

# MERCOFRIO 2000 - CONGRESSO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DO MERCOSUL

## OTIMIZAÇÃO DE COLETORES SOLARES DE PLACAS PLANAS

**D. G. Gomes** – nide@aer.ita.cta.br

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil, 12228-900

**Nide G C R Fico Jr**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil, 12228-900

***Resumo:** Este trabalho consiste no estudo de otimização teórica do desempenho de coletores de energia solar de placas planas com a introdução de um degrau no perfil da aleta, promovendo portanto uma economia de material. Foi feito um estudo teórico de otimização no fator custo / fator de eficiência do coletor de energia solar entre quatro materiais, com diferentes espessuras de placas utilizados para confecção de aletas coletoras de energia solar, sendo eles, o cobre, o alumínio, o aço e aço galvanizado em função das distâncias entre os centros dos tubos. Depois de terem sido especificados o material e as dimensões do coletor de energia solar, foi feita uma segunda otimização, agora em relação ao custo / fator de eficiência do coletor de energia solar proporcionado pela introdução de um degrau no perfil da aleta, em função da sua localização. Foi confeccionado um coletor de energia solar com as dimensões otimizadas, testes e ensaios de eficiência foram realizados conforme a Norma ASHRAE específica para coletores de energia solar*

**Palavras-chave:** coletor solar, otimização, aleta

### 1. INTRODUÇÃO

Um coletor de energia solar de placas planas, comumente chamado de coletor solar, é um trocador de calor que pode ser projetado para aplicações que requerem temperaturas moderadas, ou seja, de até aproximadamente 100 °C acima da temperatura ambiente. Este tipo de equipamento pode ser utilizado em aquecimento de ambientes, mas sua principal aplicação é no aquecimento de água para uso doméstico. A energia solar incidente que é absorvida pelo coletor,  $I$ , é transferida para o fluido que escoar no seu interior (Duffie & Beckman, 1974).

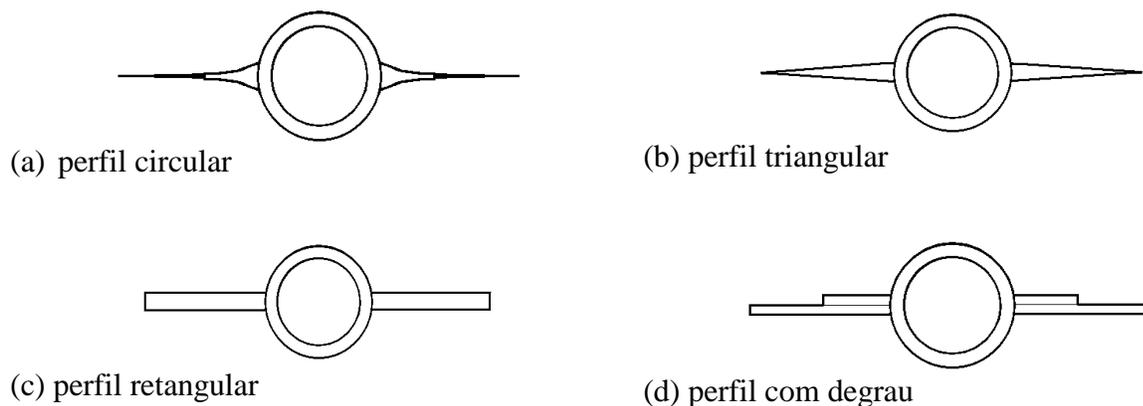
Os coletores de energia solar de placas planas são quase sempre montados em uma posição fixa, como por exemplo, num telhado, com sua orientação otimizada na intenção de receber o máximo possível de raios solares ou fixado em paredes verticais, quando usados em altas latitudes (Duffie & Beckman, 1974).

Em função da elevada alta de custo do petróleo nos anos 70 aumentou a importância da energia solar como fonte alternativa de energia. Duffie e Beckman (1974) editam o livro “*Solar Energy Thermal Processes*” no qual dão uma grande contribuição na tecnologia de absorção de

energia solar devido aos seus 20 exaustivos anos de pesquisas na área. Klein (1975) introduziu no cálculo dos coeficientes de perdas de energia, os efeitos de capacitância térmica e, portanto, melhorou os resultados obtidos por Hottel e Willier (1958) para coletores de energia solar de placas planas.

Devido ao grande aparecimento de coletores de energia solar no mercado, foi necessário criar procedimentos de testes para os ensaios realizados (Duffie & Beckman, 1974). Em resposta à esta necessidade, o *National Bureau of Standards* por intermédio de Hill e Kusuda, em 1974, propõem um procedimento de teste, o qual foi modificado pela *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers*, ASHRAE (1977). A Norma ASHRAE 93-77 tem como proposta determinar os métodos de testes em módulos de coletores, com e sem concentração de energia solar.

Procurando economizar material da aleta, sem prejudicar sua eficiência, foram desenvolvidos perfis não uniformes como, por exemplo, o circular e o triangular (ver Figura 1.2). Entretanto a dificuldade na manufatura destes perfis faz com que, na prática, o perfil retangular seja usado. Até que Hollands e Stedman (1992) desenvolveram estudos na otimização de placas absorvedoras de calor de coletores de energia solar com degraus na espessura da aleta. O objetivo destes autores era manter a eficiência da placa coletora e, ao mesmo tempo, obter economia de material. Ao contrário das aletas com perfis não uniformes, a aleta com degrau no perfil é de fácil fabricação. Duas chapas de mesma espessura são laminadas a frio formando um sulco semicircular em cada uma delas. Estes sulcos são responsáveis por acomodar o tubo no qual a água escoar. A confecção das aletas com duas lâminas de larguras diferentes proporcionam a formação de um degrau no perfil. Este processo de fabricação foi desenvolvido a partir do método patenteado por Olson, Thundal e Wilson (1981). A figura 1 mostra os perfis de aletas circulares, triangulares, retangulares e com degraus, respectivamente.



**Figura 1:** Perfis de aletas

O objetivo do presente trabalho é realizar a otimização de um coletor de energia solar de placas planas com degrau na aleta. Assim, primeiramente foi feita uma avaliação teórica *de custo / fator de eficiência* em coletores de energia solar de placas planas em função da distância entre os centros dos tubos. Esta avaliação foi feita para os quatro materiais mais utilizados comercialmente na fabricação de coletores de energia solar, são eles: cobre, alumínio, aço e aço galvanizado. Em seguida foi realizada uma segunda avaliação de *custo / fator de eficiência*, agora

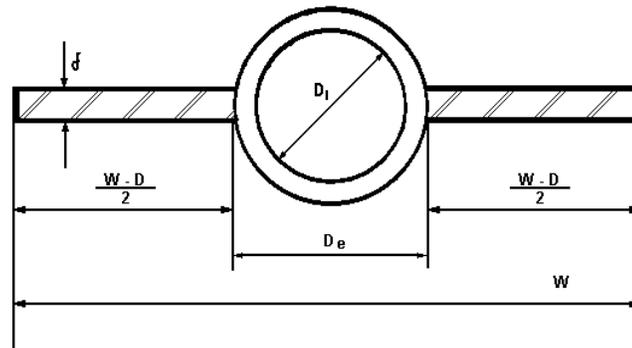
para aleta com degrau. A partir deste estudo teórico foi confeccionado um coletor otimizado, com degrau na aleta. Ensaios experimentais foram realizados neste coletor de energia solar. É importante salientar que para determinação de sua eficiência térmica foi utilizado o método descrito pela norma ASHRAE (1977).

## 2 OTIMIZAÇÃO DA ALETA

A otimização foi feita primeiro para uma aleta sem degrau e, posteriormente, para uma aleta com degrau. A primeira parte do estudo de tem por objetivo determinar qual a espessura idela para a introdução do degrau. Para a otimização foi utilizada uma equação que relaciona o custo e a eficiência do coletor. O custo foi levantado nas cidades de São Paulo e São José dos Campos.

### 2.1 Aleta sem degrau.

Uma aleta com perfil uniforme, ou retangular, com a respectiva nomenclatura ,é apresentada na Fig. 2. Assim,  $\delta$  é a espessura,  $W$  representa a distância entre tubos,  $D$  é o diâmetro externo de cada tubo enquanto  $D_i$  denota o diâmetro interno. O material da aleta tem uma condutividade térmica,  $k$ . As perdas de energia são representadas pelo coeficiente  $U_L$ .



**Figura 2:** Geometria de um coletor de placa plana com aleta de perfil retangular.

Para a otimização da relação *custo/fator de eficiência* do coletor, em função da distância entre tubos, foi utilizada a Eq. (1). A validação do método de otimização utilizado foi feita através de comparação com os resultados obtidos por Bliss (1959) para um problema típico.

$$\left( \frac{\text{custo}}{\text{fator de eficiência}} \right)_w = \frac{\left( a + b + \frac{c}{W} \right)}{\frac{1}{U_L}} \quad (1)$$

$$W \left[ \frac{1}{U_L \left( D_e + (W - D_e) \left( \frac{\tanh \sqrt{\frac{U_L}{k} \delta \left( \frac{W - D_e}{2} \right)}}{\sqrt{\frac{U_L}{k} \delta \left( \frac{W - D_e}{2} \right)}} \right)} \right) + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]$$

É interessante notar que o numerador representa o custo do coletor. Sendo o custo fixo, que engloba vidro, pintura, isolamentos, etc., representado por “a”. A parcela “b” é custo da placa metálica absorvedora. O preço dos tubos é dado por “c”. O denominador da Eq.(1) denota a eficiência do coletor que é função, além dos parâmetros já definidos, do coeficiente de filme  $h_{fi}$  e do coeficiente  $C_B$ , relacionado com a condutância da solda aleta-tubo.

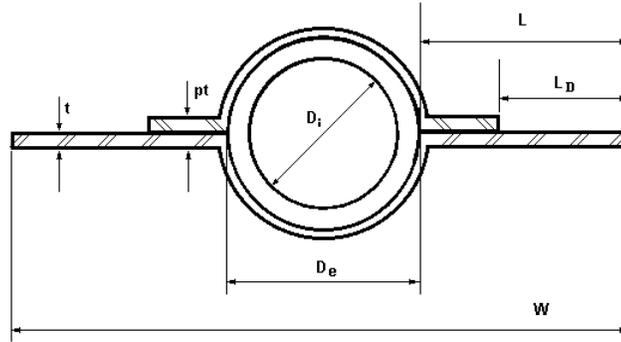
Na Tab. 1 apresenta-se os resultados de otimização feita para coletores de e energia solar com placas planas retangulares, para espessuras de chapas encontradas no mercado, com vistas a fabricação de um coletor com degrau na aleta. Observa-se a espessura ótima da aleta viria com o material utilizado. A placa de alumínio com espessura de 0,8 mm é a mais indicada, pois proporciona um *custo / fator de eficiência* menor em relação aos outros três materiais analisados.

**Tabela 1** – Espessuras ótimas para introdução de um degrau na aleta. Mercados de São José dos Campos e São Paulo.

<b>MATERIAL DA PLACA</b>	<b>ESPESSURA DA PLACA</b>	<b>FATOR DE EFICIÊNCIA DO COLETOR</b>	<b>DISTÂNCIA. ENTRE TUBOS</b>	<b>CUSTO / FATOR DE EFICIÊNCIA</b>
	<b>mm</b>	<b>%</b>	<b>cm</b>	<b>US\$/m<sup>2</sup></b>
Aço	1,8	88,1	7,87	77,11
Aço galvanizado	1,0	87,3	7,87	73,69
Alumínio	0,8	88,2	10,41	66,67
Cobre	0,2	88,7	8,38	71,90

## 2.2 Aleta com degrau

A introdução de um degrau na aleta resulta em uma economia de material mas, por outro lado, causa uma queda de eficiência. Tomando os dados do coletor definido como ótimo na análise anterior, aleta retangular, as dimensões do coletor foram mantidas constante e foi analisado o efeito da introdução do degrau. Na Fig.(3) é mostrada, com mais detalhes, a aleta com degrau.



**Figura 3** Geometria de um coletor de placa plana com degrau na aleta .

A Eq. (2) foi utilizada na otimização custo/eficiência do coletor de placas planas com degrau no perfil da aleta. Os resultados obtidos apresentam boa concordância com os de Hollands e Stedman (1992).

$$\left( \frac{\text{custo}}{\text{fator de eficiência}} \right)_{\text{Degrau}} = \frac{\left( a + b + \frac{c}{W} \right)}{\frac{1}{U_L}} \quad (2)$$

$$W \left[ \frac{1}{U_L \left( D_e + (W - D_e) \left( \frac{1}{z} \left( \frac{BB + CC}{DD + EE} \right) \right) \right)} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]$$

os parâmetros  $z$ ,  $BB$ ,  $CC$ ,  $DD$ ,  $EE$  estão relacionados com a geometria e características do material da aleta.

Neste trabalho foi suposto que as aletas com degrau são construídas pela sobreposição de duas chapas. Por exemplo, no caso do alumínio, usa-se duas chapas com espessura de 0,4 mm. Não faria sentido usinar uma chapa com 8 mm de espessura para a confecção do degrau na aleta

pois esta prática aumentaria o custo do coletor. O resultado da otimização para os quatro materiais analisados está na Tab. 2.

**Tabela 2** – Espessuras e tamanhos dos degraus otimizados para os materiais encontrados nos mercados de São José dos Campos e São Paulo

MATERIAL DA ALETA	ESPESSURA DA ALETA pt mm	ESPESSURA DA ALETA t mm	VALOR Y (L <sub>D</sub> /L) DO DEGRAU	FATOR DE EFICIÊNCIA DO COLETOR %	CUSTO DO COLETOR US\$/m <sup>2</sup>	CUSTO / FATOR DE EFICIÊNCIA US\$/m <sup>2</sup>
Aço	1,8	0,9	0,98	84,9	61,06	71,89
Aço galvanizado	1,0	0,5	0,72	85,6	60,80	70,97
Alumínio	0,8	0,4	0,88	86,1	54,96	63,79
Cobre	0,2	0,1	0,82	86,6	59,43	68,59

Uma comparação entre os resultados apresentados nas Tabs. 1 e 2 mostra que houve uma diminuição do custo do coletor para todos os materiais analisados. Essas reduções são apresentadas na Tab. 3.

**Tabela 3** – Reduções de fator de eficiência, material, custo e custo / fator de eficiência do coletor causadas pela introdução do degrau otimizado nas aletas retangulares

MATERIAL	REDUÇÃO %			
	FATOR DE EFICIÊNCIA DO COLETOR	MATERIAL DA ALETA	CUSTO DO COLETOR	CUSTO / FATOR DE EFICIÊNCIA DO COLETOR
Aço	3,6	49	10,2	6,7
Aço Galvanizado	2,0	36	5,6	3,6
Alumínio	2,0	44	6,5	4,3
Cobre	2,4	41	6,8	4,6

Como pode ser observado na Tab. 3, houve uma redução na relação custo/eficiência dos coletores através da introdução de um passo otimizado nas aletas para todos os materiais estudados. A economia de material foi significativa em todos os casos. Por outro lado, a queda na eficiência do coletor foi bastante pequena. O alumínio mostrou-se o material com a melhor relação custo/benefício para a construção de um coletor solar com degrau no perfil da aleta.

### 3 TESTE DE DESEMPENHO

Foi construído um coletor com base nos resultados apresentados no item anterior. Segundo Duffie e Beckman (1974), o método indicado para realizar o ensaio de desempenho é o descrito na norma ASHRAE STANDARD 93-77 (1977). O propósito desta norma é estabelecer métodos para determinar o desempenho térmico de módulos de coletores de energia solar com fluidos trocadores de calor. esquema utilizado nos ensaios foi a configuração de teste de circuito aberto (“*Open-Loop*”). O desempenho térmico do coletor de energia solar é determinado obtendo-se a eficiência instantânea através de uma combinação de valores de radiação incidente, temperatura ambiente, temperaturas de entrada e saída do fluido, e pelas características de tempo de resposta térmica do coletor, caracterizado pela constante de tempo do coletor. A instrumentação utilizada nos ensaios foram as indicadas pela norma ASHRAE (1977) e calibradas conforme a norma usada.

Os ensaios de eficiência térmica são feitos em campo. Os testes para determiná-la são feitos de modo que uma curva de eficiência instantânea é plotada sob as condições estabelecidas pela norma. Quatro temperaturas diferentes de entrada do fluido são usadas para obter valores de  $(T_e - T_a) / I$ , onde  $T_e$  é a temperatura de entrada,  $T_a$  é a temperatura ambiente e  $I$  a intensidade de solar recebida pelo coletor. O fluxo de fluido de aproximadamente  $0,020 \text{ kg/s}$  é o indicado pela norma ASHRAE (1977) para líquidos. O cálculo da eficiência térmica é feito através dos dados obtidos da diferença de temperatura do fluido na entrada e na saída do coletor, o fluxo mássico,  $\dot{m}$ , e o calor específico a pressão constante,  $C_p$ , dividido pela intensidade solar recebida,  $I$ , obtida através do piranômetro colocado na posição ao lado do coletor no ensaio. Maiores detalhes sobre este procedimento são encontrados na Norma ASHRAE STANDARD 93-77 (1977)

A Tab. 4 apresenta os resultados para diferentes valores do parâmetro  $(T_e - T_a) / I$ . Para cada um desses valores foram realizados 20 ensaios. A média desses experimentos é que aparece na Tab. 4. A incerteza dos resultados experimentais foi calculada acordo com Kline e McClintock (1953).

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de eficiência térmica do coletor confeccionado

Ensaio ( $T_e - T_a$ ) / $I$ °C m <sup>2</sup> /W	Resultados %	Incerteza %
0,00	83,3	± 1,2
0,02	72,0	± 1,2
0,04	58,2	± 1,4
0,08	32,1	± 3,1

## 4 CONCLUSÃO

Neste trabalho objetivou-se a otimização de um coletor de energia solar de placa plana com degrau na aleta. Assim, realizou-se uma otimização teórica que teve início com uma aleta retangular na qual, posteriormente, introduziu-se um degrau. A introdução do degrau se mostrou interessante no caso estudado pois diminuiu significativamente o custo do coletor (42%) enquanto a eficiência foi penalizada em apenas 2%. Após o estudo de otimização construiu-se um coletor e a seu rendimento foi testado experimentalmente. Os resultados obtidos mostraram a boa eficiência do equipamento projetado.

## REFERÊNCIAS

- ASHRAE, Standard 93-77, 1977, "Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors", American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, New York.
- Bliss, Raymond W., Jr., 1959, "The Derivations of Several 'Plate-Efficiency Factors' Useful in the Design of Flat-Plate Solar Heat Collectors", Solar Energy Laboratory, Institute of Atmospheric Physics, University of Arizona, Tucson, *Solar Energy*, Vol 3, pp 55-64.
- Duffie, John A., and Beckman, William A., 1974, "*Solar Engineering of Thermal Processes*", Wiley Interscience, New York.
- Hollands, K. G. T., and Stedman, B.A., 1992, "Optimization of an Absorber Plate Fin Having a Step-Change in Local Thickness", Solar Thermal Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, N2L 3G1, *Solar Energy*, Vol49, No. 6, pp 493-495.
- Hottel, H. C. and Willer, A., 1958, "Evaluation of Flat-Plate Collectors Performance", Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy, Vol 2, Part I, pp 74, University of Arizona Press.
- Klein S. A., 1975, "Calculation of Flat-Plate Collector Loss Coefficients", Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, U.S.A., *Solar Energy*, Vol 17, pp 79-80.
- Kline, S. J., McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments", Mechanical Engineering.
- Olson, G., Thundal, B. and Wilson, G., 1981, "Advanced Solar absorber of Metallurgically Bonded Copper and Aluminum", Proceedings, Solar World Forum, Brighton, England, Pergamon Press, Vol. 1, pp 163-168.