

GERAÇÃO TÉRMICA COM CPC DE ABSORVEDOR 'V' INVERTIDO COMPLETAMENTE ILUMINADO

Bráulio Bezerra Brandão – bbb@nlink.com.br
Chigueru Tiba – tiba@ufpe.br
Naum Fraidenraich – nf@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco - Departamento de Energia Nuclear
Av. Prof. Luiz Freire, 1000. Cidade Universitária [50.740-540]. Recife - Pernambuco, Brasil
Fone: + 55 81 3453 6019_ Fax: + 55 81 32718250

2.4 Coletores de Concentração e Fogões Solares

Resumo. Foi determinada neste trabalho, a viabilidade para utilização dos coletores concentradores do tipo CPC com absorvedor V invertido completamente iluminado e estacionário ($C < 1,2$) para suprir a demanda de calor de processo industrial em sistemas de pequeno porte com operação na faixa de 50 – 100°C. Além das equações para o traçado da superfície refletora foi calculada a energia térmica gerada anualmente por este coletor operando com orientação Leste-Oeste. Uma otimização relativa à superfície refletora foi feita, procurando determinar qual ângulo de aceitação do coletor parabólico minimizaria o comprimento da cavidade do coletor (otimização econômica) sem detrimento de seu desempenho. A otimização resultou que este ângulo seria igual ao ângulo de vértice do absorvedor. Posteriormente foi realizado um truncamento (corte na região superior do coletor), pois sendo estas últimas superfícies perpendiculares ao plano horizontal, influenciaria muito pouco na concentração. Diferentes configurações do CPC (diferentes ângulos de aceitação e diferentes graus de truncamento) foram analisadas numericamente e concluiu-se que para uma dada concentração do CPC, tanto a relação mínima entre o comprimento da superfície refletora e abertura como o menor número médio de reflexões ocorrem para CPC oriundos dos maiores ângulos de aceitação, no caso 56,4° (concentração nominal igual 1,2). Contudo, quando é considerado adicionalmente a energia térmica gerada anualmente (por exemplo, para Recife, ângulo de inclinação em relação a horizontal igual à latitude e temperatura do fluido igual a 50°C) o intervalo ótimo (máximo muito largo) desloca-se para uma região de ângulos de aceitação entre 33.75° e 45.58°.

Palavras-chave: CPC, Energia térmica anual gerada, Otimização geométrica-ótica-térmica

1. INTRODUÇÃO

A Fig. 1 mostra a secção transversal de um CPC com ângulo de aceitação de 56,4° concentração nominal igual a 1,2 e ângulo de vértice do absorvedor igual a 78°. A secção desenhada em azul celeste (escuro) é uma involuta circular, em verde, vermelho e azul turquesa (claro) são mostradas as secções parabólicas. Esta figura revela o CPC com sua cavidade refletora ainda não otimizada em relação ao número de cavidades, parábolas e ao seu truncamento. Observando-a notamos que a porção superior da superfície refletora do CPC é quase perpendicular à abertura e, contribui muito pouco para a sua relação de concentração. Do ponto-de-vista prático, a cavidade do concentrador CPC pode ser truncada significativamente (podendo chegar à metade da sua altura) tanto para economizar o material refletor como para reduzir a altura do coletor para uma dimensão próxima ao coletor plano, sem sacrificar demasiadamente o seu desempenho. Um estudo detalhado enfocando esse aspecto requer o conhecimento do comprimento da superfície refletora, da altura e do número médio de reflexões do CPC truncado.

Os principais elementos de construção que compõem as curvas do CPC são mostrados nesta mesma figura onde exhibe a parte direita da cavidade concentradora, a parte esquerda é simétrica. Os pontos F_1 , F_2 e F_3 são os vértices do absorvedor e também os focos das seções parabólicas, V_1 , V_2 e V_3 são os vértices das parábolas, e_1 , e_2 e e_3 são os eixos de simetria das parábolas e são os raios extremos que passam pelos focos, γ o semi-ângulo do vértice do absorvedor, $r/2$ é o segmento de reta que define a semi-base virtual do absorvedor e θ_a o ângulo de aceitação do CPC.

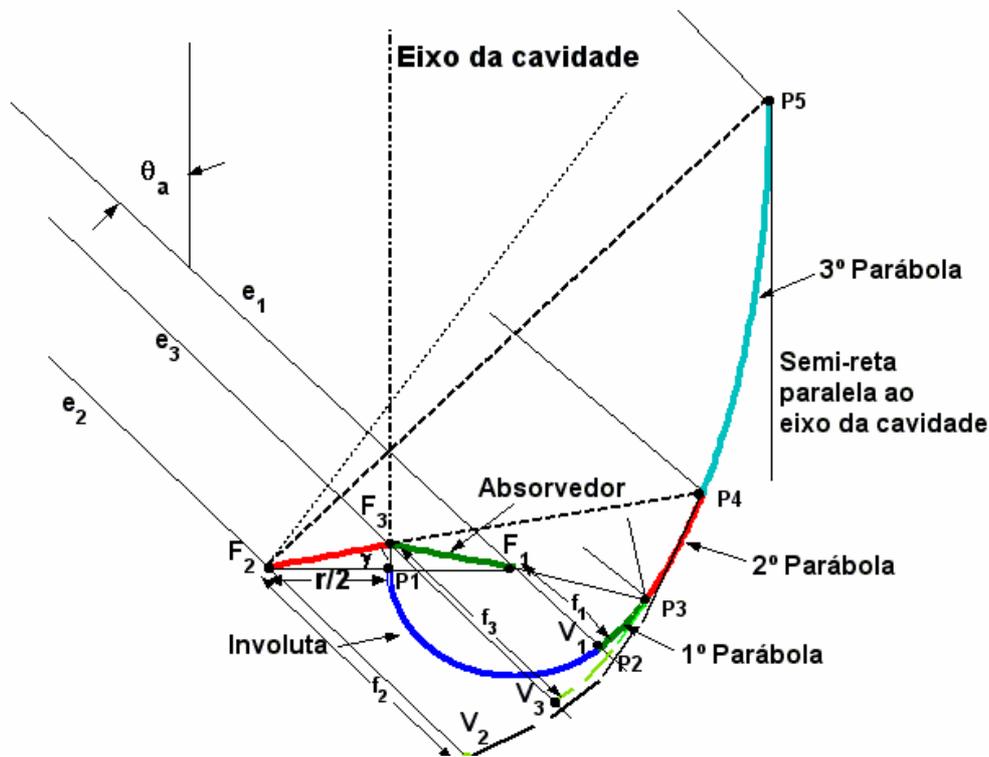


Figura 1 – Construção da cavidade do CPC

As equações derivadas para a superfície refletora e o número médio de reflexões conforme FRAIDENRAICH (2003), são:

Involuta (secção P_1P_2)

$$x = \frac{r}{2} [1 + \cos(\phi)] \quad (1)$$

$$y = \frac{r}{2} \sin(\phi) \quad (2)$$

onde, $\pi \leq \phi \leq (\theta_a + 3\pi/2)$

Número médio de reflexões na involuta

$$\langle n \rangle = \frac{1}{4} (\pi/2 + \theta_a) \text{sen}(\gamma) \quad (3)$$

onde, r é o raio vetor e ϕ o ângulo formado entre o raio vetor e o eixo da parábola que está inclinado de θ_a em relação ao eixo da cavidade e γ semi-ângulo de vértice do absorvedor.

Primeira secção parabólica (secção P₂P₃)

$$x = f_1 \left[1 + \frac{2 \cos(\phi)}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} \right] \quad (4)$$

$$y = \frac{r \sin(\phi)}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} \quad (5)$$

$$f_1 = r / 2, \text{ (distância focal)} \quad (6)$$

onde, $(\theta_a + 3\pi / 2) \leq \phi \leq (\gamma + 3\pi / 2)$

Número médio de reflexões na primeira secção parabólica

$$\langle n \rangle = \frac{A_r}{A_a} - \left[\frac{r(1 - 2 \cos \alpha) / (1 + \cos(\gamma - \theta_a))}{A_a} \right] \quad (7)$$

onde, $0 \leq \alpha \leq (\gamma - \theta_a)$

Segunda secção parabólica (secção P₃P₄)

$$x = \frac{2f_2}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} \cos(\phi) \quad (8)$$

$$y = \frac{r \cos(\gamma)}{2 \sin(\gamma)} + \frac{2f_2}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} \sin(\phi) \quad (9)$$

$$f_2 = \frac{r}{2} \left[1 + \frac{1 + \cos(\gamma - \theta_a)}{2 \sin(\gamma)} \right], \text{ (distância focal)} \quad (10)$$

onde, $(\gamma + 3\pi / 2) \leq \phi \leq (\pi / 2 - \gamma)$

Número médio de reflexões na segunda secção parabólica

$$\langle n \rangle = \frac{A_r}{A_a} - \left\{ \frac{2f_2 \left[\frac{\cos(\gamma - \theta_a)}{1 + \cos(\gamma - \theta_a)} - \frac{\cos(\alpha)}{1 + \cos(\alpha)} \right]}{A_a} \right\} \quad (11)$$

onde, $\gamma - \theta_a \leq \alpha \leq \pi - (\gamma + \theta_a)$

Terceira secção parabólica (secção P₄P₅)

$$x = \frac{2f_3 \cos(\phi)}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} - \frac{r}{2} \quad (12)$$

$$y = \frac{2f_3 \sin(\phi)}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} \quad (13)$$

$$f_3 = f_2 + \frac{r[1 + \cos(\gamma - \theta_a)]}{4\sin(\gamma)}, \text{ (distância focal)} \quad (14)$$

onde, $(\pi/2 - \gamma) \leq \phi \leq (\pi/2 - \theta_a)$

Número médio de reflexões na terceira secção parabólica

$$\langle n \rangle = \frac{A_r}{A_a} - \left\{ \frac{2f_3 \left[\frac{\cos(\pi - (\gamma + \theta_a))}{1 - \cos(\pi - (\gamma + \theta_a))} + \frac{\cos(\alpha)}{1 + \cos(\alpha)} \right]}{A_a} \right\} \quad (15)$$

onde, $\pi - (\gamma + \theta_a) \leq \alpha \leq \pi - 2\theta_a$

A Fig.2 ilustra uma visão aproximada, em terceira dimensão, de uma cavidade do CPC.

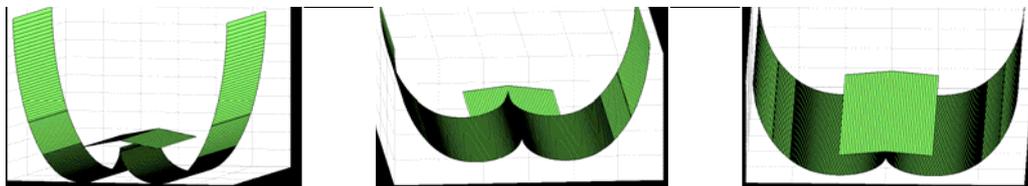


Figura 2 – Vista em 3D de um CPC não otimizado

2. OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA REFERENTE AO ABSORVEDOR

Para o concentrador CPC com absorvedor V invertido completamente iluminado ideal, ou seja, quando a sua concentração nominal é dada por $C=1/\sin(\theta_a)$, o ângulo do vértice do absorvedor que minimiza o comprimento da superfície refletora é igual ao ângulo de aceitação angular da cavidade (BRANDÃO, 2004) Esse resultado provoca a redução no número de parâmetros necessários para otimizar a geometria da cavidade e simplifica, de forma drástica, a superfície refletora do coletor suprimindo a primeira e terceira secções parabólicas do CPC genérico, Fig. 3.

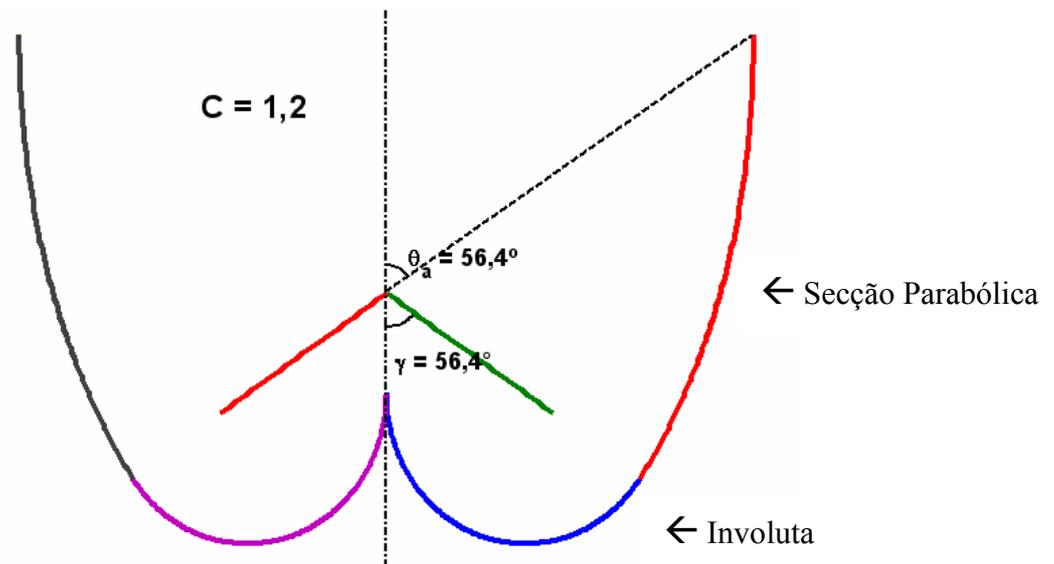


Figura 3 – Configuração da cavidade de um CPC com a escolha do semi-ângulo de vértice do absorvedor $\gamma = \theta_a$.

3. ENERGIA ANUAL GERADA PELO CPC ORIENTADO LESTE -OESTE

Para uma dada temperatura de operação do coletor T_e (temperatura do fluido na entrada do coletor) a energia térmica instantânea gerada é dada por um balanço energético (Fig. 4). I_t representa a irradiação solar aceita pelo CPC (coletada), $U\Delta T$ a perda térmica e o termo q_t , indica a energia térmica líquida gerada no coletor.

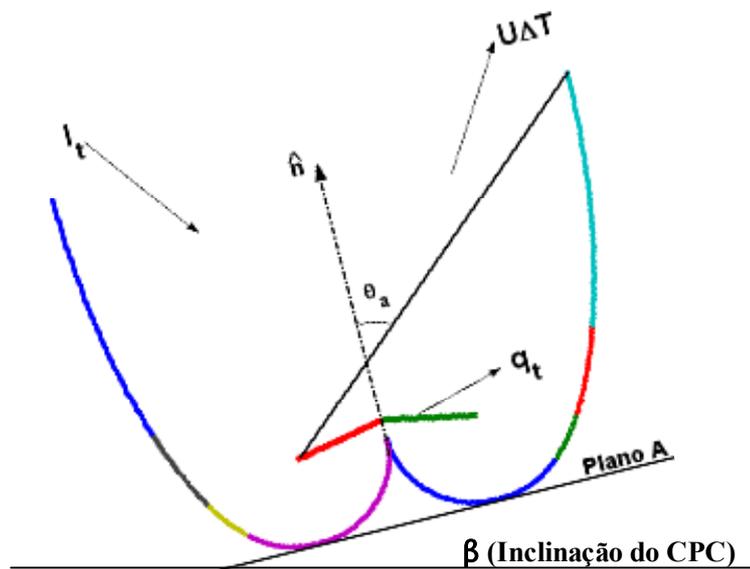


Figura 4 – Representação do balanço de energia em um CPC

$$q_T = F_R \int_{t_i}^{t_f} [\rho^{<n>} \alpha \tau (I_b^c + I_d^c) - U(T_e - T_{amb})] dt \quad (\text{GJ/m}^2) \quad (16)$$

onde, T_{amb} é a temperatura ambiente, F_R o fator de remoção de calor do CPC, ρ a refletividade da superfície refletora, $<n>$ o número médio de reflexões, α a absorvância do absorvedor, τ a transmi-

tância da cobertura de vidro, t_i e t_f são os instantes do início e fim da coleção de energia térmica e q_T a energia térmica diária.

O valor da energia térmica mensal Q_T^m gerada pelo CPC para um dado mês (m) é :

$$Q_T^m = \sum_i q_T^i$$

O valor da energia térmica anual Q_T^a gerada pelo CPC é dado por:

$$Q_T^a = \sum_m Q_T^m$$

Os termos da eq.(16) são descritos abaixo:.

A irradiação solar direta aceita pelo coletor CPC é expressa por (CARVALHO et al., 1987):

$$I_b^c = I_b^n \cos(\theta_i) K(\theta_i) F(\theta_\perp)$$

onde, I_b^n é a irradiação solar direta horária normal; θ_i o ângulo de incidência solar; θ_\perp a projeção transversal do ângulo de incidência solar; K o modificador de ângulo de incidência e F a função de aceitação angular do CPC.

Como um modificador de ângulo de incidência pode ser adotado a expressão dada por RABL (1981):

$$K(\theta_i) = 1 - 2,02 \cdot 10^{-5} * \theta_i^2 + 4,69 \cdot 10^{-7} * \theta_i^3 - 1,80 \cdot 10^{-8} * \theta_i^4 \quad (\theta_i \text{ em graus}) \quad (17)$$

A irradiação solar horária difusa aceita por um coletor CPC orientada leste-oeste, é dada por:

$$I_d^c = I_d^h \bar{K} / C \quad (18)$$

onde, I_d^h é a irradiação solar horária difusa no plano horizontal; \bar{K} é o valor médio do modificador de ângulo de incidência e C a relação de concentração do CPC. Existe um termo de segunda ordem devido ao espalhamento da radiação solar pelo solo não considerado aqui. O valor médio do modificador de ângulo de incidência é dado por:

$$\bar{K} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} K(\theta_i) \cos(\theta_i) d\theta_i = 0,916 \quad (19)$$

Onde, $K(\theta_i)$ é dado pela eq. (17)

3.1 Otimização da energia solar térmica anual gerada

Os efeitos do truncamento no CPC são: menor perímetro do refletor; aumento da aceitação da irradiação difusa, menor número médio de reflexões e menor relação de concentração. O primeiro efeito tem consequência direta no custo do coletor na medida em que reduz a quantidade do material utilizado; o segundo e terceiro efeitos levam ao aumento da eficiência do dispositivo na medida em que aumentam a quantidade de radiação que incide no absorvedor. Porém, o quarto efeito vai a direção oposta, pois aumenta a superfície de perdas térmicas do coletor. Assim, a análise custo-

benefício do truncamento não é uma tarefa isolada, pois requer uma análise cuidadosa e simultânea dos aspectos óticos e térmicos do coletor.

As energias térmicas horárias geradas pelos CPC com diferentes ângulos de aceitação e graus de truncamento foram calculadas resultando em energias térmicas geradas em bases anuais considerando parâmetros como: localidade = Recife, PE, $\gamma = \theta_a$, $\tau = 0,90$ (transmitância do vidro de cobertura), $\alpha = 0,95$ (absortância do absorvedor), $\rho = 0,86$ (refletância da superfície refletora), $T_{op} = 50^{\circ}$ C (temperatura operacional do coletor), $\beta = -8,05^{\circ}$ (inclinação do coletor em relação a horizontal) F_R (CPC) = (Fator de remoção de calor) 0,90, F_R (convencional) = (Fator de remoção de calor) 0,854 U (CPC) = $1,0 + 2,5/C$ (coeficiente de perdas térmicas), Orientação Leste-Oeste. A Figura 5 mostra a energia térmica anual gerada por CPC com diversos ângulos de aceitação e graus de truncamento. Para um CPC com uma dada concentração final, por exemplo, 1,2 a energia térmica anual apresenta um máximo muito largo de $2,85 \text{ GJ/m}^2$ para cavidades originadas de ângulos de aceitação de $33,75^{\circ}$; $38,68^{\circ}$ and $45,58^{\circ}$.

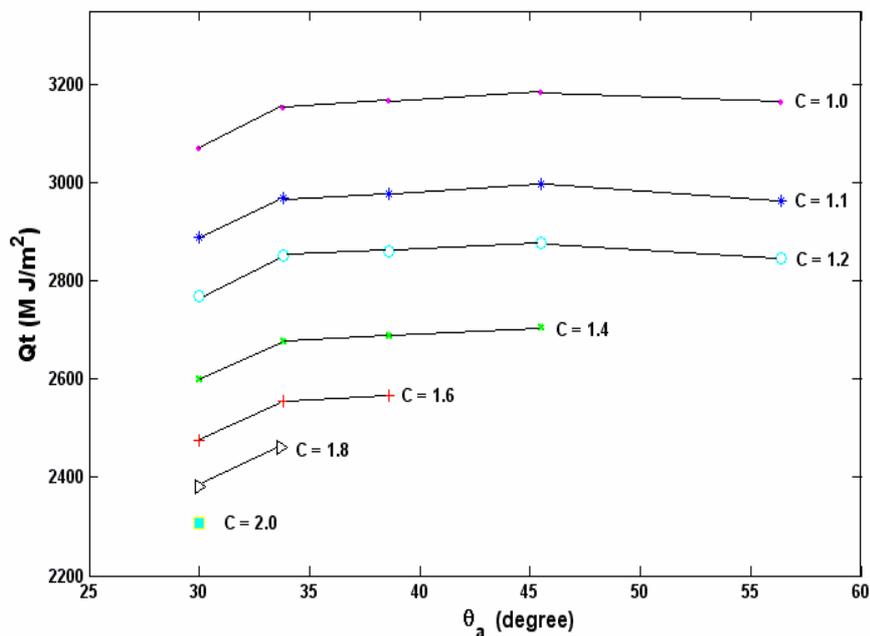


Fig. 5 - Energia térmica anual gerada por CPC com diversos ângulos de aceitação e graus de truncamento

4. CONCLUSÕES

O CPC com absorvedor V invertido completamente iluminado e ideal (sem truncamento) tem o perímetro da sua cavidade refletora minimizado quando o seu ângulo de aceitação é igual ao ângulo do vértice do absorvedor.

Um coletor CPC localizado na cidade de Recife com uma relação de concentração 1,2 gera anualmente cerca de $2,85 \text{ GJ/m}^2$ de energia térmica quando opera a 50° C. Este equipamento gera apenas 2% a menos da energia térmica anual gerada por um coletor convencional (plano) em Recife, operando ambos a 50° C, e 35% a mais que este mesmo coletor, operando ambos a 80° C. A melhoria da refletividade da superfície refletora do CPC aumenta sensivelmente esta relação. Por exemplo, para $\rho=0,96$ e temperatura operacional de 80° C o CPC de relação de concentração 1,2 estaria convertendo 55% de energia térmica acima do coletor plano.

REFERÊNCIAS

- Brandão, B B, Concentrador Parabólico composto com absorvedor V invertido completamente iluminado, Dissertação de Mestrado, PROTEN-DEN-UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, 2004.
- Carvalho, M.J; Collares, M; Gordon, M.J. Economic optimization of stationary nonevacuated CPC solar collector. *Journal of Solar Energy Engineering*, v. 109/43. 1987.
- Rabl, A , Optical and thermal properties of Compound Parabolic Concentrators, *Solar Energy* No. 18, pp. 497-511, 1976.
- Tiba, C, Fraidenraich, N and Brandão B B, Optimal design of stationary nonevacuated CPC solar concentrator with fully illuminated wedge receivers, ISES 2005 Solar World Congress, Florida, USA, 2005.

THERMIC GENERATION WITH CPC OF A FULLY ILLUMINATED INVERTED “V” TYPE ABSORBER

Abstract. In this work, the viability for utilization of type CPC concentrator collectors with fully illuminated stationary inverted “V” type absorber ($C < 1.2$) was determined, to supply the heat demand in industrial processes in small sized systems, operating in the $50 - 100^\circ\text{C}$ range. Besides the equations for tracing the reflector surface, the annually generated thermal energy for this collector operating in an East to West direction, was calculated. A relative optimization of the reflector surface was carried out, aiming to determine which acceptance angle of the parabolic collector would minimize the length of the collector cavity (economical optimization) without detriment to its performance. The optimization resulted in the fact that the angle would be equal to the vertex angle of the absorber. Subsequently, truncation was carried out (a cut in the superior region of the collector), because these latter surfaces that are perpendicular to the horizontal plane, have very little influence on the concentration. Different CPC configurations (different acceptance angles and different degrees of truncation) were analyzed numerically and it was concluded that for a given concentration of the CPC, as for the minimum relationship between the length of the reflector surface and aperture, there occurs a smaller average number of reflections for CPC arising from the greater acceptance angles, in this case 56.4° (nominal concentration equal to 1.2). However, when the annually generated thermal energy is additionally considered (for example, for Recife, angle of inclination in relation to the horizontal equal to the latitude and fluid temperature equal to 50°C) the optimum interval (very wide maximum) moves to a region of acceptance angle between 33.75 and 45.58° .

Key words: Cpc, Annually generated thermal energy, Geometric-optic-thermal optimization