

ESTUDO ANALÍTICO DE CONCENTRADORES CPC ESTACIONÁRIOS COM ABSORVEDOR V INVERTIDO

Naum Fraidenraich – nf@ufpe.br

Chigueru Tiba – tiba@ufpe.br

Bráulio B. Brandão – bbb@nlink.com.br

Olga C. Vilela – ocv@ufpe.br

Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Luiz Freire, 1000 – CDU, CEP 50.740-540, Recife, Pernambuco, Brasil
Phone: +5581 3453 6019, Fax: +55 81 32718250

2.4 Coletores de concentração e fogões solares

Resumo. *Coletores estacionários de baixa relação de concentração ($C < 2$), do tipo CPC, são de grande interesse para o fornecimento de energia em processos térmicos industriais, para temperaturas menores ou iguais a 100 °C. Concentradores com absorvedores em forma de V invertido posicionados dentro da cavidade concentradora apresentam todo o perímetro iluminado enquanto que apenas uma parte está sujeita a perdas térmicas através da cobertura. Concentradores com absorvedores planos horizontais totalmente iluminados foram amplamente estudados. Os mesmos podem ser considerados um caso particular dos concentradores com absorvedor em V. O concentrador ideal correspondente a um absorvedor V totalmente iluminado é composto por uma involuta e três segmentos parabólicos. Uma solução analítica em forma fechada para a obtenção de suas propriedades óticas e geométricas foi derivada. As equações obtidas podem ser utilizadas como ferramentas de projeto, processos de simulação e otimização de cavidades. Resultados numéricos para qualquer grau de truncamento da cavidade são apresentados.*

Palavras-chave: *Coletor solar térmico; CPC de baixa relação de concentração; Propriedades geométricas e óticas*

1. INTRODUÇÃO

Em busca de alternativas viáveis para ampliar o intervalo de temperaturas de operação dos coletores solares planos, diversas geometrias de concentradores tipo CPC de baixa relação de concentração têm sido estudadas. Entre elas, concentradores com absorvedor cilíndrico (BAUM e GORDON, 1984), com absorvedor V invertido, iluminado apenas na superfície de topo (BAUM e GORDON, 1985) e com absorvedor plano completamente iluminado, posicionado horizontal ou verticalmente (GORDON, 1986). Concentradores com absorvedores planos horizontais completamente iluminados (GORDON, 1986) podem ser considerados um caso particular do concentrador analisado neste trabalho.

Do ponto de vista do desempenho térmico, é desejável que o absorvedor do coletor CPC esteja localizado dentro da cavidade do concentrador, sem interface com a região externa. Além disso, é interessante que seja iluminado completamente, de tal modo que a superfície de perda resulta ser aproximadamente igual à metade da superfície iluminada. As geometrias CPC com absorvedor plano, horizontal ou vertical, completamente iluminado e absorvedor tubular fazem parte dessa categoria.

Neste trabalho, foram analisadas as propriedades geométricas e óticas de concentradores ideais com absorvedor tipo V invertido, completamente iluminado (Fig. 1). Em uma comparação com o receptor horizontal, o absorvedor tipo V invertido não tem contato físico com a superfície refletor-

ra o que diminui as perdas térmicas pela parte inferior ou posterior da cavidade. Cabe mencionar também que o ângulo do absorvedor em V constitui um grau de liberdade adicional, que pode ser escolhido de forma otimizada. Juntamente com o truncamento, procedimento já estabelecido como um modo efetivo para reduzir custos do coletor solar, os resultados apresentados neste trabalho podem prover geometrias atraentes para a conversão de energia solar em energia térmica a baixas temperaturas ($T \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$). A seguir, são considerados os seguintes assuntos: a) Descrição das expressões analíticas para a geometria do refletor da cavidade CPC; b) Derivação de soluções analíticas em forma fechada para o cálculo da abertura, altura, comprimento do refletor, função de aceitação angular e número médio de reflexões para qualquer grau de truncamento.

2. PROCEDIMENTO DE CONSTRUÇÃO

Cavidades truncadas estão definidas através de três parâmetros: semiângulo de aceitação (θ_a), ângulo de raio extremo da cavidade (θ_t) e ângulo de vértice (γ) (Fig. 1). Para um CPC completo o ângulo (θ_t) é igual ao semiângulo de aceitação da cavidade (θ_a), o qual define a máxima concentração (C) que pode ser obtida com raios de luz incidentes na abertura, compreendidos no intervalo angular $\{-\theta_a, \theta_a\}$ (semiângulo de aceitação). Para concentradores bidimensionais, ou seja com geometria cilíndrica se verifica (WELFORD e WINSTON, 1978):

$$C = \frac{1}{\sin(\theta_a)} \quad (1)$$

Em concentradores truncados, com (θ_t) denota-se o maior ângulo de incidência que permite que os raios luminosos atinjam diretamente o absorvedor. Para ($\theta_t > \pi/2$), convencionou-se que o maior ângulo com que o raio atinge diretamente o absorvedor é ($\pi/2$), devido ao bloqueio das cavidades vizinhas sobre a luz refletida do solo.

O concentrador ideal com absorvedor V invertido, completamente iluminado é mostrado na Fig. 1.

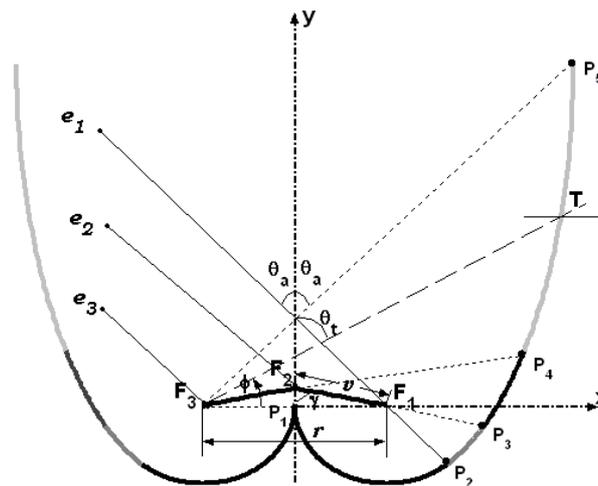


Figura 1- Concentrador CPC com absorvedor em V completamente iluminado.
 Parâmetros geométricos: $C=1.4$; $\theta_a=45.58^\circ$; $\gamma=78^\circ$.

Consideramos um concentrador simétrico bidimensional. O absorvedor é um triângulo isósceles, com ângulo do vértice (γ), base de comprimento (r) e lados de comprimento igual a (v). Os pontos (F_1), (F_2) e (F_3) são os focos de três segmentos parabólicos, que em conjunto com a involuta,

construída na base da cavidade, integram um lado do concentrador. Na figura também estão indicados os eixos das parábolas (e_1), (e_2) e (e_3), que formam um ângulo (θ_a) com o eixo da cavidade.

O procedimento de construção a ser descrito corresponde à metade direita da cavidade. Começando no centro da base do absorvedor, definido pelo ponto (P_1), é gerada uma involuta da base do absorvedor, formada pelo arco (P_1P_2), região que permanece na sombra da cavidade concentradora. Esta é a primeira parte da superfície refletora. A primeira seção parabólica ($P_2 - P_3$), com foco F_1 e eixo (e_1) (Fig. 1), assegura a continuidade da curva involuta (ponto (P_2)), até a interseção com o segmento de reta ($F_2 - F_1$) (ponto (P_3)). O segundo segmento refletor, seção ($P_3 - P_4$), termina no ponto de interseção com o segmento de linha reta ($F_2 - F_3$) (ponto (P_4)). Este segmento de parábola tem seu foco (F_2) e eixo (e_2), paralelo ao eixo (e_1). Finalmente a terceira seção do refletor parabólico ($P_4 - P_5$), com foco (F_3) e eixo (e_3), se estende até a interseção com o raio extremo que passa pelo foco (F_3), com ângulo (θ_a) (ponto (P_5)).

A descrição acima corresponde a uma cavidade CPC completa. Caso a cavidade seja truncada na terceira seção, o segmento parabólico se estenderia até o ponto (T), onde intercepta a linha que passa através do foco (F_3) e forma um ângulo (θ_t) com o eixo da cavidade (Fig. 1). Como pode ser visto na figura, a parte superior da superfície refletora é quase perpendicular à abertura da cavidade e, conseqüentemente, contribui muito pouco na concentração de raios luminosos. Portanto, de um ponto de vista prático, a altura da cavidade pode ser reduzida consideravelmente com a conseguinte economia de material, sem sacrificar seu desempenho. Apesar de que o truncamento analisado corresponde à terceira seção do CPC, a cavidade pode ser truncada em qualquer dos segmentos parabólicos e ainda na própria involuta. Na próxima seção são apresentadas as equações que descrevem as propriedades geométricas dos concentradores CPC com absorvedor V invertido.

3. GEOMETRIA DA CAVIDADE

3.1 Equações do refletor

O sistema cartesiano utilizado nesta análise tem sua origem no ponto (P_1), com o eixo horizontal (x) e o eixo vertical (y), de acordo com o indicado na Figura 1. As equações do refletor em função do parâmetro (ϕ), para a involuta e os três segmentos de parábola, são mostradas na Tab. 1.

Tabela 1. Equações paramétricas da cavidade CPC com V invertido

Involuta	Primeiro segmento parabólico	Segundo segmento parabólico	Terceiro segmento parabólico
$x = \frac{r}{2} [1 + \cos(\phi)]$ $y = \frac{r}{2} \sin(\phi)$ Para $\pi - \theta_a \leq \theta_t \leq \frac{3\pi}{2}$ $\phi \begin{cases} \pi \\ 5\frac{\pi}{2} - \theta_t \end{cases}$	$x = \frac{r}{2} \left[1 + \frac{2 \cos(\phi)}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} \right]$ $y = \frac{r \sin(\phi)}{1 + \sin(\theta_a - \phi)}$ Para $(\pi - \gamma) \leq \theta_t < (\pi - \theta_a)$ $\phi \begin{cases} 3\frac{\pi}{2} + \theta_a \\ 5\frac{\pi}{2} - \theta_t \end{cases}$ $f_1 = r/2$	$x = \frac{2f_2 \cos(\phi)}{1 + \sin(\theta_a - \phi)}$ $y = \frac{r \cos(\gamma)}{2 \sin(\gamma)} + \frac{2f_2 \sin(\phi)}{1 + \sin(\theta_a - \phi)}$ Para $\gamma \leq \theta_t < \frac{\pi}{2}$; $\phi \begin{cases} 0 \\ \frac{\pi}{2} - \theta_t \end{cases}$ e para $\frac{\pi}{2} \leq \theta_t < \pi - \gamma$; $\phi \begin{cases} \gamma + 3\frac{\pi}{2} \\ 5\frac{\pi}{2} - \theta_t \end{cases}$ $f_2 = \frac{r}{2} \left[1 + \frac{1 + \cos(\gamma - \theta_a)}{2 \sin(\gamma)} \right]$	$x = \frac{2f_3 \cos(\phi)}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} - \frac{r}{2}$ $y = \frac{2f_3 \sin(\phi)}{1 + \sin(\theta_a - \phi)}$ Para $\theta_a \leq \theta_t < \gamma$ $\phi \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \gamma \\ \frac{\pi}{2} - \theta_t \end{cases}$ $f_3 = f_2 + \frac{r[1 - \cos(\gamma + \theta_a)]}{4 \sin(\gamma)}$

Denotamos com (ϕ) o ângulo medido no sentido anti-horário a partir do semi-eixo positivo (x), com centro no ponto (F_1) , para a involuta, ou nos pontos (F_1) , (F_2) e (F_3) para os segmentos parabólicos (Fig.1). O ângulo de truncamento (θ_t) é medido no sentido anti-horário a partir do semi-eixo positivo (y) até a linha reta que une (F_1) com a borda (T) da involuta truncada ou até as linhas que unem os focos (F_1) , (F_2) ou (F_3) com o ponto de truncamento (T) (Fig. 1), localizado no extremo do respectivo segmento parabólico truncado. Com (f_1) , (f_2) e (f_3) designamos a distancia focal de cada parábola.

As dimensões da abertura do concentrador podem ser calculadas, para cada (θ_t) , com as equações paramétricas da superfície refletora para a coordenada (x) e a altura da cavidade com as equações paramétricas da superfície refletora para a coordenada (y), ambas mostradas na Tabela 1.

3.2 Comprimento do refletor

O comprimento da involuta pode ser calculado em função do ângulo (θ_t) , já definido.

$$L_{inv} = r\left(\frac{3}{2}\pi - \theta_t\right); \quad \pi - \theta_a \leq \theta_t \leq \frac{3}{2}\pi \quad (2)$$

A superfície do refletor (perímetro por unidade de comprimento axial do concentrador) (L_i) , para cada um dos segmentos parabólicos $(i = 1, 2 \text{ e } 3)$ pode ser calculada pela Eq. (3)

$$L_{parab,i} = 2^{5/2} f_i \left[\left(\cos\left(\frac{\alpha_{u,i}}{2}\right) \right)^3 \text{Log} \left(\frac{\cos\frac{\alpha_{u,i}}{4} + \sin\frac{\alpha_{u,i}}{4}}{\cos\frac{\alpha_{u,i}}{4} - \sin\frac{\alpha_{u,i}}{4}} + \frac{\sin(\alpha_{u,i})}{2} \right) \frac{1}{[1 + \cos(\alpha_{u,i})]^{3/2}} + \right. \\ \left. \left[\left(\cos\left(\frac{\alpha_{l,i}}{2}\right) \right)^3 \text{Log} \left(\frac{\cos\frac{\alpha_{l,i}}{4} - \sin\frac{\alpha_{l,i}}{4}}{\cos\frac{\alpha_{l,i}}{4} + \sin\frac{\alpha_{l,i}}{4}} - \frac{\sin(\alpha_{l,i})}{2} \right) \frac{1}{[1 + \cos(\alpha_{l,i})]^{3/2}} \right] \quad (3)$$

Os ângulos que definem os limites inferior e superior da seção refletora são denotados com os símbolos $(\alpha_{l,i})$ e $(\alpha_{u,i})$ (ângulos polares), onde $(i=1, 2 \text{ e } 3)$ indica o segmento parabólico. Para concentradores completos ou truncados, os limites estão dados por:

$$\text{Para } i=1 \quad (\pi - \gamma) \leq \theta_t < (\pi - \theta_a); \quad \alpha_{l,1} = 0 \quad \text{e} \quad \alpha_{u,1} = \pi - (\theta_a + \theta_t) \quad (4)$$

$$\text{Para } i=2 \quad \gamma \leq \theta_t < (\pi - \gamma); \quad \alpha_{l,2} = \gamma - \theta_a \quad \text{e} \quad \alpha_{u,2} = \pi - (\theta_a + \theta_t) \quad (5)$$

$$\text{Para } i=3 \quad \theta_a \leq \theta_t < \gamma; \quad \alpha_{l,3} = \pi - (\gamma + \theta_a) \quad \text{e} \quad \alpha_{u,3} = \pi - (\theta_a + \theta_t) \quad (6)$$

O comprimento total da cavidade, truncada na parábola (i) , é igual à soma dos comprimentos dos segmentos parabólicos não truncados e da involuta, mais o comprimento $< L_{parab,i} >$, do segmento parabólico truncado.

$$L = L_{\text{inv}} + \sum_{j=1}^i L_{\text{parab},j} \quad (7)$$

onde os segmentos não truncados são designados por ($j < i$). Na próxima seção são analisadas as propriedades óticas das cavidades, ou seja a função de aceitação angular e o número médio de reflexões.

4. PROPRIEDADES ÓTICAS

4.1 Função de aceitação angular

O comportamento ótico da cavidade pode ser representado por duas propriedades, a função de aceitação angular ($F(\theta)$) e o número médio de reflexões $\langle n \rangle$. A função de aceitação angular é a fração de raios incidente na abertura que atinge o absorvedor em uma cavidade com paredes refletoras perfeitas (refletividade $\rho = 1$). A função de aceitação angular, correspondente a raios luminosos com ângulo de incidência menor ou igual a (θ_a), é igual a 1. Entretanto, uma fração de raios luminosos, que incidem na abertura com ângulos maiores que (θ_a) e menores que (θ_t) atingem o absorvedor em forma direta, sem reflexões, ou no caso em que se reflitam na involuta, atingem a base do absorvedor.

O ângulo de truncamento varia desde (θ_a) até ($\frac{3}{2}\pi$), dividido de acordo com os diferentes segmentos que compõem a cavidade. Para valores do ângulo (θ_t) no intervalo ($\theta_a \leq \theta_t < \gamma$) (terceiro segmento parabólico) a função de aceitação angular é igual a

$$F(\theta) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \theta \leq \theta_a \\ \frac{1 + C_t \left(1 + \frac{1}{\sin \gamma}\right)}{2C_t \left(1 + \frac{1}{\sin \gamma}\right)} \left(1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \theta_t}\right) & \theta_a < \theta \leq \theta_t \\ 0 & \theta \geq \theta_t \end{cases} \quad (8)$$

No intervalo $\gamma \leq \theta_t < \pi/2$ (primeira parte do segundo segmento parabólico)

$$F(\theta) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \theta \leq \theta_a \\ \frac{1}{2C_t \left(1 + \frac{1}{\sin \gamma}\right)} \left(1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \gamma}\right) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \theta_t}\right) & \theta_a < \theta \leq \gamma \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \theta_t}\right) & \gamma \leq \theta \leq \theta_t \\ 0 & \theta \geq \theta_t \end{cases} \quad (9)$$

No intervalo ($\pi/2 \leq \theta_t < \pi - \gamma$) (segunda parte do segundo segmento parabólico)

$$F(\theta) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \theta \leq \theta_a \\ \frac{1}{2C_t \left(1 + \frac{1}{\sin \gamma}\right)} \left(1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \gamma}\right) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \theta_t}\right) & \theta_a < \theta \leq \gamma \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \theta_t}\right) & \gamma \leq \theta \leq \pi - \theta_t \\ 1 & \pi - \theta_t \leq \theta < \pi/2 \\ 0 & \theta \geq \pi/2 \end{cases} \quad (10)$$

No intervalo $(\pi - \gamma \leq \theta_t \leq \pi - \theta_a)$ (primeiro segmento parabólico)

$$F(\theta) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \theta \leq \theta_a \\ \frac{1}{2C_t \left(1 + \frac{1}{\sin \gamma}\right)} \left[C_t \left(1 + \frac{1}{\sin \gamma}\right) + 1 - \left(C_t \left(1 + \frac{1}{\sin \gamma}\right) - 1 \right) \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \theta_t} \right] & \theta_a < \theta \leq \pi - \theta_t \\ 1 & \pi - \theta_t \leq \theta < \pi/2 \\ 0 & \theta \geq \pi/2 \end{cases} \quad (11)$$

No caso em que o concentrador esteja formado por uma involuta truncada, o ângulo (θ_t) pertence ao intervalo $(\pi - \theta_a \leq \theta_t \leq 3\pi/2)$. Em tal situação se verifica que todos os raios luminosos compreendidos no intervalo $(0 \leq \theta \leq \pi/2)$ são aceitos ($F(\theta) = 1$).

Na Seção 5 será mostrado, através de um caso particular, o comportamento da função de aceitação angular ($F(\theta)$).

4.2 Número médio de reflexões

A eficiência ótica (η) de um concentrador tipo CPC (para $\rho > 0,75$) pode ser representada com boa aproximação pela fórmula $\eta = \alpha \tau \rho^{<n>}$, onde (ρ) é a refletividade da superfície refletora, (α) a absorvidade da superfície do absorvedor, (τ) a transmissividade da cobertura do coletor e $<n>$ o número médio de reflexões que um raio luminoso incidente na abertura realiza até atingir o absorvedor.

O número médio de reflexões $<n>$ da cavidade concentradora, truncada na parábola (i), é igual à soma do número médio de reflexões das parábolas não truncadas e da involuta, mais o número médio de reflexões da parábola truncada. O cálculo do número médio de reflexões da involuta e dos segmentos de parábola, para qualquer grau de truncamento, conduz às seguintes expressões

$$<n_{inv}> = \frac{r \left(\frac{3}{2} \pi - \theta_t \right)}{2 \cdot L_{abs}} \quad \pi - \theta_a \leq \theta_t \leq \frac{3}{2} \pi \quad (12)$$

$$\langle n_1 \rangle = \frac{L_1(\theta_t)}{2 \cdot L_{abs}} - \frac{2f_1}{L_{abs}} \left[\frac{1}{2} + \frac{\cos(\theta_a + \theta_t)}{1 - \cos(\theta_a + \theta_t)} \right] \quad \pi - \gamma \leq \theta_t < \pi - \theta_a \quad (13)$$

$$\langle n_2 \rangle = \frac{L_2(\theta_t)}{2 \cdot L_{abs}} - \frac{2f_2}{L_{abs}} \left[\frac{\cos(\gamma - \theta_a)}{1 + \cos(\gamma - \theta_a)} + \frac{\cos(\theta_a + \theta_t)}{1 - \cos(\theta_a + \theta_t)} \right] \quad \gamma \leq \theta_t < \pi - \gamma \quad (14)$$

$$\langle n_3 \rangle = \frac{L_3(\theta_t)}{2 \cdot L_{abs}} - \frac{2f_3}{L_{abs}} \left[\frac{-\cos(\gamma + \theta_a)}{1 - \cos(\gamma + \theta_a)} + \frac{\cos(\theta_a + \theta_t)}{1 - \cos(\theta_a + \theta_t)} \right] \quad \theta_a \leq \theta_t < \gamma \quad (15)$$

O comprimento dos refletores parabólicos ($L_1(\theta_t)$, $L_2(\theta_t)$ e $L_3(\theta_t)$), nas Eqs. (13) a (15), são dados pela Eq. (3) conjuntamente com o domínio angular, expresso pelas Eqs. (4) a (6). O perímetro do absorvedor é igual a ($L_{abs} = r \frac{1}{1 + (1/\sin\gamma)}$).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comprimento da cavidade com relação à abertura, (L/A) e o número médio de reflexões $\langle n \rangle$ para concentradores com concentração máxima compreendida entre (1,2) e (2) e ângulo do vértice do absorvedor ($\gamma=78^\circ$) são mostrados nas Figs. (2) e (3) em função da concentração da cavidade truncada (C_t).

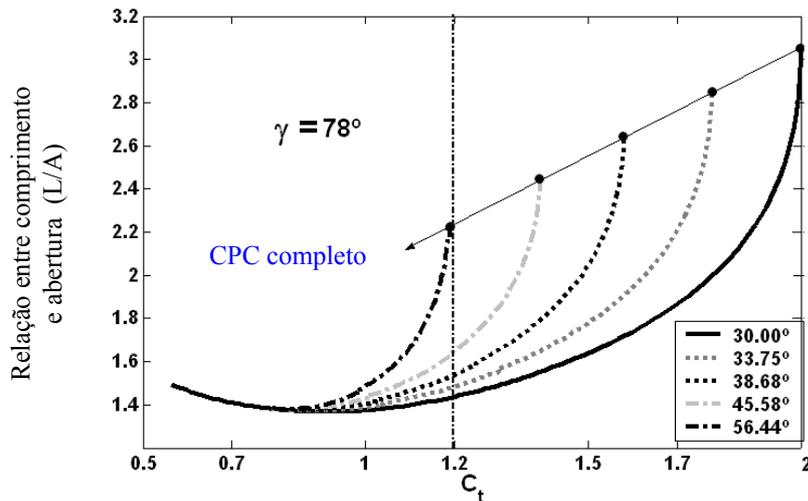


Figura 2-Comprimento da cavidade em relação ao comprimento da abertura (L/A) versus relação de concentração da cavidade truncada (C_t), para cavidades com concentração máxima compreendida entre (1,2) e (2).

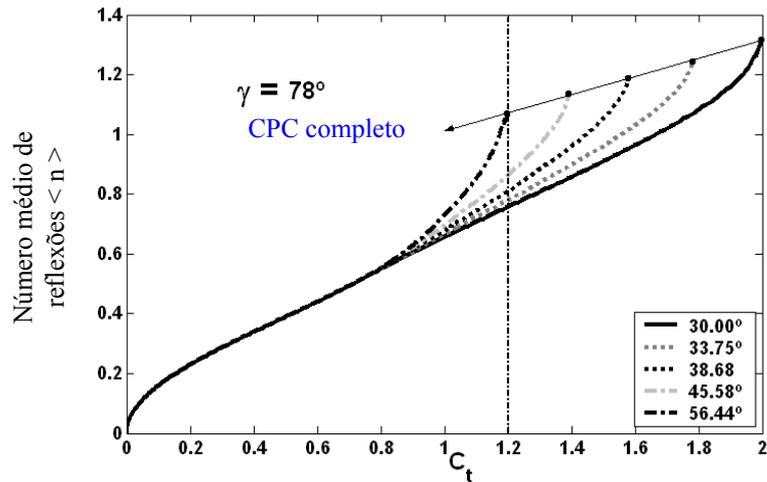


Figura 3 - Número médio de reflexões $\langle n \rangle$ da cavidade concentradora versus relação de concentração da cavidade truncada (C_t), para cavidades com concentração máxima compreendida entre (1,2) e (2).

Os resultados apresentados nas Figs. 2 e 3 mostram que as propriedades óticas e geométricas mais atrativas para concentradores truncados, menor relação (L/A) e menor número médio de reflexões $\langle n \rangle$ para um determinado valor de (C_t), correspondem a concentradores com a maior relação de concentração ideal ($C=2$).

A relação entre o comprimento e abertura da cavidade (L/A) apresenta, à medida em que o grau de truncamento varia, um mínimo bem definido (Fig. 2). Entretanto, a otimização da geometria da cavidade, ou seja a escolha adequada da relação (L/A), requer uma consideração cuidadosa das perdas térmicas devido a que o truncamento reduz o custo de produção das cavidades, mas também aumenta as perdas térmicas (TIBA et al. 2005).

A coleção de energia é afetada pela função de aceitação angular $F(\theta)$ (Fig. 3).

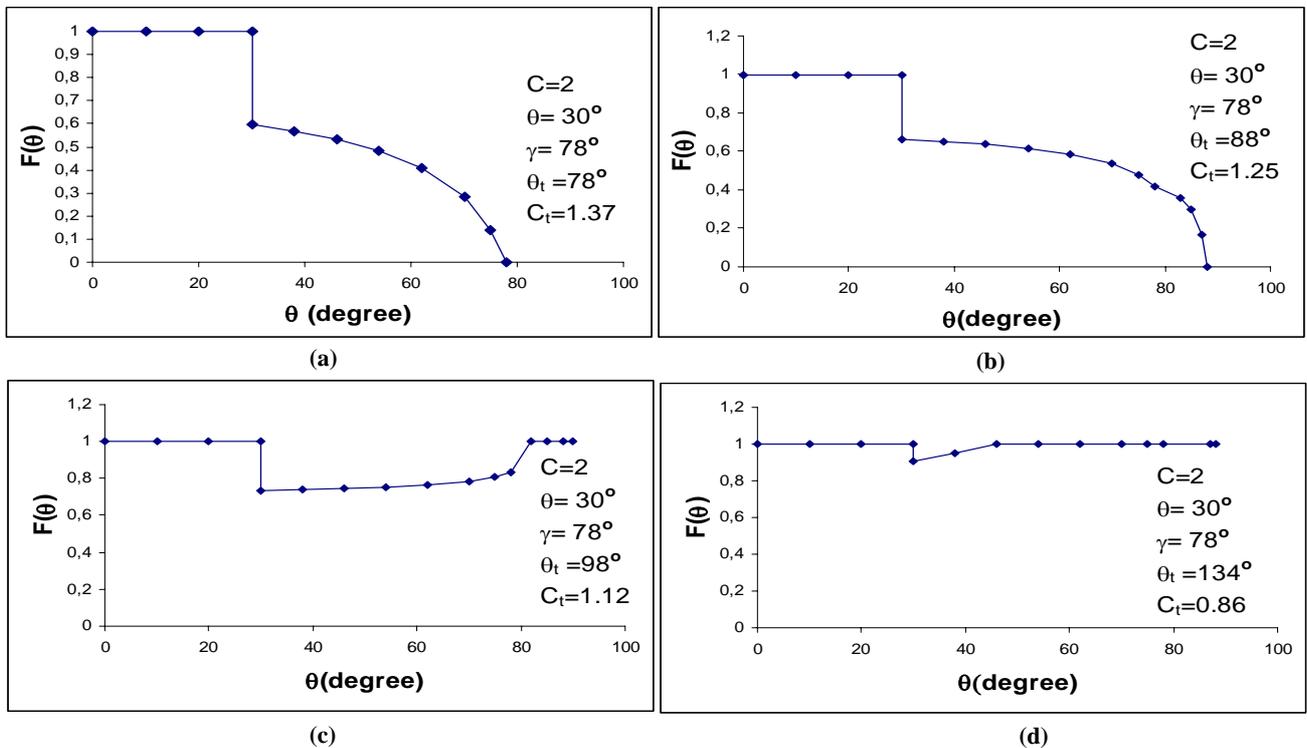


Figura 3 - Função de aceitação angular para ângulos de truncamento $\theta_t = 78^\circ, 88^\circ, 98^\circ$ e 134° . Relação de concentração $C=2$ e $\gamma=78^\circ$.

Na Fig. 3 pode ser visto o comportamento da função $F(\theta)$ para quatro valores da relação de concentração da cavidade truncada (concentração ideal, $C=2$ e ângulo do vértice $\gamma = 78^\circ$). Pode-se apreciar que uma significativa quantidade de energia pode ser coletada fora do intervalo de aceitação angular. Por exemplo, a contribuição na coleção de irradiância difusa, fora do intervalo de aceitação da função $F(\theta)$, para um concentrador truncado com $C_t=1.25$ é aproximadamente 60% da contribuição dentro do intervalo de aceitação angular e quase 60% da irradiância direta que incide a 60° é aceita (Fig.3 (b)).

6. COMENTÁRIOS FINAIS

Foram derivadas soluções analíticas em forma fechada para as propriedades geométricas e óticas de concentradores CPC com absorvedor V invertido plenamente iluminado. A geometria da cavidade consiste em uma involuta circular e três segmentos de parábola.

Para graus de truncamento elevados ($0,8 \leq C_t \leq 1,1$), a relação entre comprimento e abertura (L/A) da cavidade apresenta um mínimo bem definido (Fig. 2). A redução das dimensões da cavidade favorece a redução dos custos. A mesma está, entretanto, sujeita a certas restrições já que o truncamento diminui a relação de concentração C_t e aumenta as perdas térmicas. Para cada valor da máxima temperatura a ser atingida, trata-se de produzir energia térmica com o menor custo.

As equações obtidas podem ser utilizadas como ferramentas de projeto, simulação e otimização dessas cavidades.

REFERÊNCIAS

- BAUM, H. P. AND GORDON, J. M., 1985. Geometric characteristics of ideal nonimaging (CPC) solar collectors with cylindrical absorber. *Solar Energy* Vol. 33, pp. 455 (1984).
- BAUM, H.P; GORDON, J.M., Optimal design of nonimaging solar concentrators with wedge receivers. *Applied Optics*, Vol. 24, pp. 2596-2599.
- GORDON, J.M., 1986. Nonimaging solar energy concentrators (CPC's) with fully illuminated flat receivers: a viable alternative to flat-plate collectors. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 108, pp. 252-256.
- TIBA, C., FRAIDENRAICH, N. and BRANDÃO, B. B., 2005. Optimal design of stationary non evacuated CPC solar concentrator with fully illuminate wedge receiver. *Proceedings of the 2005 Solar World Congress, ISES 2005 Solar World Congress, Orlando, Florida-USA (CD-Rom)*.
- WELFORD, W.T.; WINSTON, R., 1978. *The optics of nonimaging concentrators*. Academic Press, New York .

ANALITICAL STUDY OF STATIONARY CPC CONCENTRATORS WITH INVERTED V ABSORBER

Abstract. *Stationary low concentration collectors ($C < 2$), of the CPC type, are of great interest to supply thermal energy for industrial processes, at temperatures below or equal to 100°C . Concentrators with inverted V receivers placed inside the concentrating cavity have the whole perimeter illuminated whereas only one part of it is subject to heat losses through the collector aperture. Concentrators with fully illuminated horizontal flat receivers, already studied, can be considered a particular case of that type. The ideal concentrator corresponding to a fully illuminated wedge absorber is a circular involute plus three parabolic segments. Closed-form analytic formulae are derived for its geometric and optical properties. The equations derived can*

be used as design tools, for simulation techniques and optimization purposes. Numerical results for any degree of cavity truncation are presented.

Key words: Solar Thermal Collector, Low Concentration CPC, Optical and geometrical properties