

# SOMBRA, BLOQUEIO E ÁREA DE PERDA DE UM CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.

José Aurino de Oliveira – aurinoliveira@hotmail.com

Naum Fraidenraich – naumfraiden2@gmail.com

Olga de Castro Vilela – ocv@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Energia Nuclear

**Resumo.** Os coletores concentradores utilizados na conversão solar térmica têm como componentes principais uma superfície refletora e um elemento absorvedor por onde circula um fluido térmico a ser aquecido pela radiação. Entre os concentradores existentes, os sistemas solares compostos por cilindros parabólicos são os mais utilizados para a geração de energia elétrica em grande escala. No entanto, os custos relacionados à instalação de centrais térmicas que utilizam cilindros parabólicos dificultam a competição com outras formas de produção de energia. Alternativamente, os concentradores Fresnel possuem um conjunto de características que apresentam um considerável potencial para a redução de custos. Porém, a eficiência dos concentradores Fresnel depende de fatores como bloqueio da radiação refletida e área de perda entre espelhos, os quais atenuam a radiação coletada. Esse artigo analisa as áreas de sombra, de bloqueio e de perda entre espelhos dos concentradores Fresnel e estima suas influências no desempenho do sistema.

**Palavras-chave:** Fresnel, sombra, bloqueio, perda.

## 1. INTRODUÇÃO

A conversão de energia solar em energia elétrica pode ser realizada pela concentração de radiação em uma região absorvedora, na qual circula um fluido térmico que, uma vez aquecido, é utilizado por turbinas que convertem a energia térmica em energia elétrica. Esse método é denominado conversão solar térmica e se baseia na operação de coletores concentradores de energia solar. Apesar de ser uma tecnologia relativamente nova, em que as primeiras instalações foram realizadas há aproximadamente três décadas, a energia solar térmica é considerada como uma das áreas mais promissoras no campo das energias renováveis (Mills, 2004).

A geometria cilindro parabólica constitui a versão mais aceita e consagrada para a geração de energia elétrica por meio da conversão solar térmica, no entanto, um dos maiores empecilhos para a instalação de centrais térmicas baseadas nos concentradores cilindro parabólicos é o custo inicial, que dificulta a competição com as formas vigentes de produção de energia. Essa realidade fomenta a pesquisa em novas tecnologias e o desenvolvimento de sistemas que permitam menores custos em sua produção (Buie, 2004). Nessa direção, o sistema de concentração Fresnel é considerado como uma opção promissora (Silvi, 2009) devido a fatores como a utilização de espelhos planos, menor complexidade do conjunto de estrutura que compõem o sistema, posicionamento fixo do absorvedor, entre outros. Essas características permitem uma considerável redução de preços, compensando o fato de que os concentradores Fresnel possuem menor eficiência e ocupam uma superfície mais ampla (Buie, 2004).

Existem dois problemas fundamentais nos coletores Fresnel oriundos da maneira em que os espelhos são posicionados; o bloqueio da radiação refletida (Mills; Morrison, 1998) e a área de perda entre espelhos. Esses parâmetros afetam a eficiência do sistema devido ao desperdício da radiação incidente e à consequente diminuição da energia coletada.

Métodos analíticos, ou baseados em traçado de raios, foram desenvolvidos em trabalhos anteriores para concentradores Fresnel com espelhos planos (Mathur, 1991). Também foram desenvolvidas metodologias para o estudo de Concentradores Fresnel com espelhos curvos, avaliando a influência de parâmetros geométricos sobre a energia coletada (Lara, 2013).

Este trabalho apresenta o estudo do comportamento das áreas de sombra, bloqueio e perda entre espelhos dos concentradores Fresnel sob o ponto de vista da abertura disponibilizada pelo sistema para a incidência de energia, determinando suas respectivas distribuições diárias e, conseqüentemente, seus limites de ocorrência.

## 2. FRENTE DE ONDA EFETIVA

A frente de onda efetiva é definida como a largura da abertura que o concentrador Fresnel disponibiliza para a entrada de radiação no sistema. À medida que o sol se desloca no céu, a rotação dos espelhos impõe variações no tamanho da abertura de entrada dos raios solares no sistema, como indica a Fig. 1, que apresenta o nascente posicionado no lado direito da torre (essa convenção é adotada em todo o corpo desse trabalho).

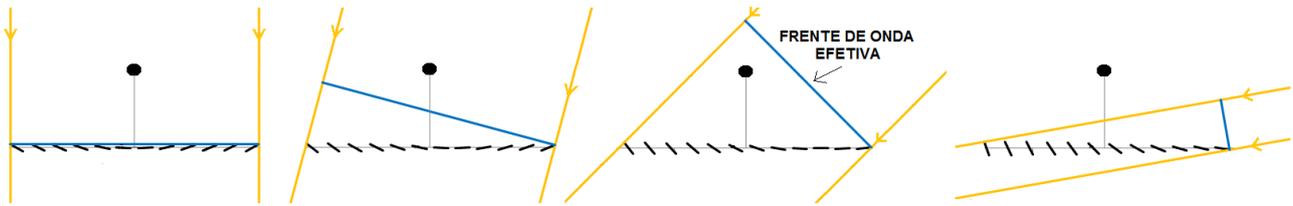


Figura 1 - Evolução da frente de onda efetiva em relação à elevação solar.

O tamanho da frente de onda efetiva é máximo ao meio dia solar e diminui gradativamente com o aumento do ângulo zenital. O valor mínimo da frente de onda efetiva ocorre no nascer, ou por, do sol, sendo nesse caso igual à projeção vertical do último espelho localizado no lado oposto ao lado em que o sol se encontra como indica a Fig. 2.

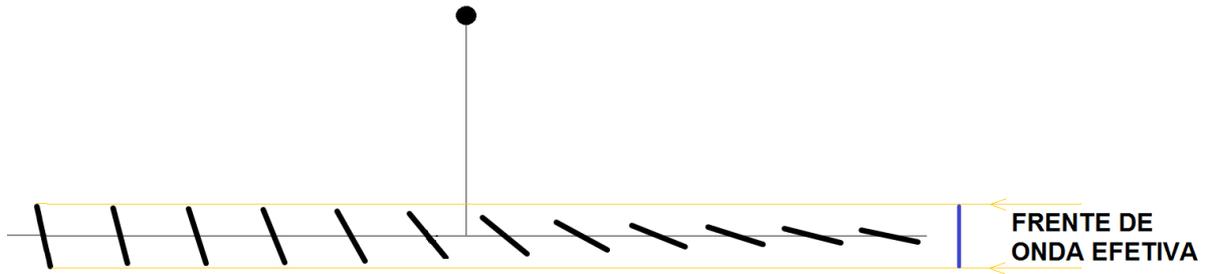


Figura 2 - Frente de onda efetiva ao nascer do sol.

Além de definir a abertura da janela de entrada de energia no concentrador, a frente de onda efetiva serve de referência para parâmetros como área de bloqueio, área de sombra e área de perda entre espelhos, empregados com a finalidade de determinar a fração da energia total que realmente pode ser utilizada pelo concentrador Fresnel.

### 3. PROJEÇÃO DOS ESPELHOS SOBRE A FRENTE DE ONDA EFETIVA

A projeção dos espelhos sobre a frente de onda efetiva (figura 3a) é um procedimento empregado para determinar a fração da energia incidente correspondente às áreas de sombra e de bloqueio existentes sobre cada um dos espelhos que compõem o concentrador Fresnel. Para projetar um espelho, ou parte dele, sobre a frente de onda efetiva é preciso considerar o ângulo compreendido entre o raio de sol e a reta normal ao espelho ( $\gamma$ ), como indica a Fig. 3b.

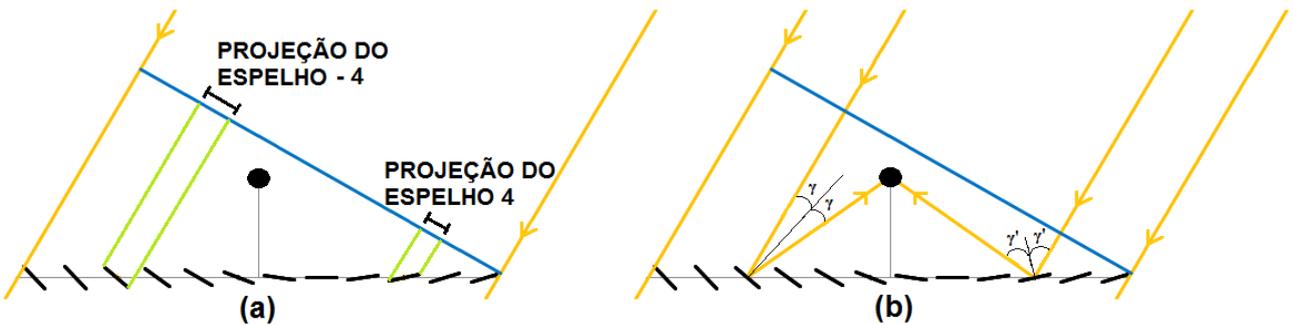


Figura 3 - Projecção dos espelhos - 4 e 4 sobre a frente de onda efetiva (a). Ângulo entre o raio de sol e a reta normal à superfície dos espelhos (b).

O comprimento da projeção do espelho, ou de parte dele, sobre a frente de onda efetiva é determinado pela Eq. (1).

$$\omega_p = \omega_e \cdot \cos \gamma \quad (1)$$

Onde  $\omega_e$  é a parte do espelho a ser projetada,  $\omega_p$  é a sua projeção sobre a frente de onda efetiva e  $\gamma$  é o ângulo entre o raio de sol e a reta normal ao espelho, dado pela Eq. (2).

$$\gamma = \psi - \theta_z \quad (2)$$

Onde  $\psi$  é o ângulo de rastreamento do espelho e  $\theta_z$  é o ângulo zenital.

#### 4. ÁREA DE SOMBRA

A rotação dos espelhos em eixos fixos, dispostos sobre uma superfície plana, permite que dois, ou mais, espelhos se encontrem na direção de um mesmo feixe de raios solares, dependendo do valor do ângulo zenital. Quando isso ocorre, apenas o espelho que se encontra à frente dos demais será atingido pelos raios solares, projetando uma região de sombra sobre o restante dos espelhos desse alinhamento. Nesse instante, a parte sombreada de cada espelho não possui utilidade no sistema e o concentrador passa a ter uma região refletora ativa menor do que a superfície total dos espelhos. Pode-se afirmar então que a área de sombra de um concentrador Fresnel indica a quantidade de material inativa em função da elevação solar.

O cálculo da área de sombra foi realizado através da análise da interseção da reta tangente à borda do espelho causador da sombra, paralela aos raios de sol (reta de sombra), com a reta que contém o espelho parcialmente sombreado, de acordo com o esquema apresentado na Fig. 4.

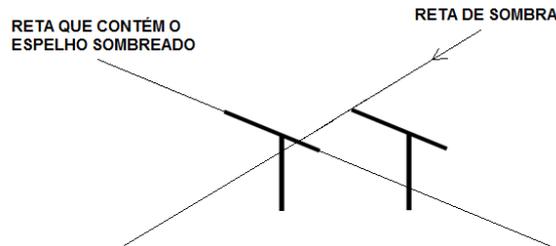


Figura 4 – Interseção entre a reta de sombra e a reta que contém o espelho sombreado.

A Fig. 5 apresenta o comportamento da razão entre o somatório da área de sombra de todos os espelhos e a superfície refletora total de um concentrador Fresnel composto por uma torre (10 m de altura) e doze espelhos (3 m de largura cada), distribuídos de forma simétrica (seis de cada lado da torre), com espaçamento nulo entre as bordas dos espelhos (o centro de cada espelho se encontra a uma distância de 3 m do centro do espelho vizinho). Os valores entre o meio dia solar e o pôr do sol são obtidos por simetria (essa simetria é intrínseca ao sistema e está presente em todo o corpo desse trabalho). Percebe-se que o gráfico possui um pequeno platô na região próxima ao nascer do sol, o qual se deve à correção da área de sombra a partir da área de luz que se estabelece na parte do espelho voltada para baixo, como indica a Fig. 6.

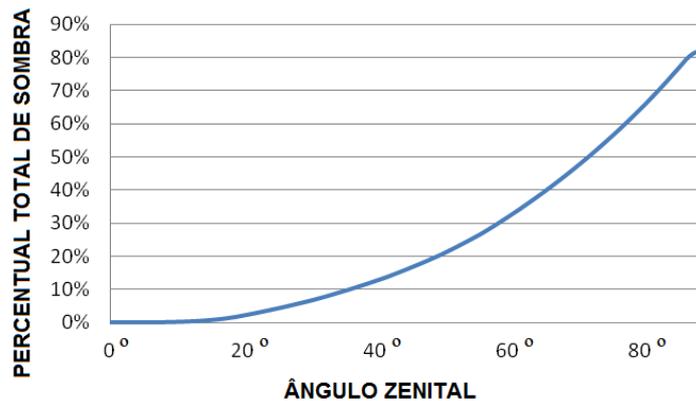


Figura 5 – Percentual total da área de sombra do concentrador Fresnel em função do ângulo zenital. Cada ponto do gráfico fornece a fração da superfície refletora total do concentrador sem utilidade momentânea devido ao sombreamento.

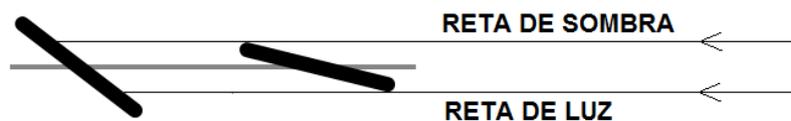


Figura 6 – Visualização da reta de luz utilizada na correção da área de sombra.

A área de sombra representa a fração de material momentaneamente ociosa, indicando o percentual da superfície refletora do concentrador sem atuação em um determinado instante. Contudo, quando se considera a quantidade total de energia que ingressa pela abertura da frente de onda efetiva, a área de sombra não atua como uma área de perda, pois a

faixa de luz sombreada em um determinado espelho é refletida pelo espelho causador da sombra, como se pode observar na Fig. 7.

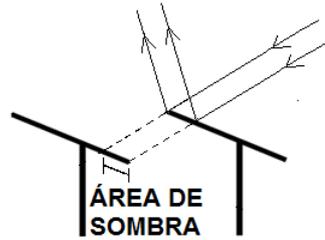


Figura 7 – Faixa de luz relativa à área de sombra. O espelho causador da sombra reflete a faixa de luz que seria refletida pelo espelho adjacente caso o sombreado não existisse.

O limite de sombreado é o momento em que um raio de sol tangencia a borda do espelho causador da sombra e atinge a borda do espelho adjacente. Cada par de espelhos tem um limite de sombreado distinto dos demais, devido à diferença no ângulo de rastreamento. Após o limite de sombreado se inicia um intervalo de variação do ângulo zenital em que a radiação encontra espaço entre os espelhos para sair do sistema sem sofrer desvio. A Fig. 8a mostra o limite de sombreado de um par de espelhos e a figura 8b apresenta um instante posterior a esse limite, onde se observa a abertura existente entre as bordas dos espelhos, região em que parte da energia incidente é perdida.

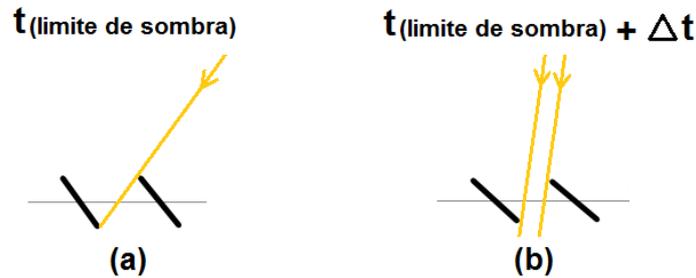


Figura 8 – Limite de sombreado (a). Desperdício de energia entre os espelhos (b).

Assim, de maneira geral, o tamanho da frente de onda efetiva ( $S$ ) pode ser calculado em função da parte iluminada de cada espelho ( $\omega_{il}$ ) e da área de perda entre espelhos ( $\omega_g$ ), ambas projetadas sobre frente de onda efetiva, através da Eq. (3).

$$S = \sum \omega_{il} + \sum \omega_g \quad (3)$$

A Fig. 9 apresenta a inclinação de cada espelho do concentrador Fresnel analisado em três instantes distintos.

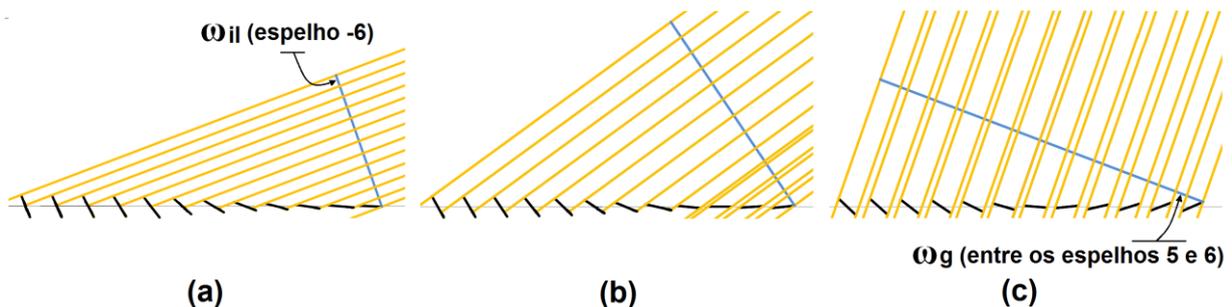


Figura 9 – Frente de onda efetiva composta pela parte iluminada dos espelhos (a). Aparecimento das primeiras áreas de perda entre espelhos (b). Frente de onda efetiva composta pela projeção dos espelhos e pelas áreas de perda entre espelhos (c).

A Fig. 9a corresponde a um momento em que nenhum dos pares de espelhos do sistema atingiu o limite de sombreado, não havendo assim área de perda entre espelhos ( $\sum \omega_g = 0$ ). Nessa figura também é apresentada a parte iluminada do espelho -6 projetada sobre a frente de onda efetiva. Observa-se que o tamanho da frente de onda efetiva ( $S$ ) é composto pela soma das projeções das áreas iluminadas de todos os espelhos. Nesse caso, a Eq. (3) assume a forma expressa pela Eq. (4), indicando que a existência de sombreado no sistema não resulta em perdas de energia.

$$S = \sum \omega i l \quad (4)$$

A Fig. 9b apresenta um instante intermediário em que os espelhos mais afastados da torre, no lado direito do concentrador, ultrapassam o limite de sombreamento, ocasionando o aparecimento das primeiras áreas de perda entre espelhos.

A Fig. 9c corresponde à situação extrema em que não há sombras no sistema, conseqüentemente, todos os pares de espelhos se encontram além do limite de sombreamento e parte da radiação incidente se perde entre os espelhos que compõem o concentrador.

## 5. ÁREA DE BLOQUEIO

O bloqueio da radiação ocorre quando uma porção dos raios refletidos por um dado espelho do arranjo atinge a parte traseira de um espelho adjacente. A Fig. 10 apresenta a área de bloqueio sobre um espelho do concentrador ao meio dia solar, observa-se que os raios de sol contidos entre os raios  $r_1$  e  $r_2$  não alcançam a superfície do absorvedor, pois são interceptados por um espelho vizinho (Chaves, 2008).

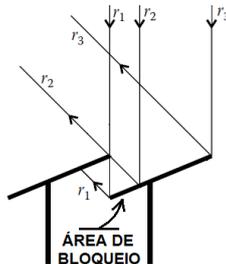


Figura 10 – Visualização do bloqueio imposto por um espelho adjacente ao feixe de luz compreendido entre os raios  $r_1$  e  $r_2$ .

O cálculo da área de bloqueio foi realizado através da análise da intersecção da reta que contém o espelho parcialmente bloqueado com a reta de bloqueio, que é paralela aos raios refletidos e tangencia a borda do espelho bloqueador, como indica a Fig. 11.

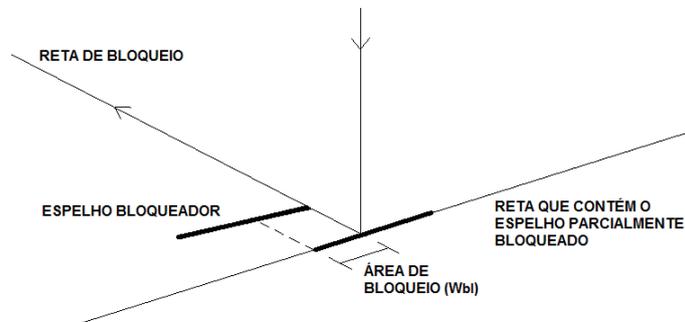


Figura 11 – Intersecção entre a reta de bloqueio e a reta que contém o espelho parcialmente bloqueado.

Existem condições limites em que o bloqueio da radiação passa a ocorrer à medida que o sol se eleva no céu. No entanto, essas condições limites dependem do posicionamento do espelho em relação à torre onde é fixada a superfície absorvedora. No lado esquerdo da torre (considerando o nascer do sol à direita da página), o bloqueio não ocorre até o ponto em que a direção dos raios incidentes se torna idêntica à direção dos raios refletidos (Fig. 12a). No lado direito da torre, o bloqueio só passa a ocorrer após o instante em que o raio refletido pela borda de um espelho é interceptado pela borda do espelho adjacente (Fig. 12b).

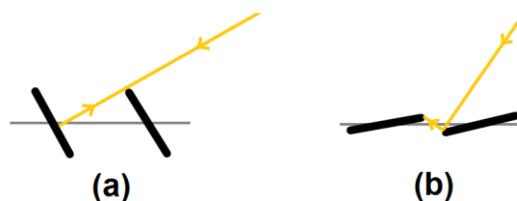


Figura 12 – Limites de bloqueio no lado esquerdo da torre (a). Limite de bloqueio no lado direito da torre (b).

Após o cálculo da área de bloqueio de todos os espelhos do sistema, a parte bloqueada de cada espelho foi projetada sobre a frente de onda efetiva de acordo com a Eq. (1).

A Tab. 1 e a Tab. 2 apresentam os percentuais da área de bloqueio ( $\omega_b$ ), em relação à frente de onda efetiva, de cada espelho do concentrador Fresnel analisado. As áreas de bloqueio de todos os espelhos foram calculadas entre o limite de bloqueio e o meio dia solar.

TABELA 1 - Percentual da área de bloqueio, em relação à frente de onda efetiva, dos espelhos posicionados no lado direito da torre.

$\Theta_z$ (grau)	% $\omega_b$ (espelho 2)	% $\omega_b$ (espelho 3)	% $\omega_b$ (espelho 4)	% $\omega_b$ (espelho 5)	% $\omega_b$ (espelho 6)
0	0,40	1,08	1,78	2,39	2,87
10	0,00	0,79	1,46	2,04	2,51
20	0,00	0,45	1,10	1,67	2,14
30	0,00	0,02	0,67	1,25	1,73
40	0,00	0,00	0,11	0,73	1,24
50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57

TABELA 2 - Percentual da área de bloqueio, em relação à frente de onda efetiva, dos espelhos posicionados no lado esquerdo da torre.

$\Theta_z$ (grau)	% $\omega_b$ (espelho -2)	% $\omega_b$ (espelho -3)	% $\omega_b$ (espelho -4)	% $\omega_b$ (espelho -5)	% $\omega_b$ (espelho -6)
0	0,40	1,08	1,78	2,39	2,87
10	0,48	1,34	2,10	2,75	3,27
20	0,20	1,10	2,05	2,91	3,62
30	0,00	0,57	1,58	2,49	3,24
40	0,00	0,00	0,77	1,76	2,59
50	0,00	0,00	0,00	0,58	1,54

Os valores contidos nas Tab. 1 e 2 indicam que os espelhos posicionados no lado esquerdo da torre sofrem maior bloqueio no decorrer do dia em comparação aos espelhos posicionados à direita da torre, exceto ao meio dia solar onde as áreas de bloqueio dos espelhos situados em posições simétricas em relação à torre são idênticas. Essa simetria nos valores das áreas de bloqueio se deve ao posicionamento característico dos espelhos dos concentradores Fresnel convencionais ao meio dia solar, como sugere a Fig. 13.

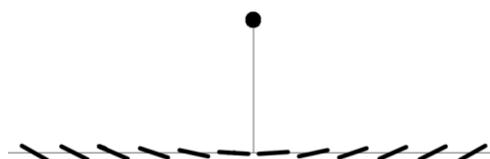


Figura 13 – Posicionamento dos espelhos ao meio dia solar.

A Fig. 14 mostra o comportamento do percentual da área de bloqueio total do concentrador Fresnel analisado, em relação à frente de onda efetiva. Observa-se que a máxima área de bloqueio sobre o concentrador ocorre ao meio dia solar.

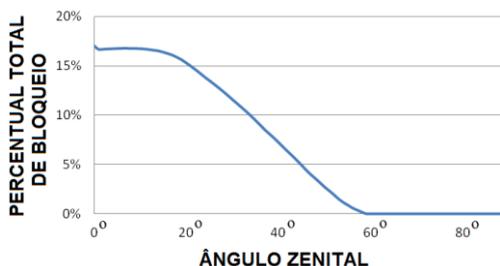


Figura 14 – Evolução do percentual total de bloqueio, relativo à frente de onda efetiva, do concentrador Fresnel analisado.

## 6. ÁREA DE PERDA ENTRE ESPELHOS

A forma como os espelhos de um concentrador Fresnel convencional são posicionados permite que a radiação encontre espaço entre os espelhos para passar através do sistema sem ser refletida. Em algumas posições do sol no céu os raios solares se perdem no vão existente entre espelhos adjacentes, determinando assim a área de perda entre espelhos.

O cálculo da área de perda entre espelhos foi realizado através da análise da intersecção das retas paralelas aos raios de sol (tangentes às bordas dos espelhos) com a reta que contém a frente de onda efetiva, de acordo com o esquema apresentado na Fig. 15.

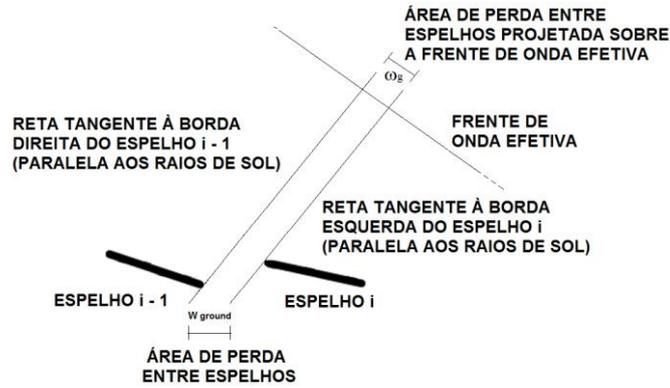


Figura 15 – Intersecções entre a frente de onda efetiva e as retas tangentes às bordas dos espelhos.

O tamanho da área de perda entre espelhos varia com o posicionamento dos espelhos no sistema e com o ângulo zenital. A Fig. 16a mostra que a área de perda entre espelhos é máxima ao meio dia solar, quando a quantidade de radiação perdida entre cada par de espelhos é simétrica em relação à torre devido ao posicionamento característico dos espelhos nesse período do dia, como ocorre com a área de bloqueio. Com o aumento do ângulo zenital (Fig. 16b), os pares de espelhos posicionados no lado da torre em que o sol se encontra passam a ter área de perda maior do que os pares de espelhos posicionados no lado oposto. O comportamento do percentual total da área de perda entre espelhos, relativo à frente de onda efetiva, do concentrador Fresnel analisado é apresentado na Fig. 17.

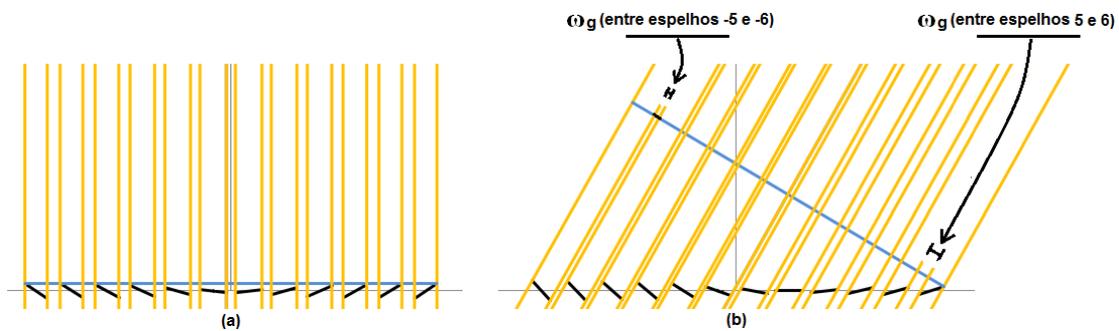


Figura 16 – Visualização das áreas de perda entre espelhos ao meio dia solar (a) e em um instante anterior (b).

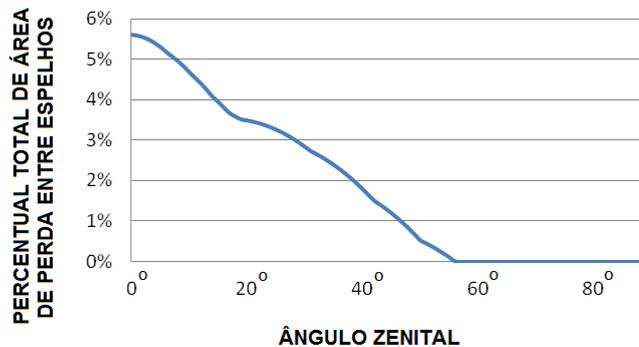


Figura 17 – Comportamento do percentual total da área de perda entre espelhos, relativo à frente de onda efetiva, do concentrador Fresnel analisado.

## 7. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A variação do ângulo de borda de um concentrador Fresnel pode ser realizada, mantendo-se a altura da torre, pela mudança no tamanho dos espelhos ou na distância entre eles. Assim é preciso definir qual dessas duas opções resulta em menor perda de radiação. Com esse objetivo (sendo  $\omega$  a metade do tamanho de um espelho e  $D$  a distância entre os eixos de dois espelhos adjacentes), foram analisados quatro tamanhos diferentes de espelhos ( $\omega = 0,5$  m;  $\omega = 1,0$  m;  $\omega = 1,5$  m;  $\omega = 2,0$  m) cada um com quatro valores distintos de espaçamento entre os eixos ( $D = 2,0 \omega$ ;  $D = 2,1 \omega$ ;  $D = 2,2 \omega$ ;  $D = 2,3 \omega$ ).

Os resultados se encontram na Tab. 3, onde é possível observar que para um dado valor de  $\omega$ , o aumento no espaçamento entre os espelhos resulta em crescimento no total das perdas relativas à frente de onda efetiva ( $\omega_b + \omega_g$ ). Isso ocorre porque a atenuação da área de bloqueio é acompanhada por um grande aumento na área de perda entre espelhos.

TABELA 3 - Percentuais de perdas de energia, relativos à frente de onda efetiva, devido ao fenômeno de bloqueio ( $\omega_b$ ) e ao espaço compreendido entre espelhos ( $\omega_g$ ).

<b><math>\omega = 0,5</math> m</b>	<b><math>D = 2,0 \omega</math></b>	<b><math>D = 2,1 \omega</math></b>	<b><math>D = 2,2 \omega</math></b>	<b><math>D = 2,3 \omega</math></b>
% $\omega_b$	3,51	1,15	0,24	0,00
% $\omega_g$	1,05	5,49	9,56	13,30
% ( $\omega_b + \omega_g$ )	4,56	6,64	9,80	13,30
<b><math>\omega = 1,0</math> m</b>	<b><math>D = 2,0 \omega</math></b>	<b><math>D = 2,1 \omega</math></b>	<b><math>D = 2,2 \omega</math></b>	<b><math>D = 2,3 \omega</math></b>
% $\omega_b$	10,43	7,78	5,91	4,68
% $\omega_g$	3,26	7,75	11,87	15,65
% ( $\omega_b + \omega_g$ )	13,69	15,53	17,78	20,33
<b><math>\omega = 1,5</math> m</b>	<b><math>D = 2,0 \omega</math></b>	<b><math>D = 2,1 \omega</math></b>	<b><math>D = 2,2 \omega</math></b>	<b><math>D = 2,3 \omega</math></b>
% $\omega_b$	17,03	14,36	12,54	11,01
% $\omega_g$	5,53	10,02	14,13	17,90
% ( $\omega_b + \omega_g$ )	22,56	24,38	26,67	28,91
<b><math>\omega = 2,0</math> m</b>	<b><math>D = 2,0 \omega</math></b>	<b><math>D = 2,1 \omega</math></b>	<b><math>D = 2,2 \omega</math></b>	<b><math>D = 2,3 \omega</math></b>
% $\omega_b$	22,48	20,00	17,81	16,29
% $\omega_g$	7,53	11,98	16,05	19,77
% ( $\omega_b + \omega_g$ )	30,01	31,98	33,86	36,06

Os resultados da Tab. 3 indicam que o espaçamento definido pela relação  $D = 2 \omega$  fornece a menor perda total de energia entre os espaçamentos analisados, seja qual for o tamanho dos espelhos. Por exemplo, considerando  $\omega = 1,5$  m, ao aumentar o espaço entre os eixos dos espelhos em 15% (mudança de  $D = 2,0\omega$  para  $D = 2,3\omega$ ) a área de bloqueio diminui 6,02% (variação de 17,03% para 11,01%) enquanto a área de perda entre espelhos aumenta 12,37% (variação de 5,53% para 17,90%), conseqüentemente a soma das perdas aumenta 6,35% (variação de 22,56% para 28,91%).

Assim, o espaço entre os eixos dos espelhos que fornece a menor soma das perdas de energia é dado pelo mínimo afastamento entre espelhos permitido pelo sistema, de forma que se todos os espelhos estivessem posicionados horizontalmente não haveria espaço entre as bordas de dois espelhos adjacentes.

## 8. EFICIÊNCIA

Os resultados da análise de sensibilidade mostram que para um dado tamanho dos espelhos a soma das perdas cresce à medida que a distância entre as bordas aumenta, conseqüentemente, o espaçamento entre os eixos dos espelhos que fornece o menor desperdício é igual ao tamanho de cada espelho. Desta forma, para aumentar o ângulo de borda de um concentrador Fresnel, garantindo a máxima fração da energia incidente disponível sobre a região de coleta (sem alterar a altura da torre), é preciso aumentar o tamanho dos espelhos ( $2\omega$ ) sob a condição para o espaçamento entre os eixos definida pela relação  $D = 2\omega$ , como é realizado, por exemplo, na segunda coluna da Tab. 3, em que essa condição é mantida para quatro valores de  $\omega$ . Os valores da Tab. 3 indicam que a soma do percentual das perdas de energia cresce sempre que o ângulo de borda é aumentado.

A soma das perdas de energia relativas à frente de onda efetiva exerce um papel fundamental na determinação da eficiência dos concentradores Fresnel, a qual é definida pela relação entre a energia incidente e a energia coletada sobre a região absorvedora, de acordo com a Eq. (5).

$$\eta_{Fresnel} = \frac{P_{abs}}{P_{inc}} = \frac{P_{inc} - (P_{bl} + P_{ground})}{P_{inc}} = 1 - \frac{P_{bl} + P_{ground}}{P_{inc}} \quad (5)$$

Onde,  $P_{inc}$ ,  $P_{abs}$  são respectivamente os valores da potência cedida pela da radiação incidente e a potência entregue ao absorvedor, enquanto  $P_{bl}$  e  $P_{ground}$  são as perdas devido ao bloqueio e às áreas entre espelhos.

A Eq. (5) pode ser escrita em função da área de bloqueio sobre os espelhos ( $w_{bl}$  na Fig. 11) e da área de perda entre espelhos ( $w_{ground}$  na Fig. 15) na forma da Eq. (6).

$$\eta_{Fresnel} = 1 - \sum \frac{I_{bn} \cdot w_{bl} \cos(i_{espelho}, i_{bn}) + I_{bn} \cdot w_{ground} \cos(i_{hor}, i_{bn})}{I_{bn} \cdot S} \quad (6)$$

$$\eta_{Fresnel} = 1 - \sum \frac{w_{bl} \cos(i_{espelho}, i_{bn}) + w_{ground} \cos(i_{hor}, i_{bn})}{S} \quad (7)$$

Em que  $I_{bn}$  é a componente direta da radiação global,  $S$  é o tamanho da abertura da frente de onda efetiva, que ao meio dia solar coincide com o tamanho da abertura do concentrador,  $i$  é um versor na direção indicada pelo seu respectivo índice,  $(i_{espelho}, i_{bn})$  é o ângulo entre o versor na direção da reta normal ao espelho e o versor na direção do raio incidente e  $(i_{hor}, i_{bn})$  é o ângulo entre o versor na direção da reta normal à área entre espelhos e o versor na direção do raio incidente.

No entanto, utilizando os conceitos formalizados pela Eq. (1), as áreas de perda por bloqueio e entre espelhos, projetadas sobre a frente de onda efetiva ( $\omega_b$  e  $\omega_g$ ), são definidas pelas Eq. (8) e (9).

$$\omega_b = w_{bl} \cdot \cos(i_{espelho}, i_{bn}) \quad (8)$$

$$\omega_g = w_{ground} \cdot \cos(i_{hor}, i_{bn}) \quad (9)$$

Assim, considerando as áreas de perda projetadas sobre a frente de onda efetiva, a Eq. (7) pode ser escrita em função das perdas relativas à energia incidente ( $P_{rel}$ ), de acordo com a sequência abaixo:

$$\eta_{Fresnel} = 1 - \sum \left( \frac{\omega_b + \omega_g}{S} \right) \quad (10)$$

$$\eta_{Fresnel} = 1 - \sum \left( \frac{\omega_b}{S} + \frac{\omega_g}{S} \right) \quad (11)$$

$$\eta_{Fresnel} = 1 - \sum P_{rel} \quad (12)$$

Desta forma, foi possível obter a eficiência do concentrador Fresnel analisado para diversos valores do ângulo de borda, os resultados estão apresentados na Fig. 18. O gráfico indica que a eficiência do concentrador diminui com o aumento do ângulo de borda devido ao crescimento da soma das perdas de energia relativas à frente de onda efetiva ( $P_{rel}$ ).

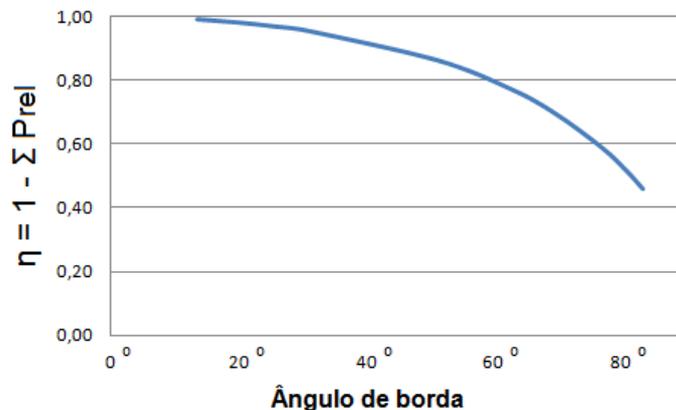


Figura 18 – Curva da eficiência do concentrador Fresnel analisado em função do ângulo de borda.

Contudo, para obter a configuração que fornece a melhor condição de operação do sistema é preciso considerar alguns fatores que não são abordados nesse trabalho como fator de interceptação, produção de energia térmica, entre outros.

## 9. CONCLUSÃO

O tamanho da abertura disponível para a entrada de energia em um concentrador Fresnel depende da posição do sol no céu, encontrando seu valor máximo ao meio dia solar.

A área de sombra representa uma parcela de material sem função momentânea no sistema, porém, a existência de sombras não impõe perdas à energia incidente.

O limite de sombreamento determina o início das perdas de energia entre as bordas dos espelhos.

A configuração que oferece a menor soma das perdas relativas de energia é definida por um espaçamento entre os eixos dos espelhos idêntico ao tamanho de cada espelho do sistema.

A eficiência de um concentrador Fresnel diminui com o aumento do ângulo de borda devido ao crescimento da soma das perdas relativas de energia.

As áreas de perda entre espelhos e de bloqueio são parâmetros importantes para determinar a fração da energia incidente que não é aproveitada pelo sistema, contudo, esses parâmetros não são suficientes para determinar a configuração que fornece a máxima coleta de energia.

## REFERÊNCIAS

- Buie, D. “Optical Considerations in Solar Concentrating Systems”. University of Sydney (2004).
- Chaves, J. “Introduction to nonimaging optics”. Taylor & Francis Group (2008).
- Lara, F., Velázquez, N., Saucedo, D. e Acuña, A. “Metodología para el Dimensionamiento y Optimización de un Concentrador Lineal Fresnel”. Información Tecnológica Vol. 24 N° 1 – 2013.
- Mathur, S. S., Kandpal, T. C. e Negi, B.S., Optical Design and Concentration Characteristics of Linear Fresnel Reflector Solar Concentrators-I. Mirror Elements of Varying Width. Energy Convers. Mgmt.: 31(3), 205-219 (1991).
- Mills, D. “Advances in solar thermal electricity technology”. Solar Energy, Vol. 76, pp. 19-31, (2004).
- Mills, D. R., Morrison, G. L. “Compact Linear Fresnell Reflector Solar Thermal Powerplants”. School of Physics, University of Sydney e School of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of New South Wales, (1998).
- Silvi, C., 2009. The Pioneering Work on Linear Fresnel Reflector Concentrators (LFRs) in Italy. Atti congresso SolarPaces2009, Electricity, fuels and clean water powered by the sun, Berlin, Germany, 15-18 settembre 2009.

### SHADOW, BLOCKAGE AND AREA OF LOSS OF A LINEAR FRESNEL CONCENTRATOR. SENSITIVITY ANALYSIS.

**Abstract.** *The concentrator collectors used in the solar thermal conversion have as main components a reflective surface and an absorber element through which a thermal fluid circulates to be heated by radiation. Among the existing concentrators, solar systems consisting of parabolic cylinders are the most frequently used to generate electrical energy on a large scale. However, costs related to the installation of power plants that use parabolic cylinder hamper competition with other forms of energy production. Alternatively, the Fresnel concentrators have a set of characteristics which offer considerable potential for cost reduction. However, the efficiency of Fresnel concentrator depends on factors such as blockage of the reflected radiation and loss area between mirrors, which attenuate the radiation collected. This article analyzes the areas of shadow, of blockage and of loss between Fresnel concentrators mirrors, and estimates their influences on the system's performance.*

**Key words:** *Fresnel, shadow, blockage, loss.*