica, que, de acordo com a natureza do argumento da integral, pode acrescentar erros ao igual que o procedimento de cálculo numérico.

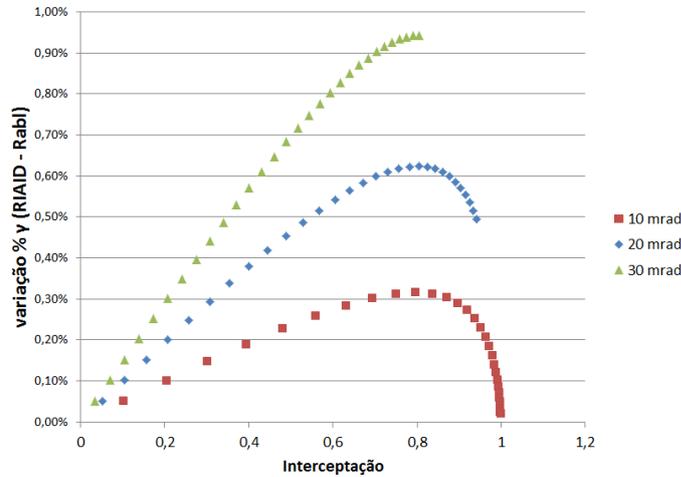


Fig. 12: Diferença entre os valores do fator de interceptação calculado com a função de aceitação angular de Rabl (1985) e a do modelo (RIAID) para vários valores de desvios ópticos

5. CONCLUSÕES

Foram apresentadas algumas aplicações do modelo RIAID, o qual permite 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).

Os resultados obtidos para o perfil de iluminação do absorvedor com funções de brilho do Sol utilizadas por diversos autores e desvio padrão de 10 mrad apresentam pequenas diferenças entre sim. Os resultados dos diversos autores, incluído o do modelo RIAID, são coincidentes. As diferenças entre modelos não são significativas devido a que os erros estocásticos para esse desvio padrão (10 mrad) transformam as funções originais em, praticamente, uma única função.

Foi desenvolvida uma nova formulação para o cálculo da função de aceitação angular, a qual utiliza a função $(\theta(\phi, \gamma))$. 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 RIAID 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 a função de aceitação angular descrita por Rabl (1985). Nota-se, portanto que as aproximações efetuadas por Rabl (1985), na definição de $F(\phi)$, podem provocar desvios importantes quando utilizada para calcular outras funções, como o fator de interceptação, por exemplo.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e a CAPES pelo incentivo por meio do fornecimento de bolsas de estudo e a aquisição dos equipamentos e materiais que permitiram a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- Bendt, P., Rabl, A., Gaul, H., Reed, K. A. (1979). Optical Analysis and optimization of line focus solar collectors, SERI/TR 34-092, Solar Energy Research Institute, Golden, EUA.
- Buie, D., Dey, C. J., Bosi, S. (2003). The effective size of solar cone for solar concentrating systems. *Solar Energy*, **74**, 417-427.
- Daly, J. C. (1979). Solar concentrator flux distributions using backward ray tracing. *Applied Optics*, **18**, 15.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A. (1991). *Solar engineering of thermal processes*. 2ª ed., Wiley-Interscience, New York.
- Evans, D. L. (1977). On the performance of cylindrical parabolic solar concentrators with flat absorbers. *Solar Energy*, **19**, 379 – 385.
- Fraidenraich, N. (1992). Analytic solutions for the optical properties of V-trough concentrators. *Applied Optics*, **31**, 1.
- Fraidenraich, N. (2009). Uma nova abordagem para calcular a distribuição de energia em concentradores solares. Notas de aula da disciplina Óptica Solar. UFPE, Recife, Brasil.
- O’Gallagher, J. J. (2008). *Nonimaging optics in solar energy*. Ed. Morgan & Claypool.
- Güven, H. M., Bannerot, R. B. (1986). Determination of error tolerances for optical design of parabolic troughs

- for developing countries, *Solar Energy*, vol. 36, pp. 535-550.
- Harris, J. A., Duff, W.S. (1981). Focal plane flux distributions produced by solar concentrating reflectors, *Solar Energy*, **27**, 403-411.
- Jose, P. D. (1957). The flux distribution through the focal spot of a solar furnace, *Solar Energy*, **1**, 19-22.
- Pedrosa Filho, M. H. O., Fraidenraich, N., Vilela, O. C. (2011). Solução analítica para a distribuição de energia em um absorvedor plano de um concentrador cilindro parabólico. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **15**, 08.11-08.19.
- Rabl, A. (1985). *Active solar collectors and their applications*. New York: Oxford University Press.
- Rabl, A., Bendt, P. (1982). Effect of circumsolar radiation on performance of focusing collectors, *J. Solar Energy Eng.*, **104**, 237.
- Vittitoe, C. N., Biggs, F. (1981). Six-gaussian representation of the angular-brightness distribution for solar radiation, *Solar Energy*, **27**, 6, 469-490.