

ESTUDO NUMÉRICO DA DISTRIBUIÇÃO DE VAZÃO EM COLETORES SOLARES DE PLACA PLANA OPERANDO EM CONVECÇÃO FORÇADA

Rafaela Frota Reinaldo – rafaela@sol.les.ufc.br
Maria Eugênia Vieira da Silva – eugenia@sol.les.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção
Laboratório de Energia Solar e Gás Natural

2.2 – Equipamentos e sistemas de aquecimento de água

Resumo. *Coletores solares de placa plana são largamente utilizados em aplicações de conversão térmica, tais como aquecedores de água. A eficiência destes coletores é função da distribuição de vazão de fluido no seu interior. Uma distribuição de vazão uniforme fornece maiores valores de eficiência. Este trabalho apresenta a simulação numérica da distribuição de vazão em coletores de placa plana operando em convecção forçada. São simuladas duas configurações de coletor, com entrada e saída de fluido central (retorno direto) e entrada e saída nas laterais opostas (retorno reverso). São consideradas as perdas de carga distribuída ao longo dos tubos e as perdas de carga localizadas devido às junções entre os tubos aletados e os distribuidores de entrada e saída do coletor. Para a determinação da distribuição de vazão são calculadas as perdas de carga entre a entrada e saída do coletor. Estas vazões devem ser tais a satisfazer a condição de que a perda de carga total entre a entrada e a saída, é a mesma, independente do caminho seguido. Os resultados mostram que os coletores com circuito de reverso apresentaram melhor distribuição de vazão, entretanto a sua perda de carga foi superior que nos coletores com circuito de retorno direto.*

Palavras-chave: *Coletor Solar de Placa Plana, Distribuição de Escoamento, Perda de Carga*

1. INTRODUÇÃO

Os coletores solares de placa plana são largamente utilizados em aplicações de conversão térmica tais como aquecedores de água, como também em dessalinizadores, refrigeradores e fogões solares. Usualmente, a circulação do fluido térmico, no interior do coletor, pode ocorrer de duas formas distintas. A primeira é através da utilização de uma bomba hidráulica, caracterizando um regime de convecção forçada no interior dos tubos. Uma segunda é pelo efeito de empuxo devido à diferença de densidade do fluido na entrada e saída do coletor, caracterizando a operação em regime de termossifão.

A eficiência do coletor de placa plana é função da distribuição do fluido nos tubos. Uma distribuição de vazão uniforme fornece maiores valores de eficiência (Weitbrecht *et al.*, 2002). Uma menor perda de carga entre a entrada e a saída de fluido no coletor também fornece maiores valores de eficiência do sistema. Assim, a determinação de uma configuração geométrica que forneça uma distribuição de vazão mais uniforme e com uma menor perda de carga possibilita o projeto de coletores solares mais eficientes.

No trabalho de Weitbrecht *et al.* (2002) são realizados cálculos da distribuição de vazão de coletores com configuração em “Z” com diferentes características. Nesta configuração, a entrada e saída do fluido estão localizadas nos extremos opostos dos respectivos coletores, caracterizando um circuito de retorno reverso.

O objetivo do presente trabalho é analisar a distribuição de vazão de coletores solares de placa plana operando em regime de convecção forçada com configurações de entrada e saída nos

distribuidores, nomeadamente em “Z” (retorno reverso) e em “U” (retorno direto). Para este propósito, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem Fortran.

A determinação numérica da distribuição de vazão no coletor foi realizada a partir da metodologia de cálculo para condutos paralelos (Streeter e Wylie, 1982). No trabalho de Reinaldo *et al.* (2003) esta metodologia é aplicada para o cálculo da distribuição de vazão em feixes de superaquecedores de caldeiras.

1.1. Descrição do coletor

Os principais componentes de um coletor solar de placa plana são a placa absorvedora, a cobertura transparente, o isolamento térmico e a estrutura de suporte. O tipo mais comum de placas absorvedoras consiste em tubos aletados conectados através de distribuidores de entrada e de saída do fluido térmico, conforme apresentado na Figura 1.

Foram analisadas duas configurações de localização da entrada e da saída do fluido nos respectivos distribuidores. A configuração em “U” é caracterizada pela entrada e saída no meio dos distribuidores (Fig. 1 a). A configuração em “Z” é caracterizada pela entrada e saída nos cantos dos distribuidores, em lados opostos (Fig 1 b).

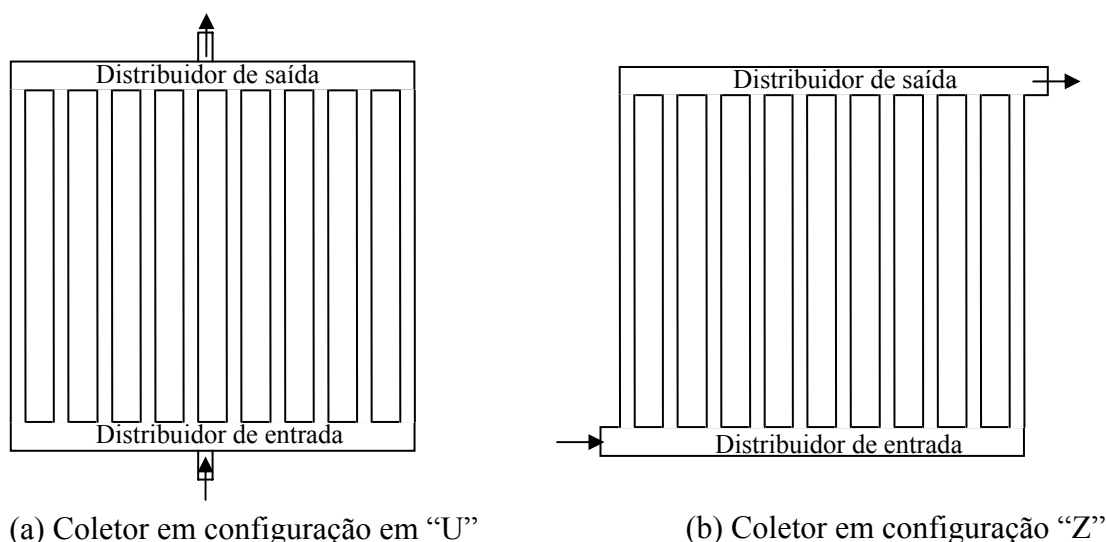


Figura 1 – Configuração dos coletores

As simulações foram realizadas considerando um coletor com as características geométricas descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Características geométricas do coletor

CARACTERÍSTICA	VALOR
Diâmetro interno do distribuidor de entrada	20,8 mm
Diâmetro interno do distribuidor de saída	20,8 mm
Diâmetro interno dos tubos	14,0 mm
Distância entre tubos	0,125 m
Comprimento dos tubos	1 m
Número de tubos	10

2. MODELO MATEMÁTICO

De forma a calcular numericamente a distribuição de vazão, o coletor é dividido em diversas seções imaginárias, conforme apresentado na Fig.2. As seções são numeradas a partir da entrada, crescendo da esquerda para a direita e são classificadas quanto pertencerem ao distribuidor de entrada (de), distribuidor de saída (ds) ou tubos (t). A Fig.2 ilustra também um dos caminhos que o fluido pode percorrer entre a entrada e a saída do coletor, estes caminhos são aqui denominados circuitos.

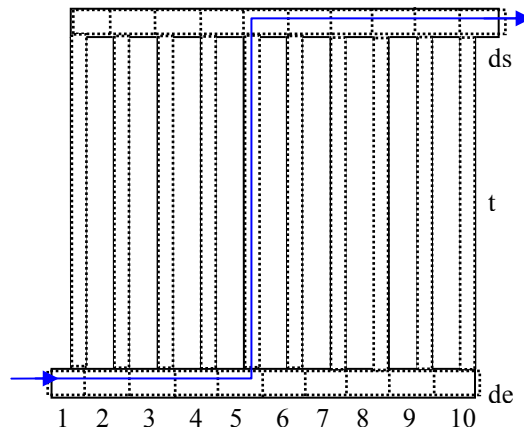


Figura 2 – Seções do coletor

Para a configuração em “U” apenas metade do coletor é utilizada para a simulação devido a sua simetria. A configuração em “Z” também é simétrica, mas foi simulada por inteiro de forma a verificar o correto equacionamento numérico do problema.

São calculadas as perdas de carga ao longo do coletor de entrada, coletor de saída e tubos de para cada seção. Em seguida, são determinadas as perdas de carga total ao longo dos diversos “circuitos” (caminhos) entre a entrada e a saída do coletor, onde cada caminho corresponde a um dos tubos. A distribuição de vazão no coletor deve ser tal que satisfaça a condição de que a perda de carga total entre a entrada e a saída seja a mesma, não importando o caminho seguido.

$$\Delta H_{C1} = \Delta H_{C2} = \dots = \Delta H_{CN} \quad (1)$$

onde ΔH é a perda de carga, em m, e os sub-índices C1, C2 e CN referem-se aos circuitos 1, 2 e N, sendo este último o número total de circuitos.

A perda de carga distribuída ao longo do distribuidor de entrada, do distribuidor de saída e dos tubos é calculada através da equação de Darcy-Weisbach, dada por,

$$\Delta H = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

sendo f o coeficiente de atrito, L o comprimento da tubulação, em m, D o diâmetro da tubulação, em m, v a velocidade do fluido em m/s e g a aceleração gravitacional em m/s².

Para escoamento laminar, com número de Reynolds (Re) < 2300, o coeficiente de perda de carga é dado por,

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3)$$

Para escoamento turbulento (Incropera e de Witt, 1992),

$$f = (0,79 \ln Re - 1,64)^{-2} \quad (4)$$

As perdas de carga localizadas nos tubos e nos distribuidores devido às suas junções são dadas pelas equações (5) e (6), respectivamente,

$$\Delta H_t = K_t \frac{v_t^2}{2g} \quad (5)$$

$$\Delta H_d = K_d \frac{v_d^2}{2g} \quad (6)$$

sendo K o coeficiente de perda de carga e os subscritos t e d referem-se aos distribuidores e tubos, respectivamente. Para o cálculo de K_t e K_d são utilizadas fórmulas empíricas (Kikas, 1995), dadas pelas equações (7) e (8),

$$K_t = \frac{7000}{Re_t} \quad (7)$$

$$K_d = \frac{550 + 1550(\dot{m}_m / \dot{m}_d)}{Re_d} \quad (8)$$

A Fig.3 apresenta a nomenclatura utilizada no cálculo da perda localizada nas junções entre os tubos e os coletores de entrada e de saída.

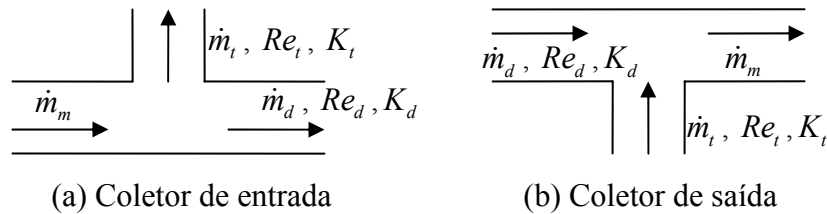


Figura 3 – Nomenclatura usada no cálculo da perda de carga localizada em junções

A vazão do distribuidor de entrada vai decrescendo ao longo deste devido à saída de massa para os tubos do coletor, em regime permanente,

$$Q_{de,i} = Q_{de,i-1} - Q_{t,i-1} \quad (9)$$

sendo Q a vazão volumétrica em m^3/s , os sub-índices de , t e i , representam distribuidor de entrada, tubo e seção i , respectivamente.

Para a configuração em “Z” a vazão do distribuidor de saída vai aumentando ao longo das seções devido à entrada de massa proveniente dos tubos,

$$Q_{ds,i} = Q_{ds,i-1} + Q_{t,i} \quad (10)$$

Visto que para a configuração em “U”, a numeração das seções é decrescente no sentido da saída para o respectivo distribuidor, tem-se então,

$$Q_{ds,i-1} = Q_{ds,i} + Q_{t,i-1} \quad (11)$$

Para um circuito n, do coletor com configuração em “Z”, a perda de carga é dada por,

$$\Delta H_{cn} = \sum_{i=1}^n \Delta H_{de,i} + \sum_{i=n}^N \Delta H_{ds,i} + \Delta H_{t,i} \quad (12)$$

Para um circuito n, do coletor com configuração em “U”, a perda de carga é dada por,

$$\Delta H_{cn} = \sum_{i=1}^n \Delta H_{de,i} + \sum_{i=1}^n \Delta H_{ds,i} + \Delta H_{t,i} \quad (13)$$

2.1. Condição simulada

As simulações foram realizadas para o coletor descrito na Tabela 1 operando em regime de convecção forçada, sendo desprezado o efeito de empuxo. O fluido de trabalho é a água a 40 °C, com densidade de 992 kg/m³ e viscosidade de 6,59.10⁻⁴ Pa.s. Foi admitida uma vazão volumétrica no coletor de 1,0 . 10⁻⁵ m³/s.

3. Resultados

A Fig. 4 apresenta o gráfico da perda de carga para o coletor com configuração em “U”, conforme mencionado anteriormente foi simulado apenas a metade do coletor devido a sua simetria. Com já era esperado, a perda de carga é crescente no sentido do escoamento. Visto que, no circuito 1, o fluido percorre uma menor distância entre a entrada e a saída do coletor, o tubo 1 está sujeito a um maior gradiente de pressão, possuindo assim uma maior vazão quando comparado aos demais. A relação entre a perda de carga máxima e mínima nos tubos é de 2,27.

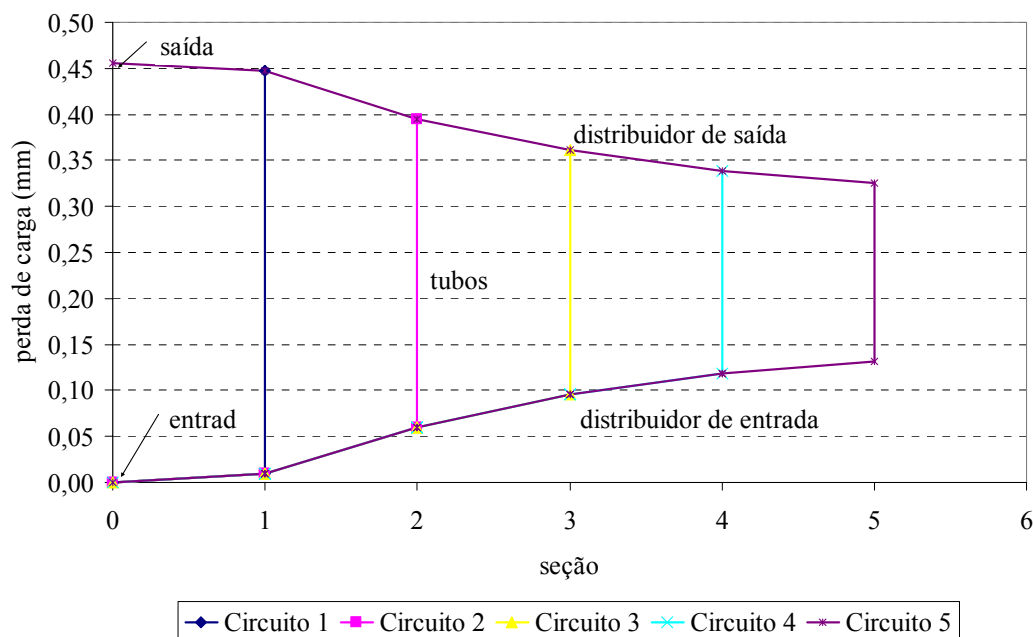


Figura 4 – Perda de carga no coletor em “U”

A Fig. 5 apresenta o gráfico da perda de carga ao longo dos diversos circuitos para o coletor com configuração em “Z”. Assim como para a configuração em “U”, a perda de carga é crescente

no sentido do escoamento. Observa-se que os tubos localizados nas extremidades do coletor estão submetidos a um maior gradiente de pressão, possuindo assim uma maior vazão quando comparados aos tubos centrais. A relação entre a perda de carga máxima e mínima nos tubos é de 1,93.

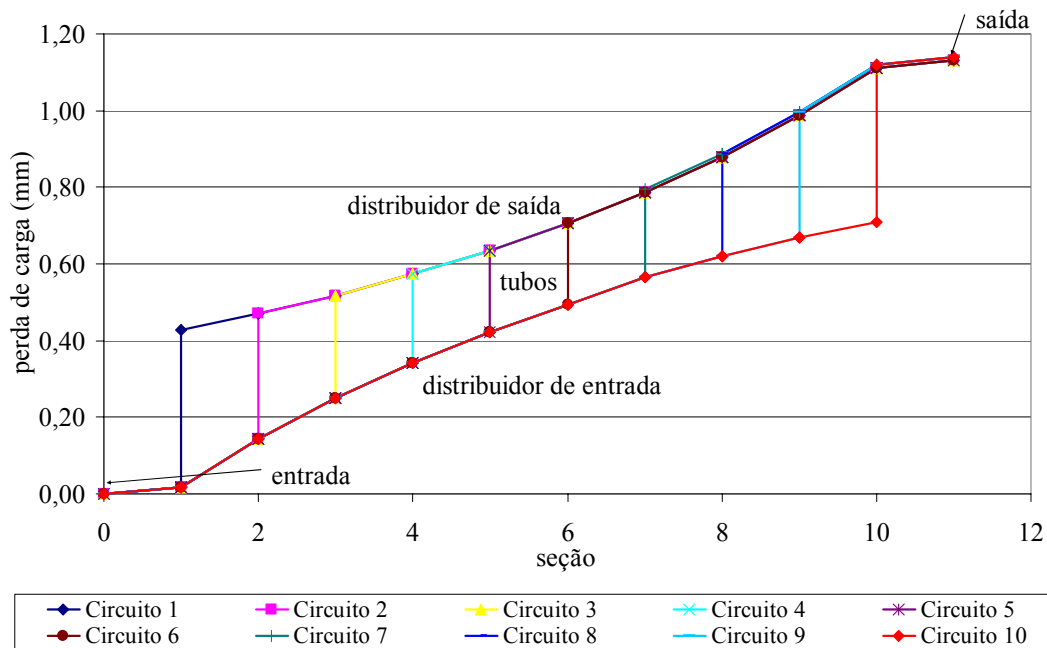


Figura 5 – Perda de carga no coletor em “Z”

A Fig.6 apresenta os gráficos das velocidades nos tubos para as duas configurações. É observado que para a configuração em “U” a velocidade é máxima para os tubos centrais e vai decrescendo em direção aos lados do coletor. Para a configuração em “Z” o comportamento é inverso, os tubos localizados nas laterais do coletor possuem uma maior vazão. Observa-se a simetria da curva para ambas configurações. A configuração em “Z” apresenta uma melhor distribuição de vazão nos tubos, visto que a razão entre a vazão máxima e mínima é de 1,9, enquanto que para a configuração “U” esta razão é de 2,3.

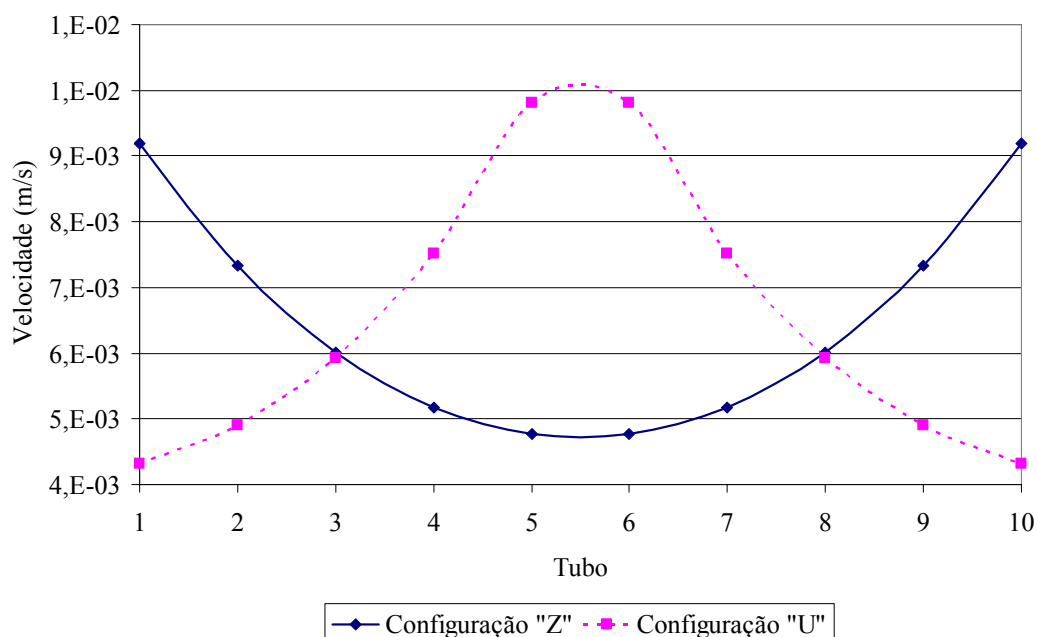


Figura 6 – Velocidade nos tubos dos coletores

4. Conclusões

A metodologia apresentada mostrou-se útil e simples para o cálculo da vazão em coletores de placa plana com diferentes configurações.

A configuração em “Z” apresentou uma melhor distribuição de vazão do que a configuração em “U”, entretanto a perda de carga total é menor para essa última.

De forma a definir qual a melhor configuração, são necessários novos cálculos da eficiência do coletor, o que poderá ser realizado em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo financiamento do projeto “Dessalinizador solar com reaproveitamento de energia para a produção de 1000 litros” e pela bolsa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico da co-autora Rafaela Frota Reinaldo.

À Petrobras pelo financiamento do projeto “Dessalinizador solar com recuperação de calor”.

REFERÊNCIAS

- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons.
- Incropera, F.P. e DeWitt, D.P., 1992, Fundamentos de Transferência de Calor e Massa, Livros Técnicos e Científicos SA.
- Kikas, N. P., 1995, Laminar Flow Distribution in Solar Systems, Solar Energy, Vol. 54, No. 4, pp. 209-217.
- Reinaldo, R. F. ; Bazzo, E. ; Azevedo, J. L. T., 2003, CFD based analysis of heat transfer in a front wall pulverized coal fired boiler including superheaters, Proceedings of the 7th International Conference on Energy for a Clean Environment, Lisboa.
- Streeter, V. L. e Wylie, E. B., 1982, Mecânica dos Fluidos, McGraw-Hill do Brasil.
- Weitbrecht, V., Lehmann, D., Richter, 2002, A., Flow Distribution in Solar Collectors with Laminar Flow Conditions, Solar Energy, Vol. 73, No. 6, pp. 433-441.

NUMERICAL STUDY OF FLOW DISTRIBUTION IN A FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR WITH FORCED CONVECTION

Abstract. Flat plate solar collectors are widely used in thermal energy applications, such as boilers. The collector's efficiency is dependent of the fluid flow distribution. A uniform flow distribution provides the best efficiency. This work presents the numerical simulation of the flow distribution inside a flat plate solar collector with forced convection. Two collector's configurations are simulated; the first one has central inlet and outlet (direct return) and the other one has the inlet and the outlet in opposite sides (reverse return). It is taking into account the distributed pressure loss along the tubes and the minor losses in the junctions between the tubes and manifolds. The total pressure loss between the inlet and the outlet is calculated in order to determinate the flow distribution. The flow inside the collector must satisfy the condition of equal pressure loss for all paths between the inlet and outlet. The results show that the reverse return collectors has a better flow distribution, however the pressure loss in this configuration is greater than in the direct return one.

Key words: Flat Plate Solar Collector, Flow distribution, Pressure Drop