

## **AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO EM UM COLETOR SOLAR**

**Renato Cardoso de Menezes** – renato.mestrado@gmail.com  
**Elizabeth Marques Duarte Pereira** – elizabeth.pereira@green.pucminas.br  
**Rudolf Huebner** – rudolf@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

### 2.2 – Equipamentos e sistemas de aquecimento de água

**Resumo.** *Para se analisar detalhadamente a influência da troca de calor em um coletor solar, é necessário fazer o estudo do escoamento no sistema das tubulações. Sistemas isotérmicos também são levados em consideração, pois este fator também influencia na uniformidade deste escoamento. Em sistemas de aquecimento solar, coletores têm seu rendimento ligado diretamente ao seu tipo de escoamento, ou seja, a não uniformidade do escoamento leva a uma queda de rendimento do sistema. Quanto maiores as temperaturas de entrada dos coletores, maiores as perdas e menor o rendimento. Neste trabalho avaliou-se numericamente a estrutura do escoamento ao longo das tubulações de elevação, e dos tubos de distribuição e coleta de um coletor solar plano com circuito de retorno reverso, levando em consideração as quedas de pressão e escoamento isotérmico. Foram feitas simulações numéricas e modelos analíticos com dois métodos diferentes, para melhor comparação dos resultados. Os resultados finais obtidos no perfil de escoamento são comparados com valores experimentais obtidos na literatura e com soluções analíticas. O presente estudo desconsiderou os fatores térmicos que também influenciam na uniformidade do escoamento, analisando então apenas os fatores mecânicos do escoamento. No resultado deste estudo, obteve-se uma boa aproximação entre os resultados obtidos nas calhas de distribuição e coleta. No caso das tubulações de elevação os perfis de distribuição de escoamento obtidos foram diferentes entre os métodos utilizados e coincidentes com os dados da literatura.*

**Palavras-chave:** *Energia Solar, Coletor, Simulação, Rendimento, Perda de carga*

## **1. INTRODUÇÃO**

A radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica e/ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio de materiais fotovoltaicos.

O aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos pode ser feito com o uso de coletores solares. Os coletores solares são mais usados em aplicações residenciais e comerciais para o aquecimento de água.

Um sistema solar de aquecimento de água é composto basicamente de um coletor solar, onde se verifica a conversão da energia solar em energia térmica, um reservatório termicamente isolado e respectiva tubulação de alimentação do sistema e distribuição de água quente (Bezerra, 2001).

Os coletores solares planos fechados são utilizados para aquecer a água até uma temperatura de 60°C. Um coletor solar plano fechado é constituído por uma caixa externa, isolamento térmico, tubos para escoamento do fluido no interior do coletor, placa absorvedora pintada de preto fosco para melhor absorção da energia solar, cobertura transparente e um sistema de vedação, Fig 1.

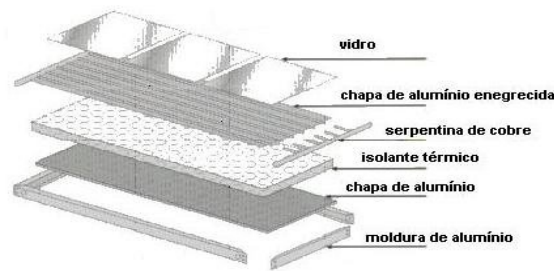


Figura 1- Esquema de Construção de um Coletor Solar

O princípio de funcionamento de um aquecedor solar de água é bastante simples. A radiação solar atravessa o vidro de cobertura e ao encontrar uma superfície geralmente preta é absorvida e reemitida, sofrendo uma alteração no seu comprimento de onda, o que a torna incapaz para atravessar de volta o vidro e a partir daí, tem origem uma reemissão desta radiação no sentido vidro/superfície/vidro. Para minimizar esta perda de radiação, o vidro usa uma cobertura especialmente desenvolvida para isto. Dentro do coletor ocorre um fenômeno conhecido por efeito estufa, responsável pelo aumento progressivo da temperatura da superfície pintada de preto fosco, enquanto durar a ação da radiação solar. Sob a superfície preta, são colocados tubos paralelos ligados nas extremidades por dois tubos de maior diâmetro (tubos de elevação e calhas de distribuição e coleta), contendo água. O coletor solar é então ligado por meio de tubos a um tanque termicamente isolado. Este aquecimento provoca o movimento convectivo natural, também conhecido como termo-sifão, que consiste na transferência da água de um local para outro devido à diferença de massa específica entre a água quente (menos densa) e água fria (mais densa) e isto ocorre até que a água existente no sistema solar de aquecimento atinja o equilíbrio térmico (Sleman A., 2006).

Os sistemas com circulação natural ou termo-sifão, Fig. 2, são recomendados para sistemas com capacidade de menores, e a circulação é lenta do fluido a ser aquecido.

Para sistemas com capacidade superior, deve-se optar pela instalação de um sistema de aquecimento por circulação forçada ou bombeada, onde são adicionados dois novos componentes: o sistema de bombeamento de água e o controlador diferencial de temperatura.

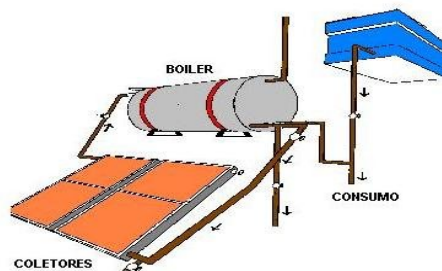


Figura 2- Vista em perspectiva de uma Instalação de Termosifão.

A utilização de aquecimento solar tem impacto sobre três aspectos: econômico, planejamento do setor energético; e social e ambiental.

Em sistemas de aquecimento solar, coletores têm seu rendimento ligado diretamente ao seu tipo de escoamento. Ou seja, a não uniformidade do escoamento leva a uma queda de rendimento do sistema. Onde quanto maiores as temperaturas de entrada dos coletores, maiores as perdas e menor o rendimento, Duffie (1991).

O escoamento interno de um coletor é considerado laminar devido à sua baixa vazão e diâmetros pequenos.

Os efeitos de transferência de calor no sistema de aquecimento não foram levados em consideração, pois primeiramente é necessário realizar um estudo fluidomecânico do sistema de aquecimento.

As quedas de pressão tanto ao longo das tubulações quanto as perdas nas junções desse coletor, ou seja, perdas localizadas, são umas das responsáveis por essa não uniformidade. As quais ocorrem durante o escoamento nas tubulações do coletor.

De acordo com V. Weitbrecht et al (2002), Fig. 3, experimentos comprovam um crescimento da vazão nos tubos de elevação ao longo do coletor. O mesmo perfil crescente foi achado por Jones G. F. e Lior N. (1994), propondo um modelo analítico não térmico, Fig. 4.

Já X. A. Wang e L. G. Wu (1990), Fig. 5, nos mostra uma simetria no escoamento das tubulações de elevação, propondo equações analíticas para modelos isotérmicos e também para modelos com a ação da transferência de calor.

Neste artigo analisou-se a distribuição de fluxo em todas as tubulações do coletor, usando dois métodos analíticos e uma simulação numérica. Podendo assim fazer uma comparação entre estes métodos estudados e obtermos respostas para melhorar a uniformidade do escoamento e conseqüentemente o rendimento do coletor.

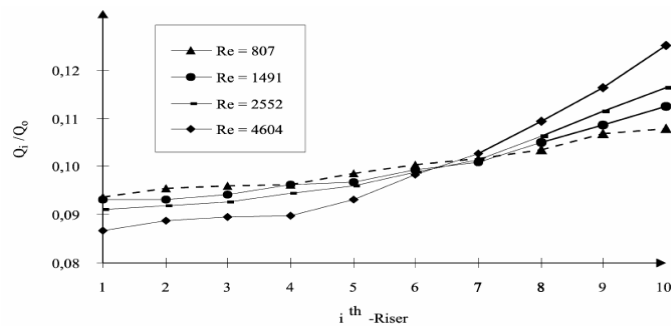


Figura 3- Distribuição de fluxo nos tubos de elevação de um coletor tipo “Z”, obtido experimentalmente. V. Weitbrecht et al (2002).  $Q_i$  é a vazão de entrada e  $Q_o$  a vazão de saída e  $i$  a numeração do tubo de elevação.

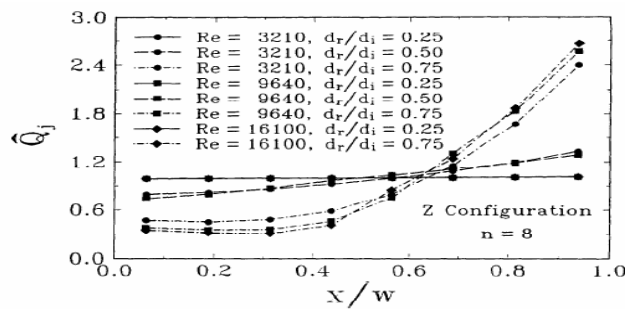


Figura 4- Distribuição de fluxo nos tubos de elevação de um coletor tipo “Z”, analisado numericamente. Jones G. F. e Lior N. (1994).  $Q_j$  é a distribuição adimensional da vazão nos tubos de elevação,  $W$  é o comprimento total da calha [m] e  $X$  a coordenada em direção ao escoamento do fluido.

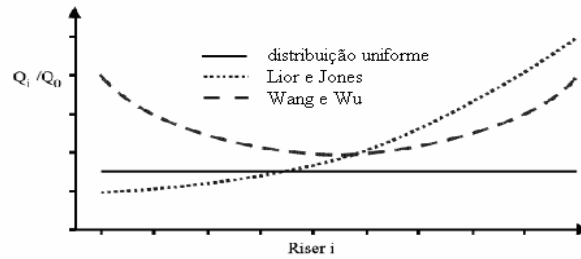


Figura 5- Esquema de distribuição de fluxo de acordo com diferentes autores. A linha sólida representa uma distribuição uniforme em todos os tubos de elevação do coletor.  $Q_i$  é a vazão de entrada e  $Q_o$  a vazão de saída.

## 2. METODOLOGIA NUMÉRICA E ANALÍTICA

Nos tópicos abaixo, são descritas as metodologias numérica e analíticas utilizada para a obtenção dos perfis de distribuição de vazão nas tubulações de um coletor solar plano.

### 2.1 Dados do Coletor

Este artigo baseou-se nas dimensões de um coletor solar plano do tipo “Z” para banho, fornecido pelo laboratório GREEN da PUC-MG. As principais medidas do coletor em questão estão demonstradas conforme a Fig. 6. O coletor possui 9 (nove) tubos de elevação com 964 mm de comprimento e diâmetro de 8,72 mm, e duas calhas idênticas, uma de distribuição e uma de coleta com 1062 mm de comprimento e diâmetro de 21 mm.

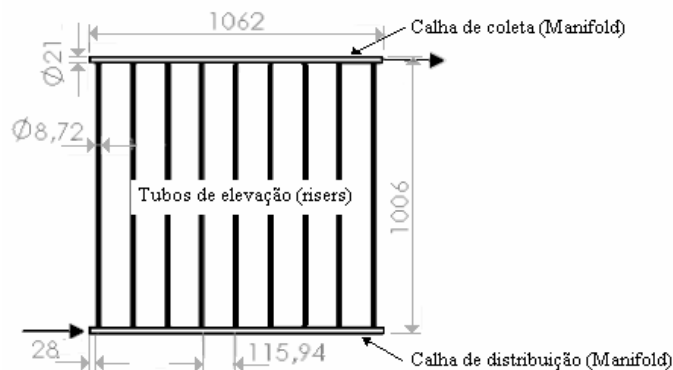


Figura 6- Coletor solar utilizado no artigo (medidas em mm).

A vazão volumétrica, uma das condições iniciais, é determinada por meio da norma da ABNT, utilizada pelo laboratório GREEN/PUC-MG, como vazão de teste para coletores solares planos do tipo “Z” para banho, Eq. 1.

$$Q = 1,2 \cdot \frac{l}{\min} \times \text{Area do coletor} [m^2] \quad (1)$$

A vazão é determinada de acordo com a norma brasileira, ABNT NBR10184 MB – 2342/1985.

O fluido de trabalho usado para o escoamento foi a água com uma temperatura constante de 25°C. Neste estudo o escoamento também é considerado regime permanente, pois como dito, foi analisado apenas os fatores fluidomecânicos do escoamento, não levando em consideração a mudança das propriedades do fluido ao longo do tempo.

O cálculo dos perfis de distribuição das vazões no coletor em estudo, foram calculados e analisados baseando-se em dois métodos analíticos e uma simulação computacional.

## 2.2 Cálculo Analítico

No cálculo do método analítico, foram usados dois métodos diferentes. Os métodos utilizados foram o do artigo de N.P. Kikas et al. (1995) e método de Hardy Cross.

**Método de N. P. Kikas et al. (1995): laminar flow distribution in solar systems.** O método adotado, Kikas et al. (1995), descreve e utiliza as equações de 2 a 12 para o cálculo das vazões mássicas em cada tubo de elevação.

Estas equações são utilizadas para coletores de tipo “Z” (coletor com retorno reverso), com número ímpar de tubos de elevação e escoamento considerado laminar em todo o coletor.

$$R_r = \frac{128 \cdot \nu \cdot L_r}{\pi \cdot d_r^4} + 2 \cdot \frac{14000 \cdot \nu}{\pi \cdot d_r^3} \quad (2)$$

$R_r$  - resistência total do tubo de elevação [Pa s kg<sup>-1</sup>].

$d_r$  - diâmetro interno do tubo de elevação [m].

$L_r$  - comprimento do tubo de elevação [m].

$\nu$  - viscosidade cinemática do fluido [m<sup>2</sup>/s<sup>-1</sup>].

$$R_h = \frac{128 \cdot \nu \cdot L_h}{\pi \cdot d_h^4} + \frac{1100 \cdot \nu}{\pi \cdot d_h^3} \quad (3)$$

Onde,

$d_h$  - diâmetro interno da calha [m].

$L_h$  - comprimento da calha [m].

$R_h$  - resistência total das calhas [Pa s kg<sup>-1</sup>].

$R_{pr}$  - resistência de uma seção reta do tubo de elevação [Pa s kg<sup>-1</sup>].

$R_{ph}$  - resistência de uma seção reta de uma calha [Pa s kg<sup>-1</sup>].

$R_{fr}$  - resistência da junção conectada à taxa de fluxo do tubo de elevação [Pa s kg<sup>-1</sup>].

$R_{fh}$  - resistência da junção [Pa s kg<sup>-1</sup>].

$$R_{fm} = \frac{3100 \cdot \nu}{\pi \cdot d_h^3} \quad (4)$$

$R_{fm}$  - resistência da junção [Pa s kg<sup>-1</sup>].

$$r = \frac{R_r + R_h}{R_r - R_{fm}} \quad (5)$$

$r$  – razão das resistências hidráulicas.

As equações que relacionam a razão entre suas vazões mássicas são descritas abaixo:

$$\dot{m}_2 = \left( r + \frac{(-1)^n + 1}{2} [r - 1] \right) \dot{m}_1 \quad (6)$$

$$\dot{m}_i = (2r-1)\dot{m}_{i-1} + (r-1)\left(\frac{(-1)^n - 1}{2}\dot{m}_1 + 2\sum_{k=1}^{i-2}\dot{m}_k\right) \quad (7)$$

ou

$$\dot{m}_i = 2r\dot{m}_{i-1} - \dot{m}_{i-2} \quad (8)$$

Fazendo a consideração que:

$$\frac{\dot{m}_r}{2} = \frac{\dot{m}_1}{2} + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5 \quad (9)$$

Onde  $\dot{m}_r$  é vazão mássica de entrada do coletor em [kg/s] e  $\dot{m}_i$  é a vazão mássica em casa tubo de elevação em [kg/s].

A Eq. 9 descreve o somatório das vazões mássicas em todos os tubos de elevação que deve ser igual à vazão mássica de entrada ou saída.

**Método Hardy cross.** O outro método analítico utilizado foi o Pipe Networks (Hardy cross method).

O tradicional método Hardy-Cross, apesar de simples, é limitado ao uso em redes horizontais e constituídas de um conjunto definido de ciclos fechados.

Hardy Cross criou este método em 1936. Assumindo que cada tubo tem um escoamento de vazão volumétrica, Q. Balanceando este volume de entrada e saída em cada conexão.

O método necessita dos dados físicos da malha dos tubos e uma pré-distribuição dos valores da vazão volumétrica em cada seção dos tubos.

Usa-se a equação de Fair Whipple-Hsiao para calcular a queda de pressão nos tubos, sendo recalculado a cada iteração realizada, até que o fluxo de água em cada tubo esteja balanceado, o qual é ajustado por um delta Q calculado, fazendo então a correção do volume do escoamento, e analisando paralelamente os resultados da queda de pressão calculada até que ela se aproxime de zero.

A equação de Fair Whipple-Hsiao utilizada para a resolução do método para este coletor em questão, foi a equação para tubos de cobre transportando água quente, Eq. 10:

$$Q = 63,281 \cdot d^{2,714} \cdot J^{0,571} \quad (10)$$

Onde, Q é a vazão volumétrica [ $m^3/s$ ]

d o diâmetro em [m] e J é a perda de carga em [m/m].

Esta equação é recomendada para diâmetros de tubulações menores de 50mm, o qual se encaixa no caso deste coletor em questão.

### 2.3 Método Numérico - Simulação

Para uma análise mais completa, é necessário o uso de uma ferramenta computacional específica para simulações em escoamento. Foi utilizado o software CFX, versão 10, baseado em volumes finitos.

Foram geradas várias malhas refinadas, com o objetivo de se obter um resultado mais coerente.

Para dados de entrada, foi dada a vazão mássica de entrada no coletor, calculada de acordo com a norma descrita para teste de coletores para banho, conforme a ABNT. A vazão mássica de entrada definida para o coletor foi de 0,019 kg/s.

Na saída do coletor, foi determinada como condição, pressão estática igual a zero, para não influenciar no escoamento ao longo do coletor.

A simulação foi executada em regime permanente, pois não houve o intuito de analisar o efeito do tempo nas propriedades do fluido neste estudo.

Fluido de teste: água a 25°C.

As equações utilizadas são a da conservação da massa e Navier –Stokes para regime laminar.

Conservação da massa:

$$0 = \frac{\partial(\rho.u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho.v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho.w)}{\partial z} \quad (11)$$

Equação de Navier-Stokes para regime laminar:

$$u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{V} \quad (12)$$

Foi utilizado um artifício de refinamento de malha – inflation – nos tubos de elevação, pois além dos diâmetros destes tubos serem pequenos, há um maior interesse neste estudo na distribuição da vazão em cada tubo de elevação.

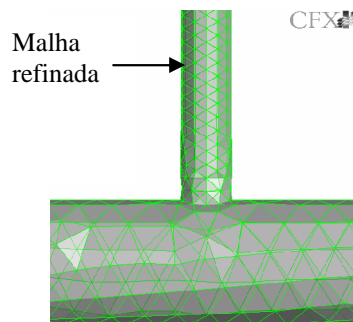


Figura 7. Malha utilizada na simulação, utilizando refinamento – inflation – nos tubos de elevação.

Para uma malha de 4 mm, foi necessário um Pentium 4 de 1GB de Ram, convergindo em 20 (vinte) horas de simulação.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Tubos de elevação (Risers)

Os resultados de maior interesse neste estudo, são os perfis de distribuição de vazão nos tubos de elevação.

De acordo com o artigo Kikas et al. (1995), obteve o seguinte resultado para as vazões mássicas calculadas apresentadas na Tab. 1:

Tabela 1. Resultados calculados pelo método de Kikas *et al.* (1995)

Tubos de elevação	Vazão mássica (Kg/s)
1	0,00199
2	0,00201
3	0,00206

4	0,00215
5	0,00227

Os valores da Tab. 1 são numerados diferentemente dos outros métodos utilizados neste artigo. A numeração é demonstrada conforme a Fig. 8.



Figura 8. Ordem de numeração dos tubos de elevação pelo método de Kikas et al. (1995).

Os valores são transformados para vazão volumétrica, para compararmos com os demais resultados, obtendo os seguintes perfis de vazão volumétrica, Fig. 9.

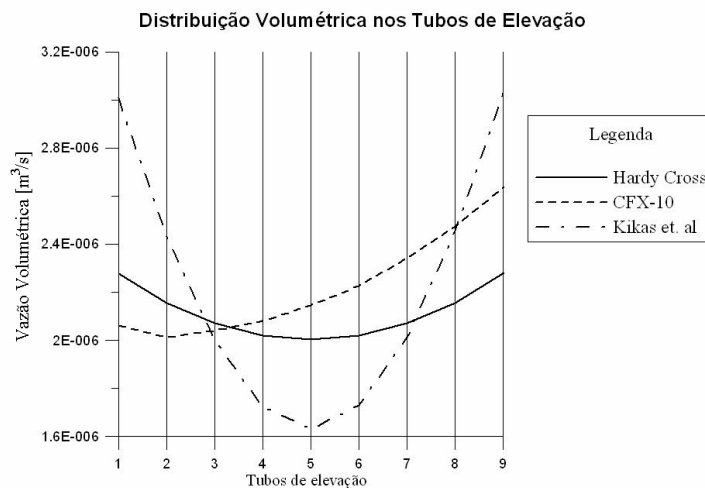


Figura 9- Perfis de vazões volumétricas nos tubos de elevação dos três métodos adotados.

Na distribuição do fluxo nos tubos de elevação, os perfis traçados obtiveram valores diferentes.

Os perfis dos métodos analíticos foram simétricos em relação à distribuição do escoamento, mas com curvas distintas. No caso do perfil obtido por meio de simulação, obteve-se um perfil diferente dos demais, tendo uma distribuição de fluxo crescente ao longo do coletor, a partir do segundo tubo de elevação.

De acordo com o artigo V. Weitbrecht et al (2002), o esquema nos mostra a diferença entre os perfis também analisados por outros pesquisadores. A curva de fluxo traçada por X. A. Wang e L. G. Wu (1990) nos mostra uma simetria no escoamento das tubulações de elevação, e no caso do perfil de Jones G. F. e Lior N. (1994), tem-se uma semelhança entre o perfil traçado pela simulação numérica deste artigo, ou seja, uma distribuição crescente do fluxo. O artigo descrito por V. Weitbrecht et al (2002), nos confirma que o perfil traçado experimentalmente pelo autor se aproxima do perfil simulado neste artigo, pelo programa CFX-10.

### 3.2 Calhas de distribuição e de coleta (manifolds)

**Calha de distribuição.** Os resultados para a calha de distribuição (manifold), obtiveram perfis aproximados.

Houve uma queda de vazão ao longo da calha de distribuição do coletor, pois a vazão é distribuída para os tubos de elevação, Fig. 10.



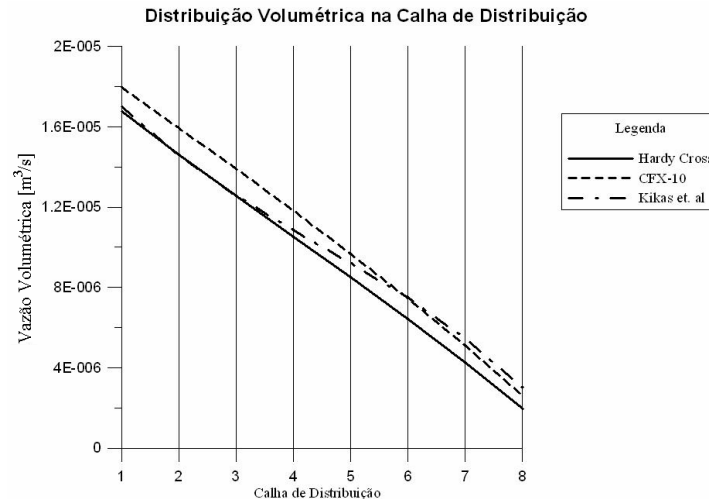


Figura 10- Perfis de vazões volumétricas na calha de distribuição dos três métodos adotados.

**Calha de coleta.** A mesma análise do caso anterior, pode ser feita para a calha de coleta.

Para o caso do escoamento nas calhas, os resultados foram também aproximados, obtendo perfis similares de distribuição de vazão. E assim obtendo um perfil crescente ao longo da calha de coleta do coletor, Fig. 11.

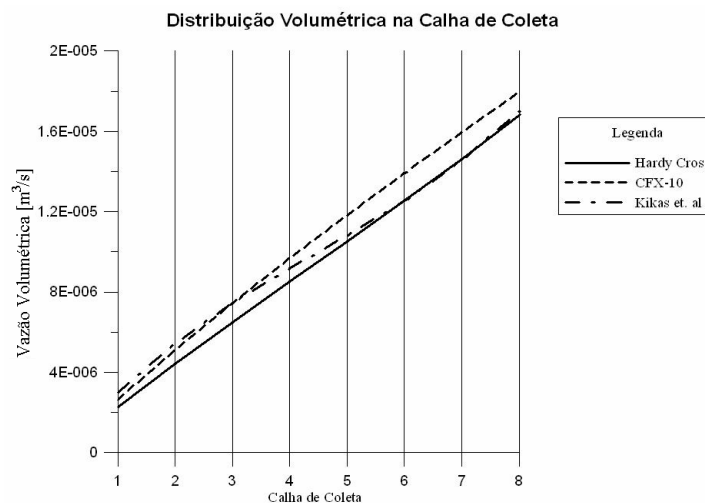


Figura 11- Perfis de vazões volumétricas na calha de coleta dos três métodos adotados.

#### 4. CONCLUSÃO

Este artigo analisou o escoamento interno em um coletor plano, considerando o sistema como um sistema isotérmico e em regime permanente. Os métodos utilizados obtiveram resultados diferentes em relação aos seus perfis traçados, tirando como principal base de dados as análises feitas nos tubos de elevação. O que mais se aproxima do método experimental demonstrado por Jones G. F. e Lior N. (1994) foi a simulação feita em CFX-10. Pois na simulação o perfil foi crescente ao longo do número de tubos de elevação do coletor.

Os perfis finais nas calhas foram bem aproximados em relação aos três métodos utilizados neste estudo.

O objetivo deste estudo foi de comparar os métodos analíticos com simulações numéricas de escoamento interno em um coletor solar plano, para então podermos analisar qual o melhor modelo

que se aproxima do real. Para a confirmação real dos perfis traçados é necessária uma análise experimental, o qual já foi realizado por V. Weitbrecht et al (2002).

## REFERÊNCIAS

- Jones G. F. and Lior N., 1994, Flow distribution in manifolded solar collectors with negligible buoyancy effects, Solar Energy, vol.52, n. 3, pp. 289–300
- N. P. Kikas, 1995, Laminar flow distribution in solar systems, Solar Energy, vol. 54, n. 4, pp. 209-217
- V. Weitbrecht, 2002, Flow distribution in solar collectors with laminar flow conditions, Solar Energy, vol. 73, n. 6, pp. 433–441.
- Jack B. Evett, Ph.D, Cheng Liu, Ph.D, 1989, 2500 solved problems in Fluid Mechanics and hydraulics, McGraw-Hill Book Company, Cap. 13.
- X. A. Wang e L. G. Wu, 1990, Analysis and performance of flat-plate solar collector arrays, Solar energy, vol. 45, n.2, pp. 71-78.
- Duffie A. John et al, 1991, Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons, Inc., Second Edition
- Bezerra A. M. Artigos diversos, 2001, Disponível em: <<http://mourabezerra.sites.uol.br>>. Acesso em Set. 2006.
- Sleman A. Cardoso, 2006, Análise da Viabilidade Econômica da Utilização de Aquecedores. Solares de Água em Resorts no Nordeste do Brasil.
- ABNT NBR10184 MB – 2342/1985, Coletores Solares Planos Líquidos - Determinação do Rendimento Térmico. Aplicação para banho: ANSI / ASHRAE 93-2003 (substitui a norma ANSI / ASHRAE 96-1986 RA91) Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors.

## NUMERICAL METHOD IN AN INTERNAL FLOW RATES OF FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR

**Abstract.** *To analyze the influence of the heat transfer in a solar collector, it is necessary to make the study of the flow in the system of the pipes. Isothermal systems also are considered, therefore this factor also influences in the uniformity of this flow.*

*In solar heating systems, collectors directly have its on income to its type of flow. Or either, the uniformity of the flow does not lead to a income fall of the system. As bigger the temperatures of entrance of the collectors, is the greater the losses and minor the income. In this work the structure of the flow along one pipe of rise was numerically evaluated, and the pipes or gutters of distribution and collect (manifold) of a plain solar collector with reverse return circuit, considering the losses of loads. Which occurs during the flow in the collector pipes. They had been made numerical simulation and you analytics analyze with two different methods, a better comparison of the results. The gotten final results in the flow profile are compared with gotten experimental values in literature or with analytics solutions. In this present study, the thermal factors that also influence in the uniformity of the flow had been disrespected, analyzing then only the mechanical factors of the flow.*

*In the result of this study, a good approach between the gotten results in the distribution gutters and collects. In the case of the rise pipes (risers) the flow profiles had been different between the used methods.*

**Key words:** Solar Energy, Collector, Simulation, income, pressure drops