

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

"DESENVOLVIMENTO DE COLETORES DE WINSTON
DE BAIXA CONCENTRAÇÃO"

Autor: FERNANDO DE ALMEIDA FRANÇA
Orientador: ISAIAS DE CARVALHO MACEDO

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Campinas da UNICAMP como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS.

JULHO/1979

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

RESUMO

Análise do desempenho térmico instantâneo de coletores de parábola composta - coletor de "Winston" - de baixa concentração, para três montagens: cobertura de vidro no plano de abertura e refletor isolado; cobertura de vidro no plano de abertura e refletor sem isolamento e cobertura de vidro imediatamente acima do absorvedor.

A transferência de calor convectiva no interior do coletor, 2a. montagem, foi determinada experimentalmente.

São discutidas as técnicas de construção de protótipos de concentrações 2,4 e 5,3 e apresentadas as curvas de eficiências, teóricas e experimentais, para temperaturas do absorvedor variando entre 50°C e 150°C.

Í N D I C E

	<u>Pág.</u>
I - INTRODUÇÃO	1
II - ESTUDO DO COLETOR DE PARÁBOLA COMPOSTA	4
II-A - Princípios Óticos	4
II-B - Simulação do Desempenho Térmico Instantâneo ...	11
II-B-1 - A Equação da Energia	12
II-B-2 - Determinação do Coeficiente Global de Transferência de Calor	15
III - CONSTRUÇÃO DOS PROTÓTIPOS E INSTALAÇÃO DE TESTES	34
III-1 - Construção dos Protótipos	34
III-2 - A Instalação de Testes	37
IV - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DA SIMULAÇÃO	40
V - CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	51
REFERÊNCIAS	52
APÊNDICE I	54
SIMBOLOGIA DO PROGRAMA	59
APÊNDICE II	62

Este trabalho foi suportado financeiramente pela
FINEP (Contrato IF/589) e pela
FAPESP (Contrato 19. Tecnol. e Ind. 78/0298).

CAPÍTULO I

I - INTRODUÇÃO

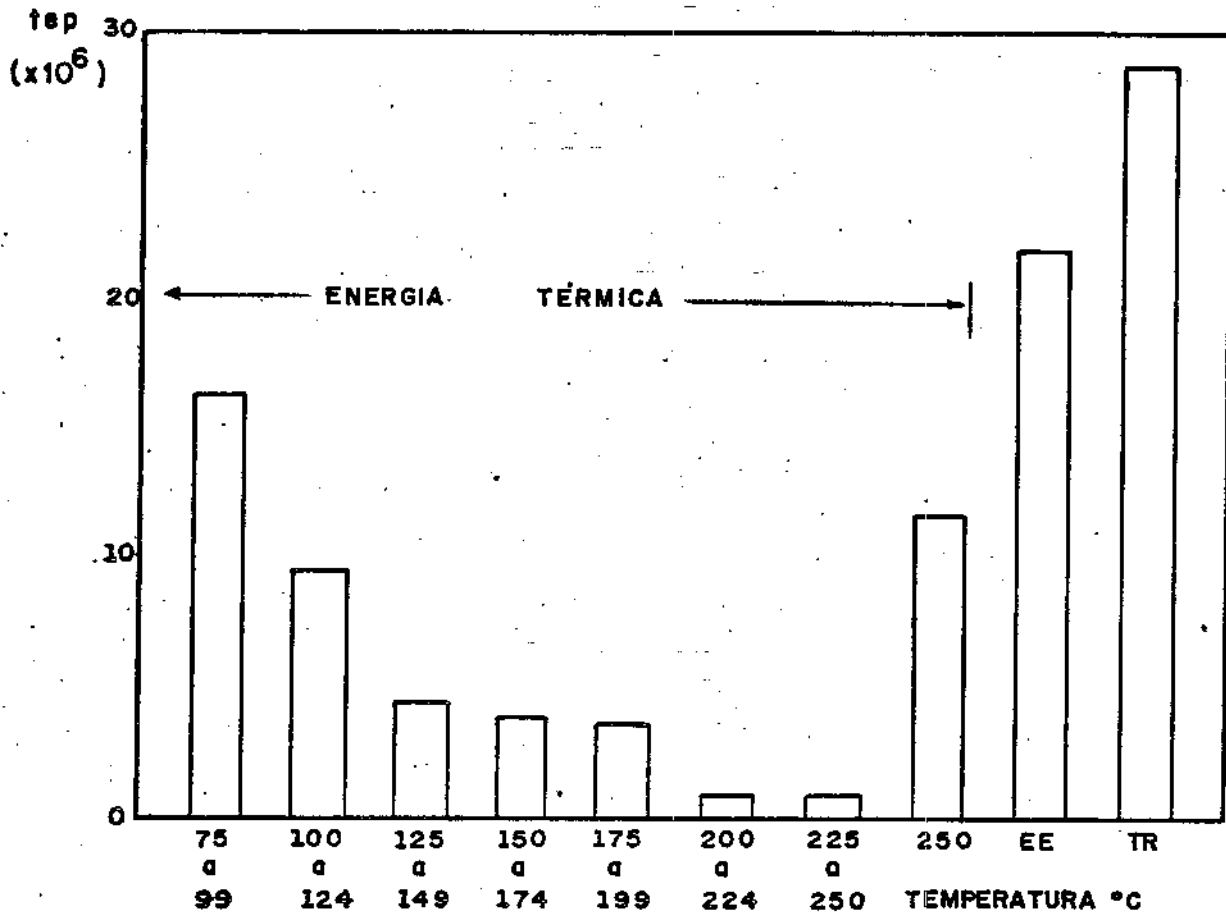
A viabilidade técnica e econômica de utilização da energia solar como fonte alternativa da energia térmica consumida em processos comerciais e industriais relaciona-se com a temperatura de operação e eficiência de captação dos coletores solares. Qualquer processo térmico que opere em temperaturas inferiores a 80°C pode tecnicamente ter, utilizando coletores solares de placa plana, a energia solar como fonte alternativa; em temperaturas superiores, até o limite de 100°C , a eficiência de tais equipamentos se reduz sensivelmente e o custo da energia é bem maior.

Um estudo preliminar recente [1] avalia a estrutura de consumo de energia no Brasil destacando sua forma final de utilização, isto é, se energia mecânica, elétrica ou térmica e, no último caso, qual o nível de temperatura de geração (Figura 1). Observa-se que 37% da energia consumida no país corresponde a energia térmica em temperaturas inferiores a 200°C , sendo que desta fração, a maior parcela, aproximadamente 85%, situa-se entre os níveis de temperatura de 75°C a 174°C . Estes resultados não devem diferir essencialmente dos de outros países.

É evidente então, já que o Brasil apresenta, em toda sua extensão territorial, condições propícias de insolação, a necessidade de desenvolvimento de coletores solares eficientes em temperaturas de captação superiores a 80°C , para a substituição total ou parcial do consumo de combustível de fontes não renováveis.

Dentro deste contexto, este trabalho analisa o desempenho térmico instantâneo de um modelo característico de coletor solar de concentração linear, denominado coletor de parábola composta -CPC- ou coletor de Winston. São discutidos a técnica de construção de dois protótipos de concentrações 2,4 e 5,3 (utilizando-se poliéster reforçado com lã de vidro para os suportes dos refletores de alumínio e tubos aletados de alumínio ou cobre para o absorvedor) e as limitações dos materiais utilizados.

Analizou-se a transferência de calor para diferentes montagens dos coletores, utilizando-se cobertura de vidro no plano de



EE - Energia Elétrica
TR - Transporte

Figura 1 - Estimativa do consumo de energia térmica no Brasil.

abertura ou imediatamente acima do absorvedor e refletor com e sem isolamento. Para a transferência de calor radiativa os mais recentes resultados publicados (soluções analíticas para os coletores CPC) foram considerados; os coeficientes da transferência convectiva foram determinados experimentalmente a partir da identificação das correntes de convecção para as montagens onde resultados conhecidos não foram considerados satisfatórios.

Os testes dos protótipos, para diversos níveis de temperatura entre 40°C e 150°C são apresentados e comparados aos resultados de simulação em computador digital.

Procurou-se, então, obter experimentalmente os parâmetros reais de projeto de coletores simples que possam operar eficientemente em temperaturas superiores às atingidas pelos coletores de placa plana disponíveis no mercado.

CAPÍTULO II

II - ESTUDO DO COLETOR DE PARÁBOLA COMPOSTA

II-A - Princípios Óticos

O coletor de parábola composta proposto por Roland Winston em 1969 [2,3] é um concentrador que atinge o limite termodinâmico máximo de concentração

$$C = \frac{n_2}{n_1} (1/\text{sen } \theta_{\text{máx}}) , \quad (1)$$

onde $2\theta_{\text{máx}}$ é o ângulo máximo de divergência da radiação incidente e n_1 e n_2 , respectivamente, os índices de refração dos meios na entrada e saída do coletor. A concentração máxima para configurações bidimensionais é dada por

$$C = n/\text{sen } \theta_{\text{máx}} \quad (2)$$

onde n é o índice de refração do meio interno ao coletor. Para coletores bidimensionais onde o meio interno é o ar, a radiação incidente no plano de abertura de largura D , dentro de uma faixa angular $2\theta_{\text{máx}}$, atinge diretamente e por reflexão a superfície receptora de largura d e,

$$C = D/d = 1/\text{sen } \theta_{\text{máx}} \quad (3)$$

Os perfis planos dos refletores são duas parábolas distintas e simétricas, de eixo inclinado do ângulo $\theta_{\text{máx}}$ em relação ao eixo ótico do coletor, cujos focos coincidem com as extremidades da superfície receptora.

A faixa angular de aceitação, a latitude do local de instalação e o número de horas que deve operar um coletor de parábola composta determinam a necessidade de seguimento do sol. Por exemplo, um coletor de concentração 5, faixa angular 23° e instalado em local de latitude $22^\circ 50'$, operando nas oito horas centrais do dia necessita, em média, de ajustes de inclinação a cada 10,3 dias. Para operação nas 6 horas centrais do dia seriam necessários, em média, ajustes de inclinação a cada 26,5 dias. A variação média da altitude solar é $\pm 8,9$ graus para o primeiro caso e $\pm 4,825$ para o segundo. A variação da declinação solar é $0,235^\circ/\text{dia}$.

A equação das parábolas e suas dimensões características, dadas em função de um sistema de eixos cartesianos inclinados de $\theta_{\text{máx}}$ em relação ao eixo ótico do coletor (Figura 2) são:

$$y = \frac{1}{2d (1 + \text{sen } \theta_{\text{máx}})} x^2 ; \quad (4)$$

a distância focal,

$$f = \frac{d}{2} (1 + \text{sen } \theta_{\text{máx}}) ; \quad (5)$$

as extremidades inferior e superior da parábola, $(x_d; y_d)$ e $(x_D; y_D)$,

$$x_d = d \cos \theta_{\text{máx}} , \quad (6)$$

$$y_d = \frac{d}{2} (1 - \text{sen } \theta_{\text{máx}}) , \quad (7)$$

$$x_D = (d + D) \cos \theta_{\text{máx}} , \quad (8)$$

$$y_D = \frac{d}{2} (1 - \text{sen } \theta_{\text{máx}}) \left(1 + \frac{1}{\text{sen } \theta_{\text{máx}}} \right) ; \quad (9)$$

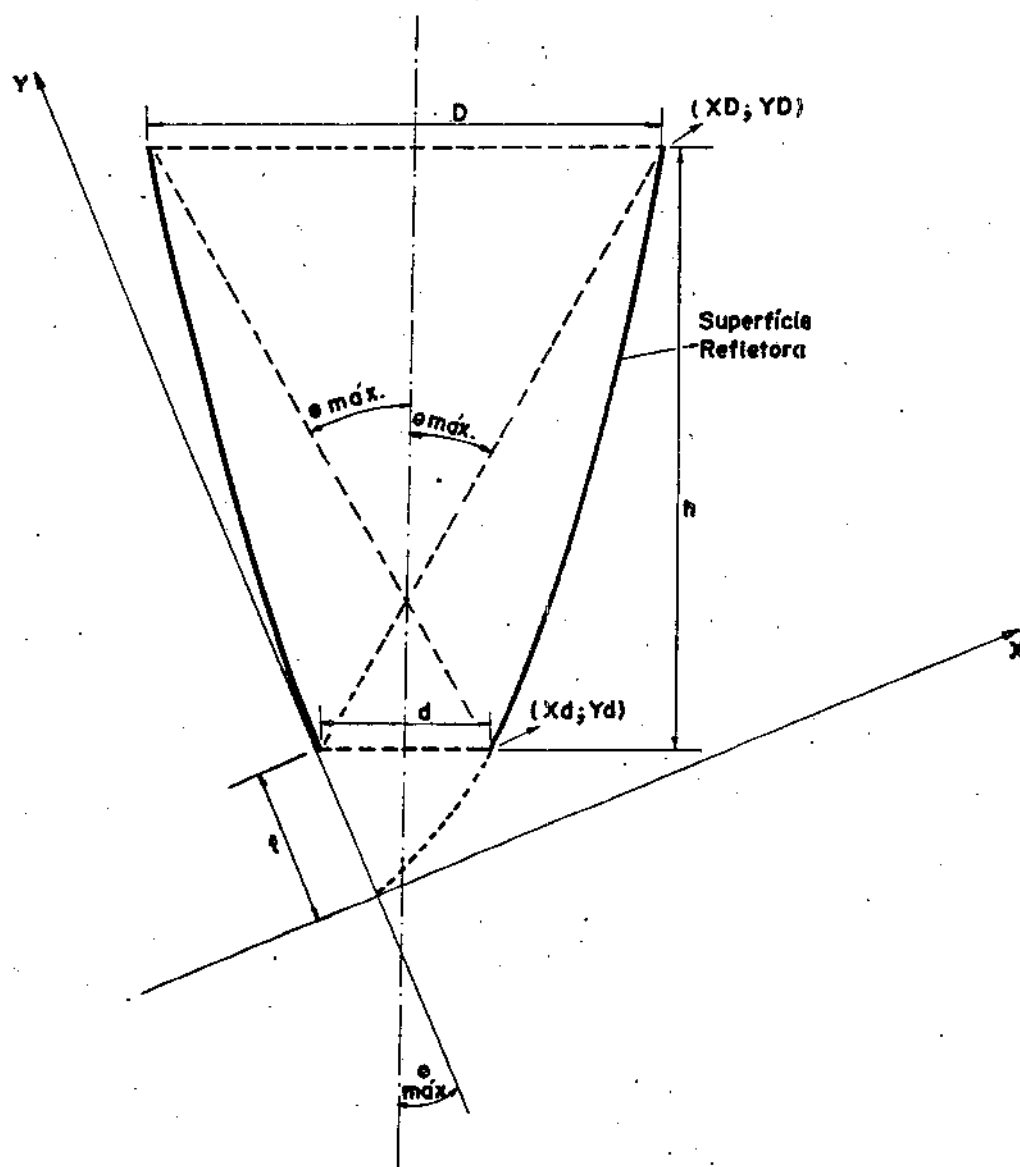


Figura 2 - Perfil plano do coletor CPC e as dimensões características.

A altura do coletor, isto é, a distância entre a superfície de abertura e a superfície receptora,

$$h = \left(\frac{d}{2} \right) \left[1 + \left(\frac{1}{\sin \theta_{\text{máx}}} \right) \right] \cot \theta_{\text{máx}} ; \quad (10)$$

A área das parábolas, por unidade de comprimento do coletor,

$$A_T = (1/a) \left\{ \frac{2ax_D \sqrt{(2ax_D)^2 + 1}}{2} + \frac{1}{2} \ln \left[2ax_D + \sqrt{(2ax_D)^2 + 1} \right] - \frac{2ax_d \sqrt{(2ax_d)^2 + 1}}{2} - \frac{1}{2} \ln \left[2ax_d + \sqrt{(2ax_d)^2 + 1} \right] \right\} , \quad (11)$$

$$\text{sendo } a = 1 / \left[2d(1 + \sin \theta_{\text{máx}}) \right] . \quad (12)$$

Com o aumento da concentração torna-se progressivamente desfavorável a relação entre a área de refletor e a área de abertura do coletor CPC; para concentrações variando entre 2 e 10, a razão entre a área de refletor e a área de abertura varia de 2,9 a 11, dificultando e onerando a construção. Torna-se necessário, então, truncar o coletor, isto é, reduz-se a altura original, diminuindo sua concentração, para reduzir a área do refletor. As dimensões características da parábola truncada, ainda em relação ao sistema cartesiano de eixos inclinados de $\theta_{\text{máx}}$ em relação ao eixo óptico do coletor, são: a abcissa da extremidade superior, em função da altura original h , da altura truncada \bar{h} , da largura da superfície receptora d e do meio ângulo de aceitação $\theta_{\text{máx}}$.

$$\bar{x}_D = d \left(\frac{1 + \operatorname{sen} \theta_{\text{máx}}}{\cos \theta_{\text{máx}}} \right) \left[- \operatorname{sen} \theta_{\text{máx}} + \left(1 + \frac{h}{h} \cot^2 \theta_{\text{máx}} \right)^{1/2} \right]; \quad (13)$$

a área da parábola truncada,

$$\begin{aligned} \bar{A}_r = (1/a) & \left\{ \frac{2a \bar{x}_D \sqrt{(2a \bar{x}_D)^2 + 1}}{2} + \frac{1}{2} \ln \left[2a \bar{x}_D + \right. \right. \\ & \left. \left. + \sqrt{(2a \bar{x}_D)^2 + 1} \right] - \frac{2a x_d \sqrt{(2a x_d)^2 + 1}}{2} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} \ln \left[2a x_d + \sqrt{(2a x_d)^2 + 1} \right] \right\} \quad (14) \end{aligned}$$

As relações entre as dimensões características do coletor truncado e a concentração, para vários meio-ângulos de aceitação $\theta_{\text{máx}}$ estão indicados nas Figuras 3 e 4.

Em aplicações térmicas, a superfície receptora da radiação solar, agora denominada absorvedor, deve ser um tubo de seção transversal circular ou elíptica ou um tubo aletado [4,5,6]. A transferência de calor convectiva do absorvedor para o meio ambiente é reduzida utilizando-se uma placa de vidro no plano de abertura do coletor ou envolvendo-se o absorvedor em tubo de vidro evacuado. A transferência de calor radiativa do absorvedor para o meio ambiente é reduzida utilizando-se absorvedor com deposição de material seletivo como o cromo-preto, o níquel-preto ou óxido de cobre [7].

A eficiência ótica do coletor CPC, para tais montagens, é dada por

$$\eta_o = \gamma \tau_c \alpha_a (\rho_{RS})^r, \quad (15)$$

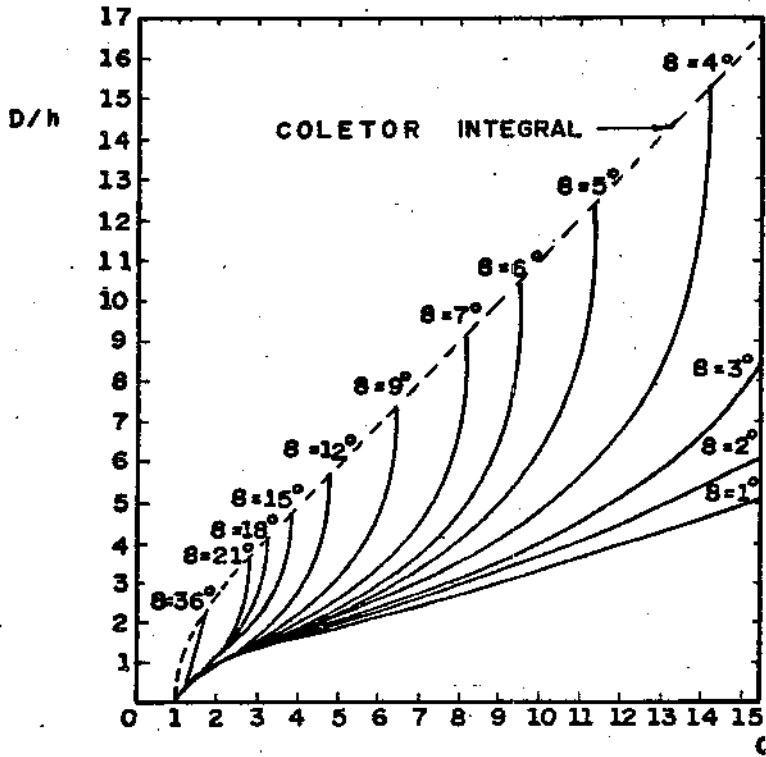


Figura 3 - Relação entre a largura da superfície de abertura, altura, concentração e ângulo de aceitação para coletor CPC.

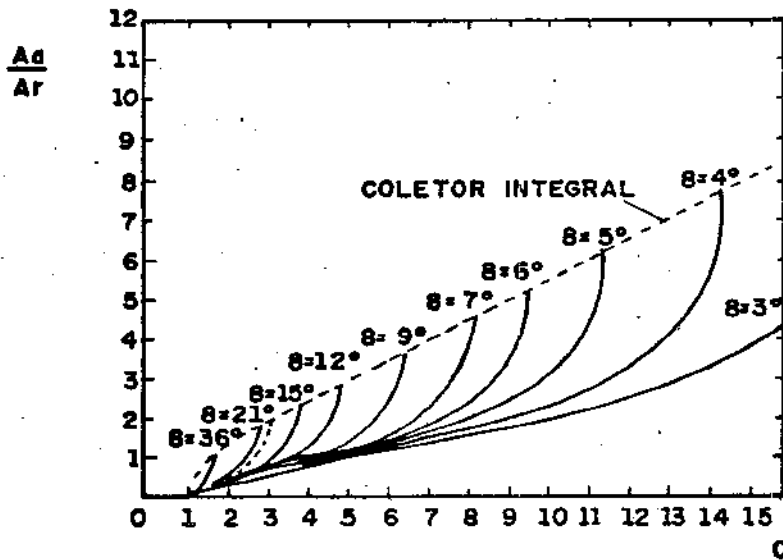


Figura 4 - Relação entre a área de abertura, área de refletor, concentração e ângulo de aceitação para coletor CPC.

onde:

- γ \equiv fração da radiação solar total incidente no plano de abertura dentro da faixa angular $2\theta_{\text{máx}}$;
- τ_c \equiv transmissividade da cobertura à radiação solar;
- α_a \equiv absorptividade do absorvedor à radiação solar;
- ρ_{RS} \equiv refletividade do refletor à radiação solar;
- r \equiv número de reflexões da radiação incidente antes de atingir o absorvedor.

A transmissividade da cobertura à radiação solar é o produto das transmissividades devido à reflexão e à absorção,

$$\tau_c = \tau_r \cdot \tau_a \quad , \quad (16)$$

sendo

$$\tau_r = (1 - \rho_{cs}) / (1 + \rho_{cs}) \quad , \quad (17)$$

$$\rho_{cs} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\text{sen}^2 [\text{sen}^{-1}(n_c \text{ sen } \gamma) - \gamma]}{\text{sen}^2 [\text{sen}^{-1}(n_c \text{ sen } \gamma) + \gamma]} + \frac{\tan^2 [\text{sen}^{-1}(n_c \text{ sen } \gamma) - \gamma]}{\tan^2 [\text{sen}^{-1}(n_c \text{ sen } \gamma) + \gamma]} \right\} \quad (18)$$

$$\tau_a = e^{-k_e c} \quad , \quad (19)$$

$$r = 1 - 1/C \quad , \quad (20)$$

onde:

- ρ_{cs} \equiv refletividade da cobertura à radiação solar;
 n_c \equiv índice de refração da cobertura;
 γ \equiv ângulo médio de incidência da radiação solar na bo
bertura;
 k \equiv coeficiente de extinção da cobertura;
 e_c \equiv espessura da cobertura.

O coletor solar de parábola composta é então, um concentrador linear cilíndrico que apresenta vantagens sobre os coletores tradicionais: em relação aos concentradores de foco único, aceitando a radiação solar dentro de uma faixa angular $2\theta_{\text{máx}}$, concentram parte da radiação difusa incidente e não necessitam de seguimento diário contínuo do sol; em utilização térmica, sendo a superfície receptora uma fração da superfície de abertura, atingem temperaturas mais altas com eficiência superior aos coletores de placa plana.

II-B - Simulação do Desempenho Térmico Instantâneo

A análise teórica do desempenho térmico instantâneo do coletor CPC foi realizada para três montagens distintas do coletor CPC:

- 1 - cobertura de vidro no plano de abertura e refletor isolado;
- 2 - cobertura de vidro no plano de abertura e refletor sem isolamento;
- 3 - cobertura de vidro imediatamente acima do absorvedor.

O desempenho térmico instantâneo do coletor CPC foi analisado teoricamente por Allen, Levitz, Rabl, Reed, Schertz e Winston [6], para absorvedor em tubo evacuado, e por Rabl [7], que confrontou resultados teóricos e experimentais para montagens com cobertura de vidro no plano de abertura e refletor isolado.

No presente trabalho as expressões para a potência transferida ao fluido são baseadas em deduções de Duffie e Beckmann [8] para o coletor de placa plana.

Os coeficientes de transferência de calor convectiva entre o absorvedor e a cobertura, na primeira e terceira montagens foram determinados a partir de dados experimentais obtidos por Hollands, Unny, Raithby e Konicek [9] para espaço confinado entre placas planas paralelas; para a segunda montagem procedeu-se à identificação experimental das correntes de convecção, isto é, dos perfis de velocidade e temperatura do ar confinado associados a cada par de temperaturas absorvedor-cobertura.

Os coeficientes da transferência de calor radiativa entre o absorvedor e a cobertura para a primeira e segunda montagens foram obtidos a partir da solução analítica de Rabl [10,11] para os coletores de parábola composta; a transferência radiativa na terceira montagem reduz-se ao problema de placas planas paralelas com fator de forma unitário.

As expressões dos coeficientes de transferência de calor convectiva e radiativa da cobertura para o ar ambiente e o espaço, respectivamente, são bem conhecidas. Para efeito de cálculo admitiu-se que a velocidade média do vento local - Campinas - é igual a 2 m/s e que a temperatura efetiva do espaço é sempre inferior à temperatura ambiente em 10°C.

II-B-1. - A Equação da Energia

O balanço instantâneo de energia no coletor é a relação entre a potência solar incidente no plano de abertura, a potência dissipada na cobertura e refletor, a potência dissipada nas perdas entre o absorvedor e o ambiente e a potência transferida ao fluido, denominada potência útil. A eficiência instantânea do coletor é dada por

$$\eta = q_u / I \cdot A_c \quad (21)$$

onde:

- q_u - potência útil;
 I - potência solar incidente no plano de abertura;
 A_c - área da superfície de abertura.

Considerando as hipóteses:

- condição de regime permanente no instante analisado;
- fluxo unidimensional de calor através da cobertura e camadas isolantes, inferior e lateral;
- não há gradiente de temperatura ao longo da espessura da cobertura;
- gradiente de temperatura longitudinalmente e transversalmente ao absorvedor são tratados independentemente;
- a energia armazenada no coletor é desprezível,

$$q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (t_{fs} - t_{fe}) = A \cdot F' \left[I_{n0} - U_G (t_f - t_{amb}) \right], \quad (22)$$

onde:

- \dot{m} - vazão mássica do fluido de transferência;
 C_p - calor específico a pressão constante do fluido de transferência;
 t_{fe} - temperatura do fluido na entrada do coletor;
 t_{fs} - temperatura do fluido na saída do coletor;
 F' - fator de eficiência do coletor;
 U_G - coeficiente global de transferência de calor do absorvedor para o ambiente;
 t_f - temperatura local do fluido;
 t_{amb} - temperatura ambiente.

O fator de eficiência do coletor, F' , é função do coeficiente global de transferência de calor, das características do absorvedor e do coeficiente de película entre o fluido e o absorvedor. Se o absorvedor é um tubo aletado,

$$F' = \frac{l / U_G}{W \left[\frac{1}{U_G d_e + (W - d_e)F} + \frac{1}{C_s} + \frac{1}{\pi d_i h_f} \right]} \quad (23)$$

onde:

- W - largura da aleta;
- d_e - diâmetro externo do tubo;
- F - eficiência padrão da aleta;
- C_s - condutância do elemento de ligação do tubo à aleta;
- d_i - diâmetro interno do tubo;
- h_f - coeficiente de película entre o tubo e o fluido.

A temperatura local do fluido a uma distância l da entrada do coletor é

$$t_{f_l} = \left\{ \left[e^{-(U_G W F' l / \dot{m} C_p)} \right] \cdot \left[t_{f_e} - T_{amb} - I \eta_o / U_G \right] \right\} + t_a + I \eta_o / U_G \quad (24)$$

A temperatura do absorvedor, associada à temperatura local do fluido é

$$t_{a_l} = \left[t_{f_l} + E (I \eta_o + U_G \cdot t_{amb}) \right] / (1 + E U_G) \quad (25)$$

sendo

$$E = \left[\frac{1}{(\pi d_i h_f)} \right] \cdot \left[(W - d_e) \quad F + d_e \right] . \quad (26)$$

A determinação do coeficiente global de transferência de calor diferencia-se para cada uma das montagens e será tratada detalhadamente nos próximos itens deste Capítulo.

II-B-2 - Determinação do Coeficiente Global de Transferência de Calor

1a. Montagem - cobertura de vidro na superfície de abertura e refletor isolado.

Para esta montagem pode-se admitir, sem incorrer em erro apreciável, que a transferência de calor entre a face superior do absorvedor e o ambiente, se processa totalmente através da cobertura de vidro. O circuito térmico equivalente, para o absorvedor à temperatura local t_a , a cobertura à temperatura local t_c e o ambiente à temperatura t_{amb} , está indicado na Figura 5.

O coeficiente da transferência de calor radiante entre o absorvedor e a cobertura é dado por

$$h_{ri} = \epsilon_e \cdot \tau \cdot (t_a^2 + t_c^2) \cdot (t_a + t_c) , \quad (27)$$

sendo

$$\epsilon_e = \epsilon_1 + \left(\frac{\epsilon_2 \cdot \epsilon_3}{\epsilon_2 + \epsilon_3} \right) , \quad (28)$$

$$\epsilon_1 = (\epsilon_{ri} - \epsilon_c \cdot \epsilon_a) / (1 + \rho_{ri}^2 \cdot \rho_c \cdot \rho_a) , \quad (29)$$

$$\epsilon_2 = \left(\frac{1 + \rho_{ri} \cdot \rho_c}{1 - \rho_{ri} \cdot \rho_c \cdot \rho_a} \right) \epsilon_{ri} \cdot \epsilon_a . \quad (30)$$

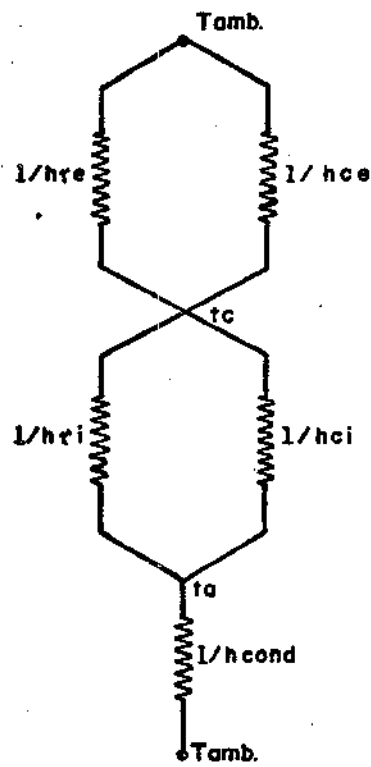


Figura 5 - Circuito térmico equivalente para 1a. Montagem.

$$\epsilon_3 = \left[\left(\frac{1 + \rho_{ri} \cdot \rho_a}{1 - \rho_{ri}^2 \cdot \rho_c \cdot \rho_a} \right) \cdot \epsilon_{ri} + \left(\frac{\epsilon_{ro}}{1 - \rho_{ro} \cdot \rho_c} \right) (C - 1) \right] \epsilon_c ,$$

(31)

$$\epsilon_c = 1 - \rho_c ,$$

(32)

$$\epsilon_a = 1 - \rho_a ,$$

(33)

$$\epsilon_r = 1 - \rho_r ,$$

(34)

$$\epsilon_{ri} = \frac{\bar{A}_r}{A_a} \cdot \epsilon_r \cdot Edo ,$$

(35)

$$\epsilon_{ro} = \left(\frac{\bar{A}_r}{A_c \cdot A_a} \right) \cdot \epsilon_r \cdot Edo ,$$

(36)

$$\rho_{ri} = 1 - \epsilon_{ri} ,$$

(37)

$$\rho_{ro} = 1 - \epsilon_{ro} ,$$

(38)

$$Edo = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{d} \left(\frac{\bar{x}_D^2 - x_d^2}{1 + \text{sen}\theta} \right) \right] ,$$

(39)

$$Eoo = \frac{1}{\bar{A}_r} \left[\frac{1}{d} \left(\frac{\bar{x}_D^2 - x_d^2}{1 + \text{sen}\theta} \right) \right] ,$$

(40)

onde: ϵ_c - emissividade da cobertura,
 ϵ_r - emissividade do refletor,
 ϵ_a - emissividade do absorvedor,

A_c - área da cobertura,

A_a - área do absorvedor.

As deduções das equações acima podem ser encontradas em [10,11] e apresentam limitações nas seguintes suposições:

- a superfície refletora é totalmente especular,
- a temperatura do absorvedor é transversalmente uniforme;
- a temperatura do refletor é transversalmente uniforme.

Na ausência de qualquer informação experimental sobre a convecção em volume de ar confinado em geometrias tais como as dos coletores de parábola composta, utilizou-se, como aproximação, resultados experimentais de convecção em volume de ar confinado de seção plana transversal retangular [9]. Admitindo que não há qualquer interação com as paredes do refletor, o coeficiente da transferência de calor convectiva entre o absorvedor e a cobertura será dado por:

$$h_{ci} = \frac{k_{ar}}{\bar{h}} \left\{ 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708f(\delta)}{Ra \cos \delta} \right) \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \delta} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cos \delta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \right\},$$

$$\text{para } \delta \leq 60^\circ, \quad (41)$$

sendo:

$$Ra = G_r \cdot Pr, \quad (42)$$

$$G_r = \frac{g \beta (t_a - t_c) \cdot \bar{h}^3}{\nu^2} \quad (43)$$

$$f(\delta) = (\text{sen } 1,8 \delta)^3, \quad (44)$$

onde:

- K_{ar} - condutividade térmica do ar confinado;
 G_r - número de Grashof ;
 Pr - número de Prandtl ;
 δ - ângulo de inclinação do absorvedor, ou do plano de abertura do coletor, com a horizontal;
 g - aceleração da gravidade;
 β - coeficiente de expansão do ar confinado;
 ν - viscosidade cinemática do ar confinado.

Os parâmetros do ar confinado, coeficiente de expansão, viscosidade cinemática e condutividade térmica, são determinados a partir da definição de sua temperatura local. Para o caso considerado,

$$t_{ar} = \frac{t_a + t_c}{2} \quad (45)$$

é uma suposição razoável, comprovada experimentalmente.

Várias expressões podem ser encontradas para o coeficiente de transferência convectiva entre a cobertura e o ambiente, cujo cálculo fornece pequenas variações para os valores obtidos. Utilizou-se a indicação de [8],

$$h_{ce} = 5,7 + 3,8 V \quad (46)$$

onde:

V - velocidade média do vento atmosférico local em metros por segundo.

Se o céu pode ser considerado como um corpo negro a uma temperatura equivalente $t_{c\acute{e}u}$, coeficiente de transferência convectiva entre a cobertura e o céu, referenciado à temperatura ambiente, é

$$h_{re} = \epsilon_c \cdot \sigma \cdot (tc^2 + tc\bar{t}_{c\bar{e}u}) \cdot (tc + tc\bar{e}u) \cdot \left(\frac{tc - tc\bar{e}u}{tc - t_{amb}} \right) \quad (47)$$

A potência dissipada para o ambiente pela base do coletor pode ser sensivelmente minimizada bastando, para tanto, prever uma espessura adequada de isolante. Admitindo que a resistividade para a convecção entre a superfície inferior do isolante e o ambiente é desprezível frente à resistividade condutiva, o coeficiente da transferência de calor pela base do coletor será dado somente por

$$h_{con} = \frac{K_{isl}}{b} \quad (48)$$

onde:

K_{isl} - condutividade térmica do isolante,

b - espessura do isolante.

Finalmente, determinadas as resistividades térmicas para a montagem, o coeficiente global de transferência de calor é

$$U_G = \left[C/(h_{ri} + h_{ci}) + 1/(h_{re} + h_{ce}) \right]^{-1} + h_{con}/C \quad (49)$$

A temperatura da cobertura, para uma dada temperatura do absorvedor é determinada pela imposição de que a potência transferida do absorvedor para a cobertura mais a potência solar absorvida pela cobertura deve ser igual à potência dissipada pela cobertura para o ambiente. Então,

$$t_c = \left\{ \left(\frac{h_{ci} + h_{ri}}{C} \right) t_a + (h_{ce} + h_{re}) \cdot t_{amb} + I \cdot (1 - \tau_a) \right\} / \left\{ \left(\frac{h_{ci} + h_{ri}}{C} \right) + (h_{re} + h_{ce}) \right\} \quad (50)$$

2a. Montagem - cobertura de vidro na superfície de abertura e refletor sem isolamento.

O que, fundamentalmente, diferencia esta montagem da primeira, cobertura de vidro na superfície de abertura e refletor isolado, é a transferência de calor através das paredes laterais do coletor, que pode ser significativa, diminuindo a eficiência do equipamento.

Como não há qualquer informação na literatura sobre caso semelhante, procedeu-se à identificação experimental das correntes de convecção internas, com o intuito de desenvolver uma expressão para o coeficiente da transferência de calor convectiva entre o absorvedor e o ar confinado.

Em um coletor CPC truncado de concentração 2,4, com $\theta_{\text{máx}} = 19,4$ graus, $\bar{h} = 8,6$ m, $d = 0,3$ m, $D = 0,72$ m, refletor de alumínio apoiado em superfície de poliéster reforçado com lã de vidro de 0,002 m de espessura, inclinado de 20 graus em relação à horizontal e submetido a dois níveis de temperatura no absorvedor, observou-se, com o auxílio de fumaça, que o ar interno circula sob uma única configuração, acompanhando as fronteiras do coletor, no sentido de sua inclinação com a horizontal.

Utilizando um anemômetro de fio quente, Alnor mod. 8500, e termopares de Cu-Co, fio 24 AWG, com temperatura de referência em banho de gelo e leitura em milivoltímetro digital, Fluke mod. 2100 A, foram realizadas medidas de velocidade e temperaturas do ar interno e do refletor em pontos simétricos de uma mesma seção transversal do coletor, além das temperaturas do absorvedor, cobertura e ambiente (Figura 6). Os perfis de velocidade e temperatura da corrente de ar estão traçados nas Figuras de 7 a 10.

A energia transferida do absorvedor para o ar interno é dada por

$$q_{ci} = h_{ci} \cdot A_a \cdot (t_a - t_{ar}) \quad (51)$$

onde h_{ci} é o coeficiente médio da transferência de calor por convecção natural, podendo ser calculado pela expressão [12]

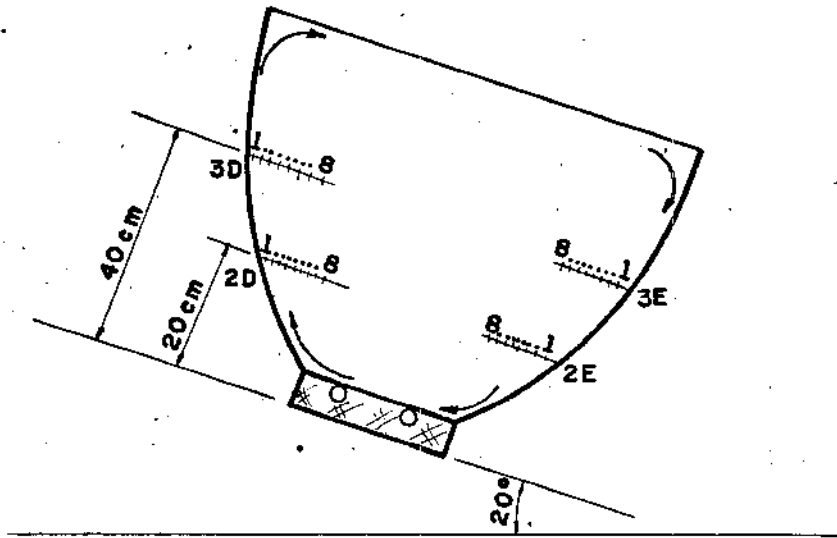


Figura 6 - Distribuição dos pontos de medida de velocidade e temperatura das correntes de convecção, 2a. Montagem.

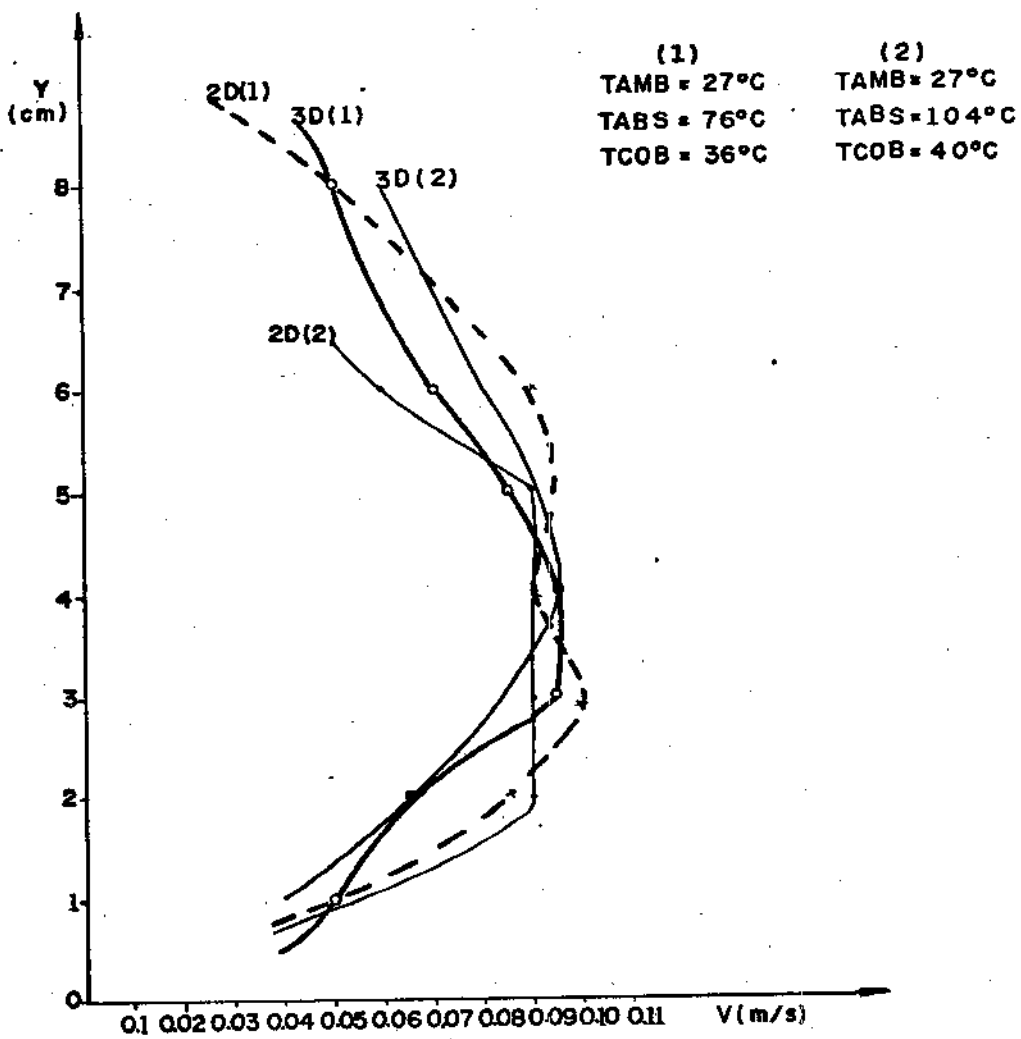


Figura 7 - Perfis de velocidade das correntes de convecção, 2a. Montagem.

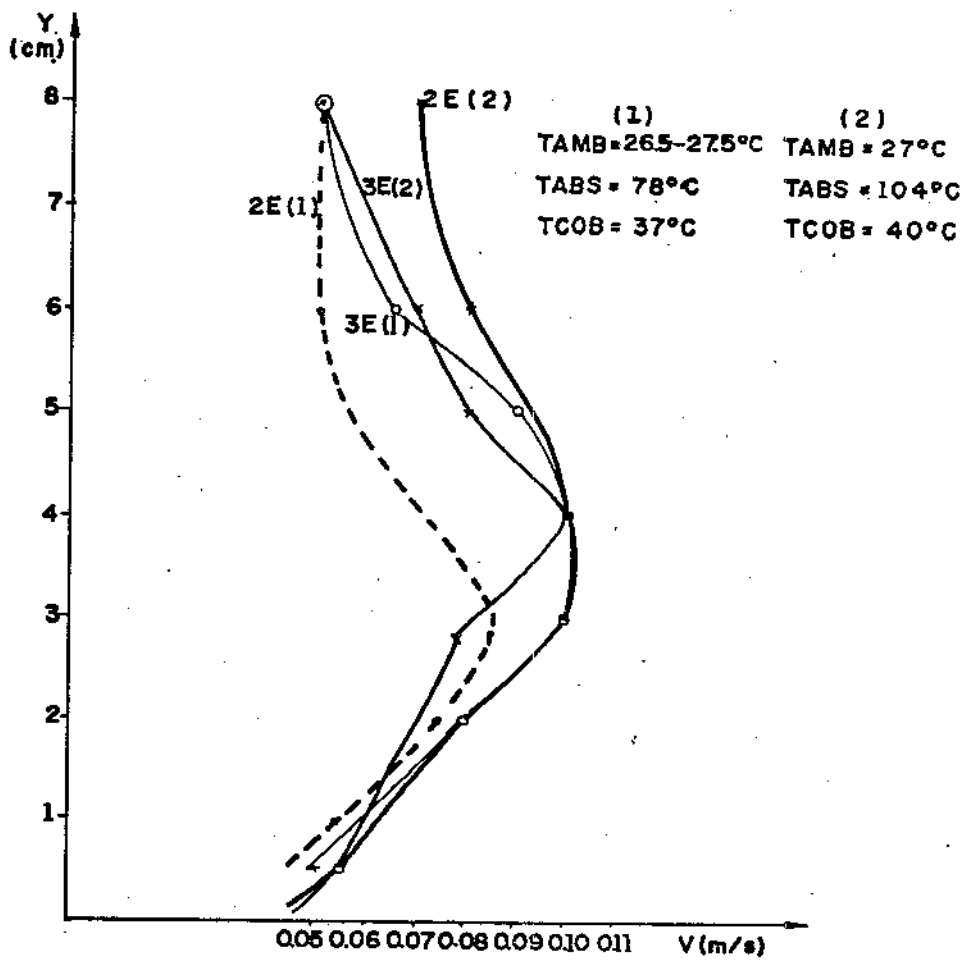


Figura 8 - Perfis de velocidade das correntes de convecção, 2a. Montagem.

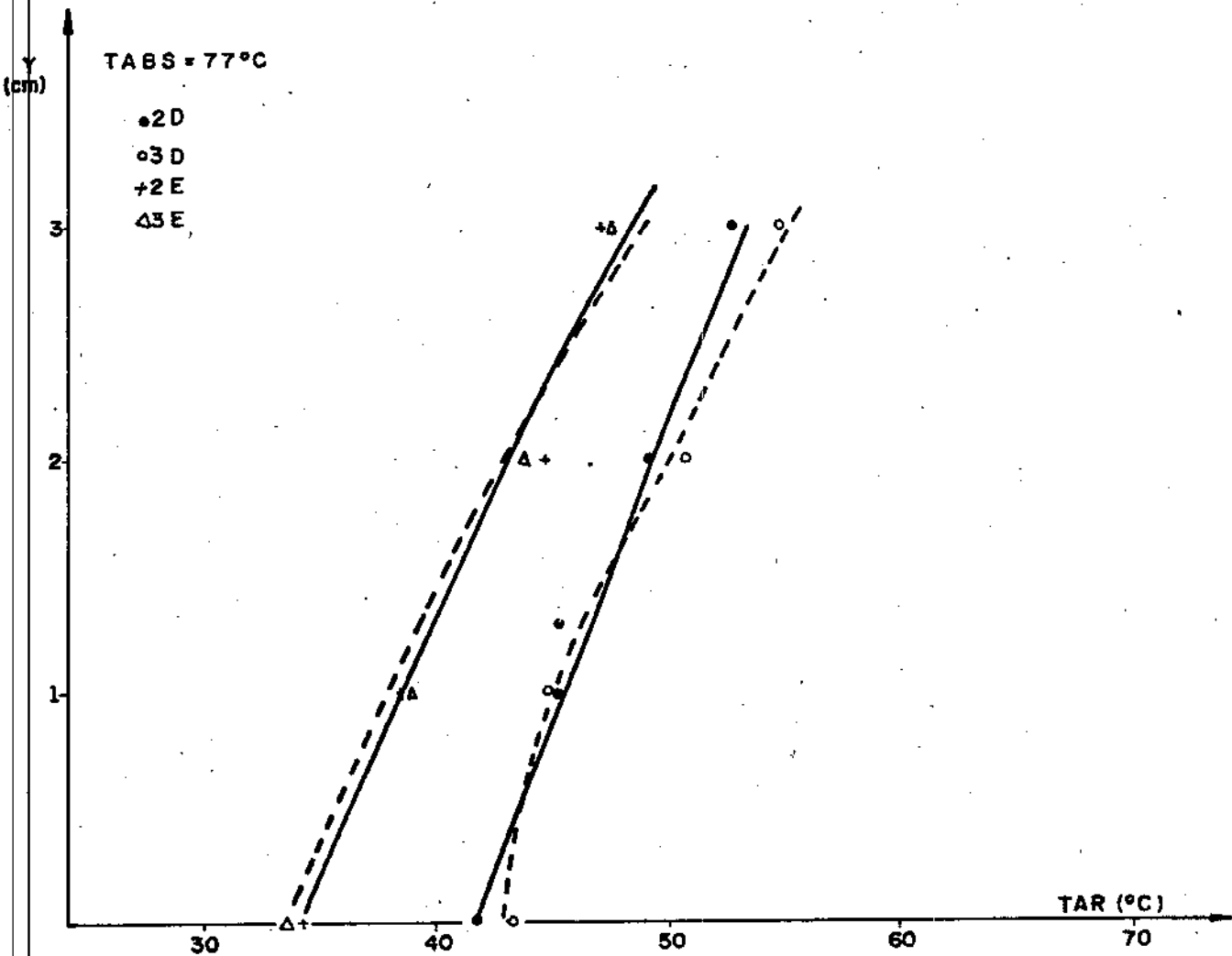


Figura 9 - Perfis de temperatura das correntes de convecção,
2a. Montagem.

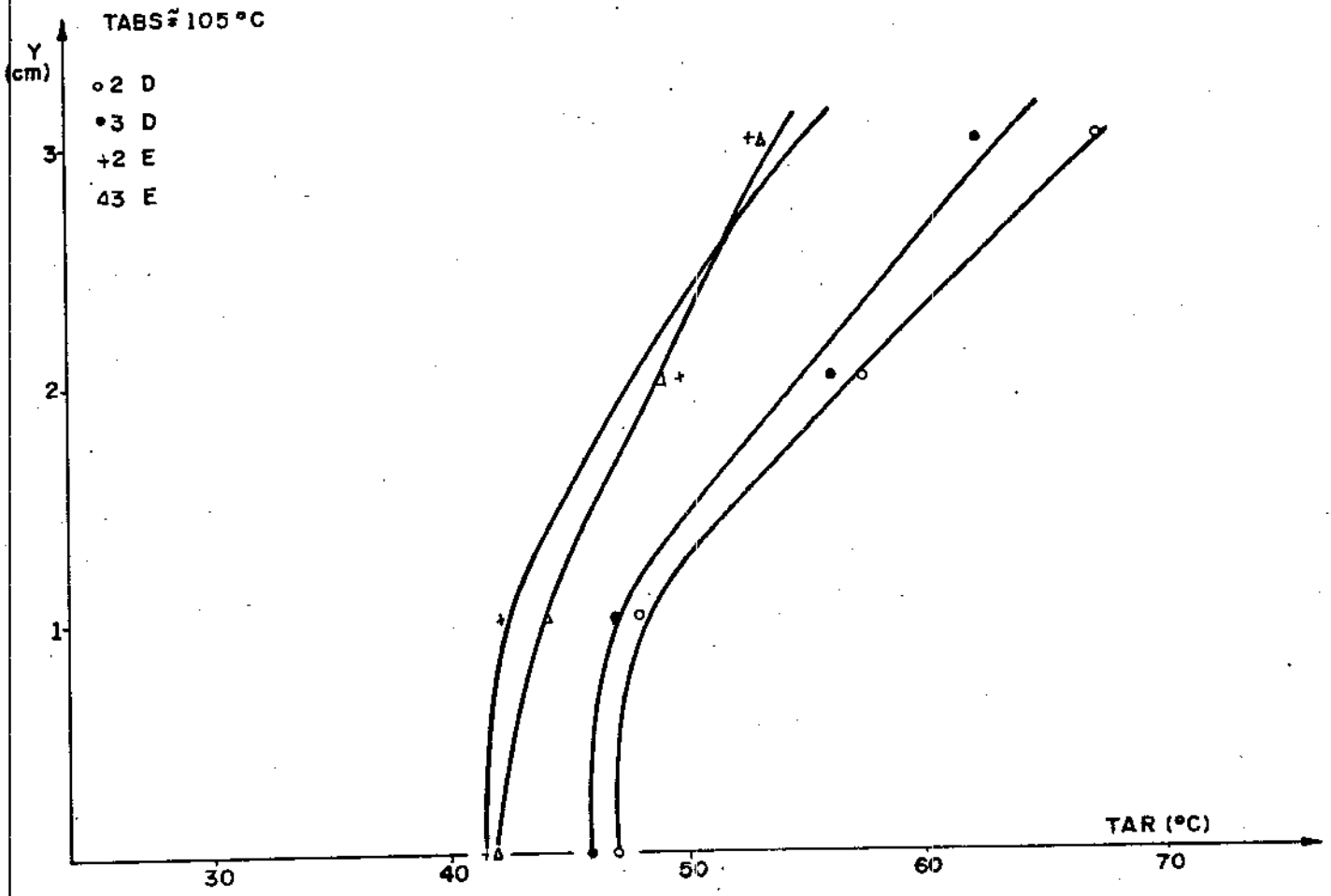


Figura 10 - Perfis de temperatura das correntes de convecção.
2a. Montagem.

$$\bar{N}_{ud} = \frac{h_{ci} \cdot d}{K_{ar}} c (Gr_d Pr_{ar})^a, \quad (52)$$

onde:

Pr_{ar} \equiv número de Prandtl do ar;

c \equiv constante que depende da inclinação da absorvedor, assumindo os valores 0,54 e 0,59 para placas horizontais ou verticais, respectivamente, em escoamento laminar;

a \equiv constante igual a 1,4 para escoamento laminar;

K_{ar} \equiv condutividade do ar imediatamente acima do absorvedor e,

$$Gr_d = g \beta (t_a - t_{ar}) \cdot d^3 / \nu_{ar}^2 \quad (53)$$

Para os dois níveis de temperatura impostos ao absorvedor, variando de 76,5°C a 78,9°C e 101,0°C a 108,3°C, e supondo uma variação linear da temperatura do ar interno junto ao absorvedor, obteve-se a expressão

$$t_{ar} = 0,77 \left(\frac{t_a + t_c}{2} \right) + 7^\circ\text{C} \quad (54)$$

Para o absorvedor inclinado de 20 graus com a horizontal, admitindo para c o valor de 0,55, calculou-se o fluxo de calor do absorvedor para os dois níveis de temperaturas citados. Para

$$t_a = 76,5^\circ\text{C} - 78,9^\circ\text{C}, h_{ci} = 4,16 \text{ w/m}^2\text{ }^\circ\text{C} \text{ e } q_{ci}/A_a = 113 \text{ w/m}^2;$$

$$t_a = 101,0^\circ\text{C} - 108,3^\circ\text{C}, h_{ci} = 4,55 \text{ w/m}^2\text{ }^\circ\text{C} \text{ e } q_{ci}/A_a = 189 \text{ w/m}^2$$

O fluxo de calor através de cada uma das superfícies laterais e da cobertura pode ser estimada se são conhecidos os valores médios da velocidade e temperatura da corrente de ar junto às seções consideradas e admitindo que elas se comportam como placas planas em regime de convecção forçada laminar. O coeficiente médio da transferência de calor é dado por [12]

$$\bar{h}_c = 0,664 \cdot Pr^{1/3} \cdot Rey_L \cdot \frac{K_{ar}}{L}, \quad (55)$$

onde:

K_{ar} \equiv condutividade térmica do ar;

Rey_L \equiv número de Reynolds;

$$\text{sendo, } Rey_L = \frac{\rho_{ar} V_{ar} L}{\mu_{ar}} \quad (56)$$

onde:

ρ_{ar} \equiv densidade do ar;

V_{ar} \equiv velocidade do ar;

μ_{ar} \equiv viscosidade do ar;

L \equiv comprimento das superfícies laterais ou da cobertura, sendo, neste caso, igual a D .

O número de Prandtl, a condutividade térmica, a densidade e a viscosidade do ar são avaliados para a temperatura média da corrente junto a cada seção e para o cálculo do número de Reynolds, a velocidade considerada é a velocidade máxima média na seção.

Para os dois níveis de temperatura impostos ao absorvedor, o fluxo de calor por unidade de área de absorvedor está dado na tabela seguinte.

t_a	t_c	t_{amb}	q_{ci}/A_a			
			LD	LE	COB.	TOTAL
76,5- 78,9	36	27	39,0	46,0	49,0	134,0
101,0-108,3	40	27	60,0	47,0	63,0	170,0

LD \equiv lateral direita; LE \equiv lateral esquerda; COB \equiv cobertura.
 t_a , t_c e t_{amb} em $^{\circ}C$ e q_{ci}/A_a em $watt/m^2$.

Comparando-se os resultados do fluxo total de calor por unidade de área de absorvedor obtidos por métodos distintos, verifica-se que se situam dentro de uma faixa de variação de 10%, afirmando a validade da suposição inicial. Observa-se, ainda, que o fluxo de calor através da cobertura, nos dois casos analisados, representa pouco mais que 1/3 do fluxo total. Este resultado não deve ser generalizado a outros tipos de coletores CPC que tenham características construtivas diferentes do modelo analisado.

As expressões dos coeficientes da transferência de calor radiativa entre o absorvedor e a cobertura, da transferência de calor convectiva e radiativa da cobertura para o ambiente e o céu, respectivamente; e da transferência de calor pela base do coletor são semelhantes às da primeira montagem,

$$h_{ri} = e \cdot \delta \cdot (t_a^2 + t_c^2) \cdot (t_a + t_c) ,$$

$$h_{re} = c \cdot \delta \cdot (t_c^2 + t_{c\text{céu}}^2) (t_c + t_{c\text{céu}}) \frac{(t_c - t_{c\text{céu}})}{(t_c - t_{amb})} ,$$

$$h_{ce} = 5,7 + 3,8 V \quad e$$

$$h_{con} = \frac{K_{isl}}{b} .$$

O circuito térmico associado à montagem está indicado na Figura 11.

As expressões de $(h_{ci})_1$ e $(h_{ci})_2$ são dadas em função de h_{ci} :

$$(h_{ci})_1 = \frac{1}{3} \cdot h_{ci} \cdot \frac{(t_a - t_{ar})}{(t_a - t_c)} ; \quad (57)$$

$$(h_{ci})_2 = \frac{2}{3} \cdot h_{ci} \cdot \frac{(t_a - t_{ar})}{(t_a - t_{amb})} . \quad (58)$$

Determinadas as resistividades térmicas para a montagem, o coeficiente global da transferência de calor é

$$U_G = \left[C/(h_{ri} + h_{ci1}) + 1/(h_{re} + h_{ce}) \right]^{-1} + (h_{ci})_2/C + h_{con}/C \quad (59)$$

A temperatura da cobertura será dada por

$$t_c = \frac{\left[\left(\frac{h_{ri} + h_{ci1}}{C} \right) t_a + (h_{re} + h_{ce}) \cdot t_{amb} + I \cdot (1 - \tau_a) \right]}{\left[\left(\frac{h_{ri} + h_{ci}}{C} \right) + (h_{re} + h_{ce}) \right]} \quad (60)$$

3a. Montagem - cobertura de vidro imediatamente acima do absorvedor.

Nesta montagem o circuito térmico equivalente é semelhante ao da primeira montagem, assim como as expressões dos coeficientes de transferência de calor convectiva e radiativa da cobertura

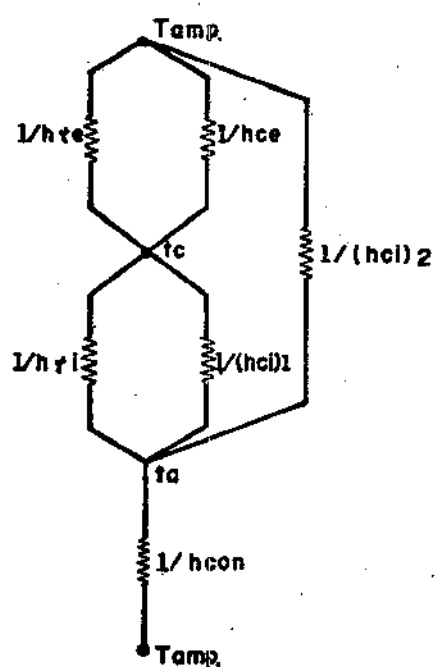


Figura 11 - Circuito térmico equivalente para 2a. Montagem.

para o ambiente e o céu, respectivamente, e o coeficiente de transferência de calor por condução pela base do coletor. Então,

$$h_{ce} = 5,8 + 3,7 \cdot V \quad ;$$

$$h_{re} = \epsilon_c \cdot \delta \cdot (t_c^2 + t_{c\acute{e}u}^2) \cdot (t_c + t_{c\acute{e}u}) \cdot \left(\frac{t_c \cdot t_{c\acute{e}u}}{t_c - t_{amb}} \right) \quad ;$$

$$h_{con} = \frac{K_{isl}}{b} \quad .$$

A transferência de calor por convecção entre o absorvedor e a cobertura é determinada com precisão utilizando-se os mesmos dados da primeira montagem, visto que os resultados experimentais considerados se adequam perfeitamente ao caso presente. Logo,

$$h_{ci} = \frac{K_{ar}}{e} \left\{ 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708f(\alpha)}{Racosa} \right) \cdot \left(1 - \frac{1708}{Racosa} \right) + \left[\left(\frac{Racosa}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \right\} ,$$

para $\alpha \leq 60^\circ$,

sendo

$$Gr = \frac{g \beta (t_a - t_c) e^3}{\nu^2} \quad (61)$$

onde: $e \equiv$ distância entre o absorvedor e a cobertura.

A troca líquida de radiação entre o absorvedor e a cobertura se reduz ao problema de duas superfícies planas paralelas com fator de forma unitário. O coeficiente de transferência de calor é

$$h_{ri} = \frac{\delta \cdot (t_a^2 + t_c^2) \cdot (t_a + t_c)}{1/\epsilon_a + 1/\epsilon_c - 1} \quad (62)$$

O coeficiente global de transferência de calor resulta, então, em

$$U_G = \left[\left(\frac{1}{(h_{ri} + h_{ci})} + \frac{1}{(h_{re} + h_{ce})} \right)^{-1} + h_{con} \right] \cdot \frac{1}{C} \quad (63)$$

e a temperatura local da cobertura, para uma certa seção transversal do coletor,

$$t_c = \frac{(h_{ri} + h_{ci}) \cdot t_a + I \cdot (1 - \tau_a) \cdot (\rho_{rs})^r \cdot \gamma + (h_{re} + h_{ce}) \cdot t_{amb}}{(h_{ri} + h_{ci} + h_{re} + h_{ce})} \quad (64)$$

CAPÍTULO III

III - CONSTRUÇÃO DOS PROTÓTIPOS E INSTALAÇÃO DE TESTE

III-1 - Construção dos Protótipos

Os protótipos construídos para os testes de desempenho térmico são modelos truncados de concentração média, 2,4 e 5,3, com ângulos de aceitação de 19,47 graus e 8,21 graus, o que resultaria, respectivamente, em modelos integrais, nas concentrações 3,0 e 7,0.

Procurou-se inicialmente construir unidades de pequeno porte com várias "células", entre 5 e 8, cada uma constituindo um pequeno coletor CPC, dispostas paralelamente e envoltas por uma caixa que sustenta a cobertura de vidro junto ao plano de abertura, isolada termicamente nos laterais e base. A tentativa se mostrou mal sucedida pois o refletor disponível, folha de alumínio polido de 0,1 mm de espessura, é flexível e necessita ser aderido a um suporte cujo perfil represente as parábolas laterais do coletor. Com os recursos disponíveis não foi possível construir tal suporte com a precisão requerida.

Optou-se, então, por construir unidades maiores, com as seguintes dimensões:

CPC concentração 2,4	-	d = 0,3 m
		D = 0,72 m
		\bar{h} = 0,65 m
		Ac = 4,2 m ²

CPC concentração 5,3	-	d = 0,15 m
		D = 0,79 m
		\bar{h} = 0,70 m
		Ac = 4,2 m ²

O suporte dos refletores foi moldado em poliéster reforçado com lã de vidro, de espessura média 0,002 m, de tal forma que, com três pontos de apoio longitudinais, na base e extremidades laterais, interligados entre si, o conjunto adquirisse rigidez estru

tural, permitindo ser inclinado sem se deformar. O refletor, folha de alumínio polida, foi aderido ao suporte com adesivo à base de silicone, que suporta temperaturas até 100°C.

Os absorvedores, isolados inferiormente com 0,05 m de lâmina de vidro, são do tipo tubo aletado. Para o coletor de concentração 2,4, construiu-se o absorvedor com dois tubos de cobre soldados, com estanho, a uma chapa também de cobre. O coletor de concentração 5,3 utiliza um perfil industrializado de alumínio, tipo "brise" com tubo único no centro da chapa, constituindo uma só peça.

Como cobertura transparente utilizou-se vidro comum, 0,003 m de espessura, que, quando montado na superfície de abertura, se apoia em esquadrias de alumínio fixadas no suporte do refletor. Para os testes de desempenho com cobertura próxima ao absorvedor, as placas de vidro, com guarnições de borracha em suas laterais, foram colocadas a 0,02 m do absorvedor (Figura 12).

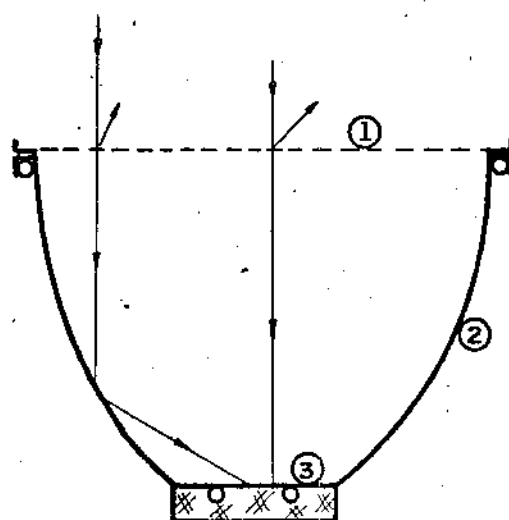
Testes em espectrofotômetro indicam, para os absorvedores pintados com esmalte sintético preto fosco, para o refletor e a cobertura de vidro de 3 mm, na faixa de radiação incidente que corresponde ao espectro solar, os seguintes valores, para incidência normal:

$$\alpha_a = 0,92 \quad ;$$

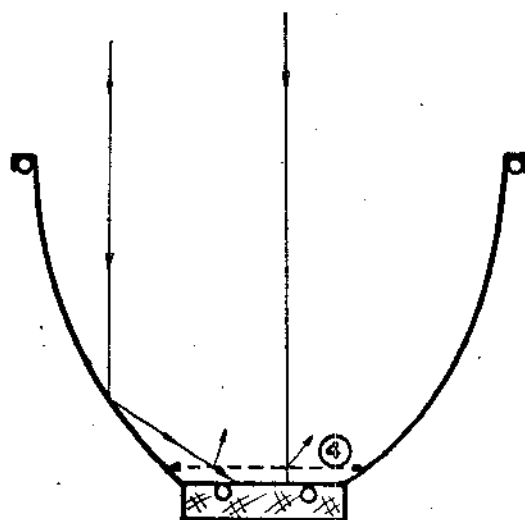
$$\rho_{rs} = 0,85 \quad e$$

$$\tau_c = 0,87 \quad .$$

Para a montagem com cobertura próxima ao absorvedor, uma fração maior da potência solar incidente é refletida ou absorvida pela cobertura, já que parte da radiação solar atinge a cobertura após a reflexão nas laterais do coletor. O ângulo médio de incidência varia com a concentração e estudos realizados [13] indicam, para coletores CPC truncados, concentrações 2,4 e 5,3, de "meio ângulo" de aceitação 19,4 graus e 8,21 graus, respectivamente, os valores 26,8 graus e 35,27 graus.



- 1 - Cobertura
- 2 - Refletor
- 3 - Absorvedor



- 4 - Cobertura

Figura 12 - Montagens dos coletores CPC : cobertura na superfície de abertura e próxima ao absorvedor.

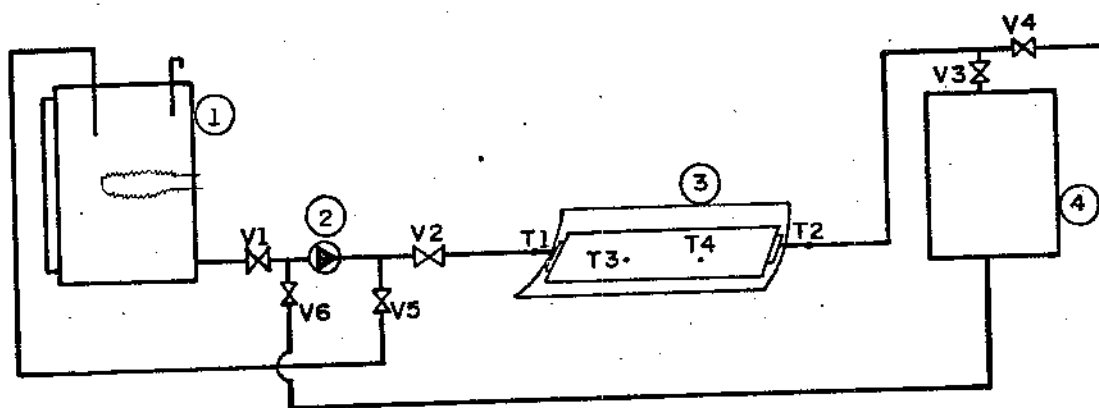
A oxidação dos refletores de alumínio, sob a ação do ambiente, reduzindo sua refletividade, constitui-se em uma limitação séria para a sua utilização em concentradores. A utilização de resinas transparentes como protetor anti-oxidação ainda não conduziu a resultados satisfatórios pois, além de reduzir a refletividade, sofre a ação progressiva da radiação ultravioleta proveniente do sol. A utilização de plásticos especiais com deposição a vácuo de película de alumínio, por exemplo "mylar aluminizado", conduz a melhores resultados de eficiência ótica e acabamento da superfície refletora, mas ainda não se conhece resultados experimentais da ação da radiação ultravioleta sobre tal produto.

III-2 - A Instalação de Teste

Para testar os protótipos foram utilizadas duas instalações que diferem entre si somente quanto ao fluido de transferência utilizado: água para temperaturas até 90°C e óleo de silicone para temperaturas acima de 90°C (Figura 13). O fluido de transferência é aquecido, em tanque isolado, por meio de resistência elétrica, sendo então bombeado através dos coletores. O fluido é então recolhido em um reservatório, sendo novamente bombeado ao tanque, isolado após o término do teste. A vazão através dos coletores foi fixada de acordo com sugestões do Center of Building Technology, Institute of Applied Technology, National Bureau of Standards [14], em uma primeira tentativa de normalizar ensaios de coletores, e medida, após a passagem pelo coletor, em vaso graduado em centilitros.

A temperatura do fluido de transferência foi registrada imediatamente antes e após sua passagem pelo coletor, por termopares de Cu-Co, fio 24 AWG, calibrados, com leitura em milivoltmetro digital Fluke mod. 2100 A. Foram registradas ainda, em cada teste, a temperatura em dois pontos do absorvedor, distribuídos equidistantemente em relação ao comprimento do absorvedor.

A radiação solar incidente no plano de abertura do coletor foi medida por um pireliômetro EPPLEY, mod. PSP e constante $9,86 \times 10^{-3}$ mv/watt/m², e registrada em milivoltmetro KEYTLEY, mod. 171.



- 1 - Tanque aquecimento.
- 2 - Bomba
- 3 - Coletor
- 4 - Tanque descarga
- T_1, T_2, T_3, T_4 - Termopares
- $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ - Válvulas

Figura 13 - Esquema da instalação de teste.

Os testes em cada nível de temperatura tiveram duração aproximada de 15 minutos e foram realizados em dias de céu claro, sendo que a maior variação da radiação incidente no espaço de duração do teste não excedeu 2,5% do menor valor registrado. Para as temperaturas de entrada e saída do fluido, as variações registradas foram, respectivamente, 3,0% e 3,6%.

CAPÍTULO IV

IV - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DA SIMULAÇÃO

Foram realizados medidas experimentais do desempenho térmico instantâneo para a segunda e terceira montagens do coletor de concentração 2,43 e para a segunda montagem do coletor de concentração 5,3. As Figuras 14 a 19 apresentam os resultados das medidas experimentais e das simulações para os dois níveis de concentração. Na Figura 14 a linha tracejada representa o desempenho teórico de um coletor de placa plana, uma cobertura e absorvedor não-seletivo, a título de comparação.

A utilização de absorvedor com deposição seletiva é fator importante no desenvolvimento dos coletores de parábola composta, aumentando sobremaneira sua eficiência.

As Figuras 20 a 22 mostram os resultados de simulação para absorvedor seletivo, $\epsilon_a = 0,87$ e $\epsilon_a = 0,17$, nos modelos de concentração 2,43 e 5,3. A linha tracejada da Figura 18 representa o desempenho teórico de um coletor de placa plana com absorvedor seletivo.

Em todos os gráficos plota-se a eficiência contra a diferença entre as temperaturas do absorvedor e ambiente dividida pela radiação incidente.

Os resultados apresentados pelo coletor de parábola composta de concentração 2,43, experimentais e teóricos, pouco diferem para as três montagens. Entre a primeira e a segunda montagens, a diferença de eficiência se amplia de 2,5% a 7% entre os níveis de temperatura do absorvedor de 70°C a 127°C, indicando pequena variação da transferência de calor convectiva no interior do coletor para refletor isolado e sem isolamento.

Para a montagem com cobertura próxima ao absorvedor, o coletor opera com eficiência menor que o coletor sem isolamento lateral até uma temperatura do absorvedor igual a 95°C, onde a eficiência de ambos é 36%. Para temperaturas superiores sua eficiência é maior, aproximando-se gradativamente da eficiência do coletor isolado lateralmente.

C = 2.43
1ª MONTAGEM: COM ISOLAMENTO LATERAL
I = 1000 watt/m²
● SIMULAÇÃO
tamb. 27°C

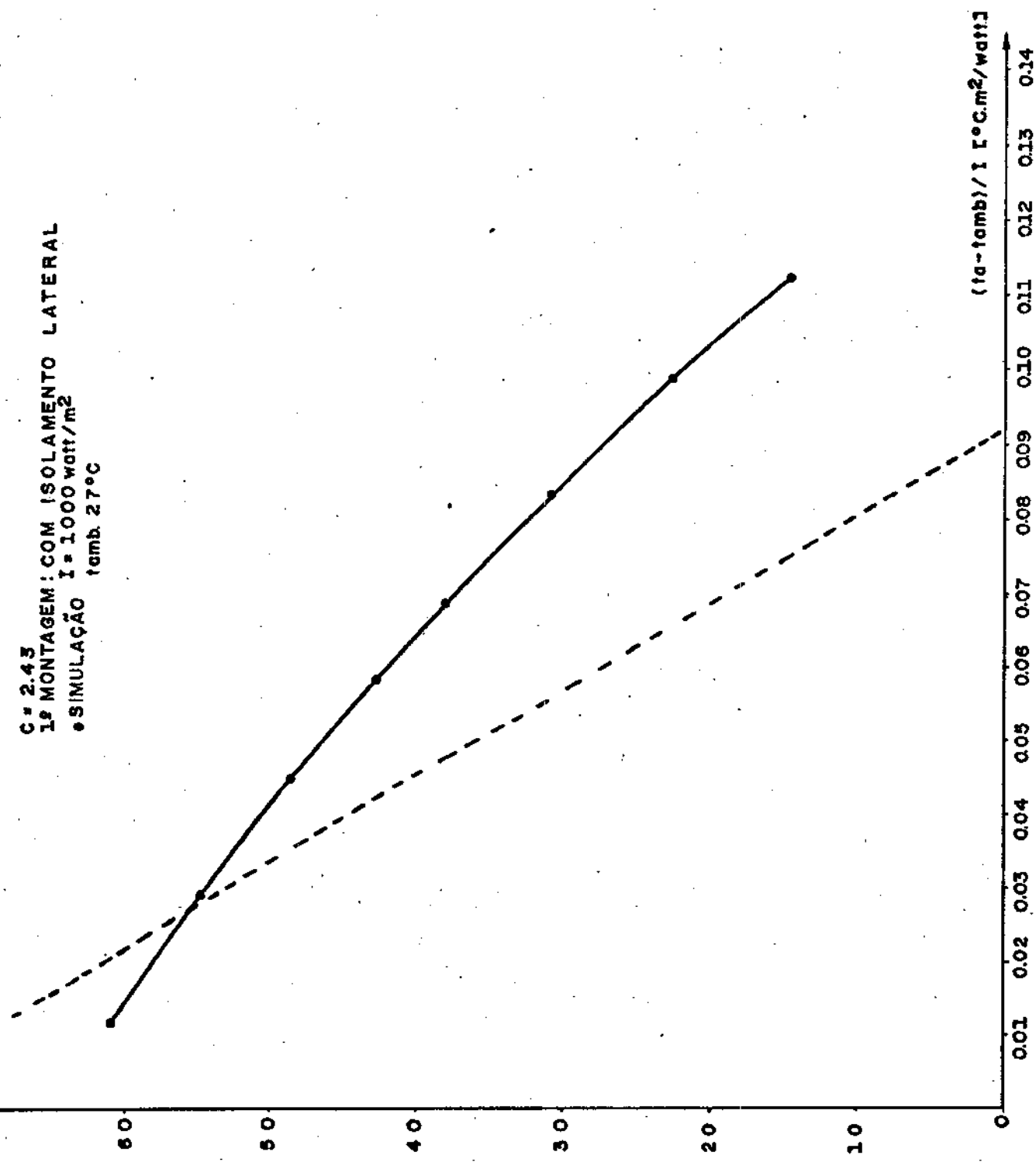
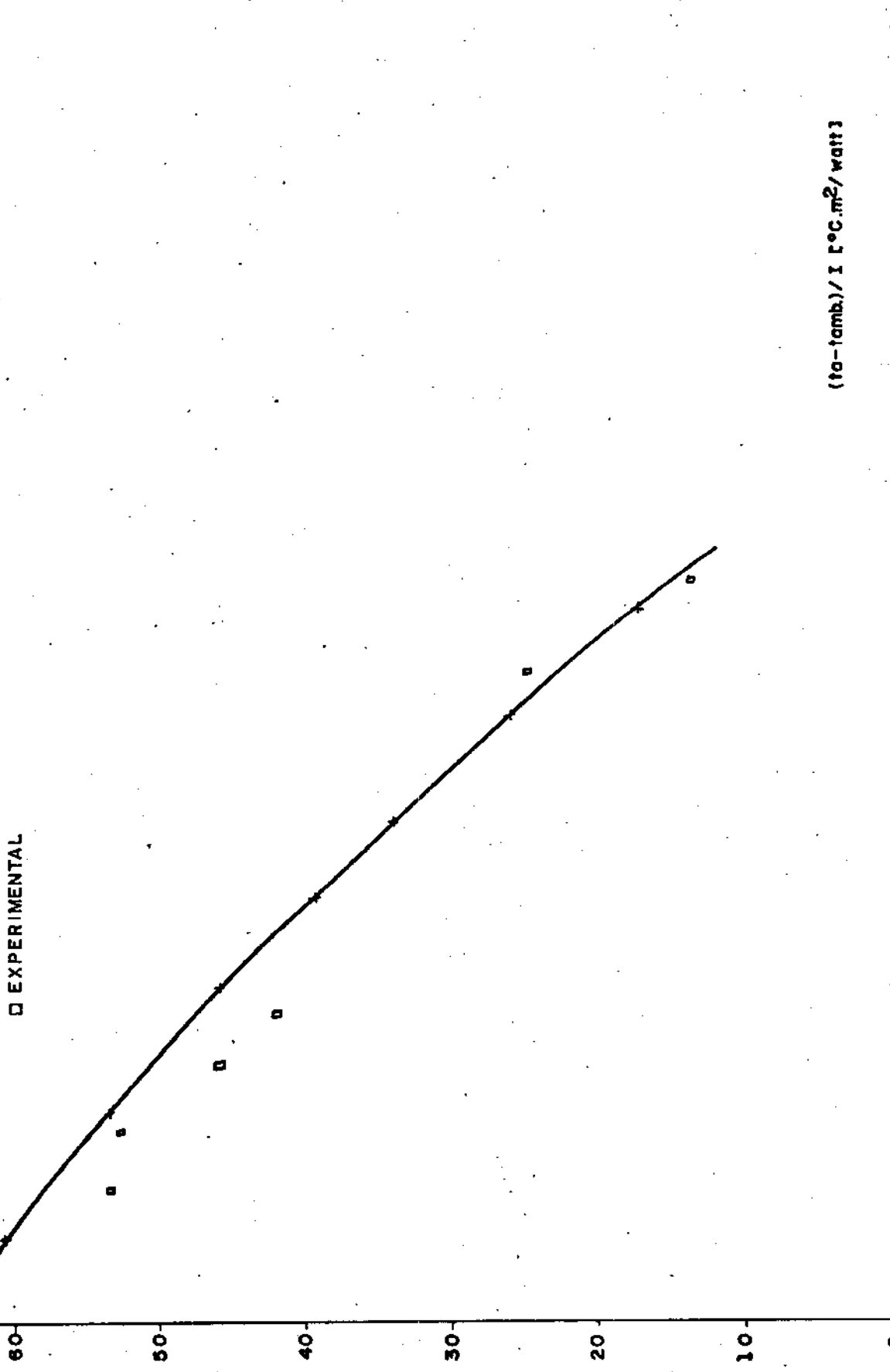


Figura 14 - Eficiência do coletor CPC.

η 70

C# 2.43
2ª MONTAGEM: SEM ISOLAMENTO LATERAL
+ SIMULAÇÃO $I = 1000 \text{ watt/m}^2$
tamb. 27°C
□ EXPERIMENTAL



$(t_o - t_{amb}) / I$ [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 / \text{watt}$]

0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.10 0.11 0.12 0.13 0.14 0.15 0.16 0.17

Figura 15 - Eficiência do coletor CPC.

C = 2.43

3ª MONTAGEM: COBERTURA PRÓXIMA AO ABSORVEDOR
o SIMULAÇÃO [I = 1000 watt / m²
tamb = 27°C

Δ EXPERIMENTAL

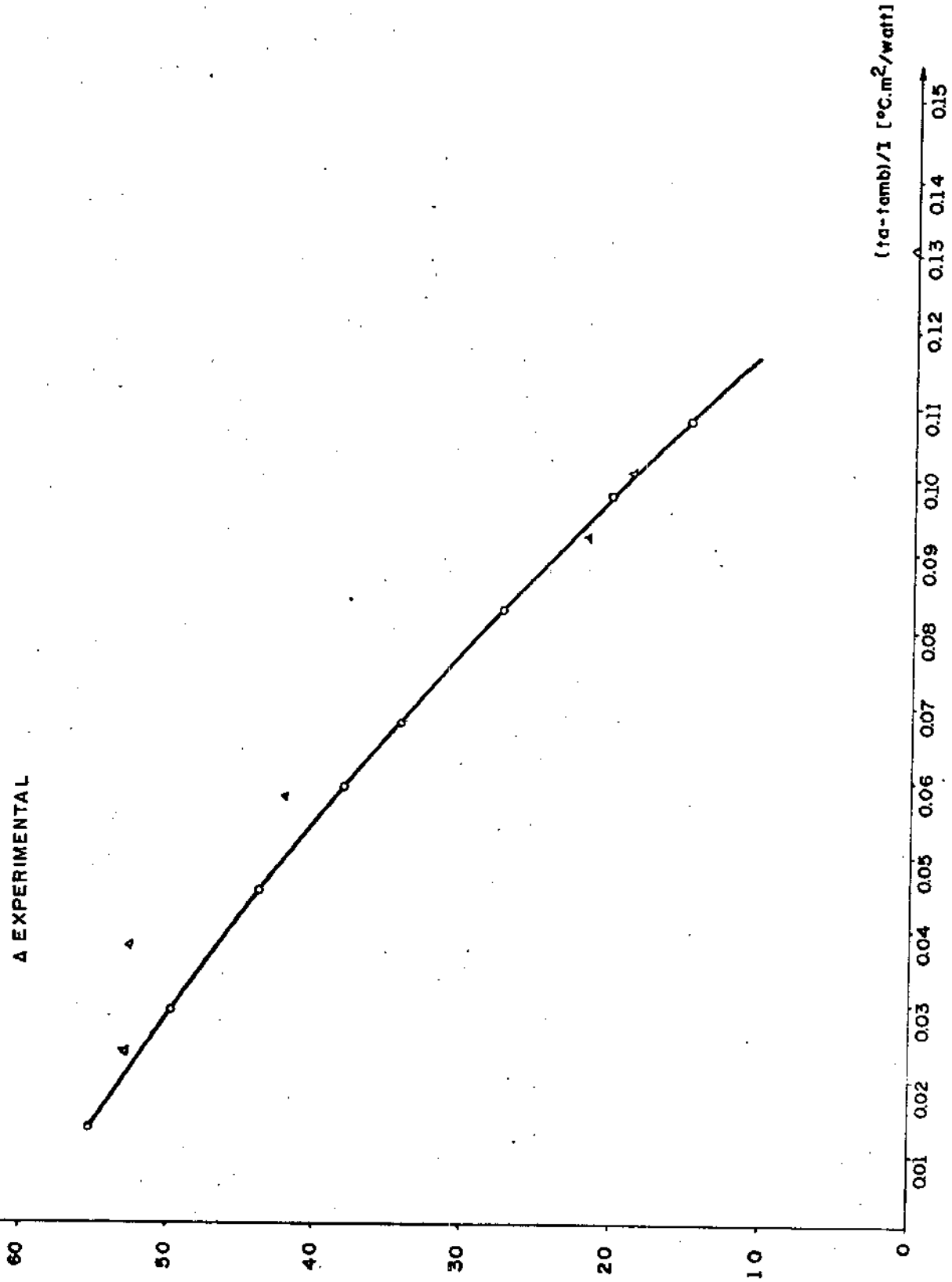


Figura 16 - Eficiência do coletor CPC.

C = 5.3
 1ª MONTAGEM: COM ISOLAMENTO LATERAL
 I = 1000 watt/m²
 • SIMULAÇÃO Tamb. 27°C

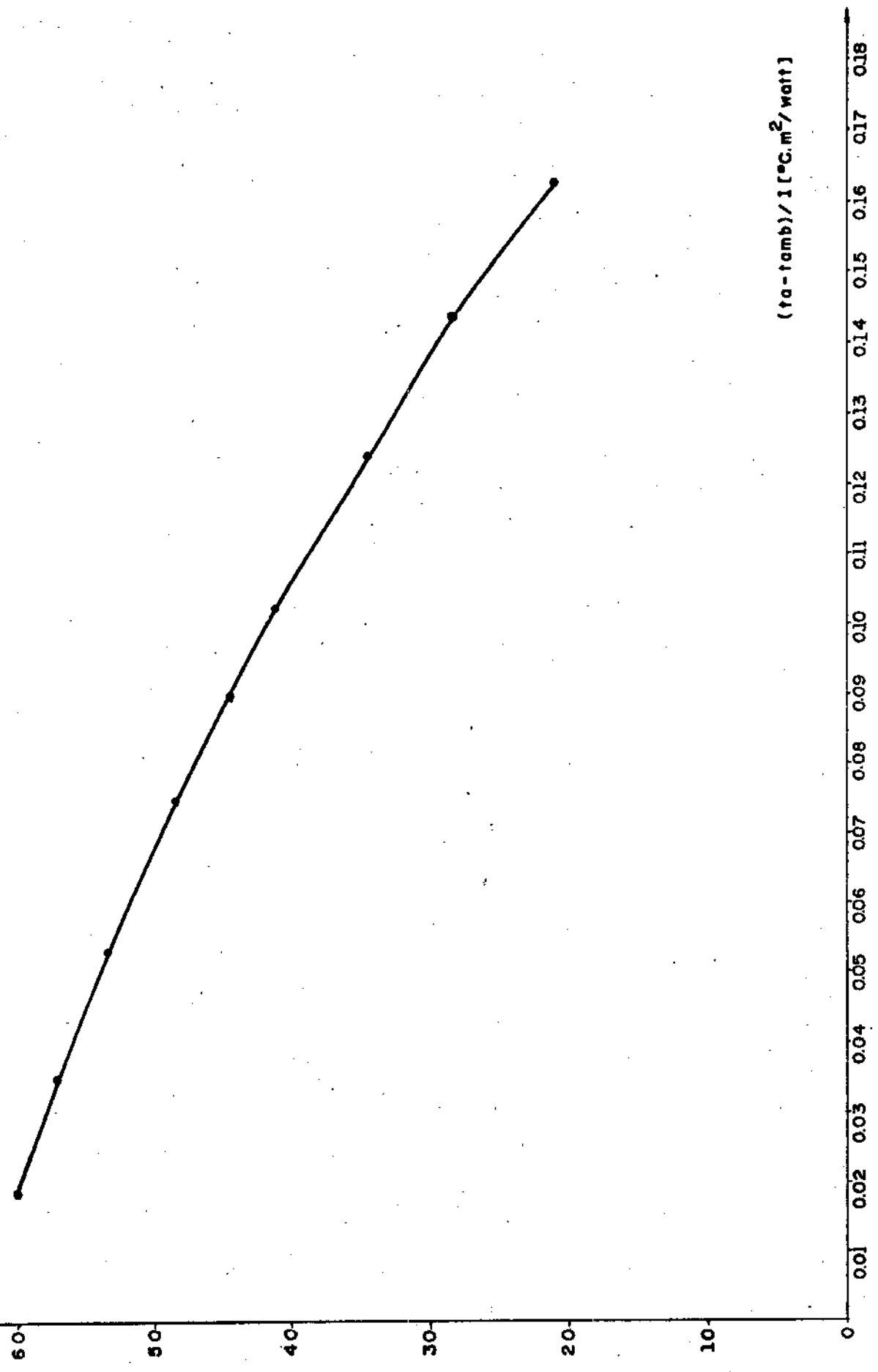


Figura 17 - Eficiência do coletor CPC.

C = 5.3
 2ª MONTAGEM: SEM ISOLAMENTO LATERAL
 + SIMULAÇÃO $I = 1.000 / m^2$
 $t_{amb} = 27^\circ C$
 □ EXPERIMENTAL

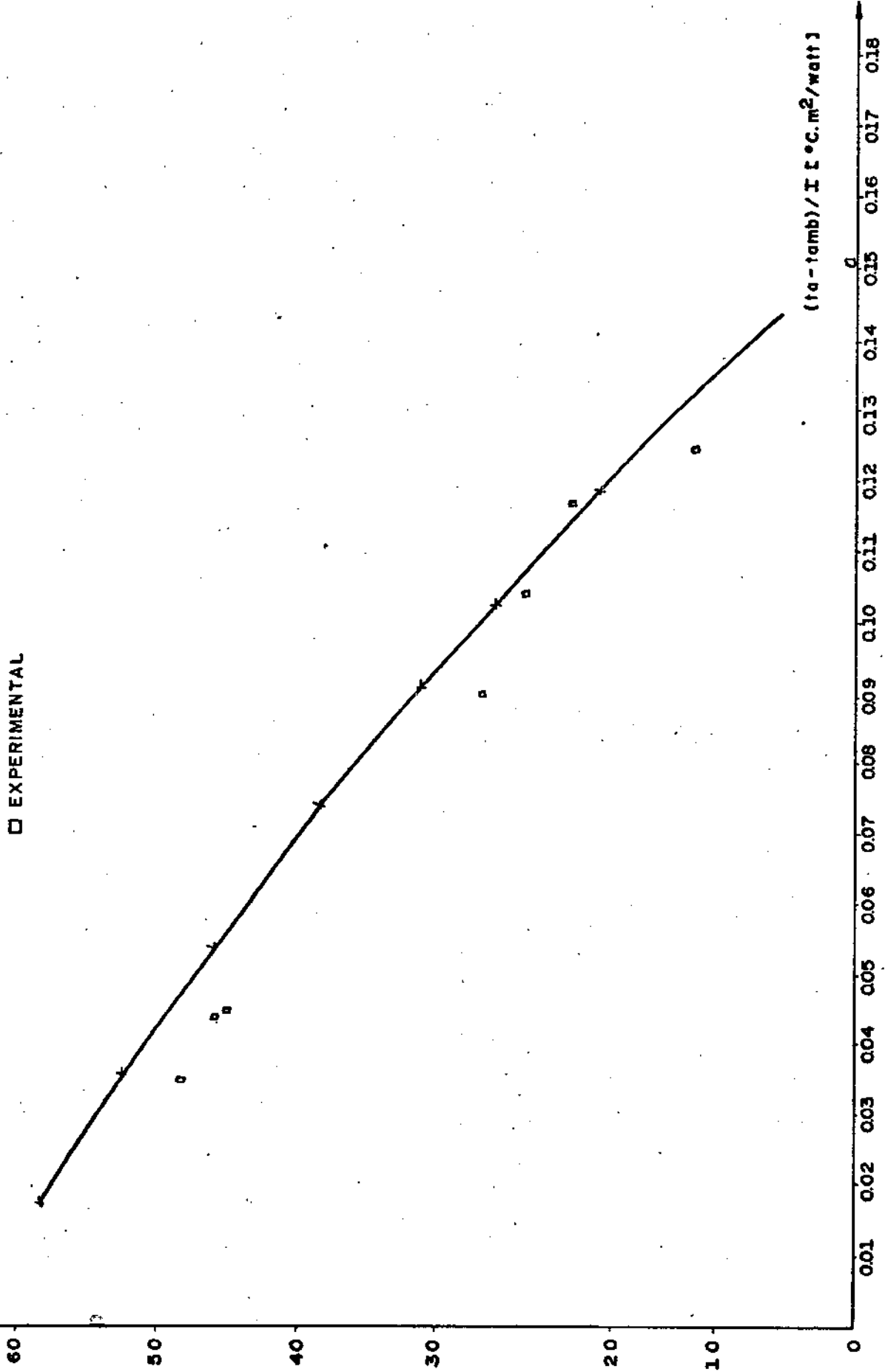


Figura 18 - Eficiência do coletor CPC.

$C = 5.3$
 3ª MONTAGEM: COBERTURA PRÓXIMA AO ABSORVEDOR
 $I = 1000 \text{ watt/m}^2$
 • SIMULAÇÃO $t_{amb.} = 27^\circ\text{C}$

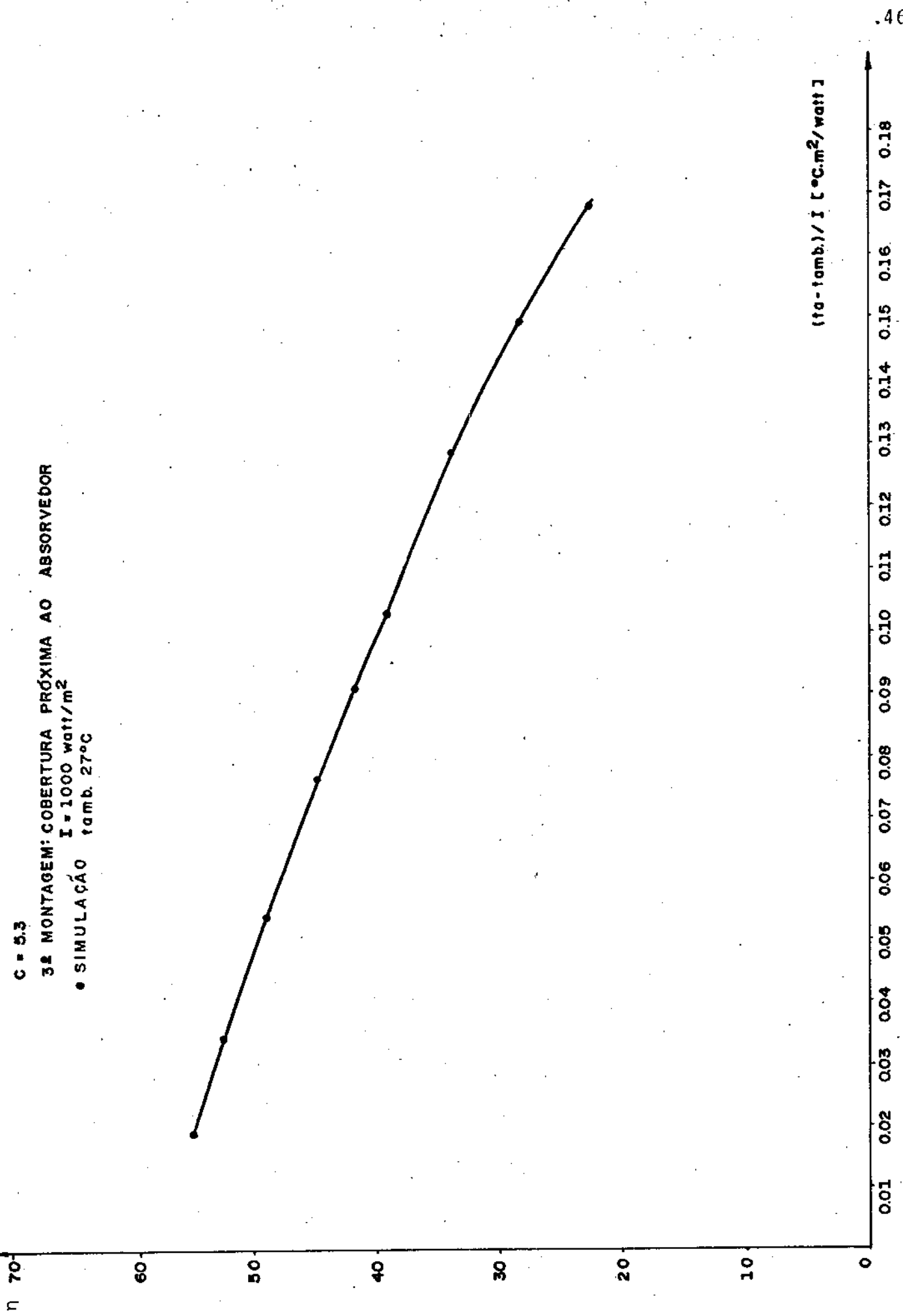


Figura 19 - Eficiência do coletor CPC.

1ª MONTAGEM: COM ISOLAMENTO LATERAL

$I = 1000 \text{ watt/m}^2$

$t_{amb} = 27^\circ\text{C}$

$\alpha = 0.87$

$\epsilon = 0.17$

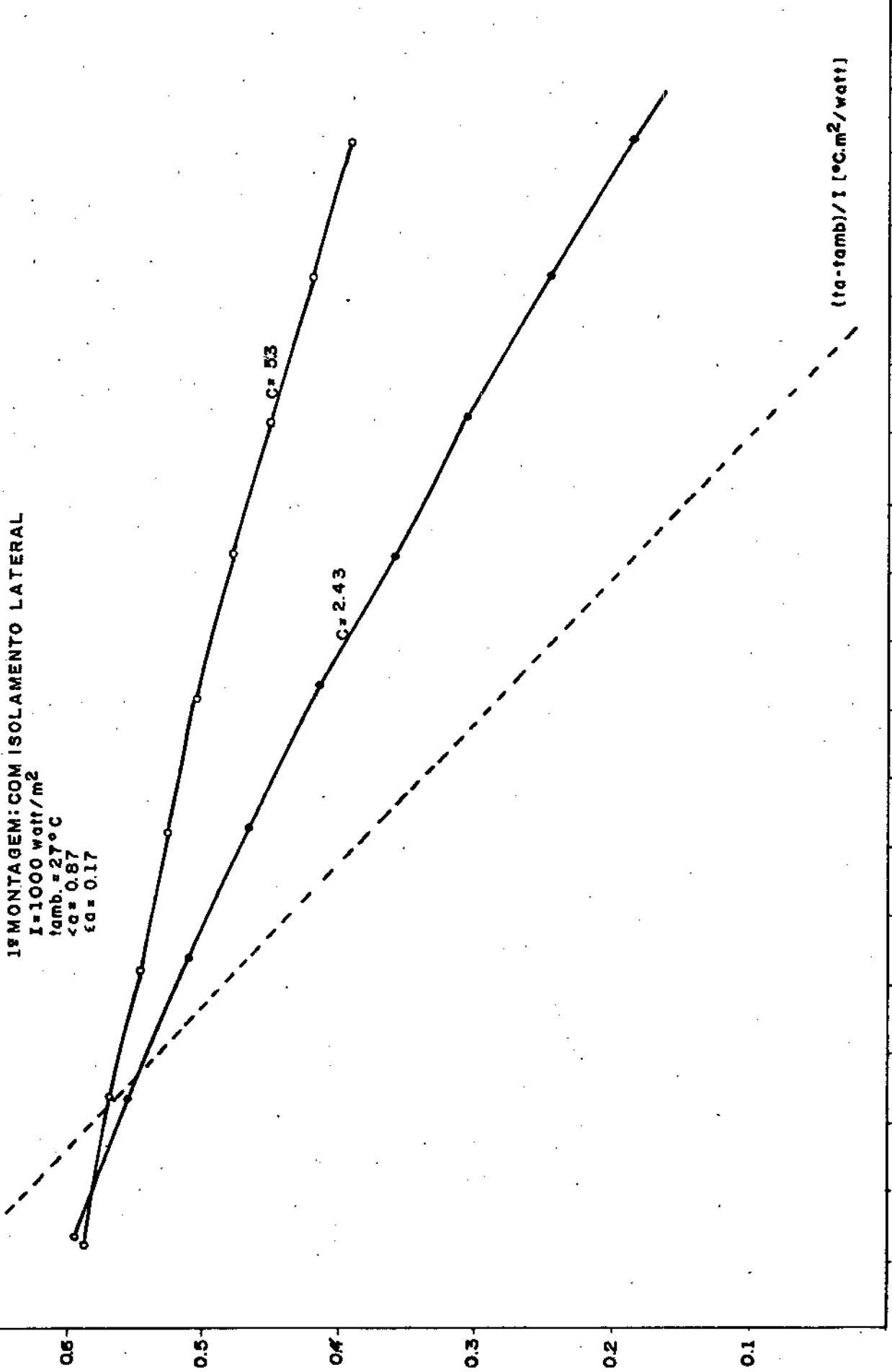


Figura 20 - Eficiência do coletor CPC.

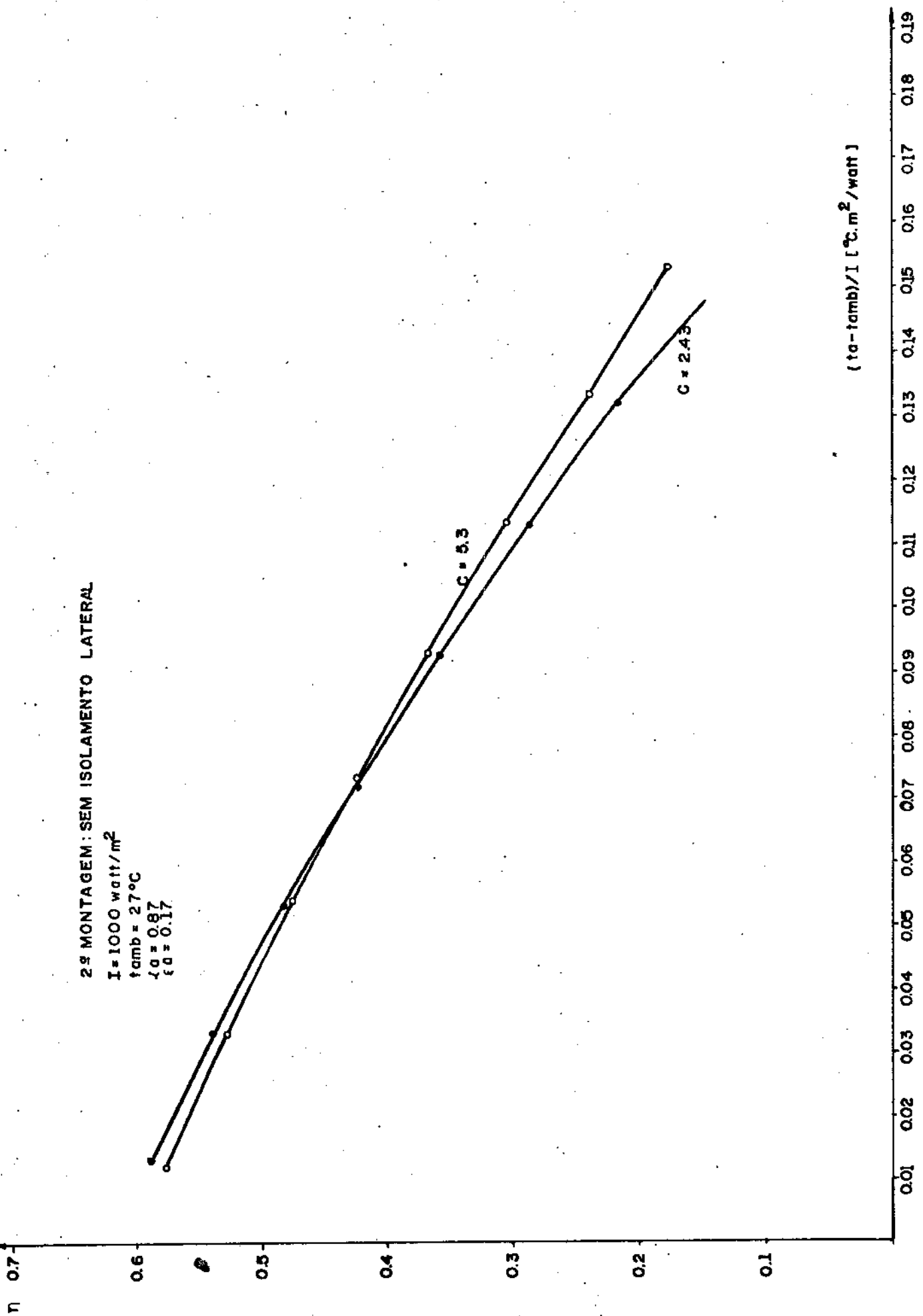


Figura 21 - Eficiência do coletor CPC.

3ª MONTAGEM: COBERTURA PRÓXIMA AO ABSORVEDOR

$I = 1000 \text{ watt/m}^2$

$t_{amb} = 27^\circ\text{C}$

$\Delta a = 0.87$

$\epsilon a = 0.17$

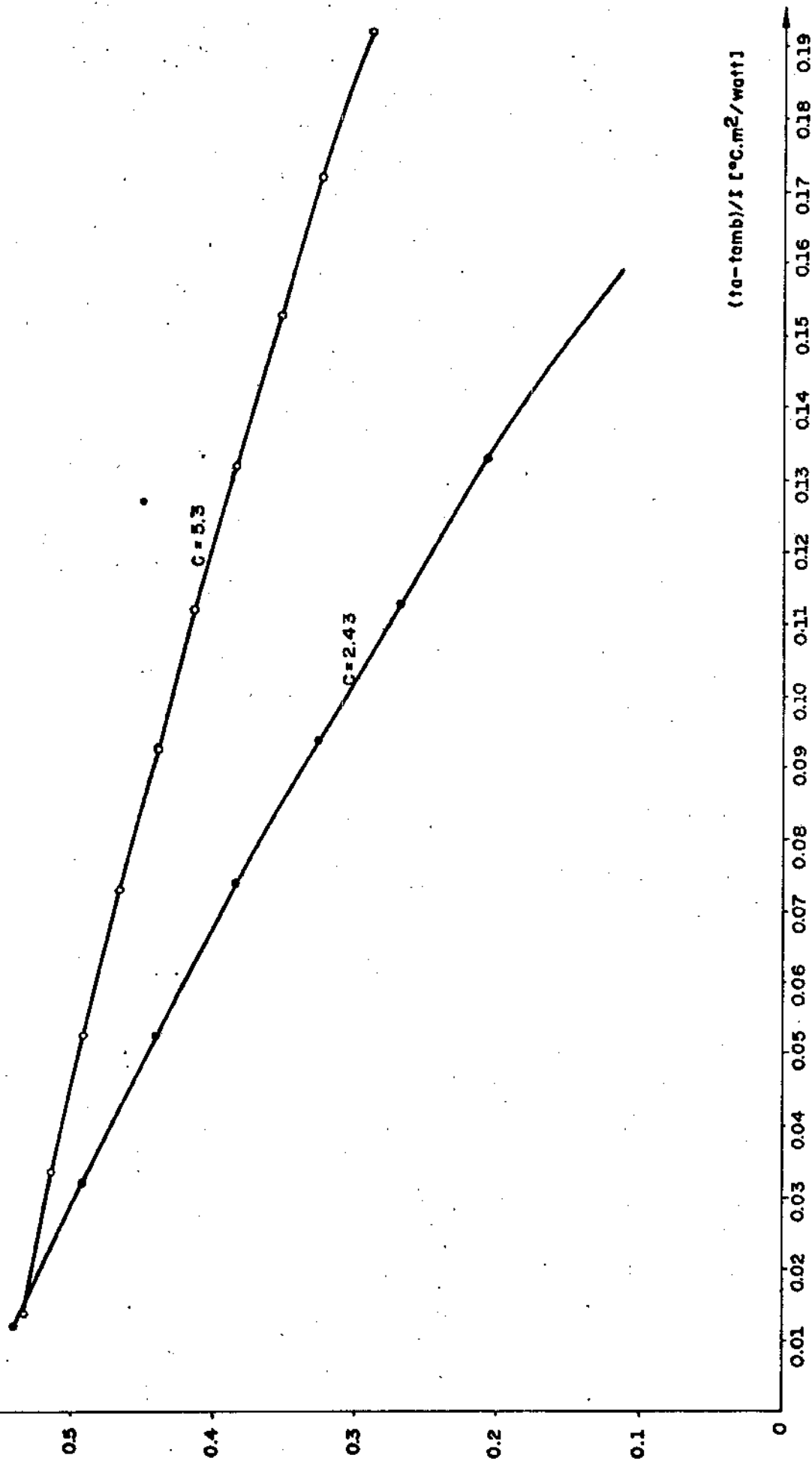


Figura 22 - Eficiência da coletor CPC.

Todas as três montagens do coletor CPC de concentração 2,43 apresentam eficiências superiores ao coletor de placa plana de cobertura simples e absorvedor não seletivo para temperaturas do absorvedor superiores a 60°C. Para a temperatura do absorvedor igual a 100°C os resultados indicam uma eficiência de 17% para o coletor de placa plana e 32% para o coletor CPC de concentração 2,43, 3ª montagem.

Os resultados experimentais e de simulação para o coletor CPC de concentração 5,3 mostram equivalência no desempenho térmico instantâneo dos modelos com isolamento lateral e cobertura próxima ao absorvedor. A eficiência apresentada pelo modelo sem isolamento lateral indica que é considerável a transferência de calor pelas laterais do coletor, sendo seu desempenho pouco melhor que o CPC de concentração 2,43 com isolamento lateral.

Estas observações são extensivas aos resultados da simulação para absorvedor seletivo, naturalmente para níveis superiores da temperatura do absorvedor, e pode-se concluir que a montagem mais adequada do coletor de parábola composto, por ser mais simples e envolver menor custo, é a que utiliza cobertura próxima ao absorvedor.

CAPÍTULO V

V - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi analisado o desempenho térmico instantâneo do coletor de parábola composta - coletor de Winston - para três montagens distintas: cobertura de vidro no plano de abertura e refletor isolado, cobertura de vidro no plano de abertura e refletor sem isolamento e cobertura de vidro imediatamente acima do absorvedor. Resultados experimentais do desempenho para a segunda e terceira montagens são apresentados, assim como análise teórica do desempenho térmico instantâneo considerando absorvedor seletivo.

Os gráficos foram apresentados na forma usual de eficiência contra diferença de temperaturas do absorvedor e ambiente sobre a radiação total incidente, sendo plotados também curvas-padrão de eficiência de coletores de placa plana, com e sem seletividade, a título comparativo.

Dos resultados apresentados concluiu-se que a montagem mais adequada para os coletores de parábola composta, entre as analisadas, é a que utiliza cobertura de vidro imediatamente acima do absorvedor.

A análise da distribuição da radiação no absorvedor e do ângulo de incidência na cobertura de vidro, para a terceira montagem, deve estabelecer condições ideais para a distribuição dos tubos do absorvedor e para a curvatura da cobertura de vidro, aumentando a eficiência de captação da placa absorvedora e minimizando a potência refletida na cobertura. Estes estudos estão em andamento no Grupo de Energia Solar da UNICAMP.

A inclusão de superfícies seletivas mostra-se promissora e os estudos técnicos relacionados estão em fase final. Coletores CPC de concentração 4, projetados a partir destes estudos, estão em fabricação para montagem em duas plantas experimentais: um protótipo de gerador de vapor e um ciclo de absorção utilizando a mistura amônia-água.

REFERÊNCIAS

- [1] MACEDO, I.C.; "Potencial de Uso da Energia Solar em Aplicações Térmicas abaixo de 200°C no Brasil". Anais do 2º Congresso Latino-Americano de Energia Solar, 1978.
- [2] WINSTON, R.; "Light Collection Within the Framework of Geometrical Optics". Journal of the Optical Society of America. Volume 60, nº 2, 1970.
- [3] WINSTON, R.; "Principles of Solar Concentrators of a Novel Design". Solar Energy, Volume 16, 1974.
- [4] WINSTON, R.; "Principles of Solar Concentrators for Solar Energy". Solar Energy, Volume 17, 1975.
- [5] GOODMAN, RABL e WINSTON; "Optical and Thermal Design Considerations for Ideal Light Collectors", Enrico Fermi Institut, University of Chicago.
- [6] ALLEN, LEVITZ, RABL, REED, SCHERTZ and WINSTON; "Development of Lightweight Compound Parabolic Concentrators for Solar Thermal Electric and Process Heat Applications". Enrico Fermi Institut, University of Chicago.
- [7] RABL, A.; "Collector with Cuplike Compound Parabolic Concentrator and Seletive Absorber". Enrico Fermi Institut , University of Chicago.
- [8] DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A.; "Solar Energy Thermal Process", John Wiley & Sons., 1974.
- [9] HOLLANDS, UNNY, RAITBY e KOUICEK; "Free Convective Heat Transfer Across Inclined Air Layers". Journal of Heat Transfer, Maio, 1976.
- [10] RABL, A.; "Optical and Thermal Properties of Compound Parabolic Concentrators". Solar Energy, Vol. 18, 1976.

- [11] RABL, A.; "Radiation Transfer Through Specular Passages - a Simple Approximation". Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 20, 1977.
- [12] KREITH, F.; "Princípios da Transmissão de Calor". Ed. Edgard Blücher Ltda, 1969.
- [13] MACEDO, I.C.; ALVES, C.L.F.; "Estudo de Radiação no Projeto de Coletores Solares de Parábola Composta". Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 1979.
- [14] HILL, J.E. e OUTROS; "Development of Proposed Standards for Testing Solar Collectors and Thermal Storage Devices". National of Standards, U.S., Department of Commerce, Fevereiro, 1976.

APÊNDICE I

No Apêndice I está a listagem de um dos programas (1a. Montagem, coletor com isolamento lateral) utilizados para a obtenção dos resultados teóricos relatados.

A execução do programa listado fornece os resultados na forma numérica, como está mostrado na tabela subsequente.

O programa é auto explicativo nas partes essenciais. Utilizou-se do método iterativo para fazer o balanço entre a potência incidente no plano de abertura do coletor, a potência dissipada entre o absorvedor e o ambiente e a potência útil transferida ao fluido.

TYPE PRSOL.F4

```

C   COLETOR CONCENTRACAO-CPC
C   CALCULO EM SECOES DE 1(UM) METRO
C   PRECISAO TEMPERATURAS IGUAL DOIS DECIMOS CENTIGRADOS
C   COLETOR COM ISOLAMENTO LATERAL
DIMENSION TCOB(0/2000), TFLD(0/400), TABS(0/400), TFLDM(7), TCOBM(7
1  ), TFLDF(7), TABSM(7), HRACF(7), HRCCF
1  (7), HCACF(7), HCABF(7), EFC(7)
C   ENTRADA DE DADOS
RADFR=1000.
IMES=03
DELTA=.349
HORA=12.30
CCTRC=2.43
TETA=.339
ABSL=.3
HBAR=.65
REFLC=.1
REFLA=.08
REFLP=.9
TRMTC=.87
ABSTA=.92
ABSTC=.07
RFLLT=.85
GAMA=.9
ALARA=.15
EXPA=.0005
CONDA=385.
CONDS=147.
DMTEX=.019
DMTIN=.015
AKISL=.0742
BISL=.05
SIGMA=5.67E-8
VZERO=9.76E-10
AKZRO=4.86E-4
GRAV=9.8
VENTO=2.
CEPE=4190.
FLUXO=.04
HFLD=1600
TFLDE=27.
TAMB=27
TABS(0)=30.
TCOB(0)=29.
C   PREPARACAO
TCEU=TAMB-19.
C=1./((2.+(ABSL*(1.+SIN(TETA))))
Y=1.
COBL=ABSL*CCTRC
AREAB=ABSL*Y
AREAC=COBL*Y
XABS=ABSL*COS(TETA)
HALT=(ABSL/2.)*(1.+(1./SIN(TETA)))*(COS(TETA)/SIN(TETA))
XBAR=ABSL*((1.+SIN(TETA))/COS(TETA))*(-SIN(TETA)+SQRT
1  (1.+(HBAR/HALT)*COS(TETA)**2/SIN(TETA)**2))
C   CALCULO EFICIENCIA OTICA
ERRE=1.-(1./CCTRC)
ETA0=GAMA*TRMTC*ABSTA*(RFLLT**ERRE)
C   CALCULO EMITANCIA EFETIVA
AREAP=(1./C)*(((2.+(XBAR*SQRT((2.+(XBAR)**2+1.)))/2.))+.5
1  *ALOG(2.+(XBAR+SQRT((2.+(XBAR)**2+1.)))-(2.+(XABS*SQRT(
1  (2.+(XABS)**2+1.)))/2.-.5*ALOG(2.+(XABS+SQRT((2.+(XABS)

```

```

1  **2+1. )))
  EDO=(1. /2. )*(1. -((XBAR**2-XABS**2)/(ABSL*(1. +SIN(TETA)))
1  *AREAP)))
  EDO=(1. /AREAP)*((XBAR**2-XABS**2)/(ABSL*(1. +SIN(TETA))))
  EMTR=1. -REFLA
  EMTC=1. -REFLC
  EMTP=1. -REFLP
  EMTEI=(AREAP/AREAA)*EMTP*EDO
  EMTEO=(AREAP/(AREAC-AREAA))*EMTP*EDO
  REFEI=1. -EMTEI
  REFEO=1. -EMTEO
  EMTE3=EMTC*((1. +REFEI*REFLA)/(1. -(REFEI**2)*REFLC*REFLA))*EM
1  TEI+(EMTEO/(1. -REFEO*REFLC))*((AREAC-AREAA)/AREAA)
  EMTE2=EMTEI*EMTEA*((1. +REFEI*REFLC)/(1. -REFEI**2)*REFLC*REFLA)
  EMTE1=(REFEI*EMTC*EMTA)/(1. -REFEI**2)*REFLC*REFLA)
  EMTE=EMTE1+(EMTE2*EMTE3)/(EMTE2+EMTE3)
40  LY=1
  TFLD(0)=TFLDE
50  I=0
  J=0
  K=0
100  TCOB(I)=TCOB(I)+273. 1
  TABS(J)=TABS(J)+273. 1
  TAMB=TAMB+273. 1
  TCEU=TCEU+273. 1
C  CALCULO COEFICIENTE RADIAÇÃO ABSORVEDOR-COBERTURA
  HRAC=EMTE*SIGMA*(TABS(J)**2+TCOB(I)**2)*(TABS(J)+TCOB(I))
C  COEFICIENTE DE RADIAÇÃO COBERTURA CEU
  HRCC=EMTC*SIGMA*(TCOB(I)**2+TCEU**2)*(TCOB(I)+TCEU)*((TCOB
1  (I)-TCEU)/(TCOB(I)-TAMB))
C  COEFICIENTE CONVECCAO ABSORVEDOR COBERTURA
  FUNC0=(SIN(1. 8*DELTA))**3
  TAR=((TABS(J)+TCOB(I))/2. )
  GRASH=(GRAV*(1. /TAR)*(TABS(J)-TCOB(I))*HBAR**3)/((VZERO*TAR**
1  1. 7)**2)
  RAY=GRASH*. 71
  HCAC=((AKZRO*TAR** 7)/HBAR)*(1. +(1. 44*(1. -((1708. *FUNC0)/(RAY
1  *COS(DELTA))))*(1. -(1708. /RAY*COS(DELTA)))))+(((RAY*COS(DEL
1  TA))/5830. )** 333)-1. ))
  TABS(J)=TABS(J)-273. 1
  TCOB(I)=TCOB(I)-273. 1
  TAMB=TAMB-273. 1
  TCEU=TCEU-273. 1
C  COEFICIENTE CONVECCAO COBERTURA AMBIENTE
  HCAB=5. 7+3. 8*VENTO
C  COEFICIENTE DE CONDUCAO
  HCON=AKISL/BISL
C  CALCULO TEMPERATURA DA COBERTURA
  I=I+1
  HINT=HCAC+HRAC
  HEXT=HCAB+HRCC
  TCOB(I)=((HINT/CCTRC)*TABS(J)+HEXT*TAMB+RADFR*ABSTC)/
1  (HEXT+(HINT/CCTRC))
  B=TCOB(I)-TCOB(I-1)
  B=ABS(B)
  IF(B-. 2)200, 200, 100
C  CALCULO TEMPERATURA FLUIDO
200  K=K+1
  HINTE=HRAC+HCAC
  HEXTE=HRCC+HCAB
  UGLBE=1. /((CCTRC/HINTE)+(1. /HEXTE))+HCON/CCTRC)
  EME=SQRT(UGLBE/(CONDA*EXPA))
  EFE=(TANH(EME*(ALARA-DMTEX)/2. ))/(EME*(ALARA-DMTEX)/2. )
  EFLIN=(1. /UGLBE)/(ALARA*(1. /UGLBE*(DMTEX+(ALARA-DMTEX)
1  *EFE)))+(1. /((3. 14*DMTIN*HFLD)))+(1. /CONDS)))
  RADDT=RADFR*ETA0

```

```

1 TFLD(K)=(AREAC*EFLIN*(RADDT-UGLBE*(TFLD(0)-TAMB)))/(FLUXO*
C CEPE)+TFLD(0)
TFLDM(LY)=(TFLD(0)+TFLD(K))/2.
C CALCULO TEMPERATURA DO ABSORVEDOR
J=J+1
EEE=((1./HFLD*3.14*DMTIN)+(1./CONDS))*((ALARA-DMTEX)*EFE+DMTEX)
TABS(J)=(TFLDM(LY)+EEE*(RADDT+UGLBE*TAMB))/(1.+EEE*UGLBE)
A=TABS(J)-TABS(J-1)
A=ABS(A)
IF(A-.2)300,300,100
300 TCOBM(LY)=TCOB(I)
TFLDF(LY)=TFLD(K)
TABSM(LY)=TABS(J)
HRACF(LY)=HRAC
HRCCF(LY)=HRCC
HCACF(LY)=HCAC
HCABF(LY)=HCAB
EFC(LY)=(FLUXO*CEPE*(TFLDF(LY)-TFLD(0))*100.)/(RADFR*AREAC)
IF(LY-6)400,500,400
400 TCOB(0)=TCOBM(LY)+5.
TABS(0)=TFLDF(LY)+10.
TFLD(0)=TFLDF(LY)
LY=LY+1
GO TO 50
500 TFLDS=TFLDF(LY)
C EFICIENCIA DO COLETOR
EFCT=(FLUXO*CEPE*(TFLDS-TFLDE)*100.)/(RADFR*COBL*LY)
TYPE 600, COTRO, RADFR, IMES, HORA, EMTA
TYPE 700, TFLDE, (TFLDF(I), TABSM(I), TCOBM(I), HRACF(I), HRCCF(
1 I), HCACF(I), HCABF(I), EFC(I), TFLDF(I), I=1, 5), TFLDF(6), TAB
1 SM(6), TCOBM(6), HRACF(6), HRCCF(6), HCACF(6), HCABF(6), EFC(6)
TYPE 800, EFCT
600 FORMAT(//, ' EFICIENCIA CPC CONCENTRACAO', F4.1, /, 9%, ' RADFR='
1 , F8.2, 1%, ' WM-2', /, 9%, ' IMES =', I5, /, 9%, ' HORA =', F8.2, /, 9%,
1 ' EMTA =', F8.2, //, ' TFLDE TFLDS TABSM TCOBM HRAC
1 HRCC HCAC HCAB EFC')
700 FORMAT(9F8.1, //)
800 FORMAT(1%, ' EFCT=', F5.1)
IF(EFCT-20.)900,900,850
850 TFLDE=TFLDS
TABS(0)=TFLDS+3.
TCOB(0)=TCOBM(LY)+1.
GO TO 40
900 END

```

EFICIENCIA CPC CONCENTRACAO 2.4

RADFR= 1000.00 WM-2
 IMES = 3
 HORA = 12.30
 EMTA = 0.92

TFLDE	TFLDS	TABSM	TCOBM	HRAC	HRCC	HCAC	HCAB	EFC
82.9	84.7	85.1	37.2	6.7	10.9	2.2	13.3	42.7
84.7	86.5	86.90	37.5	6.8	10.8	2.2	13.3	41.8
86.5	88.3	88.7	37.9	6.9	10.6	2.2	13.3	41.0
88.3	90.1	90.4	38.2	6.9	10.5	2.3	13.3	40.2
90.1	91.8	92.1	38.6	7.0	10.4	2.3	13.3	39.4
91.8	93.5	93.8	38.9	7.1	10.2	2.3	13.3	38.6

EFCO: 40.6

EFICIENCIA CPC CONCENTRACAO 2.4

RADFR= 1000.00 WM-2
 IMES = 3
 HORA = 12.30
 EMTA = 0.92

TFLDE	TFLDS	TABSM	TCOBM	HRAC	HRCC	HCAC	HCAB	EFC
93.5	95.1	95.4	39.3	7.1	10.1	2.3	13.3	37.9
95.1	96.7	97.0	39.6	7.2	10.0	2.3	13.3	37.1
96.7	98.3	98.6	40.0	7.2	9.9	2.3	13.3	36.3
98.3	99.9	100.1	40.3	7.3	9.8	2.3	13.3	35.6
99.9	101.4	101.7	40.6	7.4	9.7	2.3	13.3	34.9
101.4	102.9	103.1	40.9	7.4	9.7	2.4	13.3	34.1

EFCO= 36.0

SIMBOLOGIA DO PROGRAMA

- RADFR - Potência solar incidente no plano de abertura.
- IMES - Mês do ano.
- DELTA - Ângulo entre o absorvedor e a horizontal.
- HORA - Hora do dia.
- CCTRC - Concentração do coletor CPC.
- TETA - Meio ângulo de aceitação.
- ABSL - Largura do absorvedor.
- HBAR - Altura do coletor truncado.
- REFLC - Refletividade da cobertura à radiação infravermelho.
- REFLA - Refletividade do absorvedor à radiação infravermelho.
- REFLP - Refletividade do refletor à radiação infravermelho.
- TRMTC - Transmitância da cobertura à radiação solar.
- ABSTA - Absortância do absorvedor à radiação solar.
- ABSTC - Absortância da cobertura à radiação solar.
- RFLLT - Refletividade do refletor à radiação solar.
- GAMA - Fração da radiação solar total incidente no plano de abertura dentro da faixa angular $2\theta_{\text{máx}}$.
- ALARA - Largura da aleta.
- EXPA - Espessura da aleta.
- CONDA - Condutividade térmica da aleta.
- CONDS - Condutância térmica do elemento de ligação da aleta ao tubo.
- DMTEX - Diâmetro externo da tubulação do absorvedor.
- DMTIN - Diâmetro interno da tubulação do absorvedor.
- AKISL - Condutividade térmica do isolante na base do coletor.
- BISL - Espessura do isolante.
- SIGMA - Constante de Stefan-Boltzmann.
- VZERO - Constante para parametrização da viscosidade do ar.
- AKZRO - Constante para parametrização da condutividade térmica do ar.
- GRAV - Aceleração da gravidade.
- VENTO - Velocidade média do vento local.
- CEPE - Calor específico a pressão constante do fluido de transferência.
- FLUXO - Vazão mássica do fluido de transferência.

- HFLD - Coeficiente de película tubulação-fluido de transferência.
- TFLDE - Temperatura de entrada do fluido no coletor.
- TAMB - Temperatura ambiente.
- TABS - Temperatura do absorvedor.
- TCOB - Temperatura da cobertura.
- TCEU - Temperatura efetiva do espaço.
- COBL - Largura da superfície de abertura.
- AREAA - Área do absorvedor por unidade de comprimento do coletor.
- AREAC - Área da superfície de abertura por unidade de comprimento do coletor.
- XABS - Extremidade inferior da superfície lateral.
- HALT - Altura do coletor integral.
- XBAR - Extremidade superior da superfície lateral no coletor truncado.
- ERRE - Número médio de reflexões da radiação no interior do coletor.
- ETAO - Eficiência ótica do coletor.
- AREAP - Área da superfície refletora por unidade de comprimento do coletor.
- EMTE - Emissividade efetiva do absorvedor.
- TFLD - Temperatura local do fluido.
- HRAC - Coeficiente da transferência de calor radiativa entre o absorvedor e a cobertura.
- HRCC - Coeficiente da transferência de calor radiativa entre a cobertura e o céu.
- TAR - Temperatura do ar confinado no coletor CPC.
- GRASH - Número de Grashoff.
- RAY - Número de Rayleigh.
- HCAC - Coeficiente da transferência de calor convectiva entre o absorvedor e a cobertura.
- HCAB - Coeficiente da transferência de calor convectiva entre a cobertura e o ambiente.
- HCON - Coeficiente da transferência de calor condutiva entre o absorvedor e o ambiente.
- UGLBE - Coeficiente global da transferência de calor entre o absorvedor e o ambiente.
- EFE - Eficiência padrão da aleta.

- EFLIN - Fator de eficiência do coletor.
- TFLDM - Temperatura média do fluido de transferência.
- TCOBM - Temperatura média da cobertura.
- TFLDF - Temperatura de saída do fluido de transferência.
- TABSM - Temperatura média do absorvedor.
- EFC - Eficiência do coletor na seção analisada.
- EFCT - Eficiência total do coletor.

APÊNDICE II

No Apêndice II estão tabelados os resultados das medidas de velocidade e temperatura da corrente de convecção interna no coletor CPC, 2a. Montagem, de acordo com distribuição mostrada na Figura 6.

PONTO 2D

VEL (m/s)	TABS (°C)	TCOB (°C)	TAR (°C)	TLAT (°C)	TAMB (°C)	DISTÂNCIA (cm)
.05	(76,7)	36	(50,5)	(41,8)	27	8
0.08-0.10	(76,6)	36	(52,5)	(41,8)	27	6
0.08-0.10	(76,5)	36	(52,6)	(41,8)	27	4
0.09-0.11	(76,7)	36	(52,6)	(41,8)	27	3
0.08-0.09	(78,2)	36	(49,2)	(41,8)	27	2
.05	(77,8)	36	(45,1)	(41,8)	27	1

PONTO 3D

VEL (m/s)	TABS (°C)	TCOB (°C)	TAR (°C)	TLAT (°C)	TAMB (°C)	DISTÂNCIA (cm)
.05	(76,6)	36	(51,5)	(43,5)	27,5	8
0.06-0.08	(77,1)	36	(54,5)	(43,0)	27,5	6
0.08-0.09	(76,5)	36	(54,2)	(43,2)	27,5	5
0.09-0.10	(77,5)	36	(54,5)	(43,2)	27,5	4
0.09-0.10	(77,1)	36	(54,7)	(43,2)	27,5	3
0.06-0.07	(76,6)	36	(50,9)	(43,2)	27,5	2
0.05	(77,8)	36	(44,8)	(43,1)	27,5	1

PONTO 2D

VEL (m/s)	TABS (°C)	TCOB (°C)	TAR (°C)	TLAT (°C)	TAMB (°C)	DISTÂNCIA (cm)
-	(104,5)	40	(60,0)	(45,9)	27	8
.06	(104,4)	40	(62,1)	(45,9)	27	6
.08-.10	(104,4)	40	(3,5)	(45,9)	27	5
.085-.09	(104,2)	40	(63,5)	(45,9)	27	4
.085-.09	(104,1)	40	(62,3)	(45,9)	27	3
.07 -.09	(103,9)	40	(56,3)	(45,9)	27	2
-	(103,9)	40	(46,9)	(45,9)	27	1

PONTO 3D

VEL (m/s)	TABS (°C)	TCOB (°C)	TAR (°C)	TLAT (°C)	TAMB (°C)	DISTÂNCIA (cm)
-	(107,4)	41	(66,5)	(47,0)	27	10
.05-.07	(107,1)	41	(66,7)	(46,9)	27	8
.08	(108,3)	41	(67,8)	(47,0)	27	6
.095	(108,0)	41	(67,2)	(47,0)	27	4
.065	(108,0)	41	(7,5)	(47,0)	27	2
-	(108,3)	31	(48,0)	(47,0)	27	1

PONTO 2E

VEL (m/s)	TABS (°C)	TCOB (°C)	TAR (°C)	TLAT (°C)	TAMB (°C)	DISTÂNCIA (cm)
.05	(78,2)	37	(46,2)	(34,1)	27,5	8
.05	(78,1)	37	(47,1)	(34,1)	27,5	6
.05-.075	(78,5)	37	(47,1)	(34,1)	27,5	4
.08-.09	(78,8)	37	(46,9)	(34,1)	27,5	3
.07-.08	(78,6)	37	(42,9)	(34,1)	27,5	2
.05-.06	(78,8)	37	(38,6)	(34,1)	27,5	1

PONTO 3E

VEL (m/s)	TABS (°C)	TCOB (°C)	TAR (°C)	TLAT (°C)	TAMB (°C)	DISTÂNCIA (cm)
.05	(78,8)	37	(47,9)	(33,4)	26,5	8
.06-.07	(78,8)	37	(48,2)	(33,5)	26,5	6
.08-.10	(78,9)	37	(48,5)	(33,4)	26,5	5
.09-.11	(78,9)	37	(48,6)	(33,4)	26,5	4
.09-.11	(78,8)	37	(47,2)	(33,5)	26,5	3
.07-.09	(78,5)	37	(43,3)	(33,5)	26,5	2
.05-.06	(78,8)	37	(39,0)	(33,5)	26,5	1

PONTO 2E

VEL (m/s)	TABS (°C)	TCOB (°C)	TAR (°C)	TLAT (°C)	TAMB (°C)	DISTÂNCIA (cm)
.07	(101,2)	40	(55,2)	(41,8)	28	8
.08	(101,1)	40	(55,4)	(41,9)	28	6
.095-.10	(101,0)	40	(54,5)	(41,8)	28	4
.09-.10	(101,2)	40	(52,9)	(41,8)	28	3
.07-.08	(101,3)	40	(49,9)	(41,5)	28	2
.05-.06	(101,3)	40	(42,1)	(41,5)	28	1

PONTO 3E

VEL (m/s)	TABS (°C)	TCOB (°C)	TAR (°C)	TLAT (°C)	TAMB (°C)	DISTÂNCIA (cm)
.05	(102,5)	40	(46,5)	(41,8)	28	8
.06-.08	(101,5)	40	(54,5)	(41,8)	28	6
.07-.09	(102,3)	40	(55,5)	(41,9)	28	5
.09-.10	(101,5)	40	(54,5)	(41,5)	28	4
.07-.08	(102,3)	40	(53,1)	(41,8)	28	3
.07	(102,4)	40	(48,8)	(41,8)	28	2
.05-.06	(102,1)	40	(44,2)	(41,8)	28	1