

DESENVOLVIMENTO DE UM CONCENTRADOR CILÍNDRICO UTILIZANDO TÉCNICA DE RASTREAMENTO SOLAR DE FOCO MÓVEL – PARTE 1: ANÁLISE TEÓRICA DO MOVIMENTO DO ABSORVEDOR

Marcus Vinicius Rodrigues – sucramzabuza@hotmail.com
Centro Universitário UNA, Engenharia de Controle e Automação
Priscilla da Silva Chagas – priscilla.chagas21@gmail.com
Centro Universitário UNA, Engenharia Elétrica
Umar Lucio E. Rezende – umarlucio@gmail.com
Centro Universitário UNA, Engenharia Química
Lucas Paglioni Faria – lppg@ig.com.br
Centro Universitário UNA
Elizabeth Marques Duarte Pereira – elizabeth.pereira@una.br
Centro Universitário UNA
Matheus de Mendonça Herzog
CEMIG - MATHEUS.HERZOG@cemig.com.br

Resumo. Atualmente, a ampliação efetiva das aplicações do aquecimento solar no país para o setor industrial e para sistemas de ar condicionado e refrigeração solar requer o desenvolvimento de coletores solares para operação na faixa de temperaturas entre 80 °C e 250 °C. Nesse trabalho, foi estudada uma nova concepção de concentradores cilíndricos: refletor fixo com absorvedor móvel para acompanhamento da trajetória solar. A partir de estudos da óptica dos concentradores cilíndricos e da análise gráfica da incidência dos raios solares, foi desenvolvido um programa em MATLAB que permitiu avaliar a influência das dimensões geométricas do concentrador cilíndrico sobre seu fator de concentração. Os resultados obtidos demonstram que o movimento linear do absorvedor é suficiente para os níveis de temperatura requeridos nessa versão do protótipo, além de apresentar maior simplicidade para o sistema de deslocamento do absorvedor. A concepção do protótipo foi feita no software MAYA e encontra-se em fase construção para teste e validação do modelo utilizado.

Palavras-chave: Concentrador cilíndrico, Rastreamento Solar, Foco Móvel.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, estima-se que a área de coletores solares instalada no país ultrapassou, no final de 2013, 9 milhões de metros quadrados, destinadas basicamente às aplicações de baixa temperatura como o setor residencial. Nesse momento, o grande desafio é o desenvolvimento de coletores para aplicações industriais e em sistemas de ar condicionado e de refrigeração solares. Nesse caso, a faixa de temperatura requerida encontra-se principalmente entre 80 °C e 250 °C, que compreende desde coletores planos especiais até concentradores solares com sistemas de rastreamento solar.

No âmbito do projeto D438 - *Desenvolvimento de novos coletores solares para sistemas solares de condicionamento de ar e refrigeração*, convênio entre CEMIG/ANEEL e o Centro Universitário UNA, foi feita a concepção de um concentrador solar cujo sistema de rastreamento do Sol é feito através do movimento do absorvedor, em que circula o fluido de trabalho a ser aquecido. Busca-se dessa forma, simplificar os sistemas de rastreamento atuais com redução de consumo de energia de acionamento e de custos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estudo da ótica dos concentradores

Devido à baixa densidade de radiação solar que incide sobre a superfície terrestre para se obter temperaturas na faixa de 80 °C a 250 °C, Kalogirou (2009) recomenda o uso de coletores de tubo evacuado ou concentradores com rastreamento solar de 1-eixo como concentrador parabólico composto, refletor linear de Fresnel e calhas parabólica e circular, mostradas na Fig. 1.

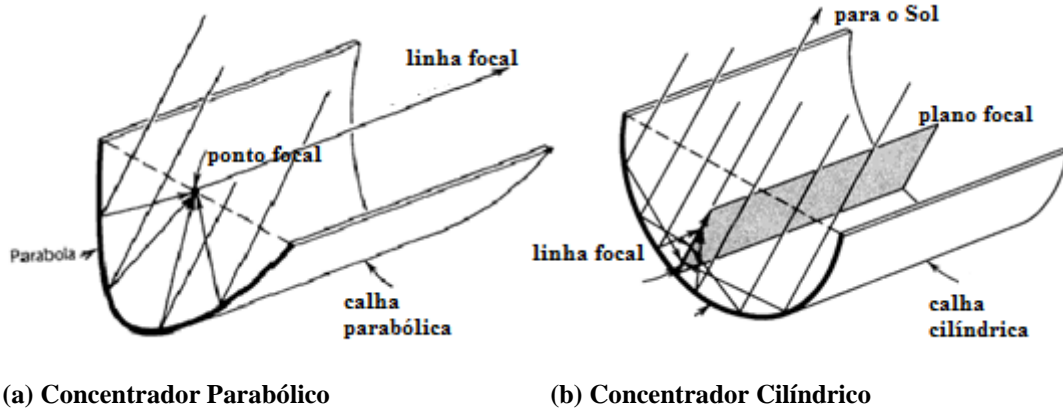


Figura 1 – Formação do foco em calhas lineares
 Fonte: Adaptado de Stine e Geyer (2001)

Os concentradores convencionais promovem o rastreamento solar, movendo toda a estrutura do coletor de modo a manter seu foco linear. Porém, quando se tem um concentrador fixo, os raios nem sempre são normais à abertura do espelho. Stine e Geyer (2001) destacam que o espelho circular é simétrico em relação a rotações em torno do seu centro e, portanto, mesmo quando os raios do Sol, considerados paralelos, não são normais em relação à abertura do espelho, a reflexão desses raios mantém o mesmo padrão, Fig. 2. Tal simetria não se repete nos espelhos parabólicos, exigindo grande precisão no rastreamento solar.

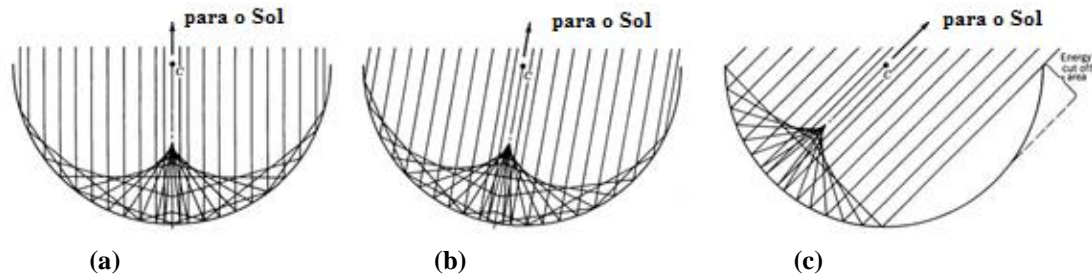


Figura 2 – Características da ótica esférica
 Fonte: Adaptado de Stine e Geyer (2001)

Riveror e Oliva (1986) apresentam, na Fig. 3, diagramas dos raios refletidos para vários ângulos de incidência em um espelho cilíndrico.

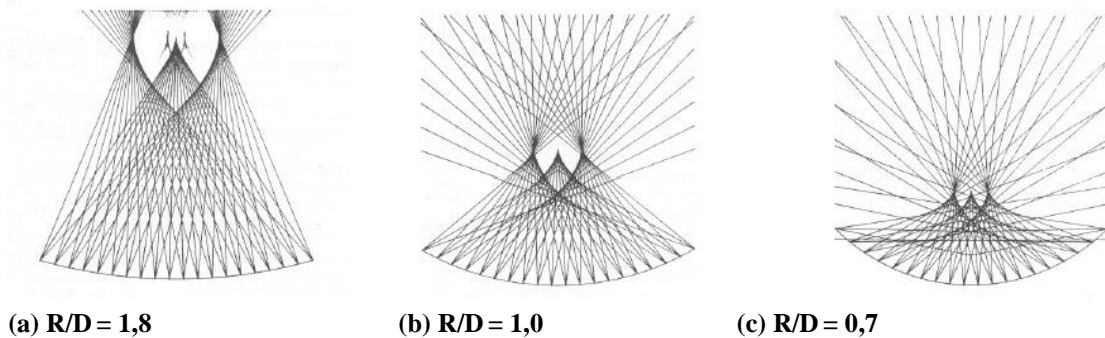


Figura 3 – Exemplos da reflexão de raios a partir de três espelhos cilíndricos
 Fonte: Riveror e Oliva (1986)

Nesse caso, R/D significa a razão entre o raio e a abertura dos espelhos, assumindo valores de 1,8; 1,0 e 0,7.

Ainda, segundo Stine e Geyer (2001), em calhas cilíndricas o ângulo de borda deve ser mantido entre 20 ° e 30 ° para se evitar a ocorrência de aberração esférica, Fig. 4.

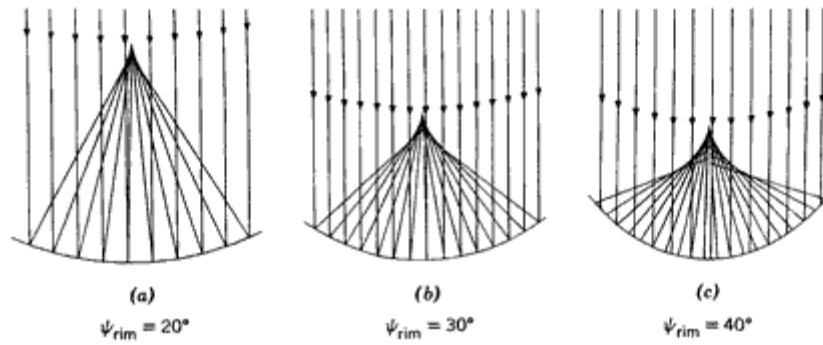


Figura 4 – Reflexão de raios paralelos em espelhos cilíndricos de diferentes ângulos de borda (ψ_{rim})
 Fonte: Stine e Geyer (2001)

Com base nesses estudos, optou-se pela concepção de concentradores de calha circular com refletor fixo e ângulo de borda de 30°. Estudos realizados por Martinez et al. (2006) mostram que tais concentradores podem atingir temperaturas de 90 °C a 200 °C com razões de concentração variando de 9 a 15.

2.2. Análise gráfica

Taneja et al. (1991) apresentam um método de análise gráfica de um concentrador cilíndrico. Esta técnica acompanha o percurso dos raios incidentes do ponto em que atingem a superfície do espelho até finalmente serem interceptados pelo absorvedor. A Fig. 5 apresenta o esquema da geometria e nomenclatura adotados:

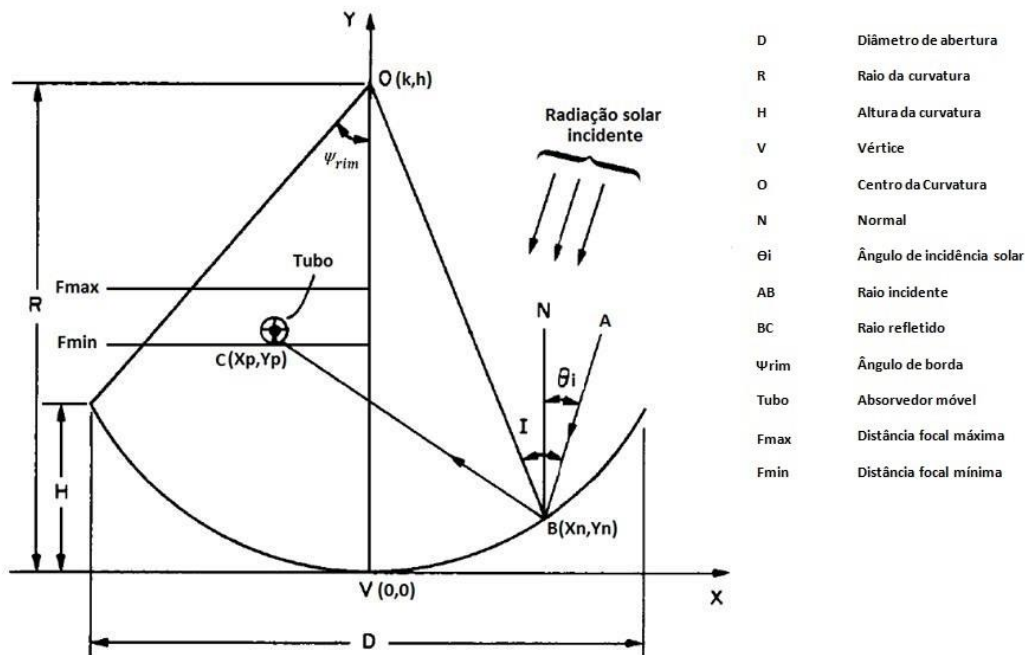


Figura 5 – Seção transversal de um concentrador cilíndrico
 Fonte: Adaptado de Taneja et al. (1991)

A abertura do refletor (D) se relaciona ao raio da circunferência da superfície refletora (R) e ângulo de borda (ψ_{rim}) na forma:

$$D = 2 \cdot R \cdot \text{sen}(\psi_{rim}) \quad (1)$$

sendo o comprimento do arco (AL) calculado pela equação:

$$AL = 2 \cdot \pi \cdot \psi_{rim} \quad (2)$$

A altura do refletor (H) é obtida por:

$$H = R - \sqrt{R^2 - D^2/4} \quad (3)$$

Depois de calculados esses parâmetros, foi possível gerar graficamente no plano (X-Y) a superfície refletora, dada pela Eq. (4):

$$Y = h - \sqrt{R^2 - (X - k)^2} \quad (4)$$

onde k e h são respectivamente, as coordenadas (x,y) do centro da circunferência do espelho.

A seguir, dividiu-se a abertura (D) do espelho por um número (N) de raios. A coordenada (X_n, Y_n) corresponde ao ponto onde o raio incide na enésima (n) divisão da superfície do espelho, expressa por:

$$X_n = n \cdot D/N \quad (5)$$

Portanto, substituindo esse valor na Eq. (4), tem-se:

$$Y_n = h - \sqrt{R^2 - (X_n - k)^2} \quad (6)$$

O coeficiente angular (m_i) do raio incidente com um ângulo θ_i é dado pela Eq. (7).

$$m_i = \tan(\theta_i) \quad (7)$$

Assim, o ângulo formado entre um raio que passa sobre o centro da circunferência com a normal no ponto (X_n, Y_n) é calculado por:

$$m_s = (k - X_n)/(h - Y_n) \quad (8)$$

Para obter-se o ângulo entre o raio refletido e a normal do espelho basta conhecer o ângulo formado entre (m_i) e (m_s), ou seja:

$$I = \tan(m_i - m_s / 1 + m_i \cdot m_s)^{-1} \quad (9)$$

A equação do raio refletido é dado por:

$$Y_r = m_r \cdot X + c \quad (10)$$

onde:

$$m_r = \tan(\theta_i - 2 \cdot I)^{-1}$$

$$c = Y_n - m_r \cdot X_n$$

Apesar de analisar quatro diferentes formatos de absorvedor, o estudo feito por Taneja et al. (1991) é estático e, assim, os cálculos para interceptação dos raios foram refeitos, considerando a posição do centro do tubo (h_p, k_p) e o raio (R_p) como variáveis. As coordenadas do ponto (X_p, Y_p) onde o raio refletido intercepta o tubo absorvedor são dadas pela Eq. (11) e Eq. (12), na forma:

$$X_p = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (11)$$

onde:

$$a = 1 + m_r^2$$

$$b = 2 \cdot m_r \cdot c - 2 \cdot m_r \cdot h_p - 2 \cdot k_p$$

$$c = -R_p^2 + c^2 - 2 \cdot h_p \cdot c + h_p^2 + k_p^2$$

$$Y_p = m_r \cdot X_p + c \quad (12)$$

Aplicadas essas equações, tem-se todos os parâmetros calculados, possibilitando modelar um concentrador cilíndrico fixo de qualquer dimensão com objetivo de se determinar a melhor posição (h_p, k_p) do tubo absorvedor para cada ângulo de incidência solar (θ_i).

3. SIMULAÇÃO DO FOCO MÓVEL NO MATLAB

Empregou-se um método convencional de análise gráfica, denominado *ray-tracing*, para o estudo do desempenho óptico do concentrador cilíndrico com objetivo de otimizar o dimensionamento e posicionamento do tubo absorvedor. Para isso, tomou-se como base o método realizado por Taneja et al. (1991), com algumas modificações.

Com base no modelo óptico de raios, apresentada neste trabalho, a contribuição efetiva de cada raio depende da sua incidência sobre o tubo absorvedor, conforme definição apresentada por Taneja et al. (1991). Ela pode ser calculada como o fator de concentração (FC) pela Eq. (13).

$$FC = \frac{N^{\circ} \text{ raios refletidos}}{N^{\circ} \text{ raios absorvidos}} \quad (13)$$

Nijgorodov et al (1995) mostram que a distância focal máxima (F_{max}) de um espelho circular é $0,5R$, decrescendo de acordo com aumento do ângulo de borda (ψ_{rim}). Considerando-se os raios incidentes paralelos entre si e perpendiculares à abertura do refletor, a distância focal mínima (F_{min}) é calculada por:

$$F_{min} = R \cdot \left(1 - \frac{\text{sen}(\psi_{rim})}{\text{sen}(2 \cdot \psi_{rim})} \right) \quad (14)$$

O fator de concentração (FC) será máximo quando o tubo absorvedor for capaz de “enxergar” todo o segmento entre F_{min} e F_{max} . A fim de encontrar o melhor posicionamento do absorvedor, as simulações feitas utilizaram $R = 1,91$ m com variação da altura do tubo entre $F_{min} = 0,80$ m e $F_{max} = 0,95$ m.

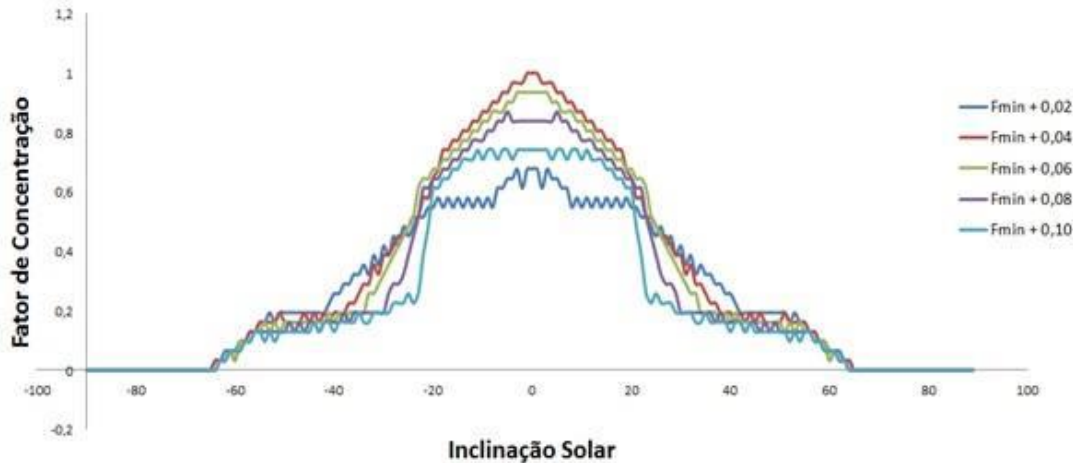


Figura 6 – Gráfico Fator de Concentração para Movimento Linear
Fonte: os autores

De acordo com os dados obtidos, a melhor posição do absorvedor encontrada está entre ($F_{min} + 0,04$) m e ($F_{min} + 0,06$) m. Assim, a altura recomendada para o tubo absorvedor no movimento linear em uma circunferência de $R = 1,91$ m é de 0,85 m. Nas simulações apresentadas na Fig. 7, os raios absorvidos são representados na cor magenta e os raios que não são aproveitados em azul. As simulações também foram feitas para diferentes tipos de movimento do absorvedor: a) Movimento linear, b) Movimento semicircular e c) Movimento otimizado, gerado pelo Matlab.

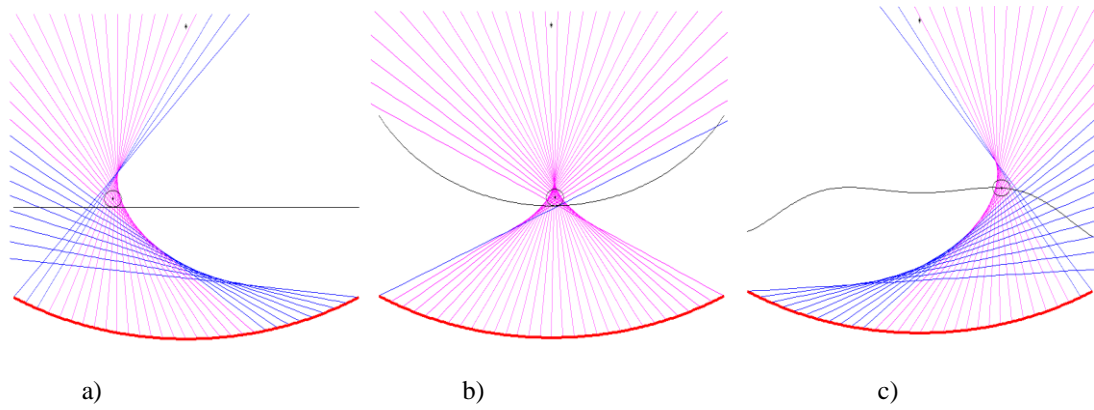


Figura 7 – Representação gráfica do fator de concentração
Fonte: os autores

Para decisão sobre o melhor modelo de concentrador, tomou-se como base o fator de concentração para os modelos a e c, mostrado na Fig. 8.

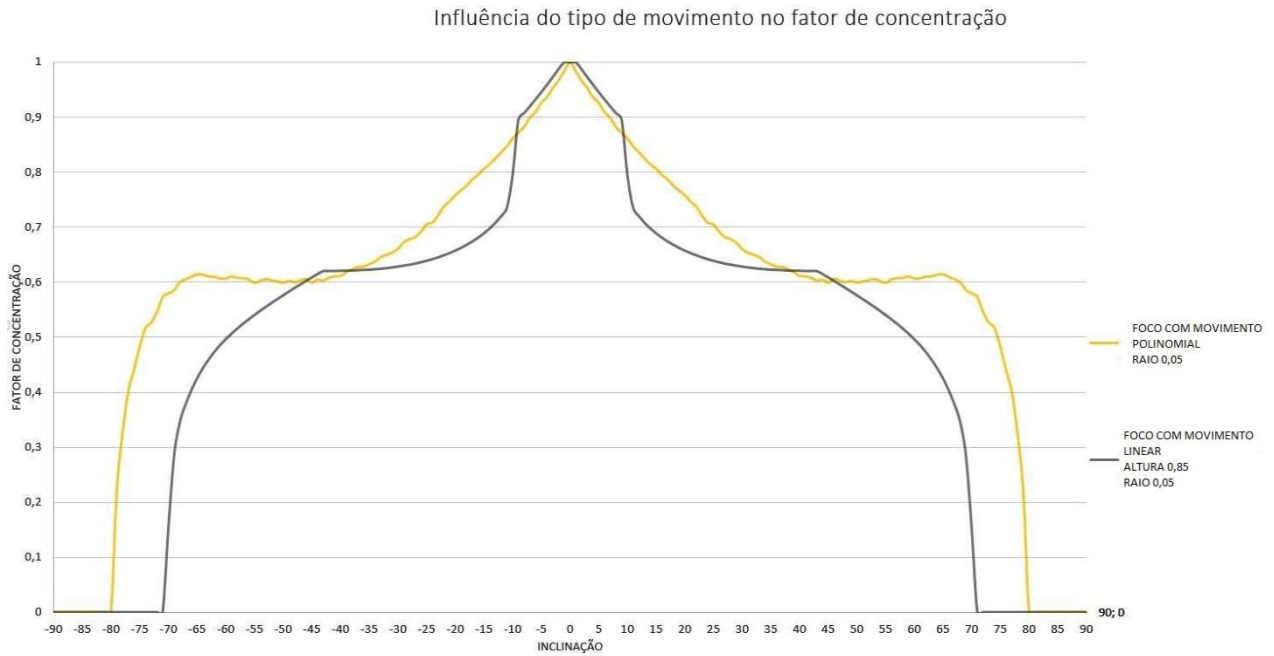


Figura 8 – Fator de concentração para movimento linear recomendado
Fonte: os autores

Para avaliar a influência do raio do tubo absorvedor (R_p) sobre o fator de concentração foram realizadas simulações para valores de 0,05 m, 0,1 m e 0,075 m, mostrados na Fig. 9.

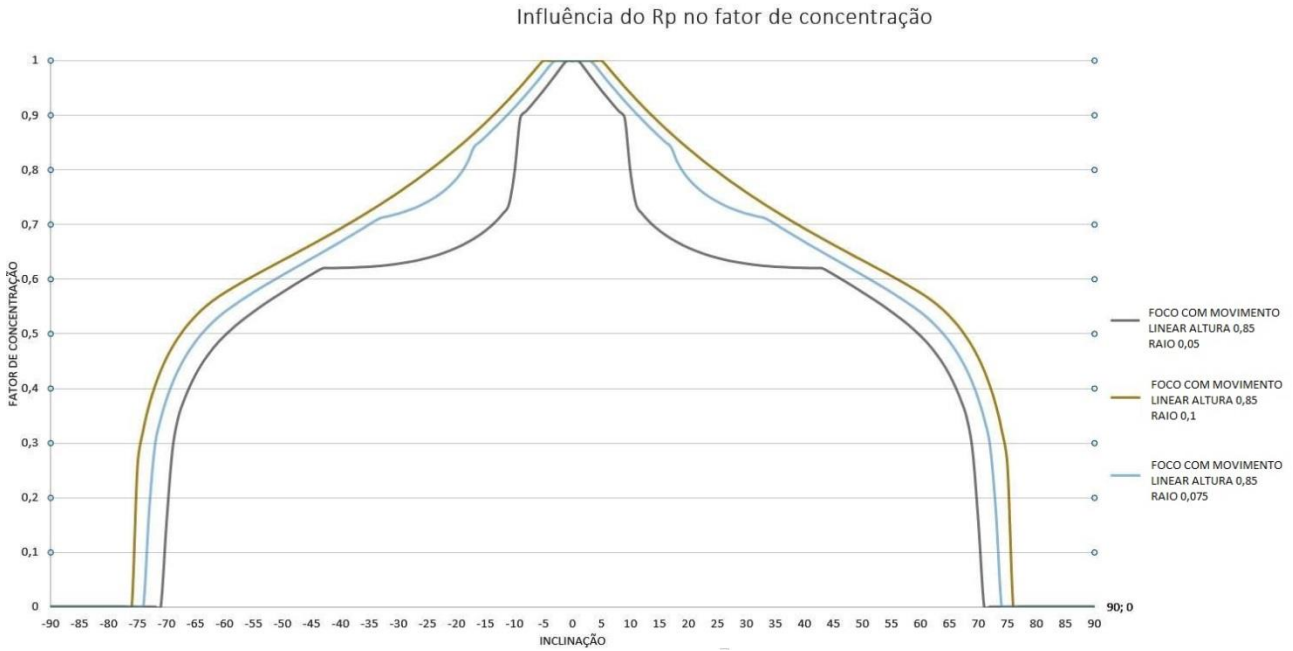


Figura 9 – Gráfico do fator de concentração ao longo do dia para 3 medidas de Rp
Fonte: os autores

Após os estudos sobre o concentrador solar de foco móvel e a modelagem matemática para definição de algumas variáveis como dimensões e tipo de movimento do tubo absorvedor, optou-se pela elaboração de uma modelagem gráfica para melhor visualização do protótipo proposto.

4. MODELAGEM GRÁFICA NO SOFTWARE AUTODESK MAYA 2014

Com auxílio do programa de modelagem 3D Maya, da AutoDesk, foi elaborado o modelo do concentrador com absorvedor móvel, a partir dos parâmetros obtidos no dimensionamento anterior. A superfície do espelho será montada sobre uma estrutura metálica, fixada na estrutura construtiva do local e seu dimensionamento depende da altura necessária para se evitar sombreamento e da carga de vento a ser suportada. Nessa modelagem utilizou-se um módulo de 1,91 m de raio, ângulo de borda de 30 ° e tubo absorvedor de 0,05 m de raio.

O tubo absorvedor coberto de vidro de boro silicato, montado a uma altura de 85 cm em relação ao espelho, move-se linearmente sobre um trilho, Fig. 10.

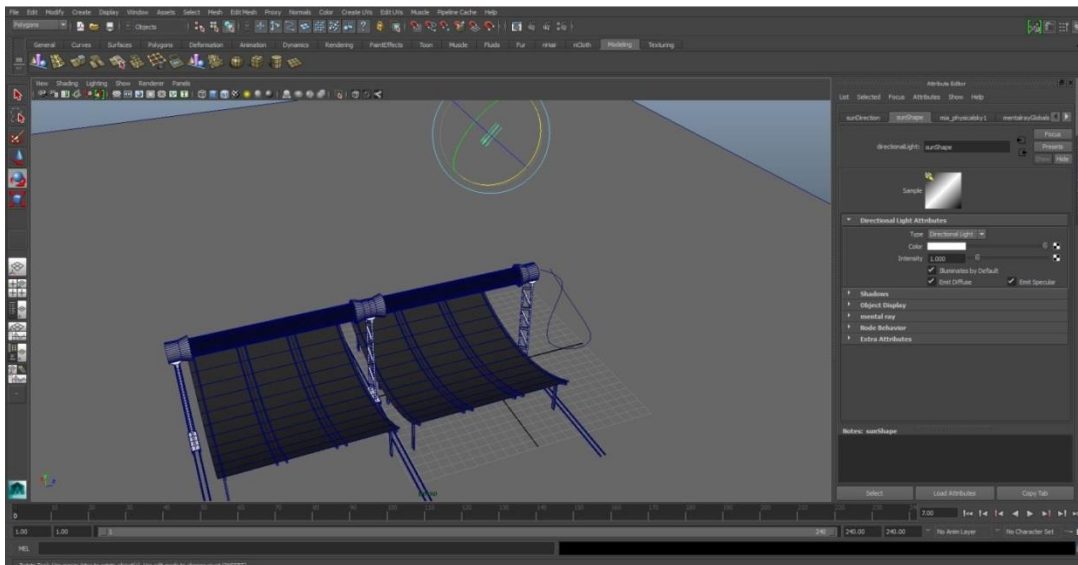


Figura 10 – Absorvedor sobre trilho
Fonte: os autores

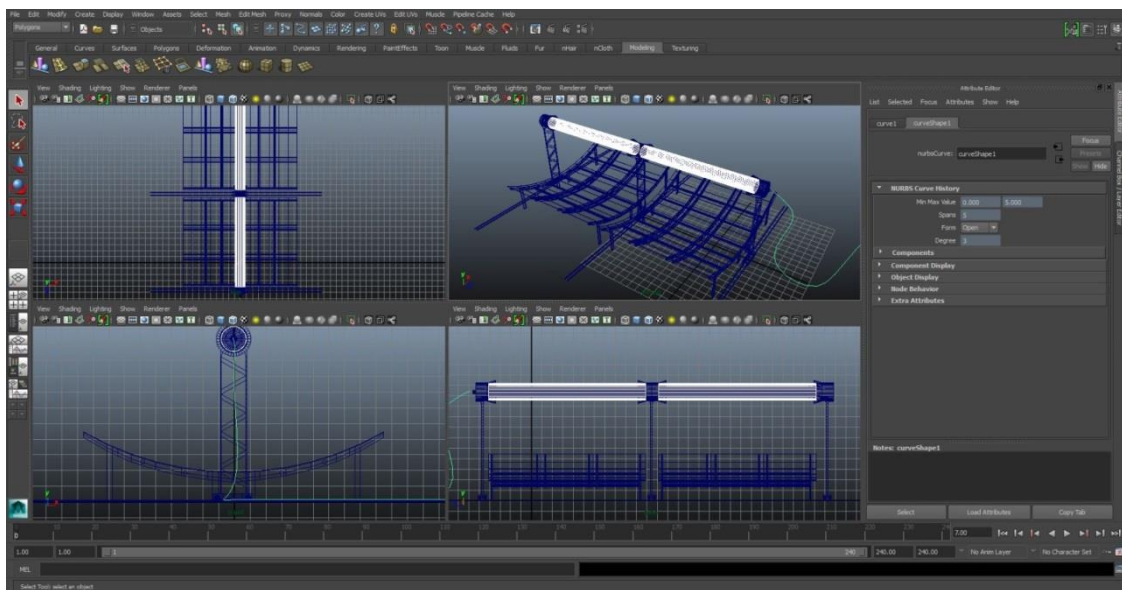


Figura 11 – Concentrador finalizado em diferentes vistas
Fonte: os autores

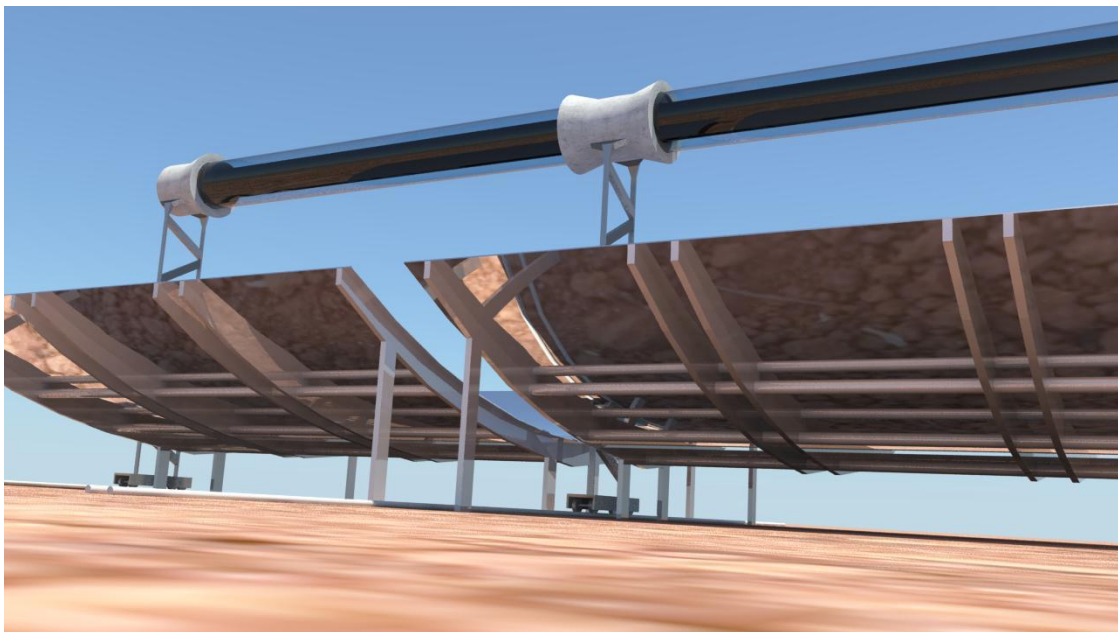


Figura 12 – Concentrador finalizado e renderizado vista posterior
Fonte: os autores

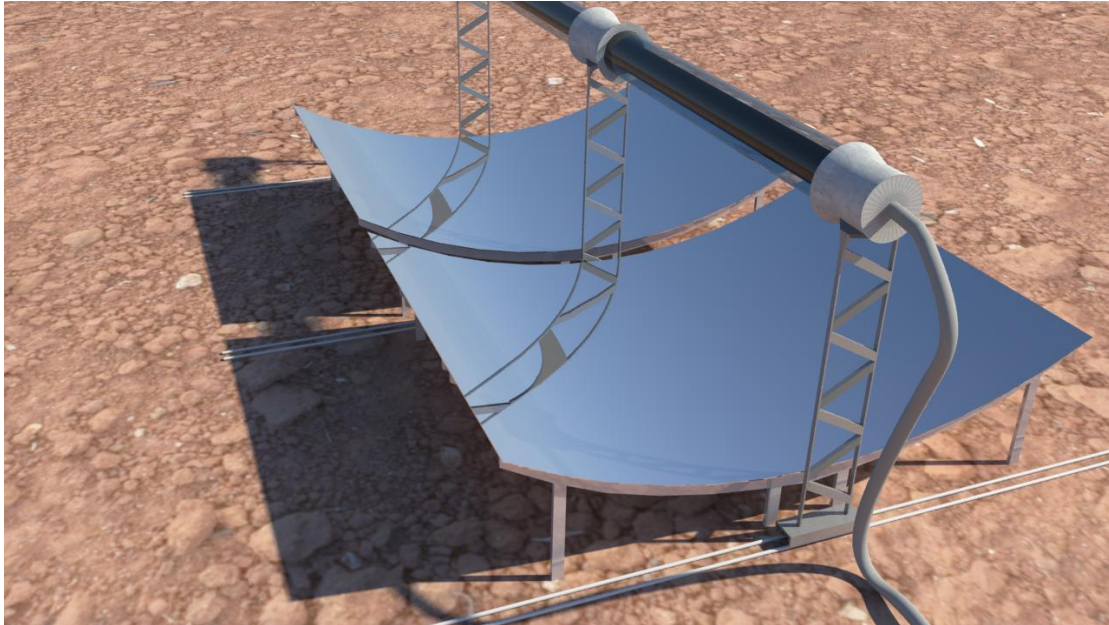


Figura 13 – Concentrador visto por cima
Fonte: os autores

5. CONCLUSÕES

Com base em pesquisas bibliográficas realizadas em fontes internacionais e uso de softwares de simulação foi possível implementar a análise gráfica do concentrador solar cilíndrico com foco móvel. A metodologia proposta permitiu definir os parâmetros geométricos de um concentrador cilíndrico com movimento linear do absorvedor, com base no cálculo do fator de concentração e simplicidade construtiva para atender o nível de temperatura requerido em sistemas de refrigeração solar.

Construção e teste do protótipo para validação do modelo proposto e determinação da relação custo-benefício do sistema de rastreamento solar.

Agradecimentos

A equipe do projeto agradece à CEMIG pelo financiamento e apoio ao projeto.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Atlas de Energia Elétrica no Brasil. Brasília. ANEEL. 2ª edição. 2005. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>
- Kalogirou, S. A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. 1a ed. Elsevier Inc., Oxford, 2009.
- Martinez, V., Alorda, B., Moia, A., Pujol, R., Low-cost orientation system for a concentrating solar collector with static reflector and tracking receiver. International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Spain, 2006. Disponível em: <<http://www.icrepq.com/icrepq06/241-martinez.pdf>>. Acesso em 15 maio de 2012.
- Nijegorodov, N., Jain, P.K., Devan, K.R.S., A non-tracking, cylindrical solar concentrator with circular cross-section: Theoretical and experimental analysis. Renewable Energy, Vol. 6, pp. 1 - 9, 1995.
- Rabl, A., Comparison of Solar Concentrators. Solar Energy, Solar Energy, Vol. 18, pp. 93 – 111, 1976.
- Riveror, H. G., Oliva, A. I., Graphical Analysis of Sun Concentrating Collectors. Solar Energy, Vol. 36, No. 4, pp. 313 - 322, 1986.
- Stine, B. W., Geyer, M., Power From The Sun. 2001. Disponível em: <<http://www.powerfromthesun.net>> Acesso em 25 de Abril de 2012.
- Taneja. P., Mathur S. S., Kandpal, T. C., Optical performance analysis of a seasonally adjusted circular cylindrical solar concentrator, Energy Convers. Mgrnt Vol. 31, No. 4, pp. 353-367, 1991.

DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE USING CYLINDRICAL CONCENTRADOR TRACKING SOLAR MOBILE FOCUS - PART 1: THEORETICAL ANALYSIS OF MOVEMENT OF ABSORBING

Abstract. *Currently, new applications of the solar heating for the industry and for solar air conditioning and cooling systems in Brazil require the development of solar collectors for operation in the temperature range between 80 °C and 250 °C. In this scope, is been studied a new design of cylindrical concentrators: fixed reflector with mobile absorber for solar tracking. From the optical studies of cylindrical concentrators and graphical analysis of sunlight, was developed a program in MATLAB that allowed us to evaluate the influence of the geometric dimensions of the cylindrical reflector on its concentration factor. The results show that the linear motion of the absorber is sufficient to temperature levels required in this version of the prototype, and present greater simplicity for the displacement of the absorber system. The design of the prototype was made in MAYA software and the next steps are its construction and experimental tests for validation of the model developed.*

Keywords: *Cylindrical Concentrator, Solar Tracking, Mobile Focus.*