

DISTRIBUIÇÃO DE RADIAÇÃO E FATORES DE INTERCEPTAÇÃO EM ABSORVEDORES DE COLETORES CONCENTRADORES COM REFLETOR SECUNDÁRIO

Mauricio Araújo Zanardi – mzanardi@feg.unesp.br

Petronio Masanobu Tanisho – tanisho@feg.unesp.br

Universidade Estadual Paulista- UNESP Campus de Guaratinguetá, Departamento de Energia

2.4 Coletores de concentração e fogões solares

Resumo. Neste trabalho é estudada a distribuição de radiação ao redor de absorvedores cilíndricos de coletores solares cilíndrico-parabólicos com refletor secundário. É também determinado o fator de interceptação do coletor, que representa a parcela da energia incidente que pode ser aproveitada. A formulação numérica desenvolvida é baseada no método de Monte Carlo, na qual a energia incidente é subdividida em “pacotes” de energia e o caminho percorrido por cada pacote é seguido até que este atinja o absorvedor ou se perca. Os possíveis caminhos são determinados através das leis de reflexão de espelhos e a escolha da posição e direção de incidência de cada pacote no coletor é feita através de variáveis aleatórias cujas probabilidades de ocorrência respeitam o modelo de distribuição de energia proveniente do Sol. Foram simuladas tanto condições ideais de construção e operação como também considerando erros de apontamento do coletor. Os resultados obtidos demonstram um ganho significativo na energia total coletada quando se utiliza o refletor secundário, principalmente nos casos onde existem erros de apontamento do coletor.

Palavras-chave: Coletores concentradores, refletor secundário, método de Monte Carlo

1. INTRODUÇÃO

Os coletores solares podem ser classificados como coletores planos (não concentradores) e concentradores. As características de operação dos coletores planos já foram bastante estudadas e são bem conhecidas. Nesses dispositivos, a temperatura do fluido de trabalho é limitada a valores relativamente baixos.

Dentre os coletores concentradores que formam imagem, os mais comuns são aqueles que estão na categoria de coletores com linha focal. As dificuldades de uso deste tipo de coletor estão relacionadas principalmente com problemas de seguimento do movimento solar e erros de apontamento. Quanto maior a concentração mais sensível será o coletor aos erros citados.

O uso de refletores secundários foi então proposto para tentar facilitar a operação deste tipo de coletor. Colares Pereira et al (1991) propuseram o uso de refletores múltiplos em coletores cilíndrico-parabólicos com absorvedores cilíndricos. Foi estudado o uso de um segundo estágio tipo CPC (coletor de parábola composta), montado dentro de um tubo de vidro evacuado, que também contém o tubo absorvedor. Foi mostrado que as perdas térmicas seriam pequenas e tornaria possível alcançar temperaturas suficientes para a produção de vapor em pressões compatíveis com as plantas de geração, usando um coletor com seguimento solar em somente um eixo.

Mills (1995) apresenta um estudo para se determinar formas do refletor secundário a fim de se obter coletores com concentração próxima às máximas possíveis. Richter (1996) mostra a análise ótica de um sistema formado por um refletor primário estacionário com forma de um semi-cilindro e um refletor secundário que podia girar ao redor do eixo de simetria do refletor primário. Este tipo de conjunto apresenta a vantagem da parte móvel do sistema possuir uma massa reduzida o que facilita mecanicamente a construção do mesmo.

Spirkl et al (1997) apresentam um estudo da forma ótima do refletor secundário utilizando o método de traçado de raios, considerando perdas por reflexões múltiplas, efeito de sombreamento do refletor principal pela presença do secundário e radiação solar não uniforme.

O objetivo do presente trabalho é estudar a distribuição de radiação ao redor do absorvedor do sistema e a influência do erro de apontamento no desempenho de um coletor solar cilíndrico-parabólico com refletor secundário fixo e com a forma de um CPC. Estas informações são importantes para uma avaliação da qualidade do sistema e das vantagens de se aumentar o custo inicial do sistema causado pela introdução do refletor secundário. Muitos outros fatores devem ser incorporados, tais como, erros de construção dos refletores, erros de posicionamento do absorvedor e do refletor secundário. Entretanto, a introdução dos mesmos não é apresentada neste trabalho. Uma visão geral de outros erros que devem ser considerados sobre a distribuição de radiação em absorvedores de coletores solares pode ser encontrada em Jones e Wang (1995).

2. GEOMETRIA DO COLETOR

O modelo de simulação desenvolvido foi baseado no coletor esquematizado na Fig. 1 na qual estão representados os parâmetros geométricos que definem os dois espelhos. Assim, para o refletor primário, A_b representa a área de abertura, r_f é o valor da distância de cada ponto do refletor à origem do sistema de eixos colocado no foco do espelho, θ é ângulo que define a posição dos pontos na superfície do refletor e f é a distância focal. Para o refletor secundário, a posição de quaisquer de seus pontos pode ser caracterizada pelo segmento de reta t que é tangente ao absorvedor, pelo ângulo γ e pelo raio R do tubo absorvedor.

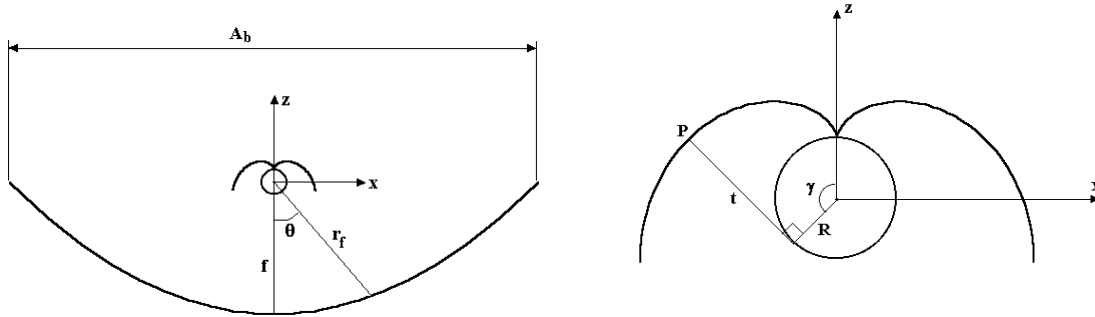


Figura 1 – Parâmetros geométricos do coletor

Utilizando estas variáveis, pode-se definir a geometria do refletor primário através das expressões :

$$A_b = \frac{4f \sin \theta_r}{1 + \cos \theta_r} \quad r_f = \frac{2f}{1 + \cos \theta} \quad x = r_f \sin \theta \quad e \quad z = r_f \cos \theta \quad (1)$$

e a do secundário por :

$$x = R \sin \gamma - t \cos \gamma \quad y = -R \cos \gamma - t \sin \gamma \quad e \quad t = R \gamma \quad (2)$$

sendo θ_r o ângulo de abertura do refletor.

3. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO

O método de Monte Carlo é baseado em seqüências chamadas de cadeias de Markov. A cadeia de Markov é uma seqüência de eventos simples com a condição de que a probabilidade de cada evento deve independe dos eventos anteriores. Assim sua aplicação depende da especificação de uma seqüência de eventos independentes, e da determinação das probabilidades associadas a cada evento da seqüência.

A aplicação do método de Monte Carlo em problemas de radiação foi proposta por Howell (1965), como uma ferramenta poderosa para solucionar as equações integrais resultantes da modelagem de troca térmica entre superfícies radiantes. O processo de aplicação do método consiste em subdividir a energia total envolvida na troca térmica em quantidades discretas, ou “pacotes” indivisíveis de energia, e seguir cada “pacote” até sua absorção. O caminho que cada “pacote” irá percorrer é determinado através de uma seqüência de números aleatórios em combinação com a densidade de probabilidade acumulada de cada evento. Ao final do processo, uma simples contagem do número de pacotes absorvidos por cada superfície dá a estimativa da energia recebida ou perdida por esta superfície. Logicamente, os processos físicos de emissão, reflexão e absorção da energia radiante têm que ser respeitados, sendo isto conseguido através da especificação correta das probabilidades de cada evento.

Como as soluções obtidas por este método são médias dos resultados obtidos de um número finito de amostras, eles irão sofrer flutuações ao redor da média. Quanto maior for o número de valores utilizados, mais representativos serão os resultados obtidos. Uma forma de se estimar a qualidade dos resultados é se fazer uma análise da variância dos resultados em relação à média obtida.

Para um número N finito de amostras, cada uma das quais composta por um certo número de eventos, a variância pode ser calculada através de :

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \right] \quad (3)$$

sendo P_i o valor obtido na amostra i e $\bar{P}$ o valor médio. Das propriedades da função normal é sabido que a probabilidade da média $\bar{P}$ estar entre $\pm s$ da média verdadeira é 68%, entre $\pm 2s$ é 95% e $\pm 3s$ é 99.7%.

No problema em estudo, a energia proveniente do sol e que atinge a área de abertura do coletor será subdividida em um certo número de pacotes. A seqüência de eventos, para cada pacote, terá a seguinte ordem:

- 1- determinação do ponto de reflexão no espelho primário;
- 2- determinação dos ângulos de incidência e reflexão;
- 3- verificação se o pacote atinge ou não o absorvedor. Caso isto ocorra, é determinada a posição onde o pacote atingiu e se reinicia o processo com novo pacote;
- 4- verificar se atinge o refletor secundário ou se é perdido. Se for perdido, um novo pacote é considerado;
- 5- determinação do ponto de intercepção no refletor secundário e os ângulos de incidência e reflexão;
- 6- determinação do ponto no qual o pacote incide no absorvedor. Pode ainda ocorrer o caso em que o pacote não atinge o absorvedor. Neste caso têm-se duas possibilidades: ele atinge novamente o refletor primário ou ele é perdido. Neste trabalho optou-se por considerar perdidos todos os pacotes que não incidam sobre o absorvedor após reflexão no secundário.

Os dois primeiros passos desta seqüência dependem de variáveis aleatórias e os demais são puramente geométricos visto que foi considerado que os dois refletores são espaciais com refletividade unitária.

A posição de reflexão do pacote no refletor primário foi determinada considerando-se uma distribuição uniforme da radiação solar sobre toda a área de abertura. Desta forma, a distribuição de probabilidade associada a cada ponto x ao longo da linha A_b deve uniforme, e pode-se então escrever:

$$x = A_b (S - 0,5) \quad (4)$$

sendo S um número aleatório entre 0 e 1.

Os ângulos de reflexão são determinados de acordo com o modelo de radiação solar adotado. Neste caso, escolheu-se um modelo uniforme, onde a distribuição de radiação solar incidente sobre um ponto do coletor é uniformemente distribuída em um cone com ângulo de 16° , conforme mostrado na Fig. 2.

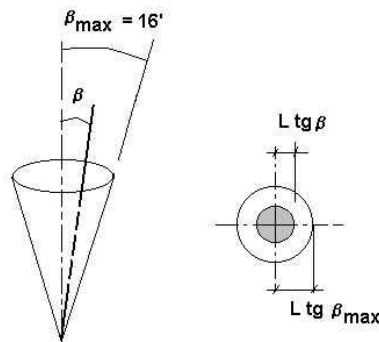


Figura 2 – Ângulo de visão do Sol

Desta forma, para se ter uma distribuição uniforme sobre toda a área da seção transversal do cone, o ângulo de incidência em relação ao eixo normal à área de abertura deve seguir a seguinte relação:

$$S = \frac{r^2}{R^2} = \frac{\text{tg}^2 \beta}{\text{tg}^2 \beta_{\max}} \quad (5)$$

Para o posicionamento do raio refletido, necessita-se ainda do ângulo de azimuth ψ , conforme mostrado na Fig.3. Como a distribuição é uniforme,

$$\psi = 2\pi S \quad (6)$$

e então, o raio refletido pode ser representado pelo vetor $\vec{u}$ como esquematizado na Fig. 3.

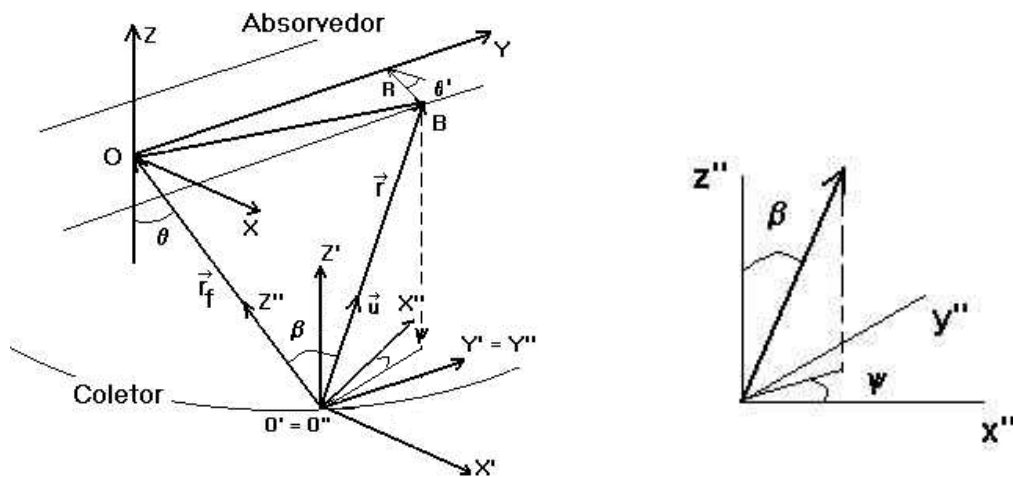


Figura 3 – Reflexão no espelho primário

A determinação do ponto B de interceptação pelo absorvedor é feita através da soma vetorial

$$\vec{O'B} = \vec{OB} + \vec{O'O} = (R \cos \theta' - r \sin \theta) \vec{i} + y' \vec{j} + (R \sin \theta' + r \cos \theta) \vec{k} \quad (7)$$

$$\vec{O'B} = A_r \vec{u} \quad (8)$$

com

$$\vec{u} = (\cos\theta \sin\beta \cos\psi - \sin\theta \cos\beta) \vec{i} + (\sin\beta \sin\psi) \vec{j} + (\sin\theta \sin\beta \cos\psi + \cos\theta \cos\beta) \vec{k} \quad (9)$$

Igualando-se as expressões (7) e (8) gera-se um sistema de equações com três incógnitas e a solução deste sistema permite determinar o ponto de interceptação do raio refletido com o absorvedor (ponto B). A expressão que permitirá calcular A_r será uma equação de segundo grau. São possíveis, portanto, três tipos de solução duas raízes diferentes, caso em que se deve considerar a de menor módulo; duas raízes iguais, ou seja o raio é tangente ao absorvedor; ou nenhuma raiz real, sendo que neste caso o raio não atinge o tubo.

Quando um pacote não atinge o absorvedor, deve-se então continuar seguindo sua trajetória, e isso leva ao espelho secundário. Neste caso deve ser verificado inicialmente em qual dos lados do secundário o pacote incide, como mostrado na Fig. 4. Uma vez estabelecido o lado, pode-se determinar o ponto P de incidência através da solução da Eq. (10) ou Eq. (11).

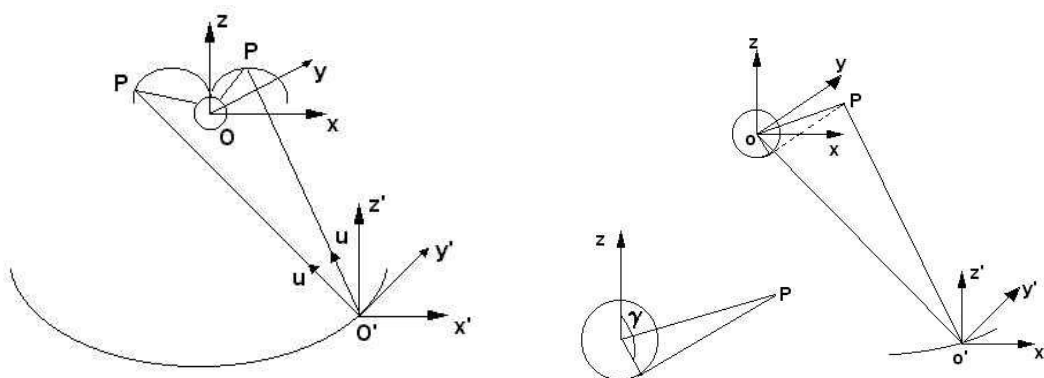


Figura 4 – Reflexões no espelho secundário

Baseado na Fig. 4 pode-se escrever que a soma do vetor $\overrightarrow{O'O}$ com $\overrightarrow{OP}$ resulta no vetor $\overrightarrow{O'P}$. Escrevendo estes vetores em relação ao sistema de eixos xyz e utilizando as expressões (2) para o espelho secundário, obtém-se, após simplificações, para pacotes que incidem no lado direito do refletor:

$$\sin \gamma (\gamma a_1 - a_3) + \cos \gamma (a_3 \gamma + a_1) = -\frac{r_f}{r} (a_1 \cos \theta + a_3 \sin \theta) \quad (10)$$

e no lado esquerdo :

$$\cos \gamma (a_1 - \gamma a_3) + \sin \gamma (a_3 + \gamma a_1) = -\frac{r_f}{R} (a_1 \cos \theta + a_3 \sin \theta) \quad (11)$$

Nestas equações, a_1 , a_2 e a_3 são as coordenadas nas direções x, y, z , respectivamente, do vetor $\vec{u}$ representado na Eq. (9). A solução desta equação permite calcular γ do ponto de incidência e conseqüentemente os valores das coordenadas x e z do ponto. É possível se obter também a coordenada y , porém, como está se considerando um coletor infinito, não há necessidade de se obter este valor. Se o valor de γ encontrado for superior ao valor máximo de construção do refletor ou se não existirem raízes no intervalo $(0, \pi)$, o pacote foi perdido e reinicia-se o processo com um novo pacote.

Determinado o ponto P, deve-se definir o sistema de eixos $x''y''z''$, mostrado na Fig.5, de tal forma versor da direção z'' é normal a P, o da direção x'' é tangente ao refletor no plano xz e o da direção y'' é tangente no plano yz . Escreve-se então o vetor $\vec{u}$ neste novo sistema de eixos, utilizando uma rotação em torno de y de um ângulo ξ na direção positiva. Faz-se então a reflexão, invertendo-se o sinal da componente z , obtendo-se o vetor resultante $\vec{u}_s$ no sistema $x''y''z''$. Uma nova rotação em torno de y de um ângulo ξ , agora no sentido negativo, permite se conhecer o vetor unitário $\vec{u}_s$ no sistema principal xyz .

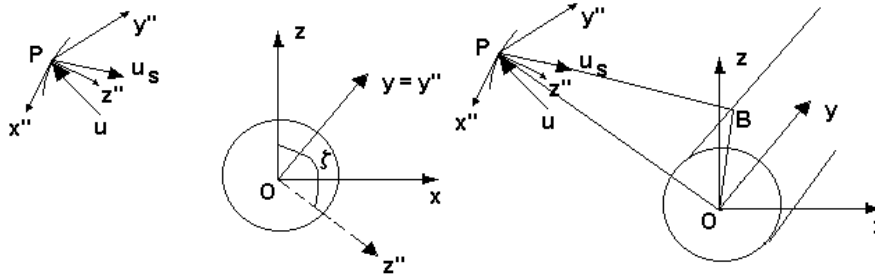


Figura 5 – Reflexão no espelho secundário

Novamente através da soma dos vetores $\vec{OP} + \vec{PB} = \vec{OB}$ obtêm-se as coordenadas do ponto B e localiza-se a posição de incidência do pacote no absorvedor. O procedimento é similar ao feito para o espelho primário obtendo-se também um sistema de 3 equações com três incógnitas que são as coordenadas do ponto de interceptação.

Em algumas configurações é possível que o pacote atinja as costas do refletor secundário, e portanto perdido. Analisando a Fig.6, existe um ângulo crítico a partir do qual esta perda é possível. Este ângulo pode ser calculado pela Eq. (12).

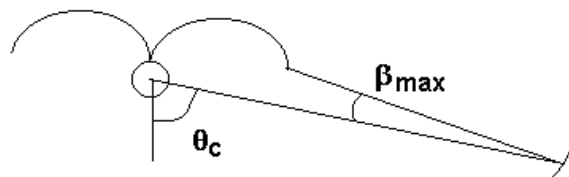


Figura 6 – Ângulo crítico

$$2f a_1^* \frac{\cos \theta_c}{1 + \cos \theta_c} - 2f a_3^* \frac{\cos \theta_c}{1 + \cos \theta_c} = \sin \gamma_{ab} (\gamma_{ab} a_1 - a_3) + \cos \gamma_{ab} (a_3 \gamma_{ab} + a_1) \quad (12)$$

sendo os valores a_i^* as coordenadas do vetor $\vec{u}$ calculadas com $\beta_{\max}$ e $\psi = 0$, e γ_{ab} é o valor do ângulo máximo do refletor secundário.

A influência do desvio de apontamento do coletor na distribuição de radiação foi também considerada. Este desvio irá causar uma distribuição assimétrica da radiação ao redor do absorvedor e em muitos casos, a diminuição do fator de interceptação.

Sua introdução no modelo desenvolvido é bastante simples e consiste da alteração somente das características do vetor $\vec{u}$. A única alteração necessária será somar o valor do ângulo de desvio δ ao valor de θ . A configuração dos sistemas de eixos da Fig.3 torna-se agora a apresentada na Fig. 7. O vetor OB, escrito no sistema de eixos $x''y''z''$

para o qual se definem os ângulos β e ψ , deve então ser rotacionado de um ângulo $\theta + \delta$ em relação ao eixo y para se obter as coordenadas nos sistema xyz . Assim, as equações que permitirão determinar as coordenadas do ponto B serão:

$$R \cos \theta' - r_f \sin \theta = a_r (\cos (\theta + \delta) \sin \beta \cos \psi - \sin (\theta + \delta) \cos \beta) \quad (13)$$

$$y' = a_r \sin \beta \sin \psi \quad (14)$$

$$R \sin \theta' + r_f \cos \theta = a_r (\sin (\theta + \delta) \sin \beta \cos \psi + \cos (\theta + \delta) \cos \beta) \quad (15)$$

e a solução deste sistema é similar à comentada anteriormente com pequena alteração dos coeficientes.

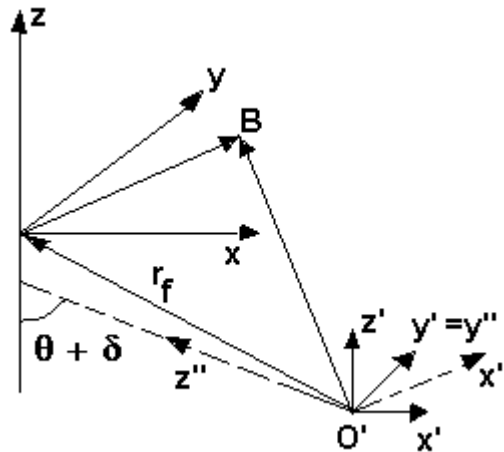


Figura 7 – Configuração dos sistemas de eixos com desvio de apontamento

4. RESULTADOS

Inicialmente, com o intuito de validar o programa de simulação desenvolvido, considerou-se um coletor cilíndrico parabólico sem refletor secundário, cujo estudo de distribuição de radiação no absorvedor foi feito por Rosa (1984). Os resultados obtidos variando-se o ângulo de abertura e a relação R/f são mostrados na Fig. 8. Estes resultados representam valores médios de 6 eventos com 100.000 pacotes cada, e os resultados são praticamente idênticos aos apresentados por Rosa (1984).

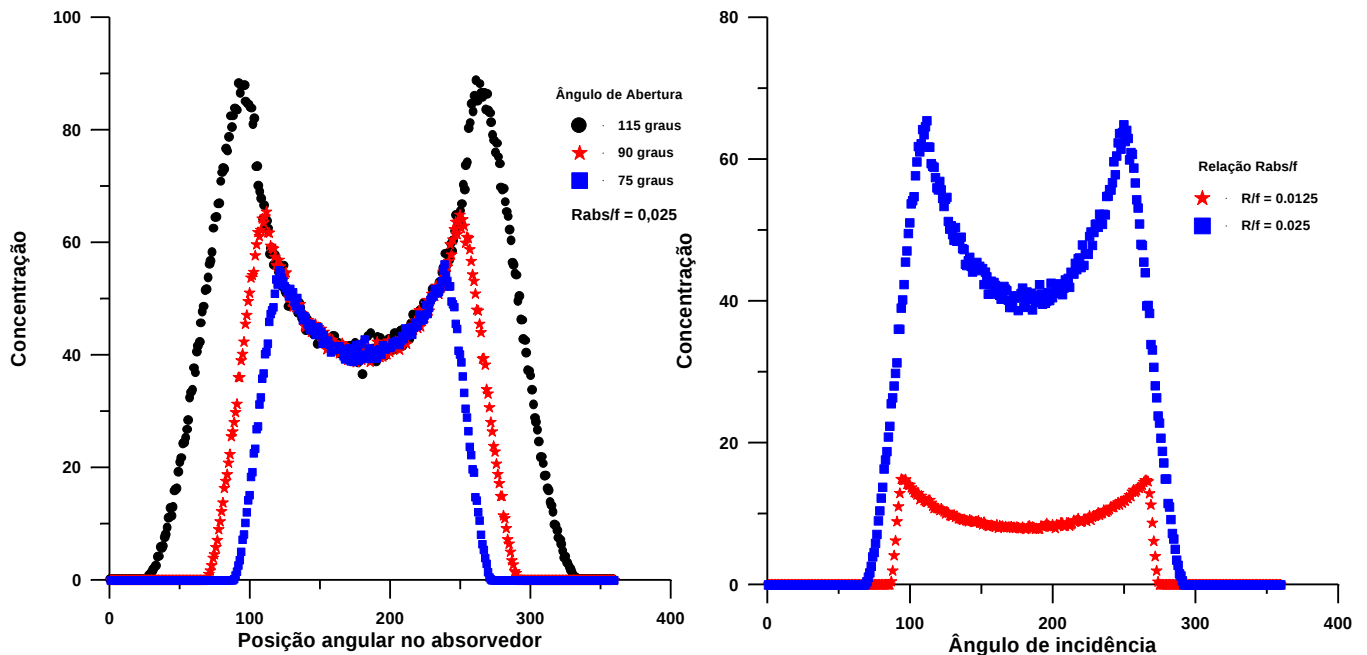


Figura 8 – Distribuição de concentração (a) em função do ângulo de abertura e $R/f = 0,025$ e (b) em função de R/f para um ângulo de abertura de 90°

Na Fig. 9 estão representados os valores dos fatores de interceptação em função da relação R/f para alguns ângulos de abertura do refletor e também são compatíveis com os resultados apresentados por Rosa (1984).

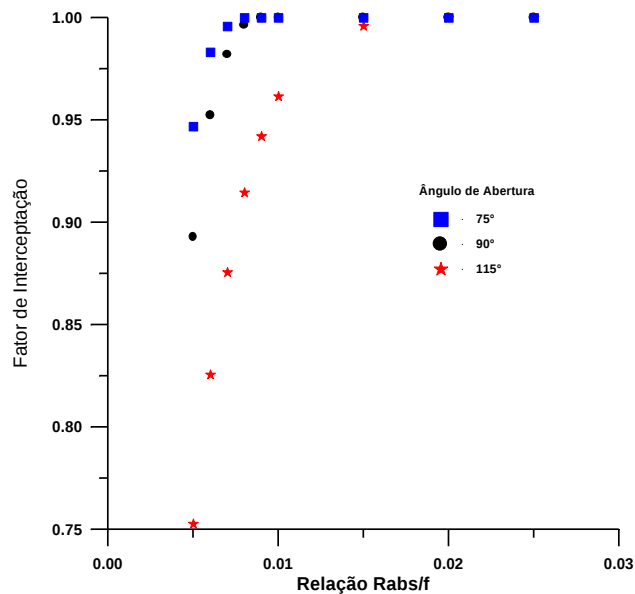


Figura 9 – Fatores de interceptação

Uma vez validado o procedimento desenvolvido, foram realizadas simulações com a inclusão do refletor secundário e alguns dos resultados obtidos são apresentados e comentados. Todos os valores foram obtidos como médias de seis simulações e considerando que a energia incidente sobre o coletor fosse subdividida em 1.000.000 pacotes.

Inicialmente, analisar-se-á o comportamento do fator de interceptação quando da inclusão do refletor secundário.

A Fig. 10a mostra o fator de interceptação para um coletor com ângulo de abertura do espelho primário de 90° e do refletor secundário (γ) de 3 radianos, variando-se a relação raio do absorvedor/distância focal e o erro de apontamento do sistema, em relação ao sol. Para o coletor com apontamento perfeito, identificado como ideal na legenda, verifica-se que para concentrações globais (relação entre a área total de abertura do refletor primário e a área do absorvedor) muito elevadas ($r/f < 0,007$) existe uma ligeira melhora no fator de interceptação com o uso do refletor secundário. Nota-se ainda que para concentrações menores, a presença do refletor secundário reduz o fator de interceptação. Isto ocorre pois parte da energia que incidiria sobre o absorvedor acaba incidindo sobre as costas do refletor secundário. Quando ocorre um desvio no apontamento, a presença do refletor secundário aumenta o fator de interceptação de forma bastante significativa.

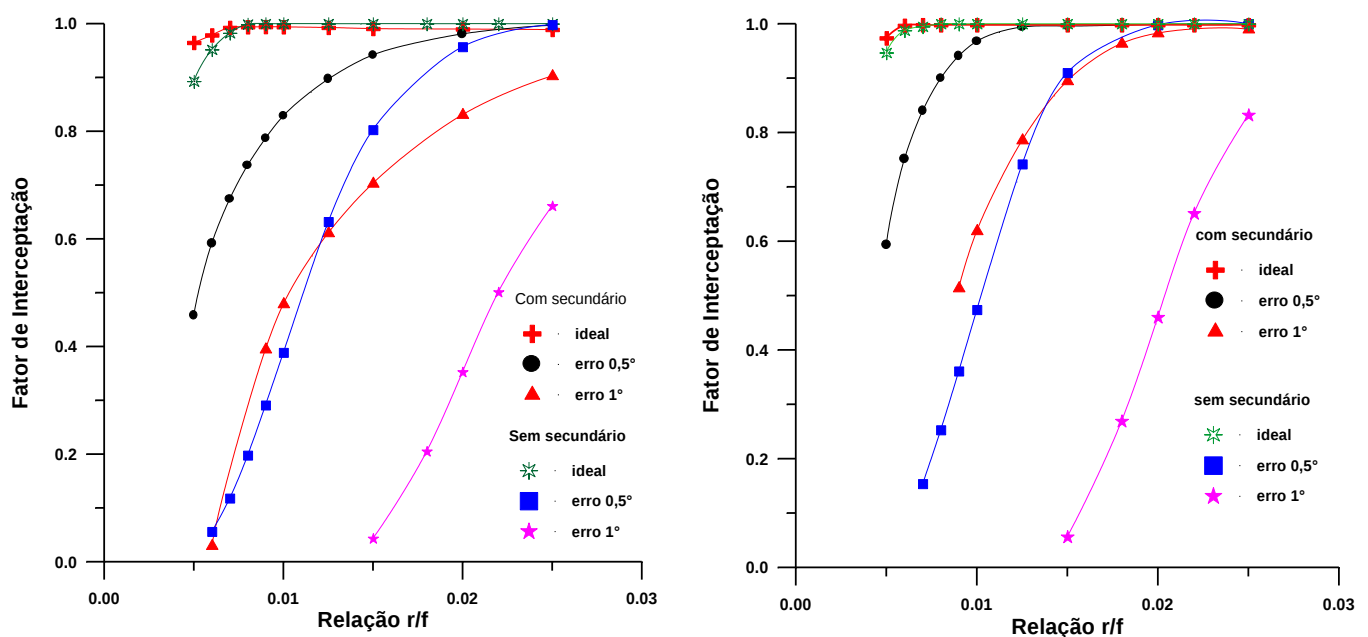


Figura 10 - Fator de Interceptação para um coletor com ângulo de abertura do refletor primário de (a) 90° e (b) 75°

Na Fig. 10b estão as variações dos mesmos parâmetros para um refletor primário com ângulo de abertura de 75° . O efeito da diminuição do fator de interceptação para o coletor ideal é menos sensível pois o ângulo crítico, definido como o ângulo no refletor primário a partir do qual existe a possibilidade de se ter energia incidindo nas costas do refletor secundário, é aproximadamente igual ao ângulo de abertura do refletor primário.

Na Fig. 11 apresenta-se a variação do fator de interceptação em função do ângulo de abertura do refletor secundário para um refletor primário com ângulo de 90° . Nota-se que apesar da quantidade de energia que atinge as costas do secundário aumentar com γ , o fator de interceptação não decresce por este fator. Isto se deve ao fato de que a quantidade de energia que passa a ser recuperada é maior que aquela que atinge as costas do refletor.

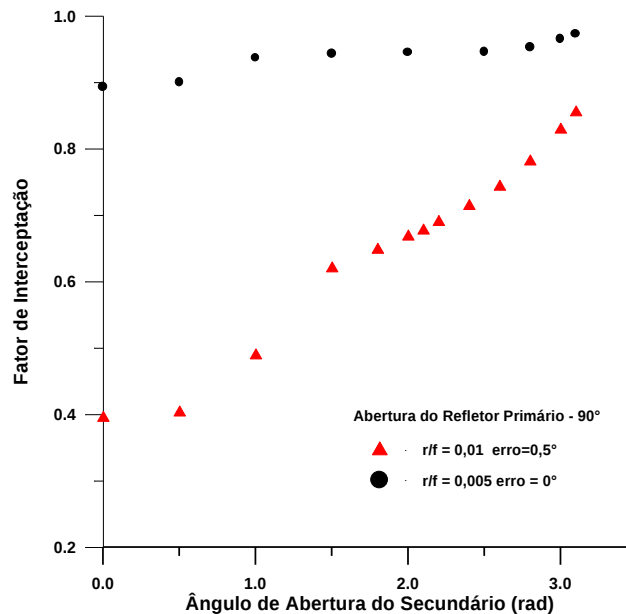


Figura 11 - Influência do ângulo de abertura do secundário sobre o fator de interceptação.

Da análise todos estes gráficos pode-se ainda verificar que, quando o desvio de apontamento cresce, existe ainda uma grande quantidade de energia que não é aproveitada. Uma forma de se melhorar a configuração do sistema é se modificar a geometria do espelho secundário. Esta modificação necessariamente irá resultar em uma maior área deste refletor e deve ser feita com critério pois irá aumentar a área sombreada do refletor primário. Neste trabalho não foram abordados os efeitos de sombra.

Uma vez determinadas as influências sobre o fator de interceptação, vamos analisar a distribuição de radiação, ou de concentração local, com a inclusão do refletor secundário. A figura 12 é a representação da distribuição de concentração local para um coletor corretamente apontado, com relação $r/f = 0,005$, com e sem a presença do refletor secundário.

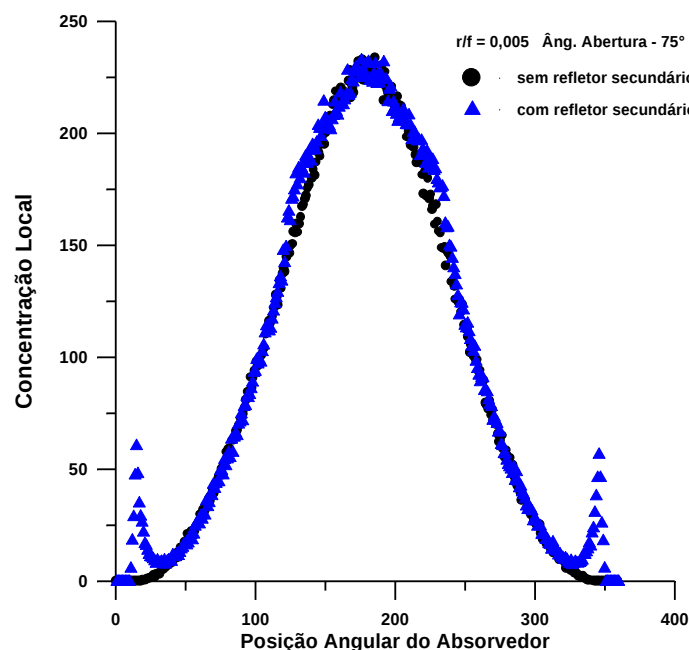


Figura 12 - Concentração local no absorvedor

Nota-se que a energia recuperada pelo refletor secundário é direcionada para duas regiões em cada lado do absorvedor. Nas figuras relacionadas à concentração local, o ângulo no absorvedor é contado a partir do eixo z do sistema principal e cresce no sentido horário. Esta característica é totalmente devida ao tipo de refletor secundário adotado.

Para mostrar a influência do desvio de apontamento representamos, na Fig. 13, as distribuições de concentração local em um coletor com 75° de abertura do refletor primário sem a presença do refletor secundário e com a inclusão do segundo refletor. O principal efeito, além da diminuição do fator de interceptação, é a perda de simetria da distribuição.

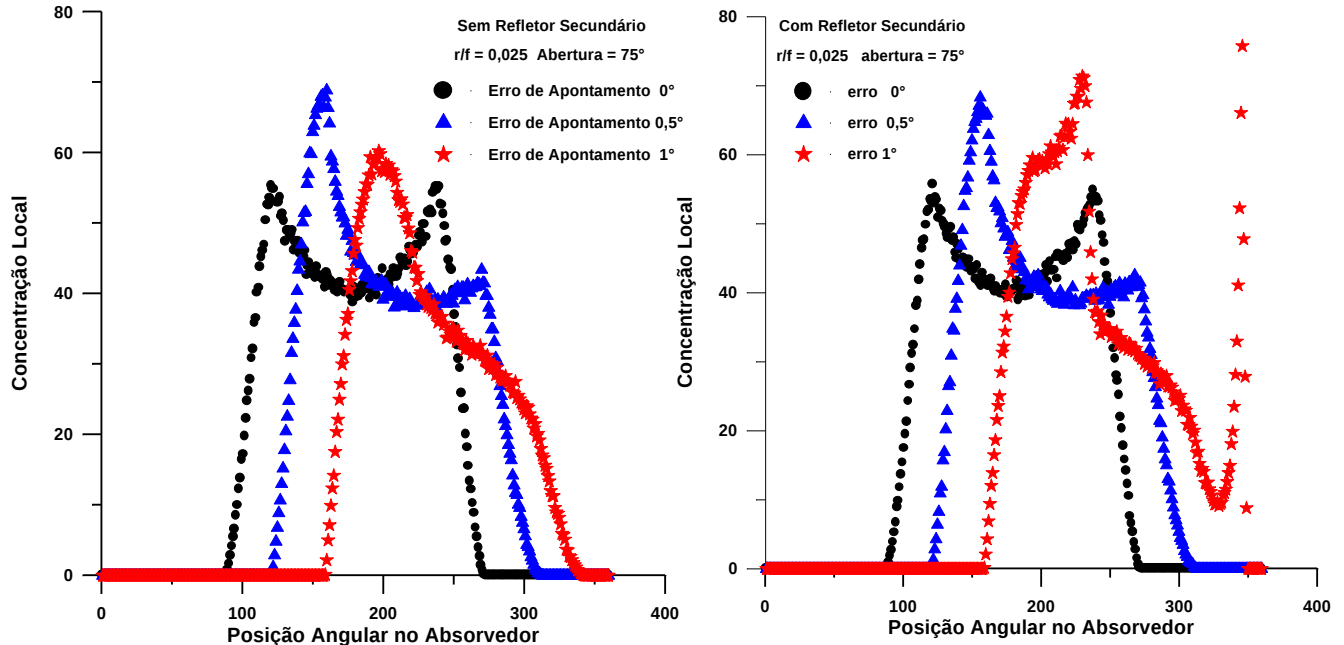


Figura 13 - Concentração local em função do desvio de apontamento (a) sem refletor secundário (b) com refletor secundário

Verifica-se que neste caso, como a concentração global não é muito elevada, para pequenos ângulos de desvio o refletor secundário não tem função. Quando o desvio aumenta, este refletor passa a coletar grande parte da energia perdida e a distribuição se deforma devido aos picos de concentração induzidos por este refletor. Este fato é mais acentuado quando se aumenta a concentração global. Na Fig. 14 são representadas as distribuições de concentrações locais para um coletor com $r/f = 0,01$ e 90° de abertura do primário. São mostradas curvas para o coletor ideal e com $0,5^\circ$ de desvio de apontamento. Para este valor de desvio, o fator de interceptação sem o secundário é de 0,39, ou seja, 61% da energia incidente é perdida. A inclusão do refletor secundário eleva este fator para 0,83.

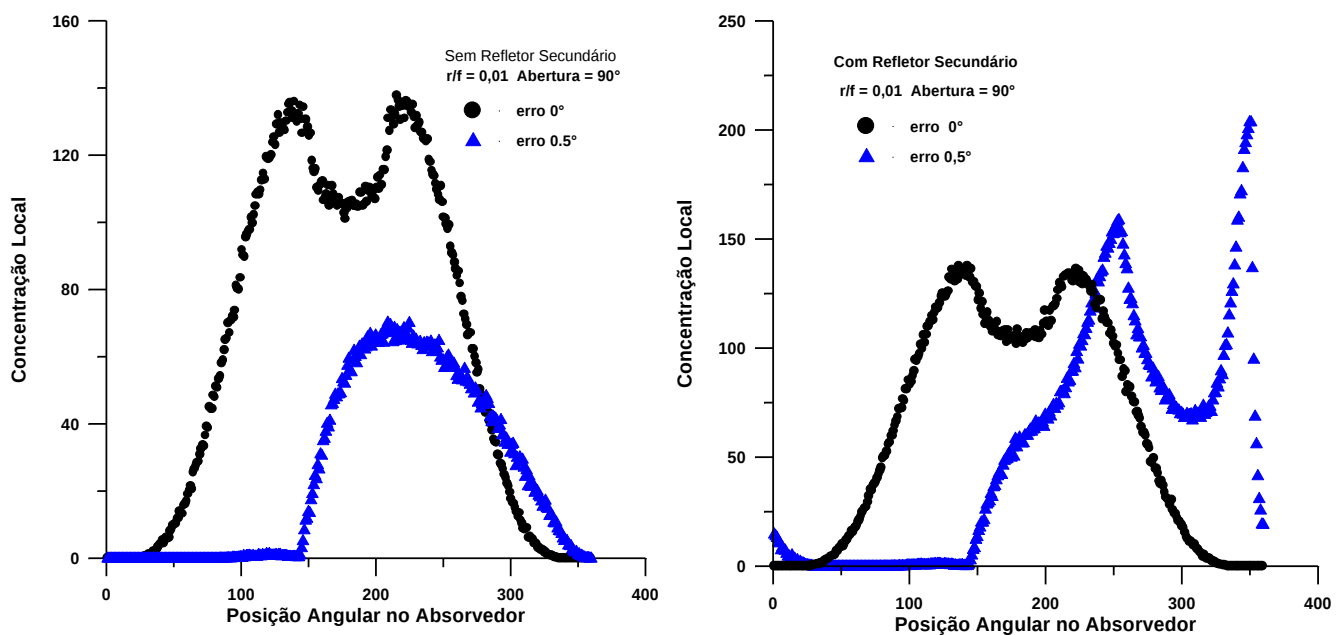


Figura 14 - Concentração local em função apontamento (a) sem refletor secundário (b) com refletor secundário

5. CONCLUSÕES

Conforme foi mostrado, a aplicação do método de Monte Carlo permitiu se determinar fatores de interceptação e distribuição de radiação em coletores com refletor secundário, mostrando ser uma técnica de implementação relativamente simples.

A presença do refletor secundário se mostrou bastante importante quando se trabalha com altas concentrações e incertezas no apontamento. Para concentrações baixas e apontamento perfeito, a presença do refletor secundário diminui a quantidade de energia interceptada e portanto deve ser evitada sua utilização.

Para se ter uma análise completa, deve-se introduzir outros efeitos de construção e operação, tais como o efeito de sombreamento causado pelo refletor secundário, erros de alinhamento e posicionamento do absorvedor em relação à linha focal e erros de curvatura decorrentes da construção dos refletores.

REFERÊNCIAS

- Collares-Pereira, M., Gordon, J.M., Rabl, A., Winston, R. 1991. High Concentration Two-Stage Optics for Parabolic Trough Solar Collectors with Tubular Absorber and Large Rim Angle, *Solar Energy*, vol. 47, n. 6, pp. 457-466.
- Howell, J.R. 1965. Calculation of Radiant Heat Exchange by the Monte Carlo Method, ASME Paper n° 65-WA/HT-54, ASME.
- Jones, P.D. and Wang, L. 1995. Concentration Distributions in Cylindrical Receiver/Paraboloidal Dish Concentrator Systems, *Solar Energy*, vol. 54, n. 2, pp. 115-123.
- Mills, D.R. 1995. Two-Stage Solar Collectors Approaching Maximal Concentration, *Solar Energy*, vol. 54, n. 1, pp. 41-47.
- Spirkl, W., Ries, H., Muschaweck, J., Timinger, A. 1997. Optimized Compact Secondary Reflectors for Parabolic Troughs with Tubular Absorbers, *Solar Energy*, vol. 61, n. 3, pp. 153-158.
- Rosa, E.S. 1984. Estudo da Distribuição de Radiação em Absorvedor Cilíndrico Usado em Refletor Solar Cilíndrico Parabólico. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica- UNICAMP.
- Richter, J.L. 1996, Optics of a Two-Trough Solar Concentrator, *Solar Energy*, vol. 56, n. 2, pp.191-198.

RADIATION DISTRIBUTION AND INTERCEPTION FACTORS IN ABSORBERS OF PARABOLIC TROUGH SOLAR COLLECTORS WITH SECONDARY REFLECTOR

Abstract. *The purposes of this work are to study of the radiation distribution around cylindrical receivers of two-stage parabolic trough solar collectors and to determine the interception factor, defined as the ratio between the absorbed energy and the incident energy, as a function of the aperture angle, the global concentration and tracking errors. The numerical procedure adopted is based on the Monte Carlo method in which the total incident energy is subdivided into indivisible bundles and the paths of these bundles are followed till the bundle hits the absorber. The feasible paths are determined by the optical and geometric characteristics of the collector and also the incident energy distribution. Simulations for ideal operation conditions and operation with tracking errors are presented and the results show the system performance enhancement in cases where tracking errors are present.*

Key words: Parabolic trough collectors, two stage parabolic collector, Monte Carlo method