

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

COMPORTAMENTO ÓPTICO DE DIFERENTES TIPOS DE CONCENTRADORES SECUNDÁRIOS DE UM SISTEMA DE REFLETORES LINEARES FRESNEL

Patricia Scalco, patriciascalco1@gmail.com
Jacqueline Biancon Copetti, jcopetti@unisinis.br
Mario Henrique Macagnan, mhmacc@unisinis.br
Benjamin Pillot, benjaminfp@unisinis.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica- Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Av. Unisinis, 950, Bairro Cristo Rei, São Leopoldo, 93.022-750, Brasil

Resumo: O uso de energia solar para alimentar processos que exigem temperaturas em torno de 300 °C aparece como uma alternativa para suprir o uso de combustíveis fósseis. Para atingir essa temperatura, é necessário utilizar equipamentos de alto rendimento e que sejam capazes de concentrar grande quantidade de radiação solar em pequenas áreas. Uma dessas tecnologias são os Refletores Fresnel Lineares (LFR). O sistema LFR consiste em um conjunto de espelhos que captam os raios solares e os refletem para um ponto fixo, chamado de receptor. No receptor é onde acontece a conversão da radiação em calor e é composto por um tubo absorvedor, por onde escoar um fluido e pelo concentrador secundário, que consiste em uma segunda superfície reflexiva cuja função é maximizar a quantidade de raios que serão absorvidos pelo tubo absorvedor. O concentrador secundário pode possuir diferentes geometrias que variam de sistema para sistema de acordo com a demanda exigida. Logo, percebe-se a importância do desenvolvimento de um modelo numérico que leve em consideração os aspectos geométricos do sistema. Dessa forma, este trabalho apresenta um estudo dos fenômenos ópticos referentes ao concentrador secundário, através de um procedimento de traçado de raios utilizando o método estatístico de MonteCarlo. Duas geometrias de concentradores de formato trapezoidal e CPC (Compound Parabolic Concentrator) são avaliadas quanto ao comportamento dos raios para diferentes ângulos de incidência e condições do concentrador secundário. Com isso foi possível calcular a eficiência óptica de cada um dos tipos de concentradores secundários analisados para diversas situações. A partir disso, foi possível determinar o modelo de concentrador secundário que melhor se adapta à situação requerida.

Palavras-chave: concentração de energia solar; refletores lineares Fresnel; concentrador secundário

1. INTRODUÇÃO

A atual preocupação com o uso consciente dos recursos naturais e o alto custo dos combustíveis fósseis tem gerado interesse em desenvolver e estudar tecnologias que utilizem fontes renováveis para a produção de energia. Dessa forma, ganha destaque a energia solar, que pode ser utilizada para a geração de eletricidade ou para a geração de calor para aquecimento, tanto em ambientes domésticos como em ambientes industriais. A faixa de temperatura de trabalho implica diretamente na escolha da tecnologia que será utilizada para a geração de calor. Para níveis de temperaturas abaixo dos 80 °C, podem ser atendidos usando coletores térmicos disponíveis no mercado (superfície seletiva ou tubos evacuados) (Shukla *et al.*, 2013; D'Antoni e Saro, 2012).

Para situações que exigem uma temperatura maior, acima de 250 °C, é necessário utilizar concentradores solares com elevado desempenho. Esse tipo de equipamento utiliza a tecnologia de concentração solar (CSP - *concentrated solar power*) para que um fluido seja elevado a altas temperaturas. O calor gerado pode ser então utilizado para atender processos ou produzir vapor em um trocador de calor para alimentar uma turbina para produção de eletricidade (Freris e Infield, 2008). Para concentrar os raios solares são utilizados lentes ou espelhos, dependendo do tipo de aplicação. Essa concentração pode se dar de maneira pontual ou linear.

Existem diversas tecnologias que utilizam esse princípio, entre elas se destaca os refletores lineares Fresnel (LFR- *Linear Fresnel Reflector*) que apesar de ser menos eficiente em relação a outras tecnologias, pode ser mais competitiva devido à sua estrutura simples e pela fácil manutenção, uma vez que apenas os espelhos se movem enquanto que o receptor

permanece estacionário. Além disso, outra vantagem desse sistema é que a estrutura é plana, facilitando sua disposição em telhados, por exemplo.

O LFR é composto basicamente por três partes: o campo de refletores, o sistema de rastreamento do Sol e o receptor, conforme é apresentado na Fig.1. O campo de refletores consiste basicamente no conjunto de espelhos onde os raios solares incidem e são refletidos para o receptor. O sistema de rastreamento solar movimenta os espelhos de acordo com a posição do Sol ao longo do dia. Os raios que incidem nos espelhos refletem para o receptor, que é composto por um tubo por onde escoia um fluido de trabalho e por uma segunda superfície reflexiva, chamada de concentrador secundário. O concentrador secundário tem a função de maximizar a quantidade de raios solares que são absorvidos pelo tubo absorvedor, como é mostrado na Fig. 2.

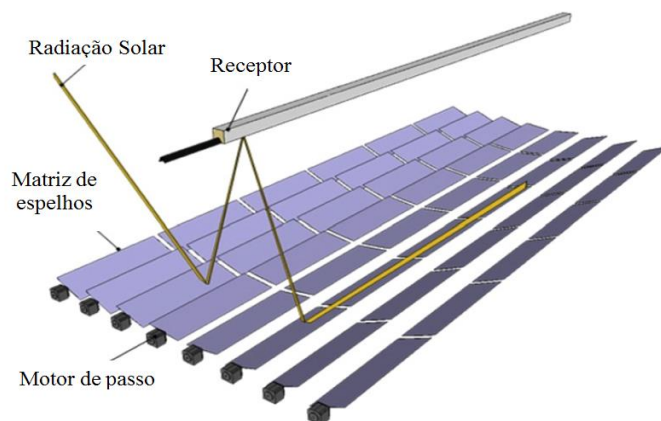


Figura 1. Representação de um refletor Fresnel linear, conforme Lin *et al.* (2013).

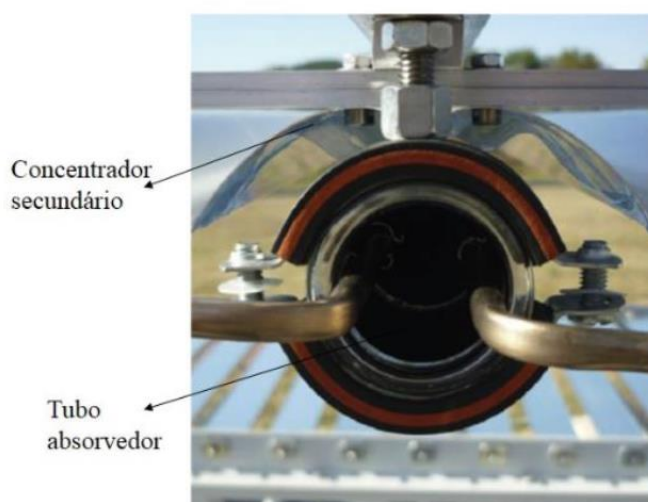


Figura 2. Representação do receptor de um sistema LFR, conforme Delatorre *et al.* (2013).

O concentrador secundário pode apresentar diversas geometrias, dependendo da aplicação e dos resultados que se deseja obter. Os formatos mais utilizados são o trapezoidal, pela geometria simples e a fácil construção e o CPC, que possui rendimento óptico melhor devido a seu maior fator de concentração.

É no elemento absorvedor do sistema LFR que acontecem os fenômenos de transferência de calor mais intensos, por isso a importância de um estudo detalhado tanto óptico como térmico do comportamento do sistema para diferentes situações. Assim, neste trabalho, foram estudados os fenômenos ópticos do receptor, bem como foram analisadas diferentes geometrias de concentrador secundário para diferentes condições de incidência da radiação solar, com a finalidade de encontrar uma configuração que apresente as menores as perdas ópticas e térmicas. Para isso, foi desenvolvida uma rotina de cálculos utilizando o método de Monte Carlo (MMC) para determinar o traçado de raios dentro do concentrador secundário. Este método consiste em uma distribuição aleatória de dados dentro de um intervalo pré-determinado, com o objetivo de obter resultados mais próximos do real. A rotina foi desenvolvida utilizando como ferramenta o *software* MATLAB.

2. DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS E DESCRIÇÃO DAS GEOMETRIAS DO CONCENTRADOR SECUNDÁRIO

O receptor é composto por um ou mais tubos absorvedores, por onde escoia um fluido de trabalho e por uma segunda superfície reflexiva, chamada de concentrador secundário posicionados a uma altura pré-definida em relação ao plano dos espelhos. O concentrador secundário é posicionado junto ao receptor de forma a maximizar a quantidade de raios solares que são absorvidos pelo tubo absorvedor.

É no receptor que acontece a conversão de radiação solar em energia térmica. Por isso a importância do estudo e análise do sistema receptor. Assim, o estudo do sistema receptor, através de simulação numérica, levando em conta as perdas térmicas e ópticas, permite verificar os parâmetros geométricos importantes para o desenvolvimento da planta operacional.

A geometria do concentrador secundário e seu posicionamento influenciam diretamente no desempenho óptico do sistema. A definição de concentração dos raios solares está relacionada ao ângulo de aceitação, $\theta_{\max}$, que estabelece a fração de raios incidentes na abertura do concentrador secundário (Rolim *et al.*, 2012), ou seja, os raios que estiverem fora do intervalo angular são descartados da análise. Essa relação pode ser representada através da Eq. 1.

$$\theta_{\max} = \sin^{-1} \left(\frac{A'}{A} \right) \quad (1)$$

onde A' é a área da superfície do tubo absorvedor e A é área de abertura do concentrador secundário. A partir disso, é utilizado o MMC para gerar pontos aleatórios dentro do intervalo angular calculado.

O MMC consiste em um método estatístico para geração aleatória de pontos dentro de um intervalo definido que para essa situação é a largura do concentrador secundário (Delatorre *et al.*, 2013). A partir de cada ponto P é gerado um raio r com um ângulo de incidência ϕ_i que incide na superfície do concentrador secundário no ponto P' , onde é gerada uma reta ortogonal N em relação a superfície do concentrador e então é gerado um raio refletido com um ângulo ϕ_r em relação a reta N . De acordo com a Lei de Snell ϕ_i deve ser igual ao ϕ_r e, dessa forma, é possível calcular o raio refletido r' a partir da Eq. 2 (Welford e Winston, 1978):

$$r' = r - 2(Nr)N \quad (2)$$

A partir disso, são gerados raios que sofrem múltiplas reflexões dentro do concentrador secundário. Esse processo se repete até que os raios atinjam o tubo absorvedor e sejam acrescentados ao fluxo absorvido ou sejam perdidos para o ambiente, sendo adicionados ao fluxo perdido. Este processo está representado na Fig. 3.

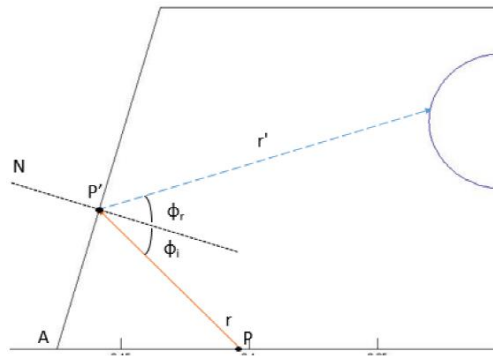


Figura 3. Representação do traçado de raios no receptor do sistema LFR.

A rotina de cálculo, mostrada na Fig. 4, para este procedimento, foi desenvolvida utilizando como ferramenta o *software* MATLAB, bem como a modelagem das superfícies analisadas.

Neste trabalho foram estudadas as geometrias trapezoidal e do tipo CPC, mostradas na Fig. 5, que são as mais utilizadas pela simplicidade e por apresentarem um bom desempenho óptico, segundo alguns estudos realizados neste sentido por Abbas *et al.*, 2012; Facão *et al.* 2011; Natarajan *et al.* 2012; Walker, 2013. A partir das geometrias, foram analisadas diversas condições do sistema. Os casos estudados levaram em consideração, primeiramente, o concentrador secundário aberto, sem cobertura transparente na parte inferior, o que evidentemente aumenta as perdas térmicas devido ao efeito do vento. Nessa interface foram gerados raios aleatórios com diferentes ângulos de incidência, com uma determinada distribuição de probabilidade em um intervalo limitado. Depois disso, foi inserida uma cobertura de vidro entre a abertura do concentrador secundário e o ambiente, sendo repetidos todos os testes realizados para a situação anterior levando em consideração o efeito de refração do vidro. Esses mesmos testes foram realizados tanto para a geometria trapezoidal como para a geometria do tipo CPC.

Com os resultados obtidos, é possível calcular a eficiência para cada geometria de concentrador secundário estudado e assim, avaliar a que apresenta um melhor desempenho.

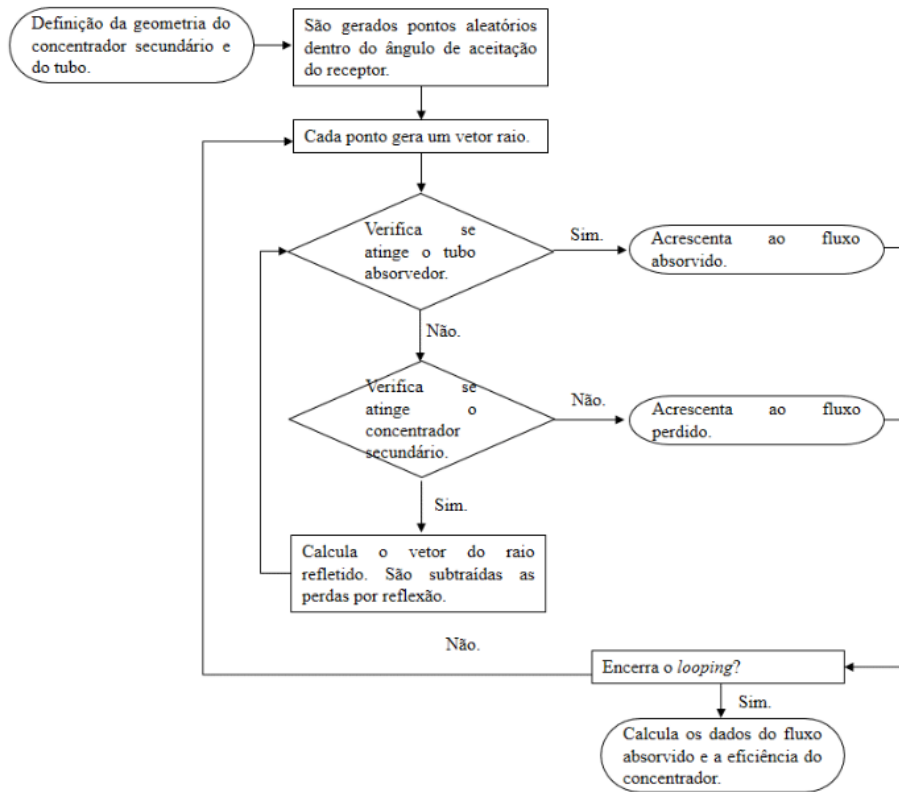


Figura 4. Fluxograma da rotina para determinação da eficiência do concentrador secundário.

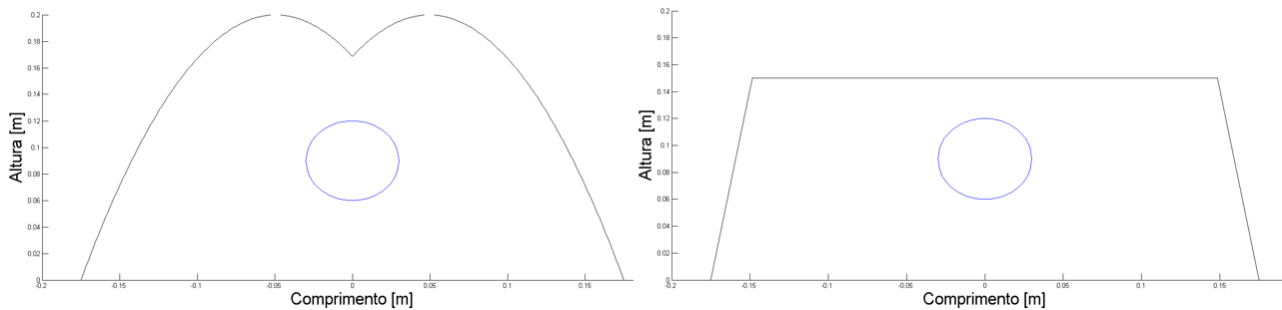


Figura 5. Representação das geometrias parabólica e trapezoidal do concentrador secundário.

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

A partir do traçado de raios para as diferentes condições analisadas é possível determinar a eficiência do concentrador secundário para ambas geometrias analisadas e, a partir disso, definir as condições de trabalho. A eficiência do concentrador secundário pode ser determinada através da Eq. 3, que é uma relação entre a quantidade total de raios que atinge o tubo absorvedor e a quantidade de raios que incidem na abertura do receptor, levando em consideração todas as reflexões que os raios sofrem no concentrador secundário.

$$\eta = \left(\frac{\varphi_{abs}}{\varphi} \right) 100 \quad (3)$$

onde φ_{abs} e φ representam o fluxo absorvido pelo tubo absorvedor e o fluxo total, respectivamente, e η é a eficiência óptica do concentrador secundário.

O procedimento de traçado de raios foi feito para as duas superfícies: trapezoidal e do tipo CPC e foram analisados raios para diferentes ângulos de incidência. Na Fig. 5 é possível observar este procedimento. Na base do concentrador

secundário foram gerados pontos aleatórios utilizando o MMC e, a partir deles, foram gerados raios (em rosa) com um ângulo de incidência definido de forma aleatória também. Quando o raio incidisse na superfície do concentrador secundário, um novo raio era gerado. Essas reflexões se repetiram até que o tubo absorvedor fosse atingido pelo raio (em verde) ou fosse perdido para o meio (em azul).

Estes testes foram feitos para duas situações distintas. Primeiramente foram testadas condições para o concentrador secundário aberto, condição que apresenta maiores perdas térmicas por convecção devido ao efeito do vento mas com menores perdas ópticas. A segunda condição foi avaliada levando em consideração a existência de um invólucro de vidro na abertura do concentrador secundário, isolando-o do meio externo. A implicação dessa condição é o coeficiente de refração do vidro que foi inserido no sistema.

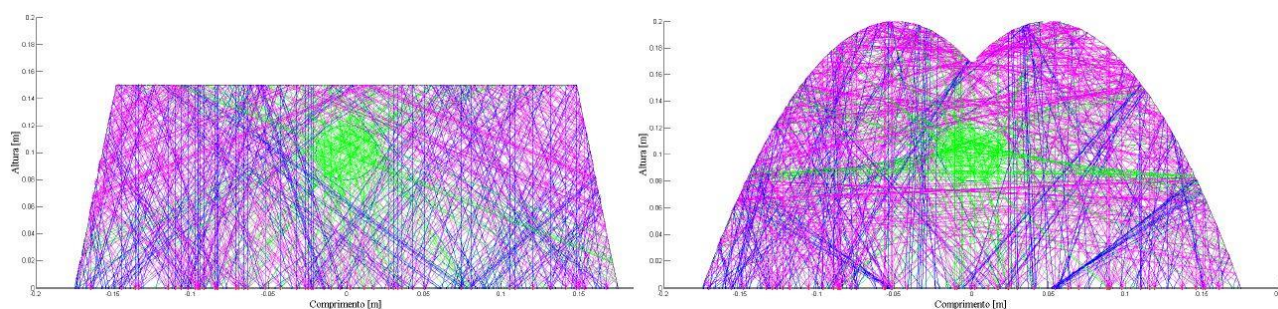


Figura 5. Traçado de raios para as geometrias parabólica e trapezoidal do concentrador secundário.

Os testes foram realizados alterando-se a quantidade de pontos aleatórios gerados pelo MMC. Cada um dos testes foi repetido 10 vezes tendo em vista verificar se a quantidade de dados aleatórios estabelecida previamente proporcionava uma estabilização nos valores de eficiência óptica encontrados. Dessa forma, a quantidade de dados aleatórios foi sendo incrementada até que o valor de eficiência estabilizasse. Assim, foi possível calcular os valores de eficiência óptica.

Para a geometria trapezoidal, foi necessário avaliar algum parâmetro, como a inclinação das paredes e a quantidade de tubos inseridos no receptor para verificar o comportamento para cada uma das situações. Como é possível verificar na Fig. 6, o ângulo de inclinação que apresenta um melhor desempenho é o de 80° . Isso acontece pois quanto mais inclinada a parede, maior será a quantidade de reflexões dentro do concentrador secundário, entretanto, com um ângulo de 90° , a eficiência é mínima devido as paredes serem ortogonais entre si, minimizando as reflexões dos raios que ali incidem.

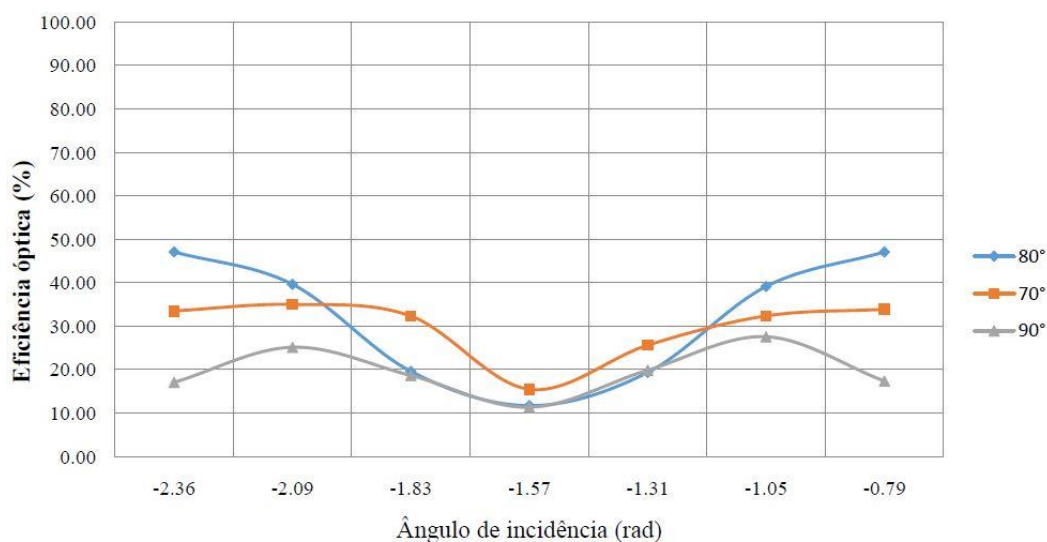


Figura 6. Eficiência óptica para diferentes inclinações das paredes do concentrador secundário do tipo trapezoidal.

Uma vez que o ângulo de inclinação para o concentrador secundário do tipo trapezoidal foi fixado em 80° , foram desenvolvidos testes variando a quantidade de tubos inseridos no concentrador secundário (Fig. 7). É possível observar que quanto maior o número de tubos absorvedores inseridos no receptor, maior será a eficiência, uma vez que a área de absorção é aumentada conforme aumenta-se o número de tubos. É importante ressaltar que a inserção de tubos é feita apenas para o concentrador secundário do tipo trapezoidal, pois no caso de concentrador do tipo CPC o tubo absorvedor já é inserido no foco da parábola.

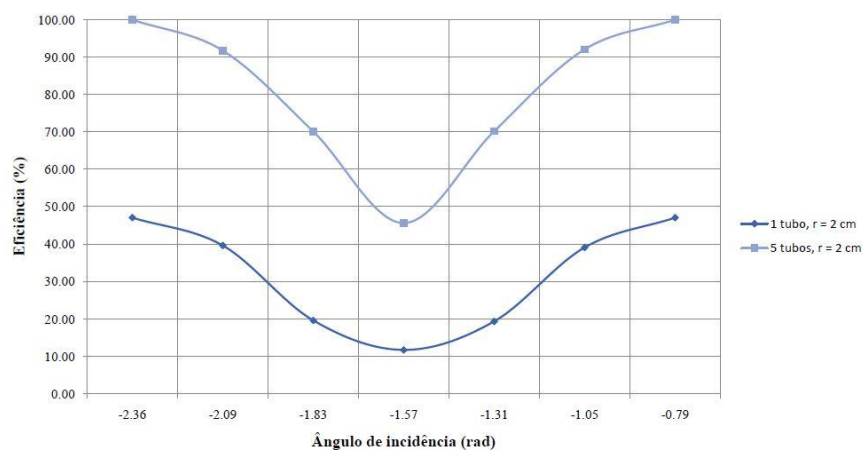


Figura 7. Eficiência óptica do concentrador secundário do tipo trapezoidal variando a quantidade de tubos.

As Figs. 8 e 9 apresentam os resultados de eficiência para os concentradores abertos trapezoidal e CPC, respectivamente. As Figs. 10 e 11 para os concentradores com invólucro de vidro.

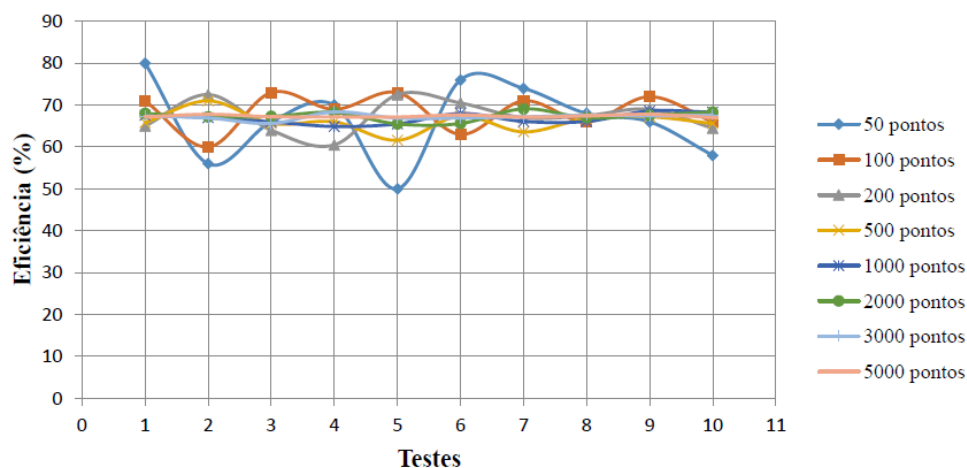


Figura 8. Eficiência óptica para o concentrador secundário do tipo trapezoidal aberto, sem invólucro de vidro.

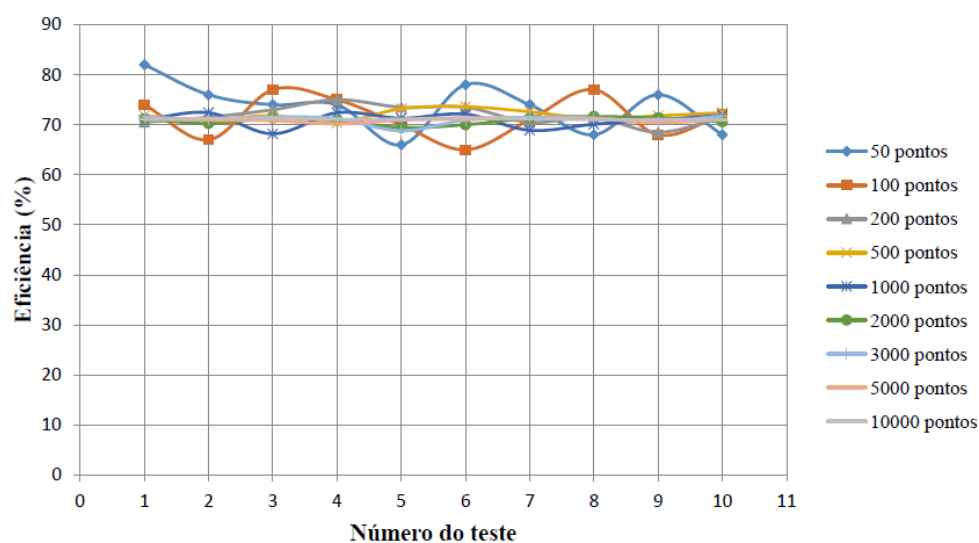


Figura 9. Eficiência óptica para o concentrador secundário do tipo CPC aberto, sem invólucro de vidro.

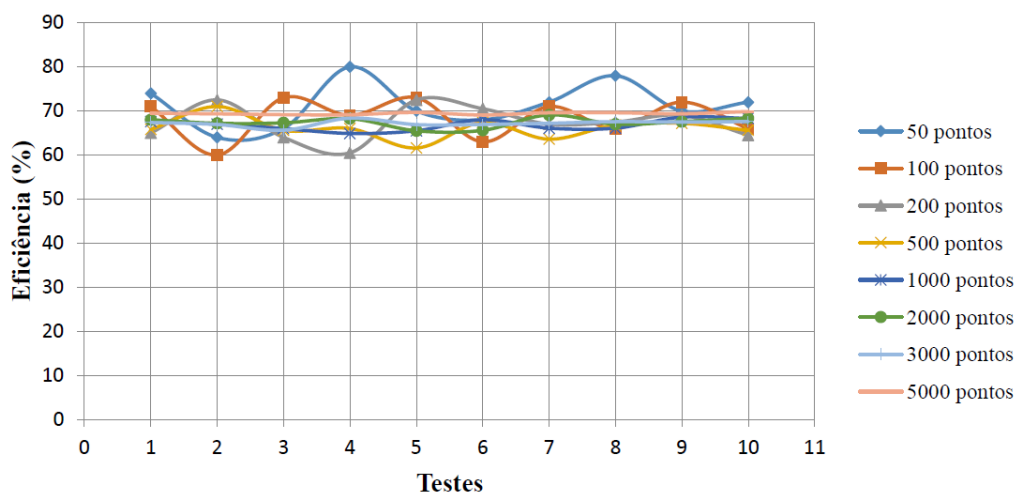


Figura 10. Eficiência óptica para o concentrador secundário do tipo trapezoidal com invólucro de vidro.

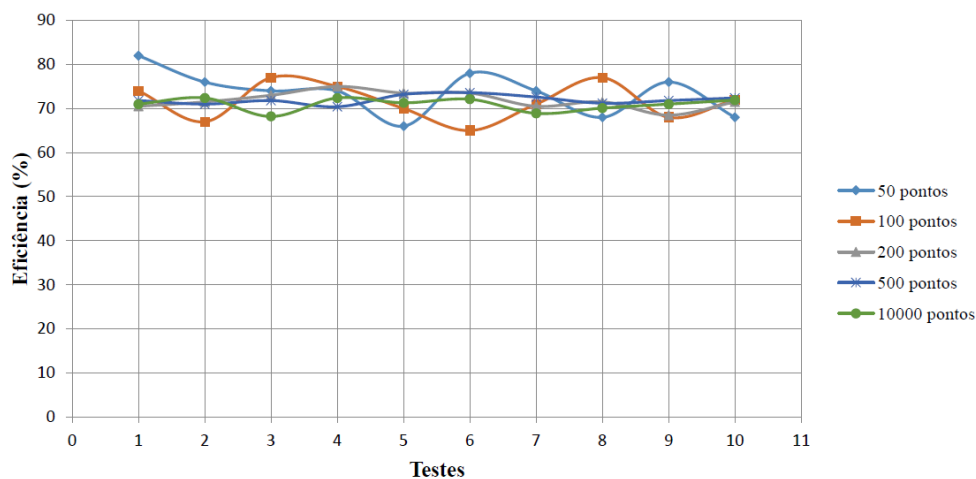


Figura 11. Eficiência óptica para o concentrador secundário do tipo CPC com invólucro de vidro.

Para analisar a eficiência média dos concentradores, foi necessário avaliar seu comportamento ao longo de um dia (Fig. 12). A partir disso, é possível observar que a geometria que apresenta melhor comportamento óptico para o concentrador aberto, é o trapézio, uma vez que em seu interior podem ser inseridos quantos tubos couberem. Para 5 tubos, de raio 20 mm cada, o valor médio da eficiência encontrado foi de 81,37 %. O concentrador do tipo CPC apresenta um desempenho baixo devido ao fato de apenas um tubo estar posicionado em sua cavidade, devido ao seu formato curvo e ao fato do tubo estar posicionado no foco da parábola. O valor médio da eficiência foi de 37,57 %. Entretanto, comparando os valores médios de eficiência para o caso de um tubo apenas inserido na cavidade receptora, o concentrador do tipo CPC, apresenta melhor desempenho, que o trapezoidal (31,92%).

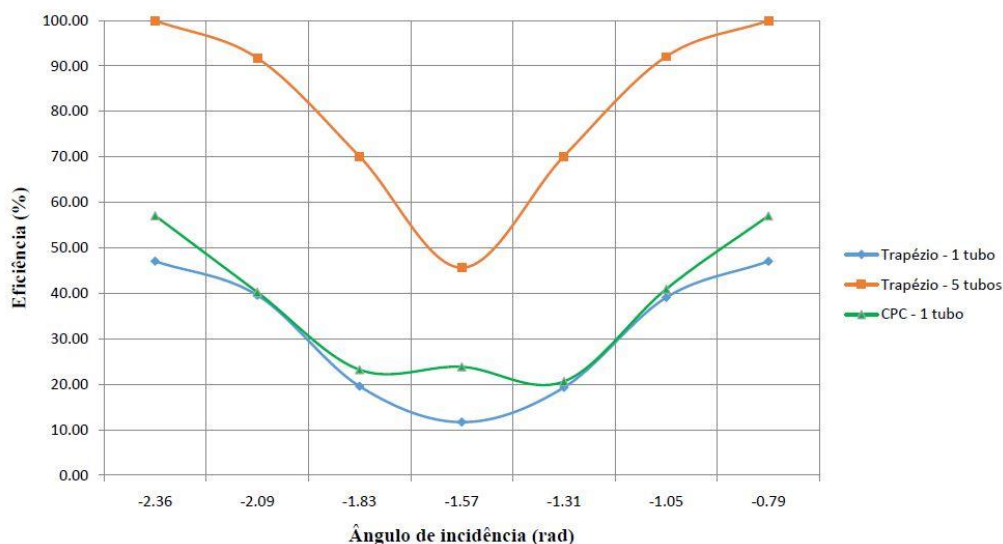


Figura 12. Eficiência óptica para o concentrador secundário ao longo do dia para as geometrias CPC e trapezoidal.

Na segunda fase dos testes foi inserida uma cobertura de vidro na abertura do concentrador secundário, acarretando um efeito de refração dos raios incidentes. Nesses testes, os resultados médios obtidos foram 99,96 % para a geometria trapezoidal e 34,84 % para a geometria parabólica. A refração ocasionada pela inserção da cobertura de vidro deve ser analisada com muito cuidado, uma vez que seus efeitos são diferentes para cada geometria. Para o concentrador secundário do tipo trapezoidal o efeito de refração melhora a eficiência do conjunto. Já para o concentrador do tipo CPC o valor médio da eficiência diminuiu. Isso acontece pois ao sofrer refração os raios atingem pontos diferentes do foco da parábola, onde está situado o tubo absorvedor.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados os resultados da análise geométrica do receptor de um sistema de concentradores Fresnel lineares. O procedimento matemático para o traçado de raios foi desenvolvido utilizando o Método de Monte Carlo. A escolha deste método estatístico se deve ao fato de que seus resultados apresentam o comportamento mais próximo dos resultados experimentais.

Em relação aos tipos de concentradores secundários estudados, observa-se que ambos apresentam um bom comportamento óptico. Devido a sua versatilidade em poder alterar a quantidade de tubos absorvedores utilizados, o concentrador secundário do tipo trapezoidal apresenta um melhor comportamento em relação ao CPC.

Além do bom comportamento óptico, os concentradores do tipo trapezoidal possuem uma geometria mais simples, o que facilita sua instalação e manutenção.

A partir dos testes realizados foi possível prever o comportamento óptico de cada uma das geometrias testadas, além disso, a rotina de cálculos desenvolvida pode ser adaptada para as mais diversas situações.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho é financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), projeto 406976/2013-9, Chamada: Linha 2 - Energia Heliotérmica.

6. REFERÊNCIAS

- Abbas, R; Muñoz J. and Martínez-Val, J. M., 2012, "Steady-state thermal analysis of an innovative receiver for linear Fresnel reflectors". *Applied Energy*, Vol. 92, pp. 503-515.
- D'Antoni M.; Saro, O., 2012, *Massive Solar-Thermal Collectors: A critical literature review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 16, pp. 3666-3679.
- Delatorre, J.; Baud, G.; Bézian, J. J.; Blanco, S.; Caliot, C.; Cornet, J. C.; Coustet, C.; Dauchet, J.; El Hafi, M.; Eymet, V.; Fournier, R.; Gautrais, J.; Gourmel, O.; Joseph, D.; Meilhac, N.; Pajot, A.; Paulin, M.; Perez, P.; Piaud, B.; Roger, M.; Rolland, J.; Veynandt, F. Weitz, S., 2013, "Monte Carlo advances and concentrated solar application". *Solar Energy*, Vol. 103, pp. 653-681.
- Facão, J.; Oliveira, A. C., 2011, "Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator". *Renewable Energy*, Vol. 36, pp. 90-96.
- Freris, L; Infield, D., 2008, "Renewable energy in power systems". Chichester: John Wiley & Sons.

- Lin, M.; Sumathy, K.; Dai, Y.J.; Wang, R.Z. and Chen, Y., 2013, "Experimental and theoretical analysis on a linear Fresnel reflector solar collector prototype with V-shaped cavity receiver". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 51, pp. 963-972.
- Morin, G.; Dersch, J.; Platzer, W.; Eck, M. and Häberle, A., 2012, "Comparison of linear Fresnel and parabolic trough collector power plants". *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 1-12.
- Natarajan, S. K.; Reddy K. S.; Mallick, T. K., 2012, Heat loss characteristics of trapezoidal cavity receiver for solar linear concentrating system. *Applied Energy*, Vol. 93, pp. 523-531.
- Rolim, M. M.; Fraidenraich, N.; Vilela, O. C., 2012, "Otimização de parâmetros construtivos de coletores parabólicos lineares". *Proceedings of IV Brazilian Congress of Solar Energy*, Vol. 4, Florianópolis, Brazil, pp. 1-8
- Shukla, R.; Sumathy, K.; Erickson, P.; Gong, J., 2013, "Recent advances in the solar water heating systems: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 19, pp.173– 190.
- Welford, W. T.; Winston, R., 1978, "The optics of nonimaging concentrators". New York: Academic Press.
- Walker, G. S. "Development of a low cost linear Fresnel solar concentrator", 2013, Master thesis, University of Stellenbosch, Stellenbosch.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

OPTICAL PERFORMANCE FOR DIFFERENT GEOMETRIES OF SECONDARY CONCENTRATOR OF A LINEAR FRESNEL REFLECTOR

Patricia Scalco, patriciascalco1@gmail.com
Jacqueline Biancon Copetti, jcopetti@unisinis.br
Mario Henrique Macagnan, mhmac@unisinis.br
Benjamin Pillot, benjaminfp@unisinis.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica- Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Av. Unisinis, 950, Bairro Cristo Rei, São Leopoldo, 93.022-750, Brasil

Abstract: *The use of solar energy to power processes that requires temperatures around 300 °C appears as an alternative to cover the use of fossil fuels. To reach this temperature, it is necessary to use high performance concentrators that can be able to focus large amount of solar radiations into small areas. One of these technologies is the Linear Fresnel Reflector (LFR). The LFR system is constituted by a mirror field where the solar radiation is focused and is reflected to a fixed point, called receiver. In the receiver is where the solar radiation is converted into heat and it consists of a tube or set of tubes inserted in one cavity, called secondary concentrator. The secondary concentrator is a second reflexive surface whose function is to maximize the amount of rays that will be absorbed by the absorber tube. The secondary concentrator may have different geometries that are constantly evolving and vary from system to system according to the require demand. Thus, the importance of developing a numerical model that takes into account the geometric aspects of the system. This paper presents a study of the optical performance for the secondary concentrator. It was developed a ray tracing procedure using the statistical method of Monte Carlo. Two geometries for the secondary concentrator are evaluated, trapezoidal and parabolic. The present study analyses the behavior of the solar rays for different angles of incidence and different conditions of the secondary concentrator. Then, it was possible to calculate the optical efficiency for each type of secondary concentrator analyzed. The parabolic concentrator type showed to be more efficient the trapezoidal one, because the curvature of its surface. However, when a glass cover was inserted in the aperture of the secondary concentrator, the trapezoidal type behavior showed to be better than the parabolic. From this, it was possible to determine the secondary concentrator model that best fits the situation required*

Keywords: solar energy; linear Fresnel reflector, secondary concentrator.