

Concentrador solar aplanático de dupla reflexão - Fundamentação teórica, modelo analítico para cálculo de concentração efetiva e análise de desempenho

Emerson Torres Aguiar Gomes (UFPE) - etagomes@hotmail.com

Olga de Castro Vilela (UFPE) - ocv.olga.cer@gmail.com

Naum Fraidenraich (UFPE) - naumfraiden2@gmail.com

Carlos Antônio Alves de Oliveira (Instituição - a informar) - caaoliveira@gmail.com

Resumo:

O presente trabalho consiste em realizar análise de configurações de dispositivos voltados para concentração solar térmica com dupla reflexão, apresentar o aplanático como uma alternativa para aumento de concentração solar e propor uma nova configuração que apresente características distintas às dos dispositivos já existentes com ganho de concentração solar térmica. O trabalho parte da apresentação do concentrador aplanático, com sua geometria característica. Em seguida, é apresentado o modelo analítico para dimensionamento da concentração solar efetiva obtida para os aplanáticos mais adequados para concentração solar face sua compactidade, e por fim, são realizadas simulações por meio de traçadores de raio que corroboram os resultados analíticos obtidos pelo modelo proposto. Os resultados obtidos e apresentados neste trabalho com o concentrador de geometria aplanática mostraram-se bem superiores aos obtidos com o cilindro-parábola que atualmente chega a 24 sóis de concentração efetiva. A concentração apresentada pelo concentrador aplanático elíptico de dimensões similares às do concentrador cilindro-parábola LS3 é de 38,4 sóis, chegando a ser 60% superior ao LS3.

Palavras-chave: Aplanático, Concentração solar, Dupla reflexão

Área temática: Conversão Térmica com Concentradores

Subárea temática: Coletores concentradores e sistemas para conversão térmica em média temperatura

CONCENTRADOR SOLAR APLANÁTICO DE DUPLA REFLEXÃO – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA, MODELO ANALÍTICO PARA CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO EFETIVA E ANÁLISE DE DESEMPENHO

Emerson Torres Aguiar Gomes – etgomes@hotmail.com

Naum Fraidenraich – naumfraiden2@gmail.com

Olga de Castro Vilela - ocv.olga@gmail.com

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, CER - Centro de Energias Renováveis

Carlos Antônio Alves de Oliveira – caaoliveira@gmail.com

Instituto Federal de Educação de Alagoas Campus Palmeira dos Índios – IFAL

Jeffrey M. Gordon – jeff@bgu.ac.il

Department of Solar Energy and Environmental Physics, Jacob Blaustein Institutes for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev, Sede Boqer Campus, 8499000, Israel

Resumo. O presente trabalho consiste em realizar análise de configurações de dispositivos voltados para concentração solar térmica com dupla reflexão, apresentar o aplanático como uma alternativa para aumento de concentração solar e propor uma nova configuração que apresente características distintas às dos dispositivos já existentes com ganho de concentração solar térmica. O trabalho parte da apresentação do concentrador aplanático, com sua geometria característica. Em seguida, é apresentado o modelo analítico para dimensionamento da concentração solar efetiva obtida para os aplanáticos mais adequados para concentração solar face sua compactidade, e por fim, são realizadas simulações por meio de traçadores de raio que corroboram os resultados analíticos obtidos pelo modelo proposto. Os resultados obtidos e apresentados neste trabalho com o concentrador de geometria aplanática mostraram-se bem superiores aos obtidos com de cilindro-parábola que atualmente chega a 24 sóis de concentração efetiva. A concentração apresentada pelo concentrador aplanático elíptico de dimensões similares às do concentrador cilindro-parábola LS3 é de 38,4 sóis, chegando a ser 60% superior ao LS3.

Palavras-chave: Aplanático, Concentração solar, Dupla reflexão

1. INTRODUÇÃO

Quando se trata de concentração solar térmica, busca-se elevar temperatura do fluido que circula nos tubos absorvedores para aumentar a eficiência na conversão termoeletrônica. Uma das formas de se elevar a temperatura do fluido é maximizando o produto concentração geométrica e eficiência ótica do sistema, tendo-se assim o conceito de concentração efetiva ou de fluxo.

A busca por esse aumento de concentração envolve dispositivos com dupla reflexão, como cilindro-parábola com secundário (Rodrigues-Sanchez e Rosengarten, 2015) e concentradores de ótica ideal como aqueles construídos pelo método SMS (simultaneous multiple surface) (Canavarró *et al.*, 2013). Deve-se notar que dispositivos de dupla reflexão que utilizam ótica ideal são não formadores de imagens (Miñano *et al.*, 2009). Mais recentemente, foi proposta a utilização de dispositivos formadores de imagens, apresentando geometria aplanática para concentração solar fotovoltaica (Gordon, 2010).

Este artigo apresenta o concentrador aplanático como uma alternativa para concentração solar térmica com dupla reflexão apresentando em seu foco absorvedor cilíndrico. Inicialmente, são apresentados os parâmetros s , K e NA (Ostroumov *et al.*, 2009) que definem unicamente o primário e o secundário do aplanático e suas diversas configurações. Em seguida, são analisadas as concentrações geométricas para absorvedores cilíndricos de diferentes raios, bem como suas respectivas eficiências óticas, obtendo-se a concentração efetiva de forma analítica.

1.1 Fundamentação Teórica: Concentração Solar e Aplanático

Aumento da concentração solar torna-se imprescindível quando se deseja obter elevadas temperaturas e melhoria na eficiência da geração termoeletrônica. A concentração solar (Rabl, 1985) relaciona a área da abertura do concentrador (A_{Ap}) com a área da superfície absorvedora (A_{Abs}) (Eq. 1).

$$C = C_{geom} = \frac{A_{Ap}}{A_{Abs}} \quad (1)$$

O espelho aplanático trata-se de uma adaptação de duas superfícies óticas com graus de liberdade, tendo sido desenvolvidas inicialmente para aplicações com telescópios (Lynden-Bell, 2002). O problema matemático para

eliminação da aberração esférica foi solucionado há muitos anos e a partir de 2002 os aplanáticos passaram a ser revisitados e aplicados à concentração de energia solar (Marshall *et al.*, 2015).

Para o espelho ser considerado aplanático, o mesmo deve obedecer ao princípio de Fermat, à Lei de Snell e à Condição do seno de Abbe (Fig. 1):

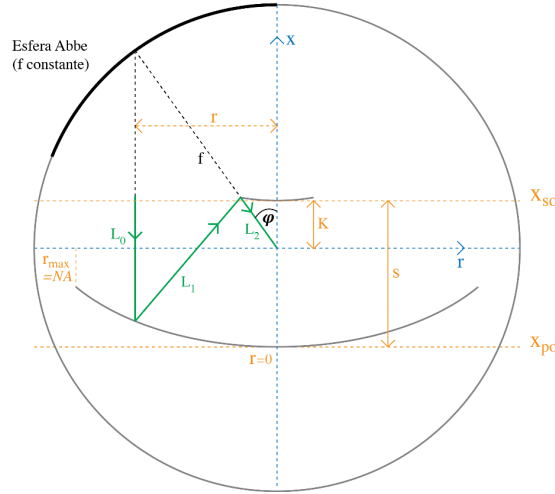


Figura 1- Ilustração da construção de um aplanático de duplo espelho

A Fig.1 ilustra da construção de um aplanático de duplo espelho com um raio arbitrário de forma que a posição radial r é traçada a partir da frente de onda, alcançando o foco sob um ângulo φ relativo ao eixo óptico. Entende-se por φ , o ângulo de aceitação observado pelo absorvedor cujo centro está situado na origem do nosso sistema de coordenadas (r, x) . O comprimento focal é indicado por f , sendo igual ao raio da esfera de Abbe tendo valor unitário. O raio do espelho primário mede $r_{\max}$, sendo igual à abertura numérica (NA). Os dois parâmetros de entrada s (distância vertical entre os vértices dos espelhos primário e secundário) e K (distância vertical entre o vértice de espelho secundário e o foco) definem o aplanático. Já os índices p e s denotam respectivamente os espelhos primário e secundário. Para melhor entendimento, o absorvedor de formato tubular não é desenhado na figura, sendo localizado no centro do sistema de coordenadas, centralizado no foco.

Como pode ser observado na Figura 1, s é um parâmetro adimensional e representa a separação dos vértices do primário e do secundário do aplanático, de forma que temos (Eq. 2):

$$s = \frac{x_{po} - x_{so}}{f} \quad (2)$$

Onde x_{po} e x_{so} são as coordenadas axiais dos vértices do primário e secundário, respectivamente.

O K representa outro parâmetro adimensional fundamental para a construção do aplanático, relacionando a distância entre o foco e o vértice do secundário (Eq. 3):

$$K = \frac{-x_{so}}{f} \quad (3)$$

A partir dos parâmetros adimensionais s e K , é possível definir o conjunto de pontos pertencentes ao primário e ao secundário do aplanático, desde que sejam cumpridas as relações (Lynden-Bell, 2002) a seguir (Eq. 4 a 9):

$$r_p = \sin(\varphi) \quad (4)$$

$$x_p = s - \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) + \frac{g(\varphi)}{s} (1 - Kf(\varphi)) \cos^4\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (5)$$

$$r_s = \frac{2sKf(\varphi)\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right)}{Kf(\varphi)\tan^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) + g(\varphi)} \quad (6)$$

$$x_s = -r_s \cot(\varphi) \quad (7)$$

$$g(\varphi) = s - (1 - s) \tan^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (8)$$

$$f(\varphi) = \left| \frac{g(\varphi)}{s} \right|^{\frac{s}{s-1}} \quad (9)$$

Os índices p e s referenciam-se ao primário e ao secundário, respectivamente. As variáveis r_p e x_p indicam, como pode ser visualizado na Figura 1, distância no eixo r e a altura no eixo x do aplanático primário. Já as variáveis r_s e x_s , indicam a distância no eixo r e a altura no eixo x do aplanático secundário.

As equações que relacionam as dimensões do primário e secundário do aplanático dependem dos parâmetros s e K. Logo, ajustando s e K, podemos ter aplanáticos com dimensões distintas, dependendo de s e K escolhidos.

Ao longo do trabalho, quando considerados os parâmetros s e K positivos, esse tipo de aplanático será denominado hiperbólico, ao se utilizar parâmetros s e K negativos, o aplanático será denominado elíptico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A partir das equações que definem os espelhos primário e secundário do aplanático, indicadas de (Eq. 4) à (Eq. 9), cumpre-se variar os parâmetros s e K para propor configurações de aplanáticos que possam vir a ser concentradores com compacidade, tornando-se soluções que ampliem a concentração de fluxo a parâmetros superiores aos já existentes. A configuração mais apropriada para concentração solar considerando-se a compacidade e concentração obtidas é aquela em que ambos os parâmetros adimensionais s e K são positivos ou negativos (Gomes *et al.*, 2016)

2.1 Limite de Concentração do Aplanático

Para o caso específico de concentradores com dupla reflexão como os aplanáticos, o limite de concentração apresenta-se relacionando a superfície do primário e a superfície do um proposto absorvedor cilíndrico e os cones da radiação incidentes em ambas as superfícies (Fig. 2).

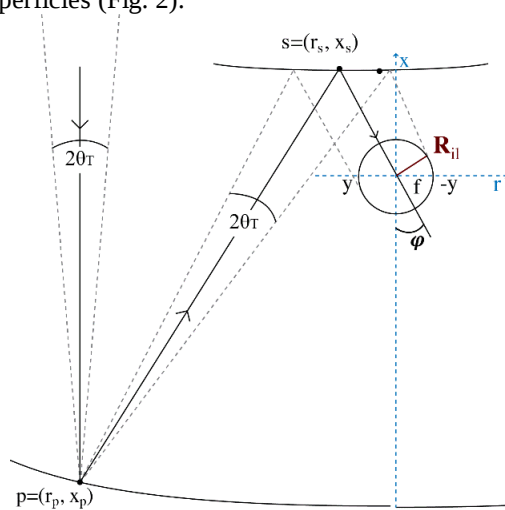


Figura 2 - Concentrador aplanático com o feixe de radiação solar sob um cone de radiação de ângulo máximo $2\theta_T$, iluminando uma região cilíndrica de raio R_{il}

O raio (R_{il}) representa a região iluminada pela radiação solar e apresenta dimensões diferentes de acordo com o ponto em que a radiação toca o primário. A região iluminada apresenta perímetro de $2\pi R_{il}$, tendo o seu cone de iluminação variando com o ângulo φ , indicado na Fig. 2. Assim, obtém-se a Eq. 10.

$$r_p \cdot \sin\theta_T = \pi \cdot R_{il} \cdot \sin\varphi \quad (10)$$

Por meio da equação que define um aplanático, r_p equivale a $\sin(\varphi)$, então o raio da região iluminada, que define o limite de concentração do aplanático depende do semiângulo θ_T (Eq. 11). Nesse trabalho, o semiângulo total, incluindo os erros óticos e especulares considerado é θ_T , aproximadamente $2\theta_s$ (semiângulo solar). Quanto menor o semiângulo total considerado θ_T , maior a precisão ótica necessária para coleção da radiação solar de forma eficiente. Esse valor de aproximadamente 2 sóis está em consonância com a literatura, segundo Canavaro *et al.* (2013).

$$R_{il} = \frac{\sin\theta_T}{\pi} \quad (11)$$

Para que um hipotético absorvedor cilíndrico fosse disposto no mesmo local da região iluminada, este absorvedor deveria ter dimensões no mínimo idênticas às da região iluminada para captar toda a radiação solar. Assim, o raio de absorvedor mínimo deve ter dimensões iguais às da menor região iluminada (Eq. 12).

$$R_{abs_min} = \frac{\sin \theta_T}{\pi} \quad (12)$$

2.2 Dimensionamento do Raio do Absorvedor

Para dimensionar o raio região de iluminação em torno do foco, devem-se seguir as seguintes etapas em sua metodologia:

- Definir parâmetros s e K , excursionar o ângulo φ desde valores próximos a zero até o valor definido como φ_{max} .
- Calcular o ângulo de borda do aplanático (Figura 3) $\alpha(\varphi)$, sendo formado pelo raio incidente solar normal ao plano de abertura do aplanático, o ponto em que há reflexão no primário (r_p, x_p) e o ponto em que esse feixe toca o secundário (r_s, x_s), sendo determinado pela Eq. 13.

$$\tan(\alpha(\varphi)) = \frac{r_p(\varphi) - r_s(\varphi)}{x_p(\varphi) - x_s(\varphi)} \quad (13)$$

- Atribuir-se um valor ao semiângulo total θ_T neste trabalho o valor para θ_T utilizado foi de 9mrad que inclui o semiângulo solar θ_s e os erros totais. Definindo-se θ_T , obtém-se o ponto em que a extremidade desse cone de incidência (θ_T) toca o secundário no ponto s' com respectivo par de coordenadas (r_s', x_s'). Esse ponto s' indica o ponto da extremidade do cone formado pelo semiângulo θ_T em que esse cone toca o secundário.
- Identificar a distância do foco (Fig.3), que está na origem do sistema de coordenadas (0,0), ao ponto do secundário (r_s, x_s) de onde vem o feixe de radiação após a segunda reflexão no aplanático. Assim, é possível identificar para cada par de coordenadas (r_p, x_p), o raio da região iluminada associada.

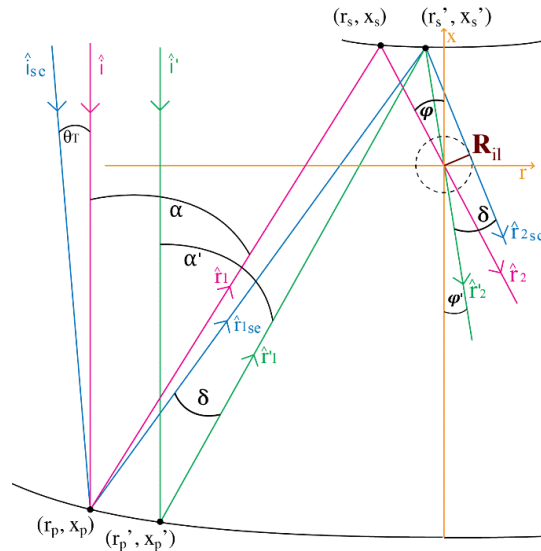


Figura 3 - Distribuição de Feixes de raios que atingem o aplanático

Seja $\hat{i}$ o feixe de radiação solar que atinge verticalmente o primário do aplanático no ponto p de coordenadas (r_p, x_p), $\hat{i}_{se}$ é o feixe proveniente do sol (à esquerda do feixe $\hat{i}$ que faz com ele o semiângulo θ_T). Para melhor compreensão da notação utilizada na Figura, o índice 1 denota feixes após primeira reflexão (primário), o índice 2 denota feixes após a segunda reflexão (secundário). Note-se que os feixes de radiação refletidos no primário tocam o secundário em pontos distintos: o feixe que incide perpendicularmente no primário, parte do primário seguindo conforme $\hat{f}_1$ e atinge o secundário no ponto s (r_s, x_s); já o feixe que atinge o primário no ponto p sob o semiângulo θ_T é refletido no primário e segue conforme $\hat{f}_{se}$ atingindo o secundário no ponto s' (r_s', x_s'). A partir do ponto s' , parte o feixe $\hat{f}_2$ até alcançar o eixo de coordenadas r transversal à direção de propagação ao raio solar $\hat{i}$. Caso ao invés de se dispor de um anteparo plano, a proposta parte da inserção de um absorvedor cilíndrico de raio (R_{abs}) concêntrico à região iluminada de raio R_{il} (Fig. 3). Após a reflexão no ponto p de coordenadas (r_p, x_p), do primário, o feixe central intercepta o secundário no ponto (r_s, x_s) e o feixe de borda do cone de radiação no ponto (r_s', x_s'). Como pode ser observado na Figura 3, o ângulo $\alpha(\varphi)$, medido entre $\hat{i}$ e $\hat{f}$ pode ser obtido pela Eq. 14.

$$\tan(\alpha(\varphi)) = \frac{r_p(\varphi) - r_s(\varphi)}{x_p(\varphi) - x_s(\varphi)} \quad (14)$$

Onde φ é o ângulo entre o raio $\hat{f}_2$ indicado na Fig. 3, o eixo normal ao aplanático e a origem do sistema de coordenadas. O ângulo φ determina, juntamente com os parâmetros adimensionais s e K , os pontos p no primário (r_p, x_p)

e s no secundário (r_s , x_s) em que raio central do cone solar toca. O raio auxiliar $\hat{i}'$ incidente na abertura do primário no ponto p' (r_p' , x_p') alcança o secundário no ponto s' (r_s' , x_s'). Esses pontos foram definidos em função do semiângulo solar já com os erros totais θ_T . Assim, utilizando-se um θ_T maior, a abertura desse cone aumentará. Sendo essa uma abordagem inovadora do presente trabalho, visto que a literatura vigente não analisa o comportamento da região de iluminação de raio cilíndrico, onde pode-se dispor um absorvedor para absorção de toda ou parte da radiação solar. A distribuição dos ângulos de chegada no aplanático pode ser observada por meio da Fig. 3.

Pode-se observar na Fig. 3, a igualdade indicada na Eq. 15, sendo essa equação é válida para qualquer que seja o aplanático, tipo hiperbólico ($s>0$ e $K>0$) ou tipo elíptico ($s<0$ e $K<0$).

$$\alpha(\varphi) + \theta_T = \alpha'(\varphi) + \delta \quad (15)$$

Como pode ser observado na Fig. 3, obtém-se a Eq. 16 que relaciona os pontos principais com os pontos deslocados obtidos por meio da consideração do raio de semiângulo θ_T refletido no primário do aplanático.

$$\tan(\alpha(\varphi) + \theta_T) = \frac{r_p(\varphi) - r'_s(\varphi')}{x_p(\varphi) - x'_s(\varphi')} \quad (16)$$

φ' é o ângulo de saída do secundário do aplanático até o absorvedor proveniente do primário sob o feixe $\hat{i}'$. O primeiro membro da Eq. 16 é conhecido, visto que $\alpha(\varphi)$ é obtido para cada φ por meio dos pares de coordenadas do aplanático e θ_T é o cone solar já com erros totais considerado. O ângulo φ é definido pela escolha do ponto do feixe de luz $\hat{i}$ na abertura, assim, conhecemos também $r_p(\varphi)$ e $x_p(\varphi)$. As incógnitas nos fornecem uma equação transcendental em que $r'_s(\varphi')$ e $x'_s(\varphi')$ podem ser determinados por métodos iterativos. Uma vez conhecido o ângulo de saída φ' , os dois pares de coordenadas do primário e secundário do aplanático do feixe de luz $\hat{i}'$ podem ser determinados e portanto $\alpha'(\varphi)$ é obtido por meio da Eq. 17.

$$\tan(\alpha'(\varphi)) = \frac{r'_p(\varphi') - r'_s(\varphi')}{x'_p(\varphi') - x'_s(\varphi')} \quad (17)$$

Obtido o ângulo $\alpha'(\varphi)$, pode-se retornar para a Eq. 15 e calcular o valor do ângulo δ (Eq. 18).

$$\delta = \alpha + \theta_T - \alpha' \quad (18)$$

Assim, a partir da Fig. 3, pode-se obter o valor do raio da região iluminada (Eq. 19) como indicado a seguir.

$$R_{il} = [(r'_s)^2 + (x'_s)^2]^{1/2} \cdot \text{sen}(\delta) \quad (19)$$

O raio da região iluminada R_{il} pode ser calculado definido-se o $\varphi_{\max}$ (ângulo que irá definir o aplanático), os pontos s e K que definem univocamente o aplanático.

2.3 Cálculo Analítico da Concentração Efetiva

Para cálculo da concentração efetiva do absorvedor, não basta a obtenção da concentração com sombra, faz-se necessário contemplar a função aceitação angular $F(\theta)$ inerente ao conjunto de espelhos aplanáticos previamente definidos. Para tanto, é necessário definir a distribuição de radiação a ser adotada para representar a forma como a radiação solar pode ser aproximada, ou representada. A função de aceitação angular depende da relação descrita na Eq. 20.

$$F(\theta_T, R_{abs}) = \frac{r_p - r_{s\max}}{r_{p\max} - r_{p\min}} \quad (20)$$

Como pode-se observar por meio da Eq. 20, a função aceitação angular depende fundamentalmente da geometria do aplanático, da relação entre tamanhos de seus refletores primário e secundário, bem como do raio de absorvedor escolhido e dos erros totais considerados (θ_T). Quanto maior o raio do absorvedor, mantendo-se os demais parâmetros do aplanático, mais raios coletados pelo aplanático são absorvidos, logo, maior a função de aceitação angular. O comportamento da função de aceitação angular $F(\theta_T)$ versus o desvio angular dos erros totais considerado θ_T pode ser observado por meio da Figura 4. Em que, para um $\theta_T=6\text{mrad}$, pode-se observar que a função aceitação angular vale aproximadamente 0,1 para $R_{abs}=0,003\text{m}$, já para $R_{abs}=0,004\text{m}$, $F(\theta_T)$ vale aproximadamente 0,2. Para $R_{abs}=0,005\text{m}$ $F(\theta_T)$ vale aproximadamente 0,4 e para $R_{abs}=0,006\text{m}$, $F(\theta_T)=1$. O aplanático hiperbólico de parâmetros $s=0,75$, $K=0,03$ e $NA=0,94$ apresenta a função aceitação angular conforme indicada na Fig. 4.

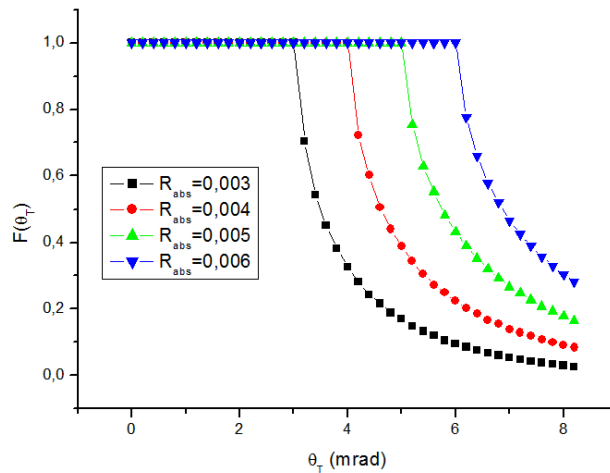


Figura 4 - Gráfico de $F(\theta_T)$ para um aplanático hiperbólico de parâmetros $s=0,75$, $K=0,03$, $NA=0,94$, $0,003m < R_{abs} < 0,006m$ vs θ_T (mrad)

A concentração efetiva é obtida por meio do produto da eficiência ótica (η_0) pela concentração geométrica com sombra (C_{cs}) (Eq. 21).

$$C_{eff} = \eta_0 C_{cs} = \eta_0 \frac{(r_p - r_s)}{\pi R_{abs}} \quad (21)$$

A eficiência ótica é diretamente proporcional à função de aceitação ($F(\theta)$) e ao fator de interceptação (γ). Assim, para maximizar a concentração efetiva do aplanático, deve-se buscar aumentar a função aceitação angular e o fator de interceptação, mantendo a concentração geométrica elevada.

2.4 Busca pelo Concentrador Aplanático Ideal

Como já mencionado neste artigo, de acordo com a escolha dos parâmetros s e K , são obtidos aplanáticos de formas, dimensões e concentrações distintas. Para identificar o aplanático ideal (de elevada concentração, mantendo a compacidade), os parâmetros s e K foram variados dentre os valores a seguir: $0,45 < s < 1,7$ e $0,01 < K < 0,45$.

A Tab. 1 indica os aplanáticos hiperbólicos ($s > 0$ e $K > 0$) de maiores concentrações solares, com ângulo de borda (α) variando de 55 a 65 graus.

Tabela 1 - Relação de aplanáticos tipo hiperbólico com melhor relação de concentração geométrica (θ_T de 9mrad)

s	K	Concentração Geométrica (sóis)	$R_{abs}=R_{il}$ (m)	α (φ) (radianos)	α (φ) (graus)	Concentração Geométrica com sombra (sóis)	Fator de sombra (%)
0,75	0,03	86,62	0,00316	1,07	61,70	78,76	9,08
0,80	0,03	85,83	0,00320	1,02	58,53	78,49	8,56
0,75	0,02	84,59	0,00334	1,09	62,63	78,47	6,14
0,80	0,02	83,09	0,00341	1,03	59,42	78,30	5,78
0,80	0,03	85,09	0,00328	1,02	58,98	78,05	7,18
0,80	0,04	85,68	0,00316	1,01	58,09	77,18	9,93

Pode-se observar que com valores positivos de s e K , o aplanático com maior concentração geométrica com sombra foi o de parâmetros $s=0,75$ e $K=0,03$, chegando-se a concentração de 78,76 sóis. Contudo, foram observados valores de concentração próximos a estes para outros parâmetros s e K .

Similarmente ao realizado com o aplanático tipo hiperbólico, os valores de s e K foram variados para o aplanático tipo elíptico ($s < 0$ e $K < 0$) a fim de identificar aqueles mais adequados para a concentração solar. Os parâmetros s e K foram excursionados entre os valores a seguir: $-1,55 < s < -0,55$ e $-0,5 < K < -0,05$.

A Tab. 2 indica a relação dos aplanáticos mais adequados para a concentração solar encontrados, considerando-se o ângulo de borda entre 55 e 65 graus, visando compacidade da estrutura.

Como pode-se observar, ao se comparar as Tab. 1 e 2, os aplanáticos do tipo hiperbólico apresentam uma maior concentração geométrica com sombra um pouco maior que os do tipo elíptico. Contudo, o fator de interceptação (γ) é maior no aplanático do tipo elíptico que no do tipo hiperbólico como será observado na seção seguinte.

Tabela 2 - Relação de aplanáticos do tipo elíptico com melhor relação de concentração geométrica (θ_T de 9mrad)

s	K	Concentração Geométrica (sóis)	$R_{abs}=R_{il}$ (m)	α (φ) (radianos)	α (φ) (graus)	Concentração Geométrica com sombra (sóis)	Fator de sombra (%)
-0,9	-0,1	80,05	0,00339	1,08	61,89	72,18	9,84
-0,95	-0,1	79,14	0,00342	1,03	59,21	71,21	10,02
-0,85	-0,05	74,08	0,00386	1,07	61,54	70,44	4,91
-1,05	-0,15	78,51	0,00324	1,00	57,31	66,52	15,28
-0,95	-0,15	77,85	0,00329	1,09	62,22	66,35	14,77

3. RESULTADOS

Por meio da metodologia analítica de cálculo apresentada, foi possível obter a concentração efetiva e os fatores de interceptação para a primeira e a segunda reflexões nos espelhos que compõem o primário e secundário do concentrador aplanático, conforme descrito na Tabela 3, bem como os fatores de interceptação e concentração alcançados medidos pelo traçador de raios Soltrace.

Tabela 3 – Aplanáticos elíptico e hiperbólico em função do raio de absorvedor escolhido.

R_{abs}	Elíptico (s=-0,9 e K=-0,1)				Hiperbólico (s=0,75 e K=0,03)			
	C_{CS}	$\gamma_{1R} + \gamma_{2R}$ (Analítico)	$\gamma_{1R} + \gamma_{2R}$ (Soltrace)	C_{eff}	C_{CS}	$\gamma_{1R} + \gamma_{2R}$ (Analítico)	$\gamma_{1R} + \gamma_{2R}$ (Soltrace)	C_{eff}
0,0030	92,8	0,716	0,717	66,6	91,4	0,441	0,423	39,3
0,0035	79,6	0,773	0,786	62,5	78,3	0,503	0,483	38,5
0,0040	69,6	0,810	0,830	57,8	68,6	0,559	0,534	37,2
0,0045	61,9	0,855	0,864	53,5	60,9	0,608	0,581	35,9
0,0050	55,7	0,884	0,892	49,7	54,8	0,653	0,629	35,0
0,0055	50,6	0,910	0,915	46,3	49,9	0,694	0,669	33,9
0,0060	46,4	0,930	0,936	43,4	45,7	0,727	0,709	32,9
0,0065	42,9	0,950	0,950	40,7	42,2	0,757	0,741	31,8
0,0070	39,8	0,966	0,965	38,4	39,2	0,780	0,774	30,8
0,0075	37,1	0,982	0,980	36,4	36,6	0,796	0,803	29,8

É importante ressaltar que o aplanático do tipo elíptico analisado apresenta uma concentração efetiva (C_{eff}) bem superior à do tipo hiperbólico para todos os raios de absorvedor utilizados neste trabalho. A título de exemplo, considerando-se um raio de absorvedor $R_{abs}=0,003$ a concentração efetiva obtida para o aplanático do tipo elíptico (s=-0,9 e K=-0,1) apresenta fator de interceptação superior a 70% e concentração efetiva de 66,6 sóis, já para o aplanático do tipo hiperbólico (s=0,75 e K=0,03) o fator de interceptação dos feixes que atingem o absorvedor é pouco superior a 40%, fazendo com que a concentração efetiva desta configuração de aplanático seja um pouco inferior a 40 sóis.

Os resultados obtidos mostram que o concentrador aplanático do tipo elíptico apresenta-se como uma alternativa viável para a concentração solar térmica por apresentar uma concentração que varia de 36,4 sóis a 66,6 sóis de acordo com o raio de absorvedor adotado (Tab. 3).

Ao se comparar os resultados apresentados na Tab. 3 com os apresentados por Rabl *et al.* (1982) e Manikandan *et al.* (2019) para um concentrador do tipo cilindro-parábola, é possível notar os ganhos. O cilindro-parábola apresenta, para o mesmo semiângulo solar considerado no aplanático de 9mrad, um fator de interceptação de 0,87 para um absorvedor de raio de 2cm e um coletor de 4m de abertura, concentração com sombra de observamos que concentração com sombra de 25,2 sóis, tendo uma concentração efetiva de 24,2 sóis. Já o aplanático tipo elíptico (s=-0,9 e K=-0,1) considerando o mesmo fator de interceptação (γ) de 0,965 apresenta uma concentração efetiva de 38,4 sóis. Ao se observar a Tabela 4 no final desta seção, pode-se comparar o raio do absorvedor adotado para o aplanático de 2,5cm e um espelho primário de 6m de comprimento. Assim, a concentração solar efetiva obtida pelo concentrador aplanático do tipo elíptico chega a ser 60% maior que a de um cilindro-parábola de dimensões semelhantes.

Ao se observar a Tab. 3, é importante notar que os fatores de interceptação foram calculados utilizando-se a metodologia analítica apresentada no trabalho, cujos resultados foram bastante próximos aos obtidos por meio de

simulação de raios realizados com o software soltrace. Tal resultado corrobora a metodologia apresentada como adequada para cálculo de fator de interceptação (γ) e concentração efetiva de estruturas com dupla reflexão e geometria aplanática.

A Tabela 3 apresenta os aplanáticos obtidos para raios de absorvedor que variam desde 0,003m a 0,0075m com restrição do ângulo de borda (α) variando de 55 a 65 graus, buscando aliar compacidade à concentração elevada. É importante notar que os valores indicados como sendo do raio de absorvedor (de 0,003m a 0,0075m) são valores tomados como referência o comprimento focal unitário para formação da esfera de Abbe. Para utilização de absorvedores de dimensões comerciais, basta utilizar fixar o raio do absorvedor comercial que se deseja utilizar e multiplicar as dimensões do primário e secundário pelo fator de multiplicação encontrado de acordo com o raio de absorvedor escolhido desde 0,003m a 0,0075m.

A Fig. 5 apresenta a variação do fator de interceptação para a primeira reflexão (γ_{1R}) e para a segunda reflexão (γ_{2R}) simulado e obtido de forma analítica para o aplanático do tipo hiperbólico de acordo com o raio de absorvedor adotado. Nesta figura pode-se observar que o fator de interceptação para a primeira reflexão (γ_{1R}) é inferior a 10% mesmo para raios de absorvedor maiores. Assim, o fator de interceptação total ($\gamma_T = \gamma_{1R} + \gamma_{2R}$) é próximo ao obtido com a segunda reflexão (γ_{2R}). O fator de interceptação obtido para a primeira reflexão é baixo em função dos feixes que tocam o primário do aplanático não cruzarem o eixo de simetria para atingir o espelho secundário, o que ocorre no caso do aplanático do tipo elíptico.

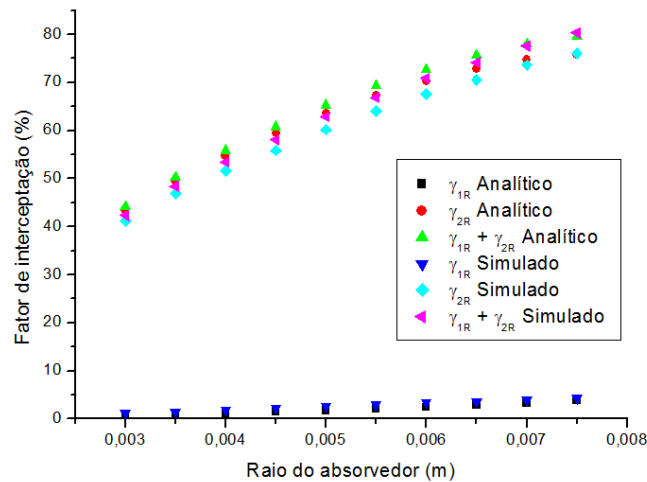


Figura 5 - Fator de interceptação do aplanático hiperbólico $\theta_1=9\text{mrad}$, $s=0,75$, $K=0,03$

A Fig. 6 apresenta a evolução do fator de interceptação para a primeira reflexão (γ_{1R}) e para a segunda reflexão (γ_{2R}) simulado e obtido de forma analítica para o aplanático do tipo hiperbólico de acordo com o raio de absorvedor adotado. Pode-se observar que o fator de interceptação para a primeira reflexão (γ_{1R}) apresenta valores bem superiores aos obtidos para o aplanático do tipo hiperbólico em função dos feixes de radiação cruzarem o eixo de simetria do concentrador, chegando a valores superiores a 65% para o raio de absorvedor de 0,0075m.

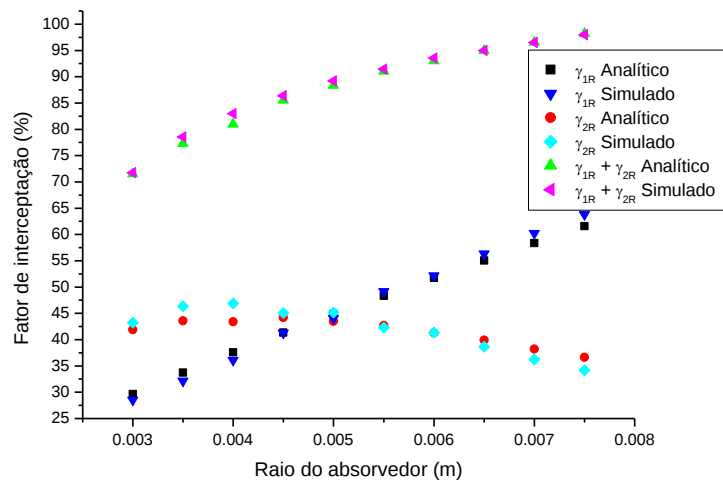


Figura 6 - Fator de interceptação do aplanático elíptico $\theta_1=9\text{mrad}$, $s=-0,9$, $K=-0,1$

Para dimensionamento do concentrador aplanático considerando dimensões de tubos absorvedores comerciais que apresentam raios de absorvedor de 2,5cm, ou 5cm de diâmetro, serão identificados fatores de proporcionalidade de acordo com os parâmetros do aplanático encontrados de acordo com o raio de absorvedor de referência. A Tabela 4 é assim

apresentada considerando o raio de absorvedor de 2,5cm e comparando com concentrador cilindro-parábola LS3 e LS1 (Manikandan *et al.*, 2019).

Tabela 4 – Dimensões aplanático elíptico e cilindro-parábola LS3

Dimensões	Aplanático Elíptico ($s=-0,9$, $K=-0,1$, $NA=0,977$, $\theta_T=9\text{mrad}$)			LS3	LS1
Raio do absorvedor referência	0,003	0,005	0,007	NA	NA
Fator de proporcionalidade	7,76	5,00	3,57	NA	NA
Raio do absorvedor proposto (m)	0,025	0,025	0,025	0,035	0,02
Concentração efetiva (sóis)	66,60 sóis	49,70 sóis	38,40 sóis	24,20 sóis	16,48 sóis
Fator de interceptação	71,70%	89,20%	96,50%	93,00%	87,00%
Comprimento total do primário (m)	15,16	7,82	6,01	5,77	4,01
Comprimento do secundário (m)	1,52	0,78	0,6	NA	NA
Altura do secundário ao solo (m)	6,98	3,60	2,77	NA	NA
Altura do absorvedor ao solo (m)	6,21	3,20	2,46	2,12	1,3

Como pode ser observado por meio da Tabela 4, considerando o raio de absorvedor de 2,5cm, obtém-se para o raio de referência de 0,007 uma concentração de 38,40 sóis, o que é 60% maior que a obtida no LS3, com dimensões similares para o comprimento total do primário. Com esta geometria aplanática, é possível obter temperaturas superiores às alcançadas com os concentradores cilindro-parábola LS3 e LS1.

4. CONCLUSÃO

O trabalho apresentou os aplanáticos hiperbólico e elíptico com absorvedores cilíndricos como alternativa para concentração solar térmica, visto que chega-se a concentrações de 66 sóis nos aplanáticos do tipo elíptico e a 39 sóis nos aplanáticos do tipo hiperbólico analisados de acordo com o raio de absorvedor escolhido obtém-se um fator de interceptação que pode variar. Foram apresentados aplanáticos do tipo elíptico e hiperbólico com diversas dimensões de raio de absorvedor e consequentemente diferentes fatores de interceptação, tornando possível escolher um aplanático que escolhendo priorizar a concentração efetiva ou o fator de interceptação do conjunto óptico.

Inicialmente foi apresentado o conceito da geometria aplanática, tendo sido analisados os aplanáticos que seriam viáveis ou não dentro das variações de s , K e da posição do absorvedor. Foram apresentados diversos parâmetros como fator de sombra, concentração efetiva, fator de interceptação tanto dos aplanáticos hiperbólicos quanto elípticos.

Em seguida, foi realizada abordagem analítica para dimensionamento da região de iluminação deste absorvedor cilíndrico, de forma a obter a região iluminada, fator de interceptação e consequente concentração efetiva do conjunto de espelhos. Os aplanáticos hiperbólico e elíptico escolhidos como mais adequados para concentração solar foram submetidos à simulação no traçador de raios soltrace e os resultados obtidos foram muito próximos àqueles obtidos de forma analítica, corroborando com os resultados obtidos pela abordagem inovadora proposta e apresentada para este concentrador.

Neste trabalho foi observado que o aplanático do tipo elíptico mostrou-se mais adequado para a concentração solar que o do tipo hiperbólico por apresentar um maior fator de interceptação. O fator de interceptação foi calculado analiticamente e por meio de simulação e os resultados obtidos foram muito próximos ressaltando que a diferença entre os dois tipos de aplanáticos se dá em função de os raios cruzarem o eixo de simetria no caso do aplanático do tipo elíptico, o que não ocorre no aplanático do tipo hiperbólico. Isto faz com que o fator de interceptação seja superior no caso do aplanático do tipo elíptico em relação ao do tipo hiperbólico, o que contribui para uma maior concentração efetiva do aplanático do tipo elíptico.

O aplanático do tipo elíptico foi comparado com concentradores do tipo cilindro-parábola comerciais como o LS1 e LS3 de forma que os resultados obtidos pelo aplanático elíptico mostraram-se bastante superiores aos obtidos por meio de concentrador do tipo cilindro-parábola, tendo as configurações e dimensões similares. Chegou-se a uma concentração de 38,40 sóis com o concentrador aplanático com dimensões de 6m de primário e um raio de absorvedor de 2,5cm. Dimensões estas similares às utilizadas no cilindro-parábola LS3 e que alcança temperatura da ordem de 390 graus celsius e concentração efetiva de 24,2 sóis. Isso mostra o potencial desta estrutura de concentração solar aplanática, de forma que a temperatura de seu fluido térmico pode chegar a 600 graus celsius e não parar nos 400 graus, obtidos pelos cilindro-parábola segundo Manikandan *et al.* (2019).

REFERÊNCIAS

- Canavarro, D. *et al.*, 2013. Infinitesimal etendue and Simultaneous Multiple Surface (SMS) concentrators for fixed receiver troughs. *Solar Energy*, vol. 97, pp. 493-503.
- Gomes, E. T. A. *et al.*, 2016. Fundamentação teórica para uso do aplanático como concentrador térmico. *Averma*, vol. 20, pp. 03.45-03.53.
- Gordon, J. M., 2010. Aplanatic optics for solar concentration. *Optics express*, Vol. 18, pp. A41-A52.

- Lynden-Bell, D., 2002. Exact Optics: A Unification of Optical Telescope Design. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 334(4), 787–796.
- Manikandan *et al.*, 2019. Enhancing the optical and thermal efficiency of a parabolic trough collector – A review. *Applied Energy*, 235, pp. 1524-1540.
- Marshall, H. *et al.*, 2015. New types of refractive-reflective aplanats for maximal flux concentration and collimation. *Optics Express*, Vol 23, n 24, pp.1541-1548.
- Miñano, J. *et al.*, 2009. An application of the SMS method for imaging designs. *Optics Express*, Vol 17, n 26, pp. 1541-1548.
- Ostroumov, N. *et al.*, 2009. Panorama of dual-mirror aplanats for maximum concentration. *Applied Optics*, Vol 48, n 26, pp. 4926-4931
- Rabl, A., 1985. *Active Solar Collectors and Their Applications*, 2ª Edição, pp. 125-155. Oxford University Press. New York.
- Rabl, A. *et al.*, 1982. Optimization of parabolic trough solar collectors. *Solar Energy*, Vol. 29, n 5, pp 407-417.
- Rodriguez-Sanchez, D. e Rosengarten, G., 2015. Improving the concentration ratio of parabolic troughs a second stage flat mirror. *Applied Energy*, Vol. 159, pp. 620-632.

APLANATIC SOLAR CONCENTRATOR WITH DOUBLE REFLECTION – THEORETICAL FOUNDATION, ANALYTICAL MODEL FOR CALCULATING EFFECTIVE CONCENTRATION AND PERFORMANCE ANALYSIS

Abstract. *The present work consists in performing analysis of configurations of devices focused on thermal concentration with double reflection, presenting the aplanatic as an alternative to increase solar concentration and proposing a new configuration that presents different characteristics to the existing devices with gain in solar thermal concentration. . The work starts from the presentation of the aplanatic concentrator, with its characteristic geometry. Then, the analytical model for dimensioning the effective solar concentration obtained for the most suitable aplanatics for solar concentration is presented, and finally, simulations are carried out by means of ray tracers that corroborate the analytical results obtained by the proposed model. The results obtained and presented in this work with the aplanatic geometry concentrator proved to be far superior to those obtained with a cylinder-parabola that currently reaches 24 suns of effective concentration. The concentration presented by the elliptical aplanatic concentrator of similar dimensions to the LS3 cylinder-parabola concentrator is 38.4 suns, reaching 60% higher than the LS3.*

Key words: *Aplanatic, Solar concentration, Double reflection*