

SIMULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO SOLAR CONCENTRADO EM ABSORVEDORES CIRCULARES DE CONCENTRADORES CILINDRO PARÁBOLA

Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho – manoel.henrique@yahoo.com.br
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Pesqueira.
Naum Fraidenraich – nf@ufpe.br
Olga de Castro Vilela – ocv@ufpe.br
Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear.

Resumo. O desempenho dos sistemas concentradores solares está relacionado a diversos fatores, entre eles destaca-se a forma com a qual, o fluxo concentrado que incide sobre o absorvedor. Utilizando-se uma nova abordagem desenvolvida com o objetivo de determinar a distribuição do fluxo em absorvedores de concentradores solares e que permite de forma versátil, ser utilizada com outras geometrias; apresenta-se neste trabalho, a aplicação desta abordagem com a geometria de concentradores do tipo calha parabólica e absorvedores cilíndricos de seção circular. Foi determinada a equação geométrica que permite a utilização da abordagem citada, a partir desta, foram apresentados resultados da distribuição de fluxo ao longo de um absorvedor circular, com raio 0,01m, utilizando-se diferentes funções de brilho solar. Também se simulou o impacto de diferentes valores de desvio óptico sobre a distribuição de fluxo, observou-se que tais desvios não provocam alterações significativas na forma da distribuição do fluxo.

Palavras-chave: Concentradores solares, Distribuição de fluxo, Erros ópticos.

1. INTRODUÇÃO

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.

Um dos aspectos centrais relativos 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.

Diversos autores (Rabl, 1976; Nicolás e Durán, 1980; Rabl et al., 1982; Fraidenraich, 2009; 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.

Uma nova abordagem do problema foi sugerida por Fraidenraich em 2009, consistente na identificação de raios interiores aos cones de radiação solar incidentes na abertura do concentrador, que atingem um determinado ponto (y) do absorvedor. A consistência desta metodologia foi testada por vários autores e numerosos exemplos de interesse na tecnologia de centrais solares térmicas foram elaborados (Pedrosa Filho et al., 2010; Pedrosa Filho et al., 2011).

A metodologia desenvolvida apresenta-se como uma solução versátil para a obtenção da distribuição de fluxo no absorvedor de concentradores solares. Naquele trabalho foram apresentadas as equações que compõem o modelo e um procedimento de representação gráfica (isolinhas $(\theta - \varphi)$). Escolhido um ponto (y) do absorvedor onde haverá de se calcular o fluxo de radiação que o atinge ($I(y)$), o método consiste em essência em identificar dentro de cada cone de radiação que se reflete na cavidade concentradora no ponto especificado pelo ângulo (θ), o raio (φ) que depois de refletido atinge esse ponto (y). Soma-se a intensidade de cada um dos raios que chegam no ponto (y) para obter a densidade de fluxo radiante ($I(y)$).

Em um segundo trabalho, Pedrosa Filho et al. (2012) utilizaram a metodologia para obter a distribuição de energia sobre o absorvedor de um concentrador, quando este está submetido a desvios ópticos determinísticos e estocásticos. Nesse trabalho foi apresentada uma nova formulação para a obtenção da função de aceitação angular de um concentrador parabólico tipo calha (2D) com absorvedor plano. A aplicação do modelo desenvolvido foi empregado recentemente nos sistemas de concentração que se empregam com maior frequência em sistemas solares térmicos (Fraidenraich et al., 2013).

Este artigo apresenta os resultados do emprego da metodologia citada à geometria de um concentrador parabólico linear (2D), porém, considerando a geometria circular do absorvedor. Inicialmente será efetuada uma breve descrição do modelo; em seguida, será representado o gráfico das isolinhas $(\theta - \varphi)$ para esta geometria e os resultados da distribuição de fluxo no absorvedor.

2. BREVE DESCRIÇÃO DO MODELO

A metodologia desenvolvida por Pedrosa Filho (2011) consiste em derivar uma relação geométrica $(\theta(\varphi, y))$, que pode ser desenvolvida para cada raio dentro do feixe solar, 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).

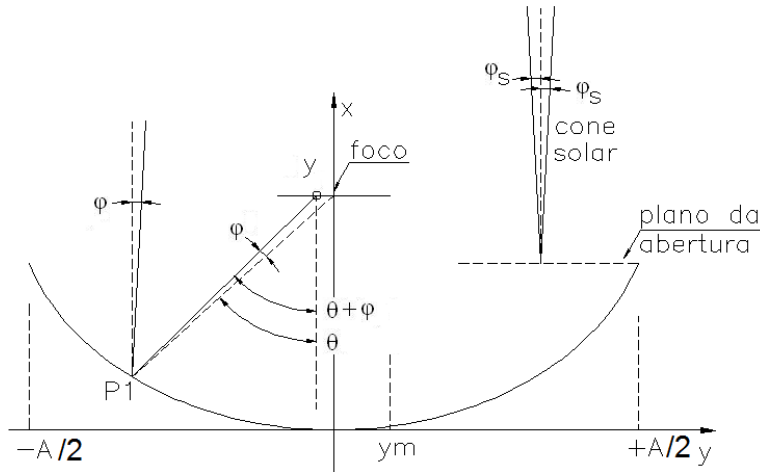


Figura 1 – Perfil de concentrador parabólico e feixe de raios que atingem a superfície do concentrador. Indica-se um raio φ , interior ao cone de largura φ_s , onde φ_s é o raio angular do Sol.

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 (Fig. 2). Por exemplo, na isolinha (y) está indicado o intervalo de raios, entre (φ_1) e (φ_2) , que incidem nele. Pode se observar também que todas as regiões do concentrador caracterizadas pelo ângulo (θ) iluminam a isolinha (y).

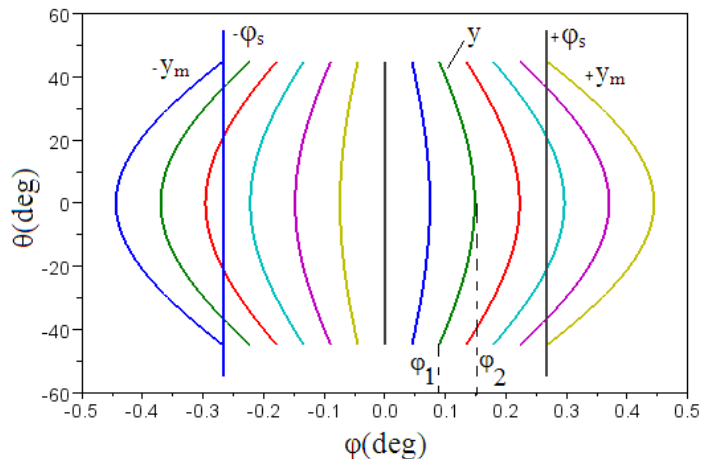


Figura 2 – Gráfico $(\theta - \varphi)$ de isolinhas (y) para uma parábola

Considerando a contribuição de cada raio dentro do feixe de energia incidente em determinado ponto (y) no absorvedor, é possível escrever a Eq. (1)

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

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

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

Na Eq. (2), o ângulo (φ) representa a posição de um raio dentro do feixe, (θ) 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) (Fig. 1). A função ($\varphi(\theta, y)$), apresentada na Eq. (2), é específica para concentradores cilindro parabólicos com absorvedor plano. Esta função é o componente principal do algoritmo a ser utilizado para o cálculo da função de distribuição no absorvedor.

3. UTILIZAÇÃO DO MODELO COM ABSORVEDOR CILÍNDRICO

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 Fig. 3 apresenta os principais parâmetros desta geometria que são relevantes para a aplicação do modelo.

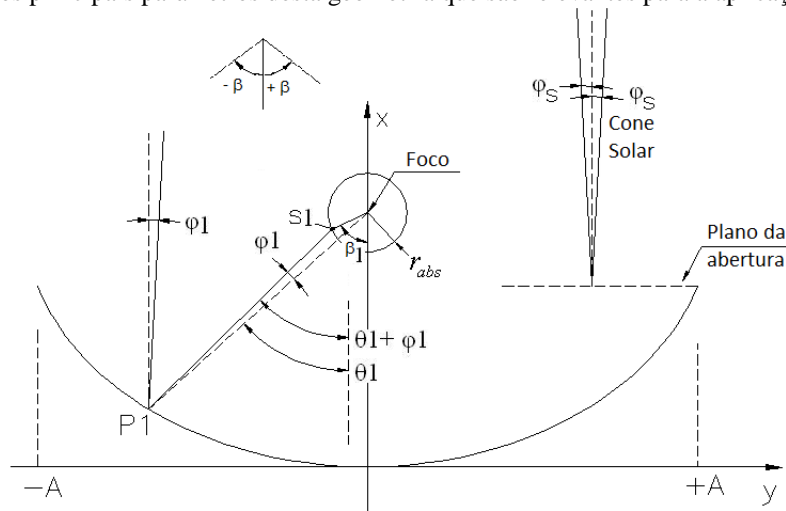


Figura 3 - parâmetros do concentrador parabólico com absorvedor cilíndrico

Segundo a Fig. 3, um cone de raios de abertura (φ_s), que contém o raio identificado por (φ_1), atinge a superfície refletora parabólica em um ponto (P_1). O eixo do cone solar (φ_s), da mesma forma que na geometria descrita no item 2, atinge o foco da parábola formando um ângulo (θ_1) com o eixo focal. O absorvedor tem raio (r_{abs}), o ângulo (β_1) indica a posição angular do ponto onde será calculada a densidade de fluxo em sua superfície, sendo tomado como positivo no sentido anti-horário e negativo no sentido horário. O raio identificado como (φ_1), após a reflexão do cone atinge o absorvedor cilíndrico no ponto (s_1), que corresponde à posição angular (β_1).

Considerando os parâmetros indicados, é possível obter a função $\varphi = \varphi(\theta, \beta)$ (Eq. (3)), na qual (β) é o parâmetro que identifica o local onde está sendo calculada a densidade de fluxo radiante. Fixado o valor de (β), a Eq. (3) permite obter para cada valor de (θ) o valor do raio (φ) ou, em forma equivalente, os pares (θ, φ) correspondentes a isolinha caracterizada como (β). O conjunto de isolinhas, para todos os possíveis valores de (β), compõem o diagrama de isolinhas que corresponde a esta geometria.

$$\tan(\varphi) = \frac{r_{abs} \sin(\theta - \beta)}{r - r_{abs} \cdot \cos(\theta - \beta)} \quad (3)$$

Na Eq. (3):

r_{abs} é o raio do 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 Fig. 4. 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°.

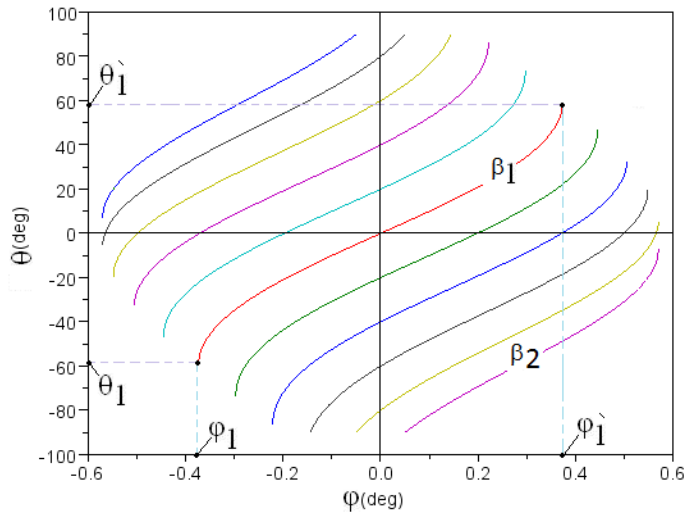


Figura 4 - Gráfico de isolinhas de concentrador parabólico com absorvedor cilíndrico de (0,01 m), distância focal de (1m) e ângulo de borda do concentrador (90°).

Observa-se, na Fig. 4, que, como cada isolinha representa um ponto na superfície do absorvedor, neste caso representado por sua posição angular, cada ponto é atingido por um intervalo de ângulos (φ) que pertencem ao cone solar. O ponto (β_1) na Fig. 4, que para a configuração da geometria apresentada corresponde ao ângulo igual a 0° , 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 afasta do centro ($\beta_1 = 0^\circ$), (β_2) por exemplo, uma menor porção do cone solar é aproveitada (valores extremos em abscissas). Além disso, verifica-se uma menor contribuição da superfície refletora para a iluminação de determinado ponto (os valores de θ estão compreendidos entre (-90°) e (-10°)).

A energia incidente em cada ponto da superfície do absorvedor obtém-se como a soma das contribuições de cada ponto da superfície refletora, utilizando-se a Eq. (4), análoga à Eq. (1) utilizada na descrição do modelo. A função $B(\varphi, \theta)$ representa o brilho da fonte de radiação do Sol para cada raio (φ) interior ao cone solar. O ângulo (φ) está relacionado com as variáveis (θ, β) (Eq. (4)).

$$I(\beta) = \int_{-\theta_r}^{\theta_r} B(\varphi(\theta, \beta)) \cdot \cos(\theta + \varphi(\theta, \beta)) \cdot d\theta \quad (4)$$

O resultado da integração é apresentado no gráfico da Fig. 5, que mostra a forma da distribuição de energia em cada posição angular da superfície do absorvedor cilíndrico.

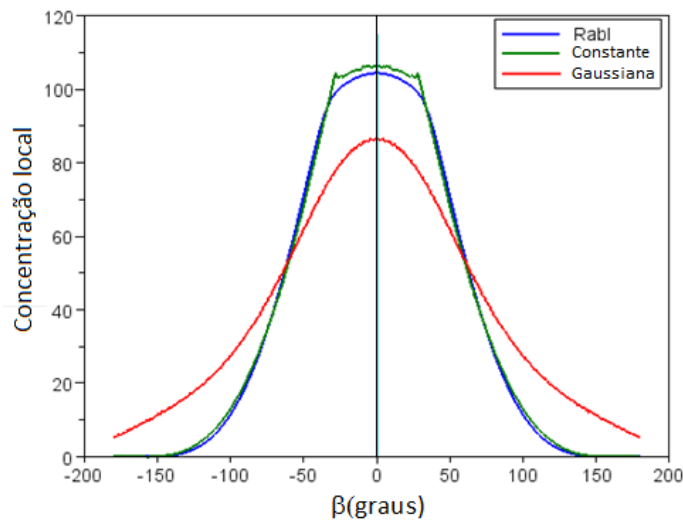


Figura 5 - Distribuição da energia sobre um absorvedor cilíndrico de concentrador parabólico. Diâmetro do absorvedor (0,01 m), distância focal de (1m) e ângulo de borda do concentrador (90°).

A Fig. 5 apresenta, como resultado da aplicação desta metodologia, a forma da distribuição de 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 erros ópticos gaussianos são considerados a radiação refletida envolve todo o absorvedor com um máximo de 86 sóis.

Adicionalmente, foram obtidas as distribuições de energia considerando-se um absorvedor com raio 0,1 m, e três valores de desvio óptico estocástico (σ_{tot}), os resultados são apresentados na Fig. 5.

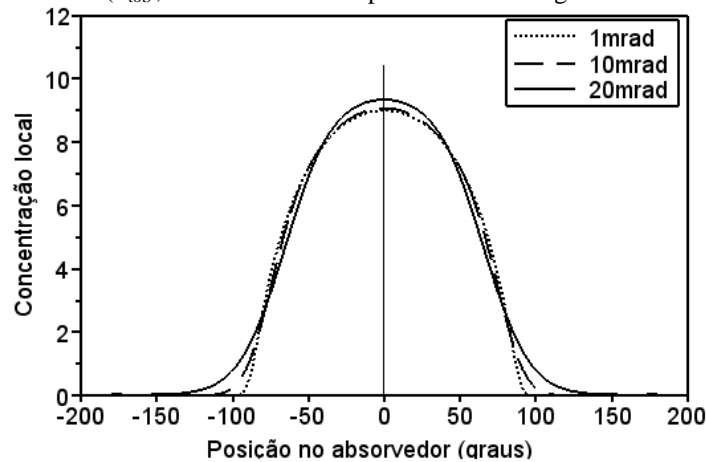


Figura 5 - Distribuição da energia sobre um absorvedor cilíndrico de concentrador parabólico. Diâmetro do absorvedor (0,1 m), distância focal de (1m) e ângulo de borda do concentrador (90°).

Observa-se na Fig. 5 que, com um aumento substancial do valor do desvio óptico, a distribuição angular de energia é levemente alterada. Porém, para diferentes desvios óticos, os intervalos que a distribuição abarca são diferentes. Para o desvio (σ_{tot}) de 1 mrad, a energia encontra-se distribuída no espaço angular de -90° a $+90^\circ$. Esta distribuição se estende para o intervalo angular entre $(-130^\circ$ a $+130^\circ)$ para 10 mrad e entre $(-150^\circ$ e $150^\circ)$ para 20 mrad. Contudo, observa-se que a intensidade da energia na região entre -75° e $+75^\circ$ não é afetada pela alteração do valor do desvio óptico.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificou-se a aplicação do modelo de isolinhas, que permite visualizar a interação entre os três elementos de um sistema concentrador, com um concentrador tipo calha parabólica e absorvedor cilíndrico. Analisando-se o gráfico de isolinhas para esta geometria, verificou-se que as posições angulares mais centrais do absorvedor não recebem raios refletidos de toda a superfície refletora. Foi possível a obtenção da distribuição de fluxo considerando três diferentes distribuições de brilho do cone solar. Considerando-se a ocorrência de desvios ópticos estocásticos, o modelo permitiu a obtenção da concentração local ao longo do absorvedor circular para três valores de desvio, observou-se que a distribuição entre as posições angulares de -75° e $+75^\circ$ não é afetada pela intensidade de valor do desvio óptico total.

Agradecimentos

Agradece-se ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo financiamento da pesquisa por meio da concessão de bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS

Fraidenraich, N.; Notas de aula da disciplina “Óptica Solar”, Grupo FAE, Departamento de Energia Nuclear, UFPE, 2009.

- Fraidenraich, N.; Pedrosa Filho, Manoel H. O.; Vilela, Olga C.; Gordon, Jeffrey M., Exact analytic flux distribution for two dimensional solar concentrators. Applied Optics, Vol.52, No. 19,1 July, 2013.
- 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.
- Pedrosa Filho, Manoel 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.
- Pedrosa Filho, Manoel H. O.; Fraidenraich, N.; Vilela, Olga C., Solução Analítica para a Distribuição de Energia em um Absorvedor Plano de um Concentrador Cilindro Parabólico. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, v. 15, p. 11-19, 2011.
- Pedrosa Filho, Manoel H. O.; Fraidenraich, N.; Vilela, Olga C., Utilização do Modelo de Identificação de Raios (RIAID) para Determinação da Distribuição de Intensidade na Região do Absorvedor e Parâmetros Ópticos de um Concentrador Cilíndrico Parabólico. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, v. 16, p. 08.103-08.112, 2012.
- Nicolás, R. O., Durán, J. C. Generalization of the two-dimensional optical analysis of cylindrical concentrators. Solar Energy, v. 25, p. 21-31, 1980.
- Rabl, Ari, 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.

SIMULATION OF A CONCENTRATED SOLAR FLUX DISTRIBUTION IN CYLINDRICAL ABSORBERS OF A PARABOLIC TROUGH CONCENTRATOR

Abstract. *The performance of solar concentrator systems is related to many factors, among them, it's emphasized the concentrated flux shape that reaches the absorber. Using a new methodology developed to determine the flux distribution in solar concentrator absorbers which allows, in a versatile way, to be used with others geometries; it's presented in this work, the application of this approach with a parabolic trough concentrator and a cylindrical absorber with a round shape. The geometrical equation was determined that allows the utilization of this approach. The flux distribution results, for a 0.01m circular absorber radius with different solar bright functions, were presented. The impact of distinct values of optical deviation in the flux distribution were simulated, it was observed that these deviations do not tease significant changes in the flux distribution profile.*

Key words: Solar concentrators, flux distribution, optical errors.