

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA FUNÇÃO DE ACEITAÇÃO ANGULAR DE CONCENTRADORES V-TROUGH E CPC

**Manoel H. O. Pedrosa Filho, Bárbara B. de Carvalho Mendes, Gizele das Graças
Farias de Andrade, Oberlan da Silva e Eurlles Canuto de Alcantara.**

Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Pesqueira,
Pesqueira-PE, Brasil.

Recibido 08/08/16, aceptado 08/10/16

RESUMEN: Para analizar la cantidad de energía que un concentrador puede captar, es necesario que sean conocidas sus propiedades ópticas, siendo la función de aceptación angular una de las principales, porque permite, entre otras posibilidades, que sean determinados los límites operacionales de incidencia de los rayos. Este trabajo presenta los resultados experimentales de la aplicación de una metodología para la obtención de la función de aceptación angular. Para ello, fueron utilizados dos concentradores, un V-trough y un CPC, que fueron desarrollados para este experimento. Para el concentrador V-trough, los resultados obtenidos son próximos a los teóricos, con error promedio de 10%. Para el CPC, la función obtenida presenta valores menores que los teóricos, del orden de 50%, debido a las imperfecciones de la superficie, aunque el ángulo de corte obtenido sea mayor que el teórico, conforme a lo previsto en la literatura.

Palabras-clave: Concentración solar, energía solar, función de aceptación angular.

INTRODUÇÃO

A energia captada por coletores planos é diretamente proporcional à área de abertura dos mesmos (Stine e Geyer, 2001). Caso haja a necessidade de se obter uma maior quantidade de energia proveniente do sol, na forma elétrica ou térmica, será necessária uma maior área de coletores (Rabl, 1985), podendo atingir dimensões e/ou quantidades de coletores que podem inviabilizar um projeto. É neste contexto que os concentradores solares são utilizados. Por aumentarem a densidade de energia incidente no absorvedor, eles que permitem sistemas de aquecimento trabalhem com temperaturas mais altas.

Para que se possa analisar um concentrador solar, é necessário que sejam conhecidas as suas propriedades, como a concentração geométrica e efetiva, e características, como a relação entre o ângulo do vértice (para concentradores V-trough) e a concentração ou a função de aceitação angular. Tais propriedades permitem definir seu desempenho em aplicações práticas utilizando para isto o fator de interceptação, que define a quantidade de energia que incidirá no absorvedor dos concentradores (Duffie e Beckman, 1991). Além de permitir a determinação de limites operacionais da incidência de radiação.

Para a determinação do fator de interceptação, o procedimento mais comum é obter inicialmente a função de aceitação angular, diversos métodos podem ser utilizados para esta finalidade como mostram: García-Cortés et al. (2012), Pottler et al. (2005), Paul (2015), Fraidenraich (1992) e Pedrosa Filho (2010).

Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados experimentais da avaliação da função de aceitação angular de dois tipos de concentradores solares: V-trough com absorvedor plano e CPC com absorvedor tubular. Os concentradores foram projetados e montados no laboratório de fontes renováveis do IFPE Campus Pesqueira com a finalidade de servir como base para ensaios operacionais, sendo a obtenção da função de aceitação angular um destes. Os resultados foram validados a partir da literatura da área.

METODOLOGIA

A metodologia consistiu inicialmente na montagem de um protótipo experimental de dois concentradores: um V-trough e um CPC.

V-trough

O protótipo do concentrador solar V-trough, utilizado para a execução deste trabalho, está ilustrado na figura 1. É composto por uma estrutura de alumínio, sobre esta, estão os dois espelhos comuns caseiros planos, com dimensões 19 x 41 cm e índice de reflexão estimado de 90%, que compõem as cavidades em V do concentrador solar e a célula fotovoltaica, que funciona como a região absorvedora do concentrador. As cavidades do concentrador solar desenvolvido podem ser reguladas com ângulos (ψ) que variam de zero a 90° graus.



Figura 1: Concentrador solar tipo V desenvolvido.

CPC

A partir das equações desenvolvidas por McIntire (1979), foi desenvolvida a curva da cavidade do CPC que foi utilizada para construir o protótipo - com absorvedor cilíndrico e centro localizado na origem $P(0,0)$. Foi adotado um meio ângulo de aceitação (θ_a) de 30° e raio do tubo absorvedor (R)

com 0,00985m. Na figura 2, pode-se observar a secção transversal do protótipo do concentrador CPC juntamente com a curva que foi desenvolvida.

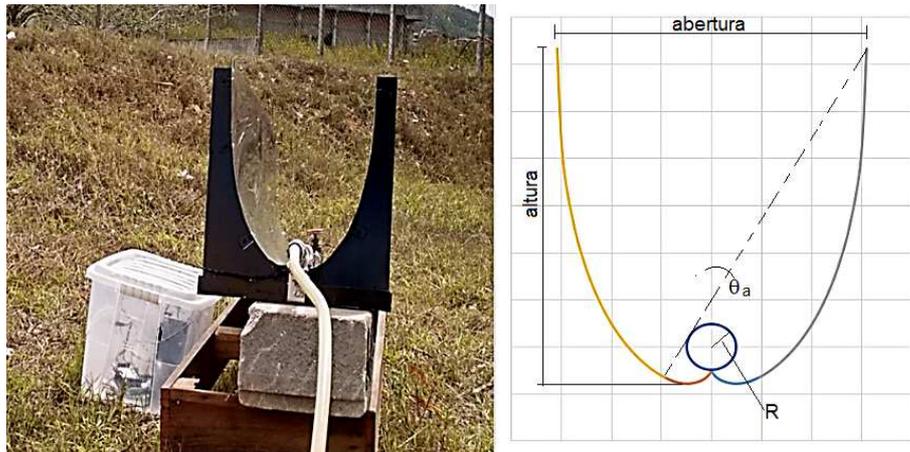


Figura 2 – Perfil cavidade refletora do protótipo do CPC sua cavidade.

Para a confecção da cavidade ótica, foram utilizadas duas chapas de aço inoxidável polido, o tubo absorvedor utilizado é feito de alumínio e pintado de preto. A cavidade refletora foi posta em um suporte de alumínio que possui a geometria da curva desenvolvida.

Obtenção da função de aceitação angular

Para a determinação da função de aceitação angular, após a montagem dos concentradores, foram consideradas: a definição da função de aceitação angular, que contabiliza a fração da radiação que chega ao absorvedor em relação à que incide na abertura do concentrador com determinado ângulo (Rabl, 1985), e o procedimento de traçamento de raios (ray-tracing) desenvolvido por Spencer e Murty (1962), o qual considera que é possível a determinação de propriedades ópticas dos concentradores solares a partir da simulação do traçamento de raios (paralelos ou não) na abertura do concentrador e posterior análise de seu caminho dentro da cavidade ótica.

Foram realizados experimentos utilizando os seguintes materiais: laser e os protótipos dos concentradores solares V-trough e CPC desenvolvidos. O laser foi utilizado para representar o traçamento dos raios paralelos (conforme a definição da função de aceitação angular) incidentes ao longo da abertura dos concentradores ensaiados, com o objetivo de verificar se, após percorrer seu caminho pela cavidade, este atingirá o absorvedor. Consiste em uma caneta laser a diodo, com comprimento de onda é de 650 nm e potência de 25 mW.

O procedimento experimental (descrito para o V-trough) foi realizado da seguinte forma: o feixe do laser foi posto na abertura do concentrador, com deslocamento da direita para a esquerda da abertura da cavidade, como ilustra a seta vermelha na figura 3. Com o objetivo de varrer toda a abertura do concentrador, o laser foi deslocado a cada 4 cm. A inclinação do laser em relação à normal da abertura do concentrador variou de 5° em 5° simulando o movimento diário do Sol.



Figura 3 – Determinação experimental da função de aceitação angular.

Dessa forma, ao incidir o laser a cada 4 cm ao longo da abertura, foi sendo observado se o laser atingia ou não a célula fotovoltaica (figura 3). Isto foi verificado desde um ângulo de incidência (θ_i) zero, quando o laser se encontra perpendicular à estrutura do protótipo, até $\theta_i=45^\circ$. O percentual dos raios que atingem o absorvedor para cada ângulo de inclinação foi calculado, dando origem à curva da função de aceitação angular.

O mesmo processo foi utilizado para o CPC. A figura 4 mostra o esquema de incidência do laser nesta cavidade.

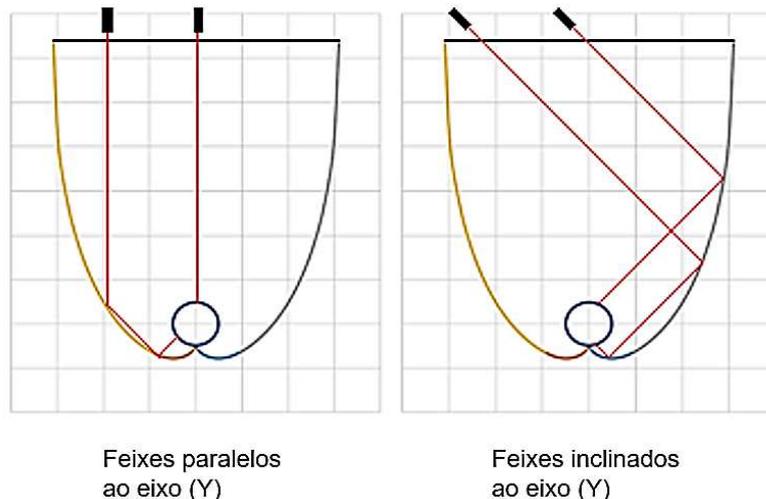


Figura 4 – Ensaio realizados com o protótipo do CPC utilizando o laser.

Determinação das curvas teóricas da função de aceitação angular

Para permitir que sejam realizadas comparações dos resultados obtidos, foram levantados os procedimentos para a determinação da função de aceitação angular dos concentradores, na literatura da área.

Para o V-trough, Filho (2006) apresenta o procedimento para determinação da função de aceitação angular $F(\theta_i)$. Ela é sempre menor que 1, para ângulos de incidência menores que (μ) , ou seja, mesmo na incidência perpendicular uma parte dos raios são rejeitados. A função $F(\theta_i)$ decresce até zero até o limite de aceitação angular (ω) (figura 5).

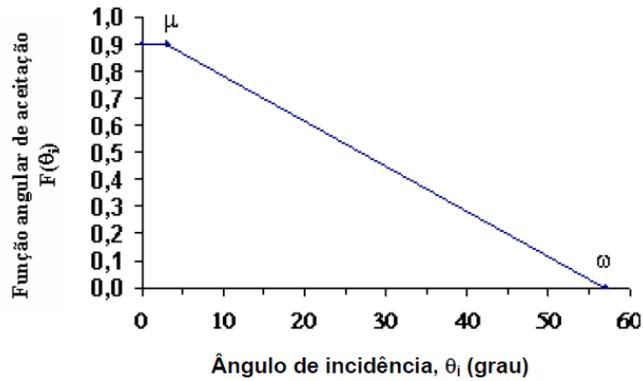


Figura 5 – Função de aceitação angular da cavidade tipo V, com $C=2,2$ e $\psi=30^\circ$.

Para a determinação dos ângulos (μ) e (ω), utilizam-se as equações 1 e 2.

$$\tan(\mu) = \frac{\frac{2}{C-1} \cdot \text{sen}(\psi) \cdot \cos(2\psi) - \text{sen}(\psi)}{\frac{2}{C-1} \cdot \text{sen}(\psi) \cdot \cos(2\psi) + \cos(\psi)} \quad (1)$$

$$\tan(\omega) = \frac{C+1}{C-1} \tan(\psi) \quad (2)$$

Nas equações 1 e 2, C é a razão de concentração, relação entre a área da abertura e a área do absorvedor.

Segundo Carvalho et al. (1985), para um concentrador CPC ideal e não truncado, a função de aceitação angular é dada pela equação 3:

$$\begin{aligned} F(\theta_i) &= 1 \quad \text{se } |\theta_i| \leq \theta_a \\ F(\theta_i) &= 0 \quad \text{se } |\theta_i| > \theta_a \end{aligned} \quad (3)$$

Já para um CPC truncado, a função de aceitação angular é definida pela equação 4:

$$\begin{aligned} F(\theta_i) &= 1 \quad \text{se } |\theta_i| \leq \theta_a \\ F(\theta_i) &= F_s(\theta_i) \quad \text{se } \theta_a < |\theta_i| \leq \theta_d \\ F(\theta_i) &= 0 \quad \text{se } |\theta_i| > \theta_d \end{aligned} \quad (4)$$

Na equação 4, $F_s(\theta_i)$ é uma função não nula de (θ_i) . (θ_d) indica o ângulo correspondente ao ângulo de truncamento do CPC.

Com o truncamento é eliminada a parte superior da cavidade refletora, visto que, este trecho é quase perpendicular ao eixo do concentrador e, por isso, contribui pouco para a concentração. O truncamento reduz a área da cavidade refletora, o que implica em uma economia do material utilizado para o desenvolvimento do CPC. No truncamento não é considerado o formato da cavidade, nem do absorvedor, geralmente os concentradores são truncados para até metade da sua altura total (Carvalho et al., 1985).

A figura 6 (Fraidenraich e Lira, 1995) apresenta da função de aceitação angular de um concentrador ideal (CPC) e de um concentrador real, observa-se que o concentrador real pode aceitar raios que incidam em sua abertura com ângulos maiores que o ângulo de corte ideal.

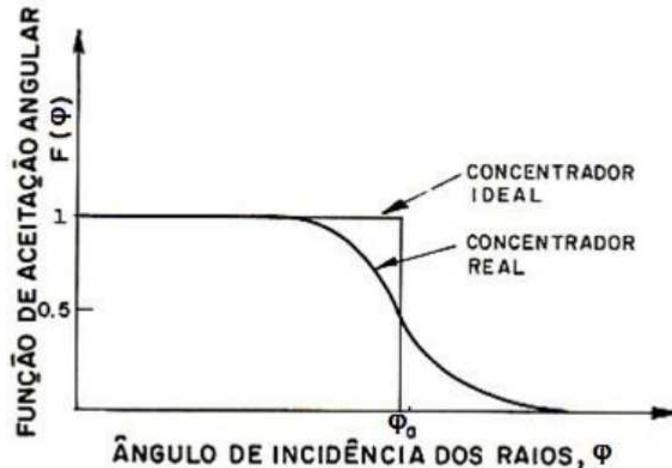


Figura 6 – Função de aceitação angular de um concentrador CPC ideal e de um real.

RESULTADOS

Como resultado da aplicação da metodologia, obteve-se o gráfico da função de aceitação $F(\theta_i)$ versus ângulo de incidência (θ_i), para o concentrador V-trough com $\psi=30^\circ$. Estão ilustradas na figura 7 duas curvas de aceitação angular: Ideal é a curva obtida utilizando-se as equações 1 e 2, Experimental é a curva obtida a partir da aplicação da metodologia descrita.

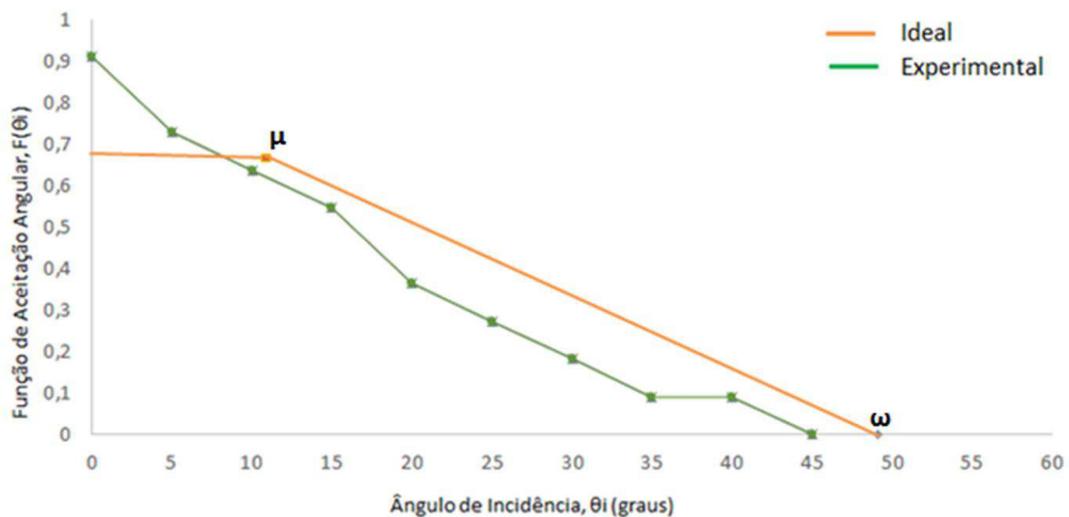


Figura 7 – Função de aceitação angular do protótipo com a cavidade tipo V, com $C=3$ e $\psi=30^\circ$

Observa-se na figura 7 que, para a estrutura do concentrador V-trough utilizado, o limite de aceitação angular (ω) obtido experimentalmente foi de 45° , ou seja, para raios que incidirem com um ângulo de inclinação em relação ao eixo (θ_i) igual ou maior que 45° estes não atingirão o absorvedor, a aceitação angular é zero. Comparando este valor ao obtido através das equações 1 e 2, percebemos que o resultado foi bem próximo do ideal, este com (ω) igual a $49,1^\circ$.

De acordo com o cálculo da função de aceitação angular (equações 1 e 2), obteve-se, para a condição que o laser incide perpendicularmente ao protótipo, um percentual de 66% de aceitação (figura 7). Porém, experimentalmente, o percentual de aceitação obtido foi 90% de aceitação, este aumento pode

ter ocorrido devido à falta de precisão ao medir ângulos de incidência (θ_i) do laser muito pequenos, na faixa de zero a 5° .

Pode-se observar ainda que, para os ângulos de incidência (θ_i) acima de 10° , o comportamento do gráfico obtido através das simulações é semelhante ao gráfico ideal, obtido empregando-se o modelo da literatura. Nesta faixa, observam-se erros médios da ordem de 10%.

Em relação ao CPC, a figura 8 apresenta o comportamento da função de aceitação angular para o protótipo do CPC completo (Real) (sem truncamento), obtida de forma experimental, e para o CPC ideal, obtida utilizando-se a equação 3.

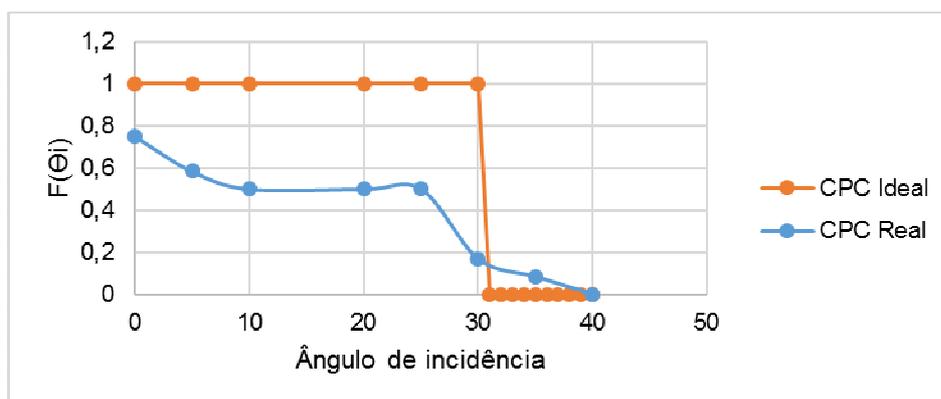


Figura 8 – Comparação dos resultados da função de aceitação angular para o CPC real e o ideal.

De acordo com os resultados obtidos experimentalmente (figura 8), pode-se observar uma diminuição dos valores da função de aceitação do CPC real em relação ao ideal, já que o CPC ideal aceita todos os raios incidentes na abertura com ângulo de incidência de até 30° . Já os raios que incidem com ângulo maior que 30° são rejeitados e refletidos para o exterior da cavidade. No caso do CPC real, o maior valor da função de aceitação é de 75% e ocorre para o ângulo de 0° , raio que incide paralelo ao eixo óptico (Y).

Os menores valores da função de aceitação ocorrem para ângulos próximos a 35° , em que são aceitos cerca de 8% dos raios que incidem na abertura do coletor. Na faixa de incidência angular que vai de 10 a 30 graus, para o CPC real, é observada uma redução de 50% da função de aceitação angular ideal, esta queda ocorre devido às imperfeições óticas e geométricas de natureza construtiva que o CPC desenvolvido possui, e também por este não possuir paredes refletoras perfeitas ($\rho = 1$).

É importante notar que, no caso dos ensaios realizados com o protótipo do CPC, houve um aumento da faixa de aceitação angular dos raios incidentes, visto que foram aceitos raios com o ângulo de incidência de 35° . O ângulo de corte do concentrador verificado é de 40° . Neste caso, uma parcela dos raios com ângulos de incidência menores que 30° será rejeitada, ou seja, vão ser refletidos de volta para o meio ambiente. Por outro lado, uma parcela de raios que incidem com um ângulo maior que 30° será aceita, ou seja, atingirá o absorvedor.

Devido à impossibilidade de realização de experimentos para a obtenção da função de aceitação angular do protótipo do CPC truncado, foram feitas simulações utilizando o software AutoCAD. Nestas simulações, raios com diversos ângulos de incidência foram traçados no concentrador, é possível observar o comportamento destes raios na figura 9.

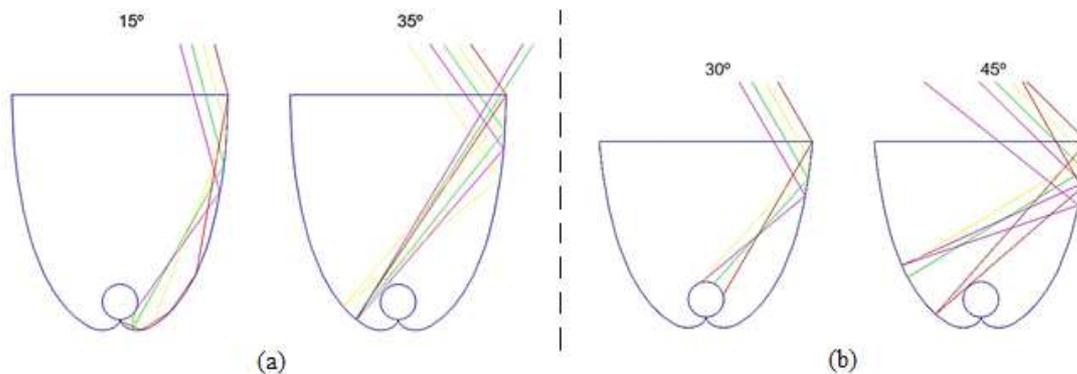


Figura 9 – Simulações realizadas para o CPC truncado em 10% (a) e em 30% (b).

Na figura 9, são apresentados dois CPCs: um com truncamento de 10% da sua altura original (figura 9a), neste foram traçados raios com ângulo de incidência de 15° e 35°. Todos os raios que incidem com ângulo de 15° atingem o absorvedor, já para raios que incidem com ângulo de 35° neste concentrador, serão refletidos de volta para o ambiente; o outro CPC com truncamento de 30% de sua altura (figura 9b) apresenta comportamento semelhante, porém, os raios com ângulo de inclinação de 30° atingirão o absorvedor, serão refletidos para fora da cavidade se incidirem com ângulo de 45°.

Com o truncamento, o CPC passar a ter características distintas das características que o CPC genérico possui, estas diferenças influenciam diretamente na função de aceitação angular do CPC. Na tabela 1, estão descritas as características do CPC completo.

| CPC completo | |
|--------------------|--------|
| Altura (m) | 0,1268 |
| Abertura (m) | 0,0618 |
| Concentração | 2 |
| θ_a (graus) | 30 |

Tabela 1 – Características do CPC completo.

Na tabela 2, são apresentadas as características do CPC com graus de truncamento.

| CPC com graus de truncamento | | | |
|------------------------------|------------|--------------|--------------------|
| Truncamento | Altura (m) | Concentração | θ_d (graus) |
| 10% | 0,1142 | 1,84 | 33 |
| 30% | 0,0888 | 1,56 | 40 |
| 50% | 0,0634 | 1,31 | 50 |

Tabela 2 – Características do CPC com graus de truncamento.

Comparando-se as tabelas 1 e 2, pode-se observar alguns dos efeitos do truncamento como a redução da altura (diminuição de material necessário e do custo) e da concentração do CPC, porém há um aumento do meio ângulo de aceitação (θ_d).

Na figura 10, é possível observar o comportamento da função de aceitação angular para as simulações realizadas no AutoCAD, considerando o CPC real completo e com graus de truncamento de 10%, 30% e 50% em relação a sua altura. Ocorre um aumento do ângulo de corte da função de aceitação, o que permite que mais raios sejam aceitos, ou seja, mais energia incidirá no absorvedor.

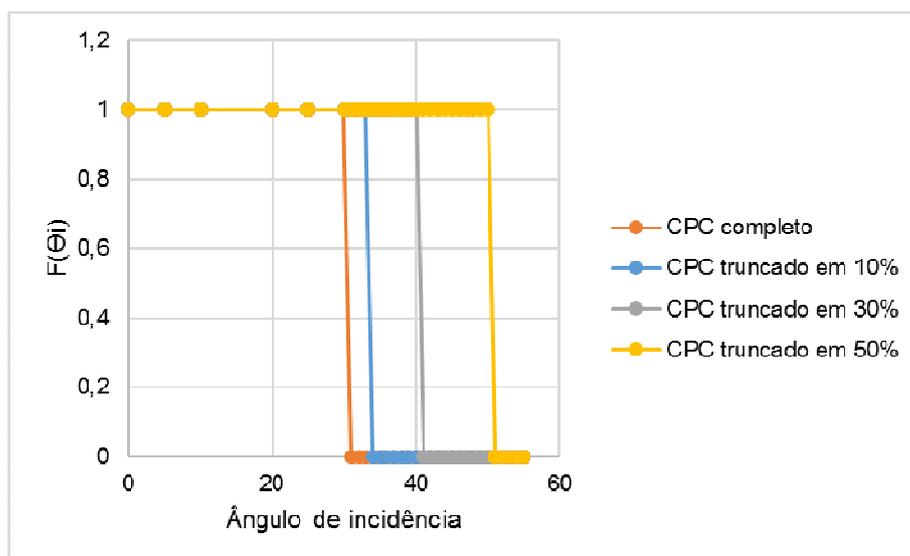


Figura 10 – Comportamento da função de aceitação angular para o CPC com graus de truncamento.

Como pode observar na figura 10, um dos efeitos provocados pelo truncamento do CPC é o aumento do ângulo de corte da função de aceitação angular. Para o CPC completo, os raios só são aceitos com ângulo de incidência de até 30 graus. Para o CPC truncado em 10%, a aceitação angular aumenta, já que são aceitos raios com ângulos de incidência de até 33 graus. Já para o CPC truncado em 50% da sua altura, a aceitação angular tem um aumento, visto que são aceitos raios que incidem com ângulos de até 50 graus.

COMENTÁRIOS FINAIS

Neste trabalho, foram determinadas experimentalmente as funções de aceitação angular de dois tipos de concentradores: V-trough e CPC. Observou-se que, para o V-trough, a função de aceitação obtida apresenta um comportamento semelhante ao descrito na literatura. Para ângulos de incidência acima de 10°, a inclinação da função de aceitação angular é a mesma do modelo estudado.

Para o concentrador CPC, também foi realizado o mesmo procedimento, a função de aceitação angular obtida, embora apresente valores menores que os teóricos, em torno de 50%, apresenta a mesma forma e um ângulo de corte de 40°, em comparação com o ideal de 30°. Verificou-se que, este efeito foi devido principalmente às imperfeições da superfície do CPC e de seu índice de reflexão. Observa-se que, a obediência da superfície refletora à geometria do CPC, na fase da construção, é imprescindível para que, suas propriedades se aproximem de seus valores teóricos, fazendo com que o CPC opere mais próximo das especificações do projeto.

Simulou-se, utilizando o AutoCad, o mesmo procedimento, considerando-se os efeitos do truncamento. Comprovou-se que os valores da concentração e dos ângulos de corte do concentrador são os mesmos obtidos pela literatura.

Percebemos que a metodologia utilizada para a obtenção da função de aceitação angular é válida e permite obter resultados próximos aos teóricos, a depender apenas da precisão da instrumentação utilizada e da qualidade da montagem dos concentradores.

Em relação a trabalhos futuros, observa-se a necessidade de avaliar a eficiência óptica de ambos os concentradores e a térmica do CPC. Outro tema, nesta linha, é a avaliação da eficiência e energia coletada no CPC com diferentes níveis de truncamento. A literatura (Carvalho et al., 1985) apresenta resultados analíticos sobre o efeito, com respeito à eficiência, afirmando que ocorre um aumento desta,

devido à redução do número médio de reflexões, o que impacta diretamente em maiores valores da eficiência óptica. A energia coletada também tende a aumentar, devido a um maior aproveitamento da radiação difusa que entra na cavidade óptica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFPE pelo apoio dado durante a realização deste trabalho, por meio das bolsas de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

- Carvalho, M. J., Collarespereira, M., Gordon, J. M. e Rabl, A. (1985). Truncation of Cpc Solar Collectors and Its Effect on Energy Collection. *Solar Energy* 35(5): 393-399.
- Duffie, J. A. e Beckman, W. A. (1991). *Solar engineering of thermal processes*. New York, Wiley-Interscience.
- Filho, J. B. d. M. (2006). Análise do sistema de irrigação na Região Semi Árida do Nordeste, utilizando o bombeamento de água acionado por geradores fotovoltaicos com concentrador tipo V. Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Fraidenraich, N. (1992). Analytic Solutions for the Optical-Properties of V-Trough Concentrators. *Applied Optics* 31(1): 131-139.
- Fraidenraich, N. e Lira, F. J. M. (1995). *Energia Solar: fundamentos e tecnologia de conversão heliotérmica e fotovoltaica*. Recife-PE, Ed. Universitária.
- García-Cortés, S., Bello-García, A. e Ordóñez, C. (2012). Estimating intercept factor of a parabolic solar trough collector with new supporting structure using off-the-shelf photogrammetric equipment. *Applied Energy* 92: 815-821.
- Mcintire, W. R. (1979). Truncation of nonimaging cusp concentrators. *Solar Energy* 23(4): 351-355.
- Paul, D. I. (2015). Theoretical and Experimental Optical Evaluation and Comparison of Symmetric 2D CPC and V-Trough Collector for Photovoltaic Applications. *International Journal of Photoenergy* 2015.
- Pedrosa Filho, M. H. O. (2010). Simulação e análise de sistemas de alta concentração de radiação solar. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Pottler, K., Lüpfert, E., Johnston, G. H. G. e Shortis, M. R. (2005). Photogrammetry: A Powerful Tool for Geometric Analysis of Solar Concentrators and Their Components. *J. Sol. Energy Eng.* 127(1): 94-101.
- Rabl, A. (1985). *Active Solar Collectors and Their Applications*. New York, Oxford University Press.
- Spencer, G. H. e Murty, M. R. V. K. (1962). General ray trace procedure. *Journal of the optical Society of America* 52(6): 672-678.
- Stine, W. B. e Geyer, M. (2001). *Power from de sun*. Pomona, California State Polytechnic University.

ABSTRACT

Analyzing the amount of energy that a concentrator can capture, it's necessary knowing its optical properties, the angular acceptance function is one of the main, because allows, beyond other possibilities, to determine the ray's incidence operational limits. This work shows the experimental results obtained from a methodology to determine the angular acceptance function. It was used two solar concentrators: a V-trough and a CPC, that were developed for this experiment. The results obtained to the V-trough are near the theoretical, with a mean error of 10%. The function gotten to the CPC shows values lower than the theoretical off 50%, due to the surface imperfections, therefore the cut angle is larger than the theoretical, as foreseen in the literature.

Keywords: solar concentration, solar energy, angular acceptance function.