ANÁLISE ÓPTICA DA CURVATURA DE ESPELHOS DE UM CONCENTRADOR FRESNEL LINEAR

Diego Ramos Moreira – dramosm@edu.unisinos.br
Luis Carlos Webler – lcwebler@edu.unisinos.br
Mario Henrique Macagnan – mhmac@unisinos.br
Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Resumo. *Este trabalho tem o propósito de avaliar o impacto da curvatura dos espelhos em um concentrador Fresnel linear (LFR). O coletor utilizado como exemplo contém 14 fileiras de espelhos de 300 mm de largura cada, com um absorvedor do tipo cavidade, de 200 mm de abertura e situado a 3 m de altura em relação ao plano contendo os eixos dos espelhos. Primeiramente determinou-se a curvatura para cada espelho do LFR. As flechas variaram entre 1,872 mm no espelho central até 1,486 mm para o espelho mais afastado. Após calcular a curvatura de cada espelho, realizou-se as simulações no Soltrace, variando a curvatura dos espelhos. O software apresentou o fluxo médio e máximo que atingiu o plano de entrada no absorvedor do LFR. Foi verificado que o uso de espelhos planos exige que a abertura do absorvedor seja maior, correspondendo no caso estudado a 400 mm, com uma maior concentração em uma faixa de 300 mm. Com a utilização de espelhos curvos e variáveis, consegue-se aumentar a razão de concentração em uma faixa de 100 mm. A simulação com curvatura fixa de 1,872 mm resultou em uma redução da potência de apenas 2,1 % em comparação com os espelhos curvados individualmente. Para configuração com a menor flecha (1,486 mm) o aumento da potência foi extremamente pequeno, de apenas 0,17 %, porém com um fluxo extremamente concentrado em uma faixa de 60 mm. Diante dos resultados apresentados para o LFR estudado, a utilização da menor flecha calculada para os espelhos é indicada para redução de custos, tempo e complexidade de fabricação.*

Palavras-chave: *Energia Solar, Refletor Fresnel linear, Análise óptica*

1. INTRODUÇÃO

Aumentar a eficiência da tecnologia de energia solar concentrada (CSP) por meio de ferramentas e reduzir os custos são um dos tópicos atuais de pesquisadores de energia solar térmica. Para responder a estes desafios, é necessário realizar uma análise detalhada das propriedades ópticas dos coletores. Todas as diferentes tecnologias, calha parabólica, Fresnel linear, disco parabólico e torre solar, dependem da precisão óptica do campo do refletor solar para possibilitar a produção de energia em custos competitivos (Arancibia-Bulnes, 2017).

Neste cenário, os refletores Fresnel lineares (LFR) foram identificados na literatura científica como uma tecnologia com alto potencial para alcançar essa redução de custo. Os LFR são, tecnologicamente, os menos desenvolvidos e, por isso, há espaço suficiente para otimizar esses sistemas (Moghimi, 2017). Atualmente, vários estudos e pesquisas estão sendo realizadas sobre os espelhos utilizados nos LFR. O número de publicações realizadas por ano sobre refletores Fresnel lineares aumentou exponencialmente com o tempo durante as últimas décadas, como mostrado na Fig. 1.

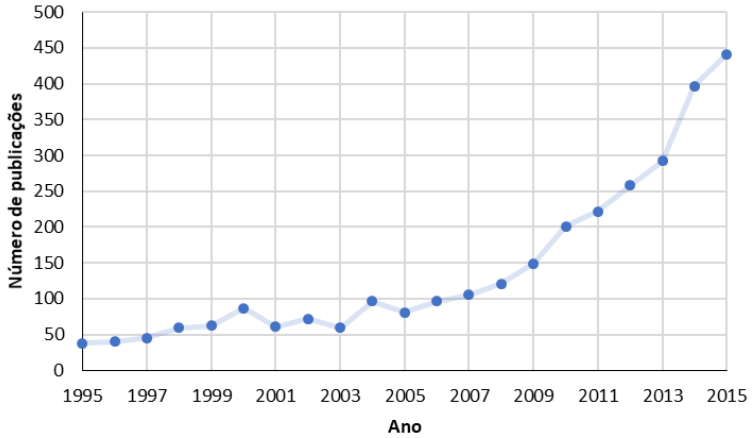


Figura 1 - Número de publicações sobre LFC realizadas entre 1995 e 2015.

Segundo Abbas Cámara (2015), o número de publicações está ficando maior em todos os tópicos devido ao crescente número de cientistas no mundo como consequência da globalização dos métodos de pesquisa. Para atender as análises, uma variedade de métodos de testes ópticos foram propostos ao longo dos anos. Avanços em sistemas

computacionais e de processamento de imagens permitiram técnicas de medição mais robustas e metodologias de avaliação rápida. Em particular, para avaliar a parte óptica dos concentradores são necessárias ferramentas de modelação especializadas. Dentre elas destaca-se o programa SolTrace, desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) dos Estados Unidos.

Teoricamente, os espelhos de um refletor Fresnel linear (LFR) podem ser planos, uma vez que sua função é refletir a radiação incidente até o absorvedor, situado a uma determinada altura em relação ao plano dos espelhos. Porém, estudos demostraram como o uso de espelhos curvos pode melhorar o desempenho óptico e reduzir o tamanho do receptor necessário. O impacto da curvatura na eficiência do LFR é inversamente proporcional à altura do receptor. Ou seja, quanto mais distante estiver o receptor, menor o impacto da curvatura do espelho na eficiência óptica do LFR. Isso significa que a implementação de heliostatos curvos em um LFR é indicada para receptores de menor altura do absorvedor em relação ao campo de espelhos. Portanto, o objetivo do presente trabalho é analisar o impacto do formato dos espelhos em um refletor Fresnel linear com 14 fileiras de espelhos de 300 mm de largura, com o absorvedor em forma de cavidade, com 200 mm de abertura, situado a 3 m de altura em relação ao plano que contém os eixos de rotação dos espelhos.

2. ESTUDOS RECENTES

Benyakhlef *et al.* (2016), verificaram que o uso de espelhos curvos com flechas variando entre 1 e 2 mm é suficiente para alcançar uma alta razão de concentração. No entanto, a escolha da curvatura ideal para um determinado sistema LFR deve ser feita, principalmente, de acordo com a eficiência óptica obtida por cada valor da flecha. Mills e Morrison (2000) compararam a energia entregue por diferentes formatos de espelhos para um refletor Fresnel linear com uma altura do absorvedor de 15 m e 48 espelhos com largura de 0,95 m. Nesse estudo, a energia entregue pelos espelhos com curvatura constante foi 0,6% inferior à energia entregue pelos espelhos com curvaturas variáveis. Já para o caso de espelhos planos, a redução chegou a 13%.

No estudo realizado por Moghimi *et al.* (2016), uma otimização prática de um LFR com uma configuração de cavidade trapezoidal multitubos foi investigada para obter a maior absorção solar ao longo de um dia. Este estudo centrou-se na realização da otimização de uma curvatura fixa ideal em todo o campo de espelhos como uma alternativa mais prática no projeto da planta em vez de permitir que cada espelho tenha uma curvatura de fabricação única. Curiosamente, uma curvatura com uma distância focal além do centroide da cavidade foi encontrada. Esta configuração resultou em uma redução de apenas 3,4% em comparação com os espelhos curvados individualmente e mais caros.

Benyakhlef *et al.* (2016), realizaram um estudo numérico para investigar o impacto da curvatura do espelho no desempenho óptico de um LFR instalado em Marrocos. Quando a flecha do espelho for superior a 3 mm e a altura do receptor for de 6 m, a eficiência óptica do sistema diminui significativamente. Isto ocorre porque a largura da projeção dos raios torna-se maior do que a largura da abertura do receptor. Em outras palavras, o aumento da flecha dos espelhos para uma posição de receptor muito distante do plano do espelho colocaria a linha focal do sistema abaixo do plano do receptor, como mostrado na Fig. 2 e, portanto, contribuiria para uma divergência dos raios refletidos antes de atingir o plano de abertura do receptor.

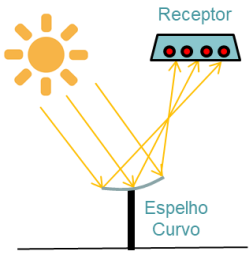


Figura 2 – Linha focal abaixo do plano do receptor.

Quando o receptor é colocado perto dos espelhos, como exemplo, a 2 m de altura acima do campo de espelhos, o efeito da curvatura do espelho na eficiência óptica é claramente observado, especialmente para pequenos valores de flecha, compreendidos entre 0,2 mm e 3 mm. Para esta gama de flechas, a eficiência óptica aumenta linearmente em 6%. Isto significa que a implementação de espelhos curvos em um LFR pode ser eficiente para receptores próximos ao plano dos espelhos.

Comparando os resultados obtidos por Mills e Morrison (2000), Moghini *et al.* (2016) e Benyakhlef *et al.* (2016), verifica-se que o impacto da utilização de espelhos curvos é maior para sistemas com receptor perto dos espelhos. Ou seja, o impacto é inversamente proporcional à altura do absorvedor. A maior redução de energia com a utilização de espelhos com curvatura fixa foi obtida por Benyakhlef *et al.* (2016), com absorvedor de 2 m e a menor foi obtida por Mills e Morrison (2000), que utilizaram um absorvedor localizado a 15 m de altura. As características dos LFR e os resultados obtidos são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 – Comparação das geometrias dos espelhos.

Autor	Altura do absorvedor	Espelhos	Diferença
Mills e Morrison (2000)	15	48	0,6%
Moghimi et al. (2016)	8	25	3,4%
Benyakhlef et al. (2016)	2	11	6,0%

3. DESIGN DOS ESPELHOS

A possibilidade de usar espelhos planos é atrativa, uma vez que facilita a fabricação e o processo de montagem sobre as estruturas de fixação e, consequentemente, reduz os custos totais da instalação. No entanto, devido ao tamanho finito do disco solar, correspondendo a um ângulo subentendido de aproximadamente 32', o feixe de raios refletidos diverge do espelho, em um fenômeno conhecido como *spillage* ou dispersão, não atingindo o plano de abertura do receptor. Esse fenômeno produz perdas ópticas significativas e é mostrado esquematicamente na Fig. 3.

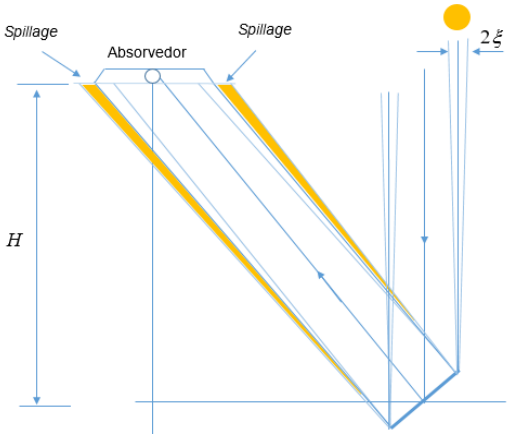


Figura 3 - *Spillage* em um refletor Fresnel linear com espelhos planos.

Uma das soluções para reduzir essas perdas é aumentar a largura do receptor. No entanto, essa solução faz com que o fator concentração no absorvedor secundário diminua, uma vez que a relação entre essa área e a área do refletor também diminui. Outra solução é aproximar o espelho do absorvedor, diminuindo a altura *H*. No entanto, diminuindo *H* as perdas por sombreamento e bloqueio incrementam.

As perdas por *spillage* aumentam com a distância focal do refletor. Isso significa que a dispersão do feixe de radiação deixando o espelho diverge mais acentuadamente para os espelhos situados próximos das extremidades da matriz de espelhos. A solução para a redução das perdas ópticas por *spillage* é através da curvatura dos espelhos. Os espelhos podem ser ligeiramente curvados sem um aumento importante de custo. A vantagem no custo dos espelhos em comparação com concentradores tipo calha parabólica ainda é interessante, pois a curvatura é muito pequena e, portanto, a fabricação é mais fácil. Os possíveis perfis teóricos dos espelhos serão descritos a seguir.

3.1 Espelho plano

A definição de um espelho plano é dada por uma linha reta no plano transversal. Em relação à normal da sua superfície, em qualquer ponto, o espelho forma um ângulo θ_i $-\pi / 2$ em relação ao plano horizontal e cada ponto do espelho pode ser representado por (x_i, z_i), como mostrado nas Eq. (1) a (3):

$$z_i = ax_i + b \tag{1}$$

$$a = \tan(\theta_i - \pi/2) \tag{2}$$

$$b = z_i - ax_i \tag{3}$$

Conforme Abbas Cámara (2015), em um espelho plano a normal do espelho é a mesma em todos os pontos do espelho e assim, os raios refletidos são paralelos em toda a sua extensão. A Fig. 4 ilustra o espelho plano e os raios refletidos.

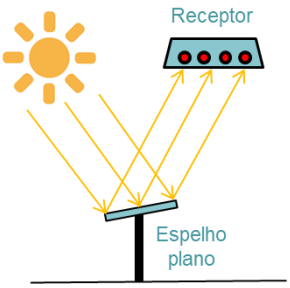


Figura 4 - Representação de um espelho plano e os raios refletidos.

3.2 Espelho parabólico

Os raios que incidem sobre uma parábola são refletidos ao ponto focal, conforme ilustrado na Fig. 5. Uma parábola vertical pode ser definida com a localização do seu vértice, *V*, e a distância focal, *f*. Definindo o sistema de coordenadas com a origem no vértice da parábola e o eixo *z* paralelo ao eixo de simetria, a parábola pode ser definida neste sistema de coordenadas conforme a Eq. (5):

$$z = \frac{1}{4f} x^2 \tag{5}$$

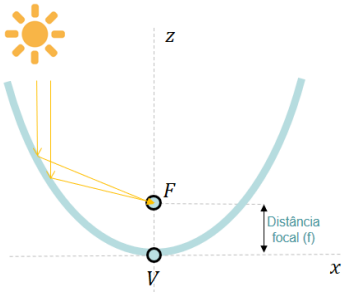


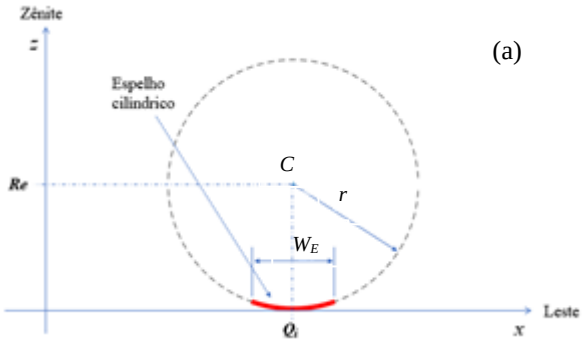
Figura 5 - Representação da parábola.

2.4 Espelho cilíndrico

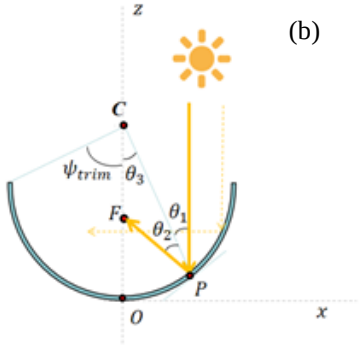
A representação de um espelho com superfície cilíndrica é mostrada na Fig. 6a. Essa curva, chamada de *z(x)* no plano *x-z* é simétrica ao eixo *z*, isso é, *z(-x)* = *z(x)*, *r* é o raio, *C* é o centro dessa circunferência e Q_i uma distância à partir do centro do absorvedor. A superfície do espelho cilíndrico pode ser definida neste sistema de coordenadas conforme a Eq. (6):

$$z = r - \sqrt{r^2 - (x - Q_i)^2} \tag{6}$$

Na Fig. 6b são mostrados dois feixes de radiação paralelos ao eixo *z* que atingem a curvatura do espelho, como mostrado na Fig. 6.



(a)



(b)

Figura 6 – Representação geométrica de um espelho cilíndrico.

Por definição, o raio de um círculo, *r*, é normal à tangente do círculo em qualquer ponto e, dessa forma, o segmento de linha *CP* é igual ao raio *r*. O primeiro raio (linha cheia) atinge o espelho no ponto *P* com um ângulo de incidência θ_1 em relação à normal nesse ponto, sofrendo uma reflexão até o foco *F* do espelho. Pela lei da reflexão para uma superfície especular, o ângulo de reflexão desse feixe será igual ao ângulo de incidência, ou seja, $\theta_1 = \theta_2$. Além disso, como o raio incidente é paralelo ao eixo de curvatura, o triângulo *CFP* é isósceles, onde os lados *FP* e *FC* são iguais. Como consequência, $\theta_3 = \theta_1 = \theta_2$ e o comprimento *CF* é igual a *r*/2 para valores pequenos de θ_3.

À medida que θ_3 aumenta, como é o caso do segundo feixe de radiação, mostrado pela linha pontilhada, o raio refletido cruza a linha abaixo de *F*, como mostrado na Fig. 6b. O aumento do espalhamento da imagem refletida em função do aumento de θ_3 é chamado de aberração esférica. O ângulo de borda, ψ_{rim}, mostrado na mesma figura, define a abertura de entrada do espelho. Se o ângulo de borda de uma calha cilíndrica (projeção da superfície x-z no eixo y) for mantido suficientemente baixo, por exemplo menor que 20 a 30°, a aberração esférica é pequena e um foco linear pode ser obtido, como pode ser observado na Fig. 7, que apresenta as focalizações de espelhos cilíndricos para diferentes ângulos de borda.

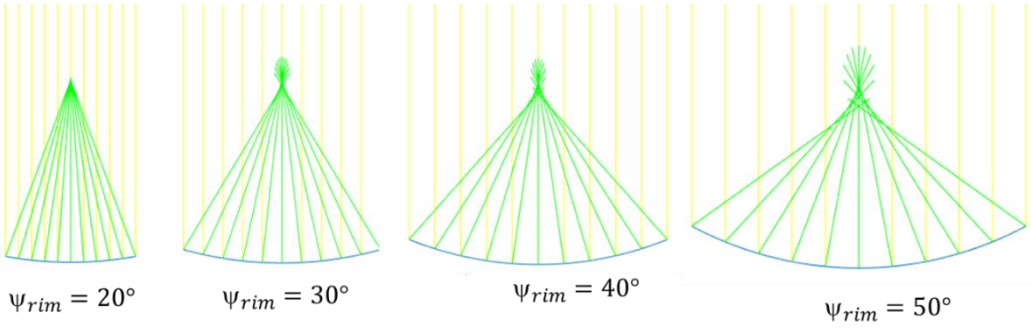


Figura 7 - Focalização de feixes de radiação paralelos em espelhos cilíndricos com diferentes ângulos de borda.

O raio *r*, quando desenhado entre C e A, como mostrado na Fig. 8, intercepta a corda no ponto *N* com um ângulo reto. A distância entre *N* e *A* é chamada de flecha, ζ. As distâncias CD, CA e CE são, obviamente, iguais a raio *r* e a meia-corda é chamada de *l*. O raio *r* pode ser calculado pela Eq. (7):

$$r^2 = \left(\frac{W_E}{2}\right)^2 + (r - \zeta)^2 \tag{7}$$

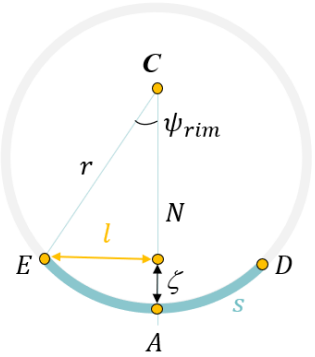


Figura 8 - Medida da curvatura de um espelho cilíndrico.

Considerando que o comprimento do arco *s* seja igual à largura do espelho, W_E, o ângulo de abertura do espelho, ψ, é dado pela Eq. (8). O ângulo de borda, ψ_{rim}, é dado pela Eq. (9) e o comprimento do lado *l* do triângulo retângulo CNE pode ser calculado pela Eq. (10):

$$\psi = \frac{s}{r} = \frac{W_E}{r} \tag{8}$$

$$\psi_{rim} = \frac{\psi}{2} \tag{9}$$

$$l = r \sin \psi_{rim} \tag{10}$$

Venegas (2016), salienta que o concentrador cilíndrico parabólico é uma das tecnologias de concentração solar mais desenvolvidas. No entanto, ainda enfrenta o desafio da redução de custos com bom desempenho óptico. Por outro lado, é mais fácil fabricar uma seção circular em vez de uma parabólica e uma seção da circunferência pode ser praticamente indistinguível na região paraxial de uma parábola, conforme ilustra a Fig. 9.

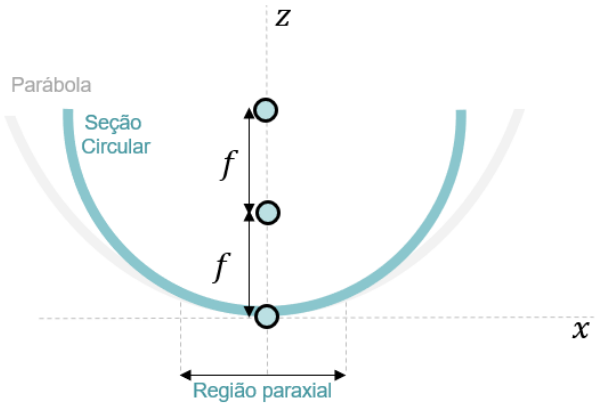


Figura 9 - Região paraxial da parábola.

4. Equações do sistema LFR

Para analisar a curvatura do conjunto de espelhos de um refletor Fresnel linear, utiliza-se a Fig. 10 para a definição dos parâmetros geométricos do coletor. Nessa figura, H é a altura do receptor em relação ao plano dos eixos dos espelhos. A distância entre o eixo do espelho n e a posição central do coletor (centro do receptor) é chamada de Q_n. O ângulo de inclinação de cada espelho é dada por θ_n. A largura de cada espelho é dada por W_E e a distância (folga) entre dois espelhos adjacentes é dada por e.

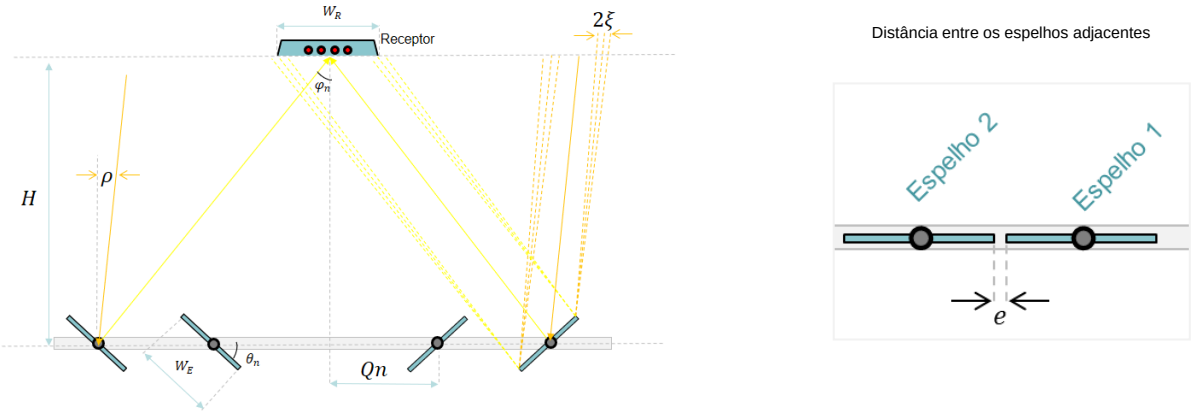


Figura 10 - Geometria do refletor Fresnel linear.

A distância focal de cada espelho, f_n, é considerada como a distância entre o centro do espelho e o centro do absorvedor. Esse vetor forma então um ângulo φ_n com a normal do plano dos espelhos na posição central do coletor e é chamado ângulo de incidência no absorvedor. Por último, o ângulo de incidência do Sol projetado no plano transversal dos espelhos é dado por ρ.

A distância Q_n do espelho n em relação ao centro do coletor pode ser calculada pela Eq. (11), utilizando a Fig. 10 como referência.

$$Q_n = \frac{W_E}{2} + \frac{e}{2} + (n-1)(W_E + e) \tag{11}$$

onde n é o número do espelho, sendo n=1 o primeiro espelho à partir do centro do coletor.

Para que um feixe de raios proveniente do Sol atinja a superfície do absorvedor, é necessário que o espelho esteja inclinado θ_n em relação à horizontal para um espelho situado a uma distância Q_n do centro do coletor e um absorvedor situado em uma altura H. Nessa condição, o ângulo de incidência no absorvedor, φ_n, será dado pela Eq. (13) a partir da Eq. (12).

$$\tan\varphi_n = \frac{sen\varphi_n}{\cos\varphi_n} = \frac{Q_n}{H} \tag{12}$$

$$\varphi_n = \tan^{-1}\left(\frac{Q_n}{H}\right) \tag{13}$$

O ângulo de inclinação do espelho *n*, dado por θ_n , é calculado pela Eq. (14).

$$\theta_n = \varphi_n - \frac{\varphi_n - \rho}{2} = \frac{\varphi_n - \rho}{2} \tag{14}$$

Pode ser observado, a partir das equações, que cada espelho terá uma inclinação diferente. A Fig. 11 apresenta os esquemas de ângulos do lado esquerdo e direito do refletor Fresnel linear.

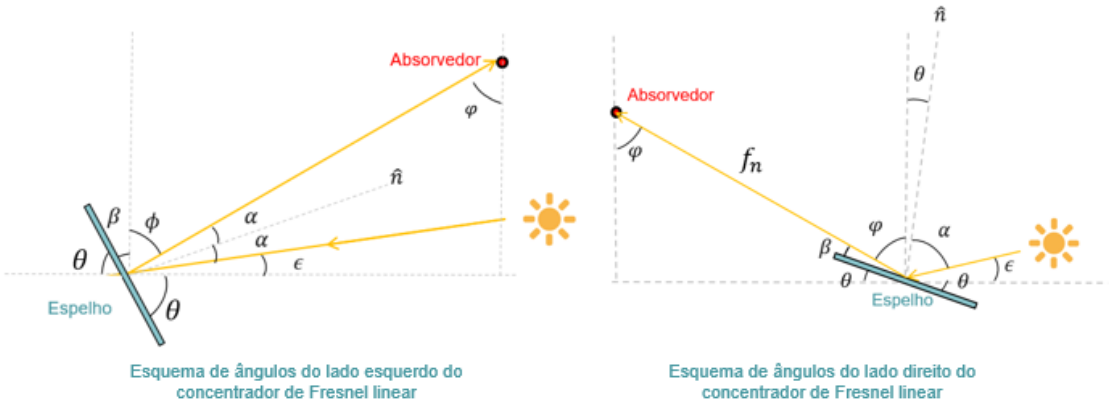
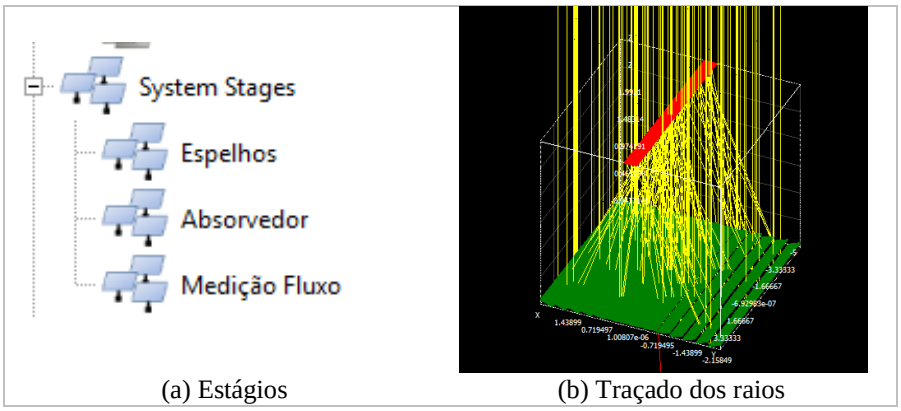


Figura 11 - Esquema de ângulos dos lados esquerdo e direito do refletor Fresnel linear.

5. SOLTRACE

O *SolTrace* é uma ferramenta desenvolvida pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) que utiliza a metodologia dos traçados de raios. Na aplicação desse método, um número específico de raios é traçado a partir da posição do Sol para o sistema. Cada raio percorre um caminho encontrando as superfícies do sistema e realizando diversas interações óticas. Algumas dessas interações são probabilísticas por natureza (seleção de um ângulo solar da distribuição angular do Sol da qual se origina o raio), enquanto outras são determinísticas (cálculo da intersecção do raio com uma superfície descrita analiticamente e o desvio resultante). O código computacional empregado nessa metodologia replica a interação real de fótons e, portanto, é capaz de prover resultados acurados até para sistemas complexos. A acuracidade do modelo aumenta com o número de raios traçados. No exemplo estudado, o caminho dos raios é traçado do Sol até o primeiro estágio (espelhos), no qual interage com cada elemento e parte para o próximo estágio (concentrador secundário), não retornando para estágio anterior. A Fig. 12 apresenta a janela de configuração dos estágios e o traçado dos raios no Soltrace.



(a) Estágios (b) Traçado dos raios

Figura 12- Simulação do LFR no software SolTrace.

Cada estágio é composto de elementos, os quais consistem de uma superfície, uma interação óptica, uma forma e, se apropriado, um conjunto de propriedades ópticas. Os raios traçados irão interagir com cada elemento de acordo com seus parâmetros definidos. A localização e a orientação dos estágios são definidas dentro do sistema de coordenadas global, enquanto que a localização e orientação dos elementos são especificadas dentro do sistema de coordenadas da fase particular em que são definidas.

Os estágios podem ser de dois tipos: óptico ou virtual. Um estágio óptico é definido como aquele que interage fisicamente com os raios. Inversamente, um estágio virtual é definido como aquele que não interage fisicamente com os raios. O estágio virtual é útil para determinar posições e direções de raio e energia incidente ou fluxo em várias posições ao longo do trajeto ótico sem afetar fisicamente a trajetória do raio. Elementos definidos dentro de um estágio virtual, portanto, não têm propriedades ópticas porque eles não interagem com os raios. Os estágios ópticos consistem em elementos que interagem com os raios que potencialmente alteram suas trajetórias. Esses elementos têm propriedades óticas e tipos de interação associados a eles.

6. RESULTADOS

De posse das equações apresentadas e utilizando um refletor Fresnel linear hipotético, com altura do absorvedor de H=3 m, 14 espelhos com W_E = 300 mm e ângulo de incidência solar transversal, ρ, igual a zero, os resultados para a determinação da flecha para cada espelho, de forma similar à apresentada por Facão e Oliveira (2009), são mostrados na Tab. 2. São analisados apenas os espelhos 1 a 7 uma vez que existe uma simetria em relação ao eixo central do coletor.

Tabela 2. Curvatura dos espelhos cilíndricos de um LFR.

Espelho	θ_n, °	φ_n, °	ψ_{rim}, °	f_n, m	ζ_n, mm
1	1,479	2,958	1,43	3,004	1,872
2	4,405	8,811	1,411	3,036	1,848
3	7,242	14,48	1,376	3,098	1,801
4	9,942	19,88	1,327	3,19	1,737
5	12,47	24,94	1,268	3,308	1,659
6	14,81	29,61	1,203	3,451	1,574
7	16,94	33,89	1,135	3,614	1,486

Como pode ser visto nessa tabela, as flechas variam entre 1,872 mm no espelho central até 1,486 mm para o espelho mais afastado. Após calcular a curvatura de cada espelho, realizou-se a simulação no *Soltrace*. *O software* apresenta o fluxo médio e máximo que atingiu o plano do concentrador secundário do LFR. Os resultados são apresentados na Tab. 3. Já a distribuição do fluxo ao longo da superfície do absorvedor é apresentada na Fig. 13. A Fig. 13(a) apresenta a distribuição de fluxo utilizando espelhos planos. Esta configuração apresentou a maior dispersão dos raios solares, em uma faixa de 300 mm.

A Fig. 13(b) apresenta a distribuição de fluxo utilizando espelhos curvos com flecha variável. Esta configuração apresentou uma menor dispersão dos raios solares, comparado com os espelhos planos, concentrando os raios em uma faixa de 100 mm. Já as Fig. 13(c) e 13(d) apresentam a distribuição de fluxo utilizando espelhos curvos com flecha fixa, de 1,872 mm e 1,486 mm, respectivamente. Com a flecha fixa, o fluxo concentrou-se em uma faixa de 60 mm.

Tabela 3 – Comparação do fluxo médio e máximo no plano do concentrador secundário do LFR.

Característica	Fluxo máximo, W/m^2	Fluxo médio, W/m^2	Área, m^2	Potência, W	Variação, %
Plano	12.354	8.795	4	35.181	-4,94
Curvatura variável	39.306	18.504	2	37.008	-
Curvatura fixa - maior	68.803	18.117	2	36.234	-2,09
Curvatura fixa - menor	69.179	18.536	2	37.072	0,17

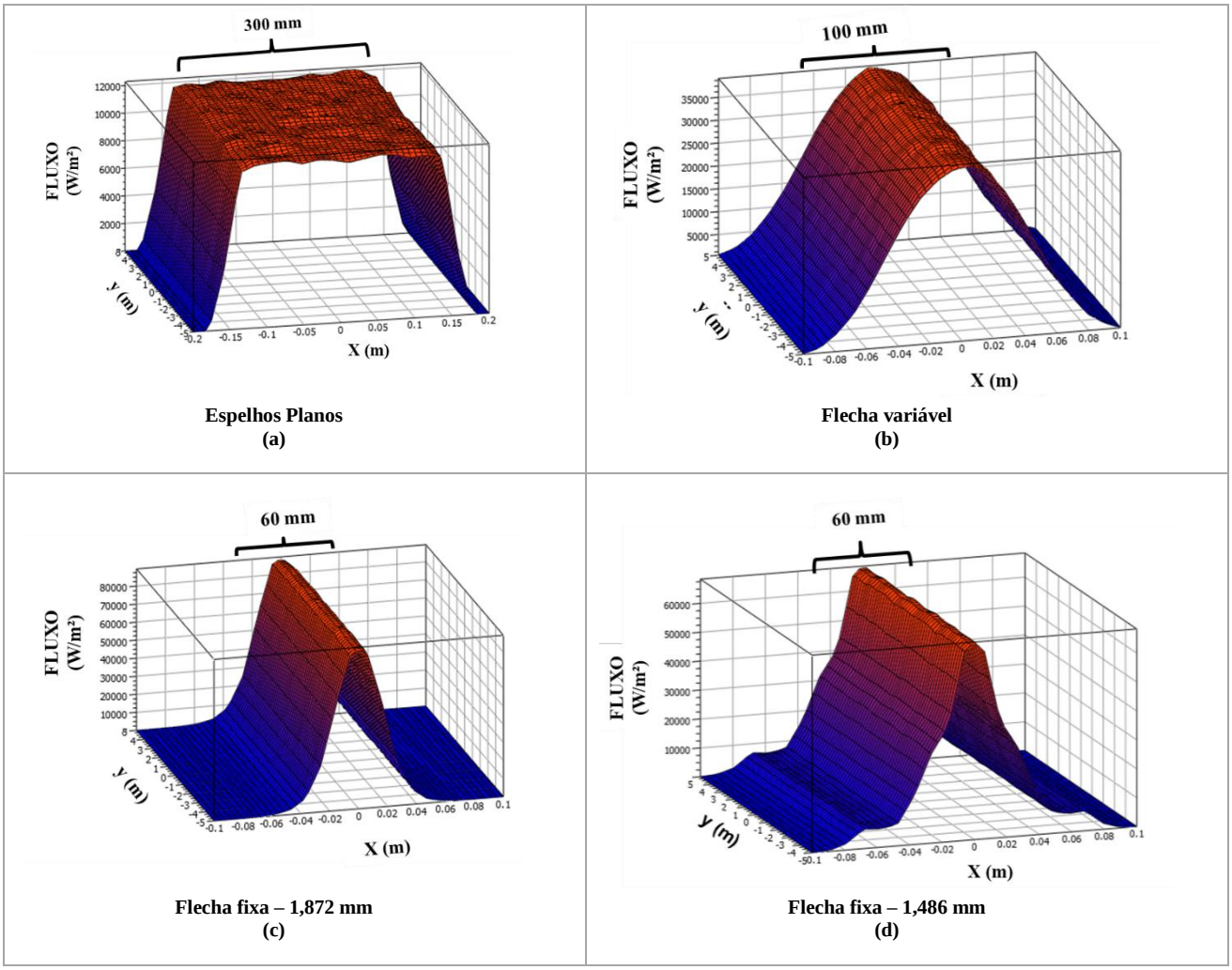


Figura 13 - Distribuição do fluxo ao longo da superfície do absorvedor.

7. CONCLUSÃO

Neste artigo foi realizada uma análise óptica da influência da curvatura dos espelhos no desempenho de um coletor LFR. Para isso analisou-se o fluxo que atingiu a superfície do receptor do LFR, utilizando espelhos com diferentes flechas. Inicialmente, através do equacionamento, verificou-se que o raio de curvatura do espelho, r_n, aumenta em direção às extremidades do coletor e, para uma largura fixa do espelho, a flecha ζ_n de cada espelho diminui na mesma direção. Da mesma forma, pode ser notado que o ângulo de borda, ψ_{rim}, também diminui do centro para a extremidade do coletor, alcançando valores da ordem de 1° para os espelhos mais extremos. Essa condição garante que para os espelhos mais afastados do centro do coletor, a aberração esférica é muito pequena, justificando o uso de uma solução simples para a curvatura do espelho.

Uma distância focal diferente para cada espelho curvo pode ser benéfica teoricamente, pois resulta em um nível de concentração maior nos tubos do concentrador secundário, enquanto que na prática essa ideia pode ser questionável. No sistema estudado, o caso ideal proposto requer 14 linhas de espelhos, o que significa que pelo menos 7 linhas de fabricação de espelho são necessárias para dobrar os espelhos e produzir diferentes curvaturas e, portanto, distâncias focais, ou 7 linhas de armazenamento devem ser consideradas para peças de reposição de espelho. Além da complexidade, essas questões aumentam o custo final do campo de espelho.

A utilização de espelhos planos exige a utilização de um concentrador secundário maior, de 400 mm para o caso analisado, com uma concentração maior em uma faixa de 300 mm. Já com a utilização de espelhos curvos de flechas variáveis exige a utilização de um concentrador secundário menor, de 200 mm para o caso analisado, com concentração maior do fluxo em uma faixa de 60 mm para as simulações com curvaturas fixas (1,486 mm e 1,872 mm).

A construção de espelhos com curvatura fixa é uma alternativa mais prática no projeto da planta em vez de permitir que cada espelho tenha uma curvatura diferente. A configuração com a maior flecha (1,872 mm) resultou em uma redução de apenas 2,1 % da potência em comparação com os espelhos curvados individualmente. Já para configuração com a menor flecha (1,486 mm) resultou em um aumento extremamente pequeno, de 0,17 %. Diante dos resultados apresentados, indica-se utilizar para o LFR a menor flecha calculada para os espelhos curvos com objetivo de redução de custos, tempo e complexidade de fabricação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pelo apoio financeiro recebido dentro da Chamada Linha 2 - Energia Heliotérmica, processo 406976/2013-9. Diego Ramos Moreira e Luis Carlos Webler também agradecem à Capes pelas bolsas de mestrado.

REFERÊNCIAS

Abbas Cámara, R., 2015. Towards cost reduction in concentrating solar power: innovative design for an efficient Fresnel based solar field. Tese de doutorado, E.T.S.I. Industriales (UPM), Madrid.

Arancibia-Bulnes, C. A., Peña-Cruz, M. I., Mutuberría, A., Díaz-Uribe, R., Sánchez-González, M., 2017. A survey of methods for the evaluation of reflective solar concentrator optics. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 69, pp.673-684.

Benyakhlefa, S., Mersa. A. A., Merrounb O., Bouatema, A., Boutammachtea, S., Alja, S. E., Ajda, H., Erregueraguia, Z., Zemmouria, E., 2016, Impact of heliostat curvature on optical performance of linear Fresnel solar concentrators. Renewable Energy, vol. 89, pp. 463-474.

Facão, J.; Oliveira, A.C., 2009. Numerical simulation of a linear Fresnel solar collector concentrator. 8th International Conference on Sustainable Energy Technologies, Aachen, Germany.

Mills, D.R.; Morrison, G.L., 2000. Compact linear Fresnel reflector solar thermal power plants. Solar Energy, vol. 68, no. 3, pp. 263-283.

Moghimi, M.A.; Craig, K.J.; Meyer, J.P., 2017. Simulation-based optimization of a linear Fresnel collector mirror field and receiver for optical, thermal and economic performance. Solar Energy, vol. 153, pp. 655-678.

Venegas, E., Domínguez, I. R. M., Carrasco, U. D., Enciso, A. P., 2016. Optical design and simulation of a circular trough solar concentrator with trapezoidal secondary. Eurosun 2016: ISES Conference Proceedings, Palma de Mallorca, pp. 1-9.