

DISCRETIZAÇÃO DE CILINDRO-PARABÓLICO PARA APLICAÇÃO EM PLANTA CSP

Diego Cunha Malagueta, Naiara Rinco de Marques e Carmo

Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia para discretização de uma geometria parabólica comumente utilizada em plantas CSP (*Concentrated Solar Power*) destinadas à geração de eletricidade. A discretização de um cilindro – parabólico tem por objetivo contribuir para simplificar o processo de fabricação dos coletores e consequentemente reduzir o custo final do projeto. O percentual de reflexão do arranjo discretizado está intimamente relacionado com a largura dos espelhos e com o posicionamento de cada um deles em uma estrutura base. Os arranjos discretizados e o comportamento da radiação incidente em cada um deles foram modelados e simulados em Matlab®. O trabalho fornece detalhes de algumas geometrias suficientes para fabricação de protótipo.

Palavras Chaves: Energia Solar Concentrada, Discretização, cilindro-parabólico.

CYLINDER-PARABOLIC DISCRETIZATION FOR USE IN PLANT CSP

ABSTRACT

This work proposes a methodology for discretization of a parabolic geometry commonly used in CSP plants (*Concentrated Solar Power*) aimed at generating electricity. The discretization of a cylinder - Parabolic aims to help simplify the process of manufacturing of collectors and consequently reduce the final cost of the project. The discrete arrangement of the reflection percentage is closely related to the width of the mirrors and the position of each of them on a base structure. The discretized arrangements and the behavior of the radiation incident on each of them were modeled and simulated in Matlab. The work gives details of some sufficient geometries for prototype manufacturing.

Keywords: *Concentrated Solar Power, Discretization, Cylinder-parabolic.*

1. INTRODUÇÃO

O uso de fontes renováveis de energia tem crescido consideravelmente. Tal desenvolvimento baseia-se não somente na importância em reduzir o consumo de hidrocarbonetos como também no imenso potencial de gerar energia com o menor impacto possível (EDX Courses, 2015).

Uma das áreas mais atraentes dentro de energias renováveis é a solar. Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), a energia solar será a maior fonte de eletricidade no mundo até 2050. Isso mostra a importância de estudos nesta área (Site Energia Heliotérmica, 2014).

O CSP permite concentrar a radiação incidente em uma grande área para um volume reduzido. Assim, a radiação direta que incide em uma ampla superfície especular poderia ser direcionada para um tubo de dimensões menores, por onde circularia um fluido térmico. Este, por fim, absorveria

uma quantidade de energia bem maior, possibilitando maior geração de trabalho em uma central de potência.

Vale ressaltar que tais sistemas devem ser orientados de modo a captar a radiação solar direta, de modo a garantir sua funcionalidade (DUFFIE & BECKMANN, 1980).

Esta tecnologia encontra aplicabilidade não só em centrais de potência, como também em sistemas de aquecimento de fluidos (MOURA, 2007), fogões solares, processos de destilação (GIRALDO et al, 2005), entre outros.

Além disso, esta geometria e técnica de concentração de energia em uma região embasam o funcionamento de radiotelescópios, muito utilizados em radioastronomia (SÁNCHEZ, 2007).

1.1. Energia Solar Concentrada

Os sistemas de Energia Solar Concentrada (CSP) consistem em focar a energia Solar em uma região ou ponto visando gerar eletricidade ou aquecer um fluido térmico. Os mais comuns são: Fresnel, Torre Solar, Disco Stirling e Cilíndrico – Parabólico. A produção de áreas espelhadas em grande escala com geometrias parabólicas atende a apenas um mercado, diferentemente de espelhos planos (Site Energia Heliotérmica, 2015a).

Os pioneiros no desenvolvimento de tecnologias CSP são Alemanha, Espanha e Estados Unidos (Site Energia Heliotérmica, 2015b). O Brasil ainda não possui projetos completamente implementados nesta área, embora haja dois em estado de implantação, um em Pirassununga/SP e outro em Petrolina/PE. (Site Energia Heliotérmica, 2015c).

2. TEORIA RELACIONADA

2.1. O CONCENTRADOR SOLAR CILÍNDRICO-PARABÓLICO

O sistema consiste de um cilindro (ou calha) parabólico côncavo e espelhado, uma estrutura suporte do conjunto, um absorvedor da radiação refletiva pelo cilindro – parabólico e um mecanismo de rastreamento da posição do Sol.

Idealmente, toda radiação direta incidente no cilindro – parabólico será refletida para o foco. A Figura 1 mostra a incidência em um cilindro – parabólico.



Figura 1 – Funcionamento de cilindro – parabólico mediante incidência de radiação Solar.

Fonte: Miller e Lumby (2012), adaptado pela autora.

As dimensões utilizadas neste trabalho para o cilindro - parabólico basearam-se no projeto já em vigor da Usina Solar localizada no campus do CEFET/MG. As informações

dimensionais sobre o cilindro – parabólico são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1 – INFORMAÇÕES SOBRE O CILINDRO – PARABÓLICO.

Coletores	Comprimento	3,750 m
	Abertura	$a = 3,440 m$
	Distância focal	$f = 1,121 m$
	Altura	$h = 0,086 m$
Tubo absorvedor	Material	Aço Inoxidável AISI 304, Schedule 40
	Diâmetro externo	$48,3 mm \cong 48 mm$

Fonte: BRAGA (2008), apud PESSOA (2014), adaptado pela autora.

3. METODOLOGIA

Inicialmente foi necessário caracterizar o arranjo discretizado do cilindro–parabólico, e analisar a proximidade da curva obtida com a curva contínua. Para tanto, foi desenvolvido um algoritmo que retornasse os pontos da curva discretizada e o percentual de reflexão obtido.

Por fim, buscou-se identificar a relação matemática entre a largura de espelho plano e o percentual de reflexão obtido.

3.1. ALGORITMO DE DISCRETIZAÇÃO

Matematicamente, a função parabólica é modelada por uma expressão do tipo:

$$y = K \cdot x^2 \quad (01)$$

onde K é uma constante dada por:

$$K = \frac{1}{4p} \quad (02)$$

onde p é a distância do foco ao vértice da parábola.

Foi elaborado um algoritmo em Matlab ® que buscou determinar, para uma largura de espelho constante:

- O número total de espelhos requeridos no arranjo discretizado;
- O posicionamento de cada espelho no plano cartesiano;
- A incidência proporcional a cada espelho plano;
- O percentual de reflexão atingido por cada espelho plano e o percentual total de reflexão do arranjo.

A discretização da curva parabólica baseou-se nos seguintes princípios:

a. Cada segmento discreto é formado por três pontos: um na extremidade superior, um na inferior, e um no ponto médio (Figura 2);

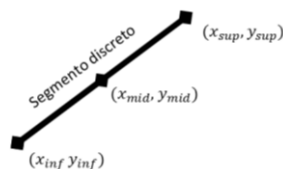


Figura 2– Segmento Discreto (Detalhe).

Fonte: Elaborado pela autora.

b. A base de cálculo considera o ponto médio do segmento, porque a reta base de cada segmento discreto é tangente à parábola contínua neste ponto (Figura3);

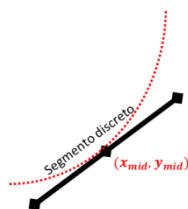


Figura 3– Segmento Discreto (Detalhe no ponto médio).

Fonte: Elaborado pela autora.

c. O ponto mais alto da parábola contínua (*abertura/2; altura*) é o ponto médio do primeiro segmento discreto (Figura4);



Figura 4– Definição do primeiro ponto do arranjo discretizado.

Fonte: Elaborado pela autora.

d. A discretização é feita a partir do ponto mais alto da parábola (*abertura/2; altura*) em direção ao vértice da mesma (Figura5).

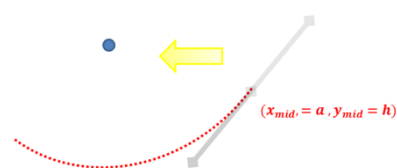


Figura 5– Orientação da discretização.

Fonte: Elaborado pela autora.

e. Calcula-se o ângulo que o segmento possui com a horizontal (Figura 6);



Figura 6– Definição de ângulo base de segmento discreto.

Fonte: Elaborado pela autora.

f. Calculam-se os coeficientes linear e angular da reta tangente à curva (Figura 7);

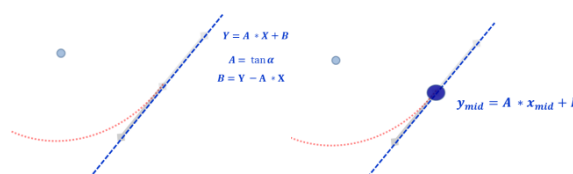


Figura 7- Definição de reta base de segmento discreto.

Fonte: Elaborado pela autora.

g. Calcula-se a derivada da função no ponto médio do primeiro segmento (Equações 03 e 04);

$$y = constante * x^2 \tag{03}$$

$$y'(x_{mid}) = 2 * constante * x_{mid} = y_{mid} \tag{04}$$

h. Calculam-se os extremos do segmento discreto (x_{sup}, y_{sup}), (x_{inf}, y_{inf}), baseando na equação de distância entre pontos (Equação 05):

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \tag{05}$$

- Para $d = 2cm \rightarrow \frac{d}{2} = 1cm$:

$$\frac{d}{2} = \sqrt{(x - x_{mid})^2 + (y - y_{mid})^2} \tag{06}$$

i. Determina-se o ponto médio do segmento seguinte a partir do ponto inferior do segmento anterior.

$$x_{sup}^{i+1} = x_{inf}^i \tag{07}$$

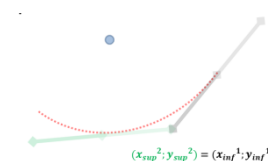


Figura 8– Determinação do segmento seguinte.

Fonte: Elaborado pela autora.

j. Determina-se o ponto médio do segundo segmento a partir do ponto inferior do primeiro.

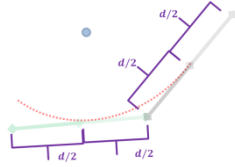


Figura 9– Determinação do ponto médio seguinte.

Fonte: Elaborado pela autora.

k. Repetem-se os passos e – i até o fim do processo de discretização; este considera o seguinte critério de finalização:

• Enquanto:

$$\sqrt{(x - x_{mid}^n)^2 + (y - y_{mid}^n)^2} \geq \frac{d}{2} \quad (08)$$

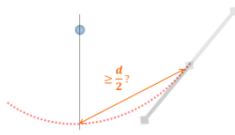


Figura 10– Critério de parada da discretização.

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2. ALGORITMO DE INTERAÇÃO COM O ABSORVEDOR

Uma vez tendo a parábola discretizada, é necessário compreender a reflexão de cada espelho plano e determinar o percentual de reflexão desejado. O método baseou-se nos seguintes passos:

- Determinar os coeficientes de uma reta paralela a cada segmento discreto, mas passando pelo foco da parábola contínua.
- Determinar as interseções desta reta paralela com os raios refletidos.

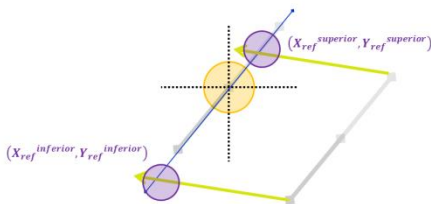


Figura 11– Reflexão de um segmento discreto na direção do absorvedor.

Fonte: Elaborado pela autora.

c. Determinar a absorção de cada espelho plano, segundo as equações:

• Absorção total:

$$X_{ref}^{superior^2} + (Y_{ref}^{superior} - f_{oco})^2 \leq \left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^2 \quad (09)$$

$$X_{ref}^{inferior^2} + (Y_{ref}^{inferior} - f_{oco})^2 \leq \left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^2 \quad (10)$$

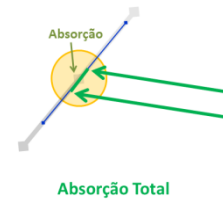


Figura 12– Reflexão onde há absorção total de radiação refletida.

Fonte: Elaborado pela autora.

• Não há absorção:

$$X_{ref}^{superior^2} + (Y_{ref}^{superior} - f_{oco})^2 \geq \left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^2 \quad (11)$$

$$X_{ref}^{inferior^2} + (Y_{ref}^{inferior} - f_{oco})^2 \geq \left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^2 \quad (12)$$

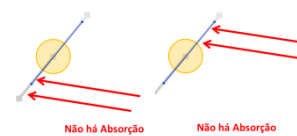


Figura 13– Caso de Reflexão onde não há absorção.

Fonte: Elaborado pela autora.

• Absorção parcial (caso 1):

$$X_{ref}^{superior^2} + (Y_{ref}^{superior} - f_{oco})^2 \geq \left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^2 \quad (13)$$

$$X_{ref}^{inferior^2} + (Y_{ref}^{inferior} - f_{oco})^2 \leq \left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^2 \quad (14)$$

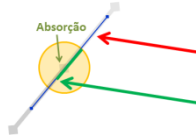


Figura 14 – Caso 1 de Absorção parcial.

Fonte: Elaborado pela autora.

- Absorção parcial (caso 2):

$$X_{ref}^{superior^2} + (Y_{ref}^{superior} - f_{oco})^2 \leq \left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^2 \quad (15)$$

$$X_{ref}^{inferior^2} + (Y_{ref}^{inferior} - f_{oco})^2 \geq \left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^2 \quad (16)$$



Figura 15 – Caso 2 de Absorção parcial.

Fonte: Elaborado pela autora.

- Absorção parcial (caso 3):

$$X_{ref}^{superior^2} + (Y_{ref}^{superior} - f_{oco})^2 \geq \left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^2 \quad (17)$$

$$X_{ref}^{inferior^2} + (Y_{ref}^{inferior} - f_{oco})^2 \geq \left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^2 \quad (18)$$

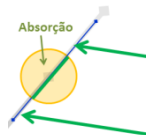


Figura 16 – Caso 3 de Absorção parcial.

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3. ALGORITMO PARA CÁLCULO DO PERCENTUAL DE REFLEXÃO

Os cálculos desenvolvidos foram:

- Incidência local: é feita em cada espelho e é proporcional à diferença entre as abcissas das extremidades de cada segmento discreto:

$$incidência\ local_i = X_{sup}^i - X_{inf}^i \quad (19)$$

- Incidência local no absorvedor: é a quantidade de radiação refletida por um espelho plano capaz de

atingir o absorvedor; ela é proporcional à diferença entre as abcissas que cabem no tubo coletor:

$$inc.\ local\ abs._i = X_{ref}^{superior^i} - X_{ref}^{inferior^i} \quad (20)$$

- Percentual local útil de reflexão: é a relação entre a reflexão parcial útil de cada segmento discreto e a incidência no mesmo.

$$percentual\ local_i = \frac{inc.\ local\ abs._i}{incidência\ local_i} \quad (21)$$

- Incidência total: é feita para todo o arranjo:

$$incidência\ total = \sum_{i=1}^N incidência\ local_i = X_{sup}^i - \frac{D_{ext}}{2} \quad (22)$$

- Incidência total no absorvedor: é feita para todo o arranjo:

$$inc.\ total\ abs. = \sum_{i=1}^N inc.\ total\ abs._i \quad (23)$$

- Percentual total de reflexão útil: é feito para todo o arranjo:

$$percentual\ total = \frac{inc.\ total\ abs.}{incidência\ total} \quad (24)$$

3.4. ANÁLISE ÓPTICA DA DISCRETIZAÇÃO

A razão de concentração é definida como a razão entre o fluxo de energia que entra no sistema pela área do receptor. É dada por:

$$C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{W_a \cdot L}{\pi \cdot D \cdot L} = \frac{W_a}{\pi \cdot D} \quad (25)$$

Quanto maior é esta razão, maior tende a ser a temperatura atingida pelo fluido térmico (DUFFIE & BECKMANN, 1980).

Observando a equação, nota-se que o numerador representa o total de radiação recebida pelo absorvedor – que equivale, pela geometria da calha, à radiação incidente na mesma. Assim, para o arranjo discretizado, este numerador seria a radiação absorvida pelo tubo – que desta vez não é necessariamente igual à incidência total na superfície especular.

Deste modo, seria possível avaliar numericamente o quanto a área especular de cada arranjo é capaz de concentrar radiação para o absorvedor.

4. RESULTADOS

O algoritmo para discretização do cilindro – parabólico foi executado para diversas entradas de largura de espelho, mantendo constantes as dimensões do receptor. O trabalho de análise começou com uma largura de espelho extrema, e foi diminuindo até permitir uma avaliação consistente.

É importante evidenciar que o posicionamento dos espelhos planos começa na extremidade do arranjo em sentido ao vértice, conforme o esquema da Figura 17.

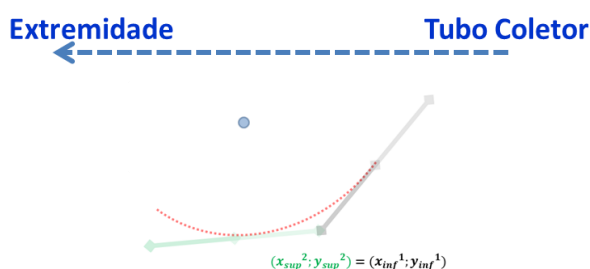


Figura 17 – Orientação do processo de discretização.

Fonte: Elaborado pela autora.

De início serão apresentados os resultados gerais para alguns dos arranjos simulados, e a seguir, três deles serão analisados graficamente.

A seguir são apresentados 3 arranjos: o primeiro é o mais ineficiente, que ilustra mais claramente os efeitos da discretização.

4.1. ARRANJO 1 ($l = 90\text{cm}$)

A primeira largura utilizada para os espelhos discretos foi $l = 90\text{cm}$. As Figuras 18 – 20 mostram graficamente o arranjo e a Tabela 3 apresenta os resultados da discretização e reflexão.

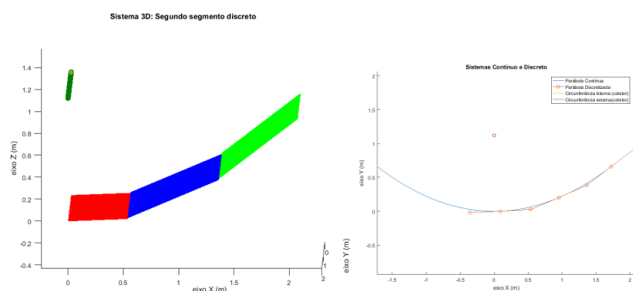


Figura 18.1 – Arranjo 1 ($l = 90\text{cm}$): Sistema discreto em 3D e comparativo em 2D entre o sistema contínuo e o discreto.

Fonte: Elaboração da autora.

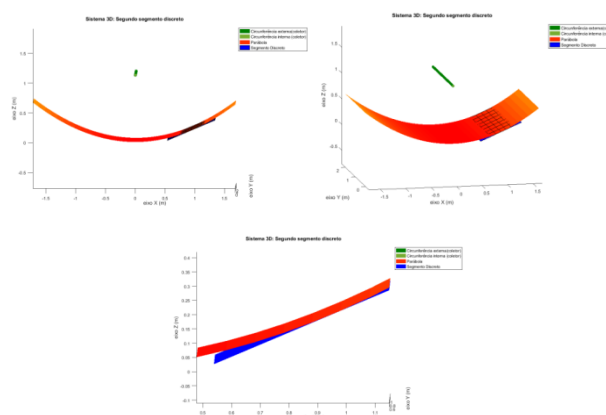


Figura 19– Arranjo 1 ($l=90\text{cm}$): Comparativo entre um espelho discreto e a curva contínua.

Fonte: Elaboração da autora.

Pela Figura 19 pode-se ter a falsa impressão de que o espelho discreto (em azul) está sobreposto ao arranjo contínuo, o que seria inverídico. É importante ressaltar que a malha gerada para cada espelho discreto coincide com o arranjo contínuo única e exclusivamente onde a reta base deste segmento – ou em 3D, o plano base – é tangente à curva do cilindro - parabólico.

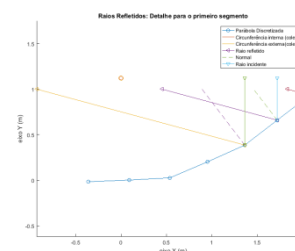


Figura 20– Arranjo 1 ($l=90\text{cm}$): Reflexão de um espelho discreto.

Fonte: Elaboração da autora.

Os próximos arranjos buscaram melhorar estes parâmetros. Foram escolhidos dois arranjos, cuja largura de espelho se aproxima consideravelmente do diâmetro do absorvedor. As coordenadas para o posicionamento dos espelhos nos dois arranjos a seguir são apresentadas no ANEXO A.

4.2. ARRANJO2($l = 5,5\text{cm}$)

A segunda largura utilizada para os espelhos discretos foi $l = 5,5\text{cm}$. As Figuras 21 – 24 mostram graficamente o arranjo e a Tabela 3 apresenta os resultados da discretização e reflexão.

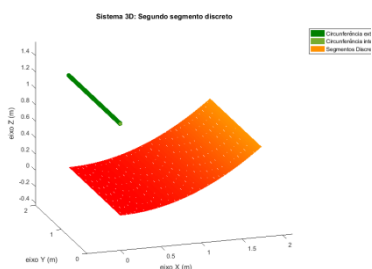


Figura 21– Arranjo 2($l = 5,5\text{cm}$): Sistema discreto em 3D (Hemisfério positivo).

Fonte: Elaboração da autora.

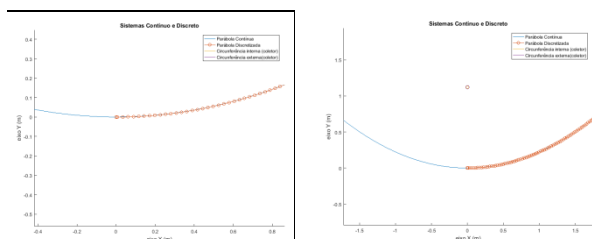


Figura 22 – Arranjo 2($l = 5,5\text{cm}$): Comparativo em 2D entre o sistema contínuo e o discreto.

Fonte: Elaboração da autora.

Percebe-se pela Figura 22 que à medida que o número de espelhos planos aumenta, os pontos ficam cada vez mais próximos do arranjo contínuo, de modo que até parecem totalmente sobrepostos.

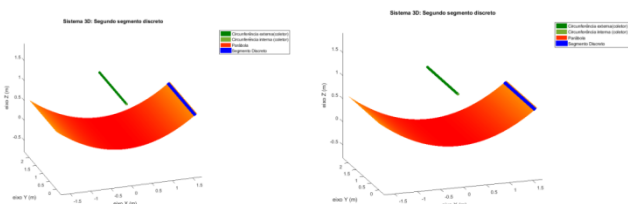


Figura 23 – Arranjo 2($l = 5,5\text{cm}$): Comparativo entre um espelho discreto e a curva contínua.

Fonte: Elaboração da autora.

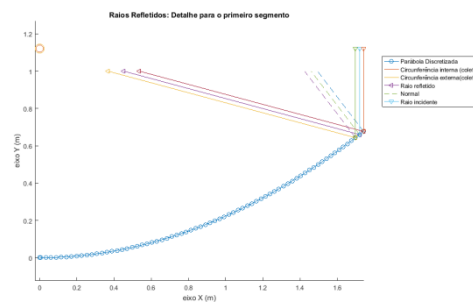


Figura 24– Arranjo 2($l = 5,5\text{cm}$): Reflexão de um espelho discreto.

Fonte: Elaboração da autora.

Pela Figura 24 é nota-se que, desta vez, toda a incidência no primeiro segmento discreto tende a atingir o receptor. Isto mostra a grande melhoria na qualidade de aproveitamento da radiação proposta pelo aumento do número de espelhos no arranjo.

A tabela 3 apresenta os resultados gerais de performance do arranjo.

TABELA 3– ARRANJO 2($l = 5,5\text{cm}$): RESULTADOS.

Largura de espelho plano:	0,055 mm
% Reflexão total:	87,14%
Absorção total (m)	1,4970
Incidência total (m)	1,7178

Fonte: Elaboração da autora.

Nota-se que houve grande melhoria no desempenho deste arranjo quando comparado ao primeiro, embora não tenha atingido a reflexão máxima. Os gráficos a seguir mostram a evolução de incidência, absorção e percentual local de reflexão.

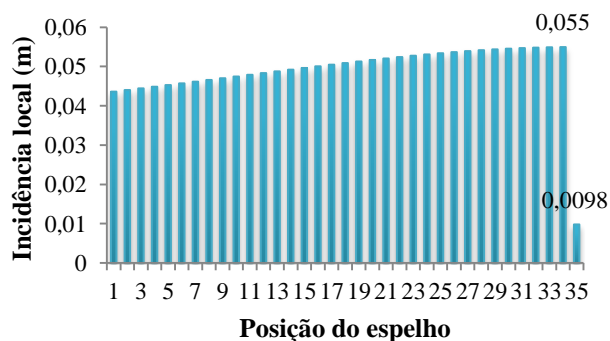


Gráfico 1– Arranjo 2($l = 5,5\text{cm}$): Incidência Local de Radiação por Espelho (m).

Fonte: Elaboração da autora.

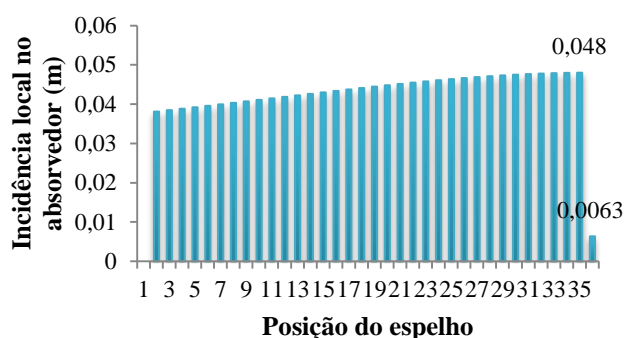


Gráfico 2– Arranjo 2 ($l = 5,5\text{cm}$): Incidência local no absorvedor (m).

Fonte: Elaboração da autora.

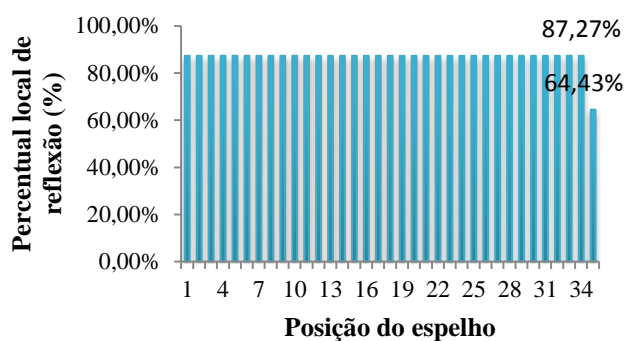


Gráfico 3– Arranjo 2 ($l = 5,5\text{cm}$): Percentual Local de Reflexão (%).

Fonte: Elaboração da autora.

Por estes gráficos é possível visualizar que a performance por espelho é bem parecida, já que desta vez a discretização foi maior. Além disso, o percentual local de reflexão para cada espelho foi em média 87,27%, exceto pela última posição, com 64,43%. Neste caso, a incidência é bem pequena devido à área de sombreamento ser bem próxima ao raio do absorvedor. Assim, qualquer perda de reflexão possibilitaria grande impacto no percentual local.

4.3. ARRANJO 3 ($l = 4,5\text{cm}$)

A segunda largura utilizada para os espelhos discretos foi $l = 4,5\text{cm}$. A Figura 25 apresenta a reflexão de um espelho e a Tabela 4 apresenta os resultados da discretização e reflexão.

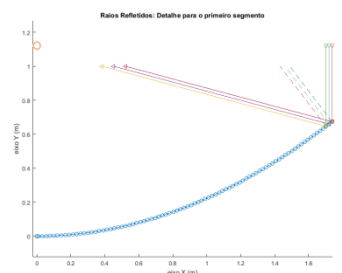


Figura 25– Arranjo 3 ($l = 4,5\text{cm}$): Reflexão de um espelho discreto.

Fonte: Elaboração da autora.

Pela Figura 25 é nota-se que, desta vez, toda a incidência no primeiro segmento discreto tende a atingir o receptor. Isto mostra que houve melhoria na qualidade de aproveitamento da radiação proposta pelo aumento do número de espelhos no arranjo. Esta melhoria foi possível com a redução de largura de espelho em apenas 1cm.

TABELA 4– ARRANJO 2 ($L = 4,5\text{CM}$): RESULTADOS.

Largura de espelho plano:	0,045 mm
% Reflexão total:	100%
Absorção total (m)	1,7139
Incidência total (m)	1,7139

Fonte: Elaboração da autora.

Nota-se que houve melhoria no desempenho deste arranjo quando comparado aos dois anteriores, de modo que inclusive atingiu a reflexão máxima. Isto foi possibilitado, inclusive, pela diminuição da largura de espelho a um valor menor que o diâmetro do absorvedor. Os gráficos a seguir mostram a evolução de incidência, absorção e percentual local de reflexão.

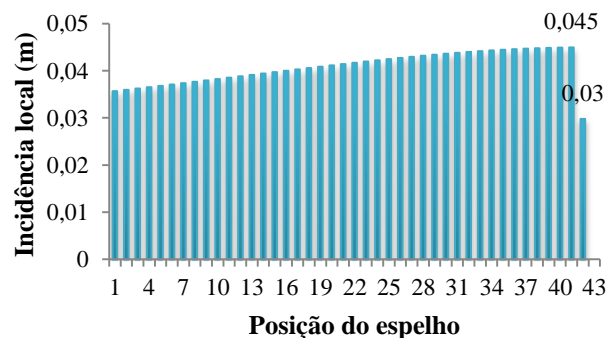


Gráfico 4– Arranjo 3 ($l = 4,5\text{cm}$): Incidência Local de Radiação por Espelho (m).

Fonte: Elaboração da autora.

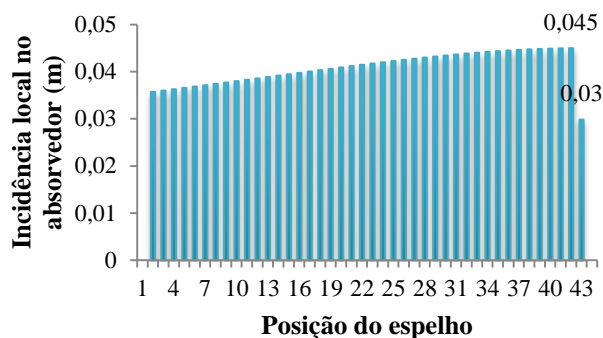


Gráfico 5– Arranjo 1 (l=4,5cm): Incidência local no absorvedor(m).

Fonte: Elaboração da autora.

Por estes gráficos é possível visualizar que a performance por espelho é bem parecida, já que desta vez a discretização foi ainda maior. Além disso, o percentual local de reflexão para cada espelho foi em média 100% - valor máximo, exceto pela última posição, com 0%. Neste caso, o segmento foi completamente encoberto pelo absorvedor, de modo que não houve radiação refletida por ele.

A seguir é apresentada uma análise geral dos principais arranjos simulados.

4.4. ANÁLISE GERAL

A tabela 5 apresenta vinte arranjos com larguras diferentes de espelho plano. Vale ressaltar que a primeira coluna apresenta o número de espelhos da metade do arranjo (da extremidade ao vértice da parábola). A geometria discretizada, assim como a contínua, é simétrica em relação ao eixo das ordenadas, atravessando o centro do absorvedor.

TABELA 5 – RESULTADOS GERAIS PARA DIVERSAS LARGURAS DE ESPELHO.

Largura de espelho plano (m)	Número de espelhos	Percentual de Reflexão	Incidência total (m)	Incidência total no absorvedor (m)	Razão l/D	Razão de concentração
0,015	252	100,00 %	1,7020	1,7020	322 %	11,22
0,020	190	100,00 %	1,7039	1,7039	242 %	11,23
0,030	128	100,00 %	1,7079	1,7079	161 %	11,26
0,040	96	100,00 %	1,7119	1,7119	121 %	11,28
0,045	86	100,00 %	1,7139	1,7139	107 %	11,30
0,046	84	100,00 %	1,7142	1,7143	105 %	11,30
0,047	82	100,00 %	1,7147	1,7146	103 %	11,30
0,048	80	100,00 %	1,7150	1,7151	101 %	11,30
0,049	78	97,95%	1,7154	1,6802	99%	11,07
0,050	78	96,01%	1,7158	1,6473	97%	10,86
0,055	70	87,14%	1,7178	1,4970	88%	9,87
0,060	64	79,91%	1,7198	1,3743	81%	9,06
0,065	60	73,85%	1,7218	1,2716	74%	8,38
0,070	56	68,68%	1,7238	1,1838	69%	7,80
0,075	52	63,53%	1,7258	1,0964	64%	7,23
0,080	48	60,29%	1,7277	1,0416	60%	6,86
0,090	44	53,11%	1,7317	0,9196	54%	6,06
0,225	18	22,05%	1,7853	0,3936	21%	2,59
0,450	10	11,64%	1,8745	0,2181	11%	1,44
0,900	6	6,34%	2,0530	0,1302	5%	0,86

Fonte: Elaboração da autora.

Nota-se que a largura de espelho definida para um arranjo e o percentual total útil de reflexão são inversamente proporcionais. Também é possível observar que para larguras de espelho próximas ao diâmetro do absorvedor o percentual de reflexão é quase máximo (100%).

5. CONCLUSÃO

Foi proposto um método para discretização de calha parabólica, visando obter uma reflexão para um tubo absorvedor.

Foi apresentado o percentual de reflexão incidente sobre o absorvedor para 20 valores de largura diferentes.

É importante destacar que a incidência sobre o absorvedor deixa de ser radial quando há discretização do cilindro –

parabólico e, portanto, os arranjos afetarão a qualidade da absorção pelo tubo. Tais análises merecem estudos futuros que visem identificar a relação da largura do espelho com a temperatura de equilíbrio atingida no absorvedor.

Visando substituir espelhos curvos por planos, de mais fácil e barata fabricação, o presente trabalho propõe a construção de um protótipo experimental e fornece a geometria completa da calha para as larguras de 4,5cm e 5,5cm, presentes no **ANEXO A**.

O algoritmo desenvolvido para este estudo fornece a geometria completa de quaisquer geometrias parabólicas e considerando quaisquer valores de largura do espelho plano. Mediante este fato, a relação entre o percentual de reflexão e a largura de espelho escolhida pode ser analisada para o desenvolvimento de um protótipo CSP discretizado.

REFERÊNCIAS

- CEFET-MG. Usina Solar do CEFET-MG. Disponível em: <<http://www.posgraduacao.cefetmg.br/cefet-mg-ppgee/index.php/pt/avisos/135-usina-solar-do-cefet-mg>>. Acesso em setembro de 2015.
- DUFFIE, J. A.; BECKMANN, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.
- ENERGIA HELIOTÉRMICA. CSP at a Glance in Brazil. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/en/csp-in-brasil/csp-in-a-glance-in-brazil>>. Acesso em setembro de 2015a.
- ENERGIA HELIOTÉRMICA. Energia Solar pode ser a maior fonte mundial de eletricidade até 2050, 2014. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/noticias/331-energia-solar-pode-ser-a-maior-fonte-mundial-de-eletricidade-ate-2050>>. Acesso em setembro de 2015b.
- ENERGIA HELIOTÉRMICA. Existem projetos heliotérmicos no Brasil?. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/fatos/existem-projetos-heliotermicos-no-brasil>>. Acesso em setembro de 2015c.
- GIRALDO, Luis Fernando Garcés; ÁNGEL, Marta Lucía Hernández; MESA, Gustavo Antonio Peñuela; RESTREPO, Alejandra Rodriguez; PALACIO, Julián Andrés Salazar. Degradación de aguas residuales de la industria textil por medio de fotocatalisis, 2005. Disponível em: <http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/revista/vol2n1/degradacion_aguas.pdf>. Acesso em novembro de 2016.
- MATLAB®. R2016a. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/>>. Acesso em setembro de 2015. Versão 9.0.
- MILLER, A., LUMBY, B. Utility Scale Solar Power Plants: A Guide For Developers and Investors. International Finance Corporation, 2012. Disponível em: <<http://www1.ifc.org/wps/wcm/connect/04b38b804a178f13b377ffd29332b51/SOLAR%2BGUIDE%2BBOOK.pdf?MOD=AJPERES>>. Acesso em dezembro de 2015.
- MOURA, Johnson Pontes de. Construção e avaliação térmica de um fogão solar tipo caixa, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15749>>. Acesso em novembro de 2016.
- PESSOA, Márcio Araújo. Metodologia teórica experimental utilizando teste quase dinâmico para avaliação de coletores concentradores do tipo cilindro parabólico. Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/especialistas/brasil-htl/teste-quase-dinamico-para-avaliacao-de-coletores-cilindro-parabolicos>>. Acesso em agosto de 2016.
- SÁNCHEZ, Ramón Angosto. Análisis y diseño de una antena parabólica para un radiotelescopio en la banda de 1420MHz, 2007. Disponível em: <<http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/170/Proyecto%20Fin%20de%20Carrera%20Reflector.pdf?sequence=1&isAllowed=>>>. Acesso em novembro de 2016.

ANEXOS
ANEXO A – COORDENADAS PARA ARRANJO
DISCRETIZADO
ARRANJO 2 ($l = 5,5\text{cm}$)

Nº	X (m)	Y discreto (m)	Y continuo (m)
1	1,741819	0,676507	0,676613
2	1,72	0,659768	0,659768
3	1,698181	0,643029	0,643135
4	1,676157	0,626562	0,626562
5	1,654132	0,610095	0,610203
6	1,631899	0,59391	0,59391
7	1,609665	0,577727	0,577837
8	1,587221	0,561836	0,561836
9	1,564777	0,545946	0,546058
10	1,54212	0,53036	0,53036
11	1,519462	0,514775	0,51489
12	1,496591	0,499506	0,499506
13	1,473719	0,484238	0,484355
14	1,450631	0,469298	0,469298
15	1,427543	0,454359	0,454478
16	1,404238	0,43976	0,43976
17	1,380932	0,425163	0,425284
18	1,357408	0,410918	0,410918
19	1,333884	0,396675	0,396799
20	1,310142	0,382799	0,382799
21	1,286398	0,368924	0,36905
22	1,262437	0,35543	0,35543
23	1,238475	0,341937	0,342065
24	1,214295	0,328838	0,328838
25	1,190114	0,315742	0,315872
26	1,165715	0,303054	0,303054
27	1,141316	0,290368	0,2905
28	1,116702	0,278105	0,278105
29	1,092086	0,265844	0,26598
30	1,067257	0,254023	0,254023
31	1,042427	0,242203	0,24234
32	1,017385	0,230837	0,230837
33	0,992343	0,219473	0,219613
34	0,967093	0,208579	0,208579
35	0,941842	0,197687	0,197829
36	0,916387	0,18728	0,18728
37	0,890931	0,176876	0,17702
38	0,865276	0,166972	0,166972

39	0,839621	0,157071	0,157217
40	0,813772	0,147686	0,147686
41	0,787922	0,138303	0,138452
42	0,761885	0,129453	0,129453
43	0,735847	0,120605	0,120756
44	0,70963	0,112305	0,112305
45	0,683412	0,104006	0,10416
46	0,657022	0,096271	0,096271
47	0,630632	0,088537	0,088692
48	0,604079	0,081381	0,081381
49	0,577526	0,074226	0,074384
50	0,550821	0,067664	0,067664
51	0,524115	0,061102	0,061262
52	0,497268	0,055146	0,055146
53	0,47042	0,049191	0,049352
54	0,443443	0,043854	0,043854
55	0,416466	0,038518	0,038681
56	0,389372	0,033811	0,033811
57	0,362277	0,029106	0,02927
58	0,33508	0,02504	0,02504
59	0,307882	0,020975	0,02114
60	0,280595	0,017559	0,017559
61	0,253307	0,014144	0,01431
62	0,225946	0,011385	0,011385
63	0,198585	0,008628	0,008795
64	0,171165	0,006534	0,006534
65	0,143744	0,00444	0,004608
66	0,116281	0,003015	0,003015
67	0,088818	0,001591	0,001759
68	0,061329	0,000839	0,000839
69	0,033839	0,000087	0,000255
70	0,006339	0,000009	0,000009
71	0	0	0

ARRANJO 3 ($l = 4,5\text{cm}$)

Nº	X (m)	Y discreto (m)	Y continuo (m)
1	1,737852	0,673463	0,673535
2	1,72	0,659768	0,659768
3	1,702148	0,646073	0,646144
4	1,684159	0,632558	0,632558
5	1,666169	0,619045	0,619117
6	1,648041	0,605718	0,605718
7	1,629912	0,592392	0,592465

8	1,611643	0,579258	0,579258	49	0,802037	0,143358	0,143457
9	1,593373	0,566125	0,566199	50	0,780789	0,135957	0,135957
10	1,574962	0,553191	0,553191	51	0,75954	0,128557	0,128658
11	1,556551	0,540257	0,540333	52	0,738169	0,12152	0,12152
12	1,537998	0,527528	0,527528	53	0,716798	0,114483	0,114585
13	1,519444	0,5148	0,514877	54	0,695308	0,107817	0,107817
14	1,500747	0,502284	0,502284	55	0,673818	0,101153	0,101256
15	1,482049	0,489768	0,489846	56	0,652214	0,094867	0,094867
16	1,463207	0,47747	0,47747	57	0,630609	0,088582	0,088686
17	1,444365	0,465173	0,465252	58	0,608896	0,082684	0,082684
18	1,425378	0,4531	0,4531	59	0,587182	0,076787	0,076892
19	1,40639	0,441029	0,441109	60	0,565366	0,071284	0,071284
20	1,387258	0,429189	0,429189	61	0,543549	0,065783	0,065889
21	1,368124	0,41735	0,417432	62	0,521634	0,060683	0,060683
22	1,348845	0,40575	0,40575	63	0,49972	0,055584	0,055691
23	1,329565	0,394151	0,394234	64	0,477714	0,050894	0,050894
24	1,310139	0,382798	0,382798	65	0,455708	0,046205	0,046313
25	1,290713	0,371446	0,37153	66	0,433617	0,041932	0,041932
26	1,271141	0,360348	0,360348	67	0,411527	0,03766	0,037769
27	1,251568	0,34925	0,349336	68	0,389359	0,033809	0,033809
28	1,231849	0,338415	0,338415	69	0,36719	0,029959	0,030069
29	1,212129	0,32758	0,327667	70	0,344952	0,026537	0,026537
30	1,192264	0,317015	0,317015	71	0,322714	0,023115	0,023226
31	1,172398	0,30645	0,306538	72	0,300413	0,020127	0,020127
32	1,152388	0,296163	0,296163	73	0,278113	0,017139	0,017249
33	1,132376	0,285878	0,285967	74	0,255758	0,014588	0,014588
34	1,112221	0,275878	0,275878	75	0,233403	0,012038	0,012149
35	1,092065	0,265878	0,265969	76	0,211002	0,009929	0,009929
36	1,071765	0,256173	0,256173	77	0,188601	0,007821	0,007933
37	1,051466	0,246469	0,246561	78	0,166162	0,006157	0,006157
38	1,031024	0,237067	0,237067	79	0,143724	0,004494	0,004607
39	1,010582	0,227667	0,22776	80	0,121257	0,003279	0,003279
40	0,99	0,218577	0,218577	81	0,098789	0,002064	0,002176
41	0,969417	0,209488	0,209583	82	0,076302	0,001298	0,001298
42	0,948696	0,200719	0,200719	83	0,053815	0,000533	0,000646
43	0,927975	0,191951	0,192047	84	0,031318	0,000219	0,000219
44	0,907118	0,183511	0,183511	85	0,00882	-0,000096	0,000017
45	0,886261	0,175072	0,175169	86	0	0	0
46	0,86527	0,16697	0,16697	87	0	0	0
47	0,844279	0,158869	0,158967				
48	0,823158	0,151113	0,151113				