

MÉTODOS ALTERNATIVOS A SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE AQUECEDORES SOLARES

Antonio Marcos de Oliveira Siqueira – antonio_siqueira@ufam.edu.br

Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Instituto Agricultura e Ambiente - IAA

2.2 Equipamentos e sistemas de aquecimento de água

Resumo. Neste trabalho apresenta-se uma discussão a respeito dos diferentes métodos encontrados na literatura para a estimativa da vazão mássica em sistemas de aquecimento de água operando em circulação natural. O estudo faz uma revisão dos principais trabalhos desenvolvidos tanto do ponto de vista teórico como empírico, apresentando os fundamentos e as origens das equações empregadas. Os métodos avaliados são seguintes: Balanço de energia no reservatório térmico, Equação de Hagen-Poiseuille, Correlação de Siddiqui, Balanço simplificado da quantidade de movimento, Equação simplificada de Hottel-Bliss-Whillier. O trabalho contempla o confronto dos métodos anteriores com procedimentos mais complexos, como o balanço detalhado de energia ao longo de todo o sistema e o balanço da quantidade de movimento. Uma vez que a simulação do desempenho de equipamentos destinadas ao suprimento de água quente por meio de energia solar, operando por circulação natural, ou seja, sem o bombeamento de água, requer a solução das equações dos balanços de energia nos coletores solares, nas tubulações, bem como no reservatório térmico, com ou sem suprimento auxiliar de energia, acopladas a equação da quantidade de movimento que torna esta simulação um processo um tanto complexo, propõe-se, neste estudo a utilização de determinadas equações ou correlações no intuito de minimizar o procedimento de determinação da distribuição de temperatura no circuito, ao longo das horas, num determinado período de tempo, para uma dada aplicação e condições meteorológicas.

Palavras-chave: Energia Solar, Simulação Computacional, Termossifão, Aquecedor Solar.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta cinco metodologias empregadas para a estimativa da vazão mássica da água de circulação nos coletores solares num sistema solar de aquecimento de água (SSAA) operando em regime de termossifão, quando são conhecidas algumas medidas experimentais como a temperatura na entrada e na saída do arranjo de coletores solares.

O objetivo principal do trabalho é verificar se estas metodologias, que utilizam um modelamento matemático simples, podem ser adequadamente empregadas na estimativa do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar operando em regime de termossifão, uma vez que o método clássico emprega diversas equações (balanços de energia e da quantidade de movimento) e requer a resolução de integrais e de equações diferenciais e/ou transcendentais, o que requer o desenvolvimento de programas computacional e um conhecimento mínimo de métodos numéricos. As metodologias são, em geral, simplificações do cálculo detalhado ou correlações. Os métodos avaliados são seguintes: Balanço de energia no reservatório térmico (BER), Equação de Hagen-Poiseuille (EHP), Correlação de Siddiqui (CS), Balanço simplificado da quantidade de movimento (BSQM), Equação simplificada de Hottel-Bliss-Whillier (ESHBW).

Inicialmente, no item 2 são apresentadas cada uma das metodologias sugeridas neste trabalho, fazendo-se uma breve descrição de sua fundamentação científica. Em Siqueira (2003) é apresentado um quadro resumo destas abordagens, relacionando os principais trabalhos na área. Uma análise comparativa entre as abordagens é apresentada no item 4.

2. METODOLOGIAS

Neste item são apresentadas cinco metodologias empregadas para a estimativa da vazão mássica da água de circulação nos coletores solares num sistema de aquecimento solar operando em regime de termossifão, quando são conhecidas algumas medidas experimentais como a temperatura na entrada e na saída do arranjo de coletores solares.

2.1 Metodologia 1 – balanço de energia no reservatório térmico

Cabe ressaltar que embora o procedimento “balanço de energia no reservatório térmico” - BER - refira-se a uma metodologia teórica, a vazão mássica é obtida a partir de variáveis determinadas experimentalmente. Assim esta grandeza é assumida também como uma medida experimental. No entanto, o produto entre o coeficiente global de transferência de calor U e a área do tanque, representado pelo termo (UA) (designado neste texto pelo mesmo nome, seguindo o padrão da maior parte dos trabalhos apresentados na literatura) empregado na determinação das perdas térmicas do reservatório térmico pode ser avaliado teórica ou experimentalmente conforme discutido em Siqueira (2003).

O balanço térmico no reservatório de água quente pode ser realizado conforme o esquema apresentado na Fig. 1, para um determinado intervalo de tempo Δt e pode ser expresso pela equação:

$$\dot{m}_c c_p T_s + \dot{m}_d c_p T_r - \dot{m}_c c_p T_e - \dot{m}_d c_p T_d - (UA)(T_m - T_a) - \dot{Q}_{tub} = \dot{Q}_{acum} \quad (1)$$

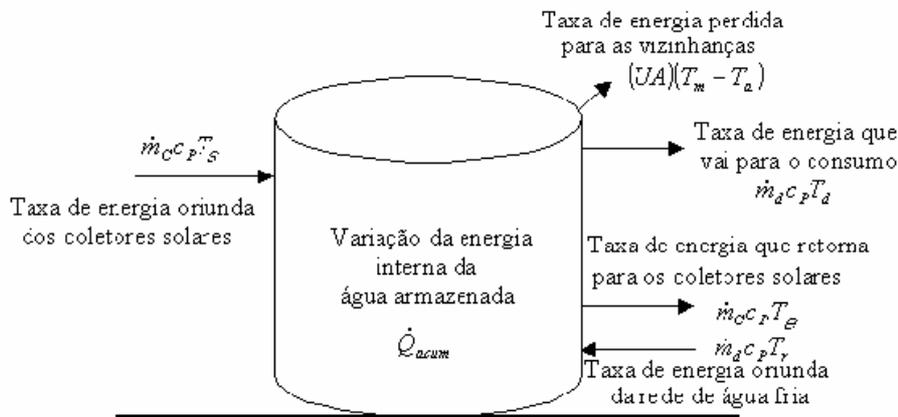


Figura 1 – Balanço térmico no reservatório de água quente.

Reagrupando os termos da Eq. (1), a mesma pode ser reescrita como:

$$\dot{Q}_{\text{útil}} + \dot{Q}_d - \dot{Q}_{\text{perdas}} = \dot{Q}_{\text{acum}} \quad (2)$$

A taxa de energia que entra no tanque ($\dot{Q}_{\text{útil}}$) é aquela oriunda do ganho térmico nos coletores, ou seja,

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = \dot{m}_c c_p (T_s - T_e) - \dot{Q}_{tub} \quad (3)$$

O termo \dot{Q}_{tub} corresponde às perdas térmicas médias na tubulação que interliga os coletores ao

reservatório térmico, \dot{m}_c é a vazão mássica da água que circula pelo arranjo de coletores, C_p é o calor específico da água, T_s é a temperatura da água na saída do arranjo de coletores, T_e é a temperatura da água na entrada do arranjo de coletores.

A taxa de energia que sai do tanque para a demanda (\dot{Q}_d) é devida ao consumo de água quente pelos usuários, ou seja,

$$\dot{Q}_d = \dot{m}_d C_p (T_d - T_r) \quad (4)$$

Sendo \dot{m}_d é a vazão mássica da água destinada ao consumo, T_d é a temperatura da água quente para o consumo, T_r é a temperatura da água de reposição no tanque e T_a é a temperatura do ar ambiente no recinto onde está instalado o reservatório.

A taxa de energia trocada com as vizinhanças (\dot{Q}_{perdas}) associada às perdas térmicas inerentes ao material de construção e de isolamento do reservatório pode é definida como:

$$\dot{Q}_{perdas} = (UA)(T_m - T_a) + \dot{Q}_{tub} = \sum_{i=1}^{n_{reserv}} \{(UA)_i (T_i - T_a)\} + \dot{Q}_{tub} \quad (4)$$

Onde $(UA)_i$ é o coeficiente global de transferência de calor da camada i do reservatório, (UA) é o coeficiente global de transferência de calor médio do reservatório, T_a é a temperatura do ar ambiente nas vizinhanças do reservatório, T_i é a temperatura da água na camada i no reservatório, T_m é a temperatura média da água na armazenada no reservatório, n_{reserv} é o número de camadas no reservatório.

A potência ou variação da energia térmica (\dot{Q}_{acum}) associada à água armazenada dentro do tanque pode ser calculada pela expressão:

$$\dot{Q}_{acum} = \frac{E(t + \Delta t) - E(t)}{\Delta t} \quad (5)$$

Onde a energia E , que é uma função da temperatura, pode ser expressa por:

$$E(t)_i = \rho V_{ACi} C_p T_i \quad (6)$$

sendo: V_{ACi} é o volume a partir da base do tanque até a metade da camada do reservatório (onde é realizada a leitura de temperatura); ρ é a massa específica da água ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). A energia armazenada no tanque num determinado instante $E(t)$ é obtida pela integração da curva de estratificação térmica versus volume de cada camada do reservatório térmico. Considera-se, portanto, que há um gradiente de temperatura contínuo partindo da base até o topo do tanque de modo que a energia contida no tanque será o produto da área resultante da integração da função gradiente de temperatura variando desde zero até o volume total do tanque, vezes o calor específico médio da água (que pode ser considerado constante na faixa de temperaturas encontrada nos sistemas de aquecimento solares de água).

Observa-se que a avaliação exata da quantidade de calor armazenada no tanque a cada instante pressupõe o conhecimento detalhado da distribuição de temperaturas da água contida no mesmo. Observa-se ainda que a energia armazenada no tanque num determinado instante $E(t)$ pode ser calculada utilizando-se o método de integração numérica trapezoidal.

Definidas cada uma das taxas de energia, a partir do balanço térmico no reservatório pode-se determinar a vazão mássica da água que circula nos coletores num determinado intervalo de tempo, substituindo-se a Eq. (3) na Eq. (2) e escrevendo-a para a vazão mássica \dot{m}_c :

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{Q}_{acum} - \dot{Q}_d + \dot{Q}_{perdas}}{c_p(T_s - T_e)} \quad (7)$$

Para esta metodologia, empregada por Young e Bergquam (1981) e Uhlemann e Bansal (1985), a vazão mássica é uma função da diferença de temperatura ao longo do coletor solar e dos termos correspondentes ao acúmulo de energia no reservatório térmico e a taxa de energia relacionada ao consumo de água quente e, finalmente, das perdas térmicas associadas. Observa-se, que os termos que envolvem energia, por sua vez, estão relacionados ao nível de temperatura, ou seja, a distribuição de temperatura ao longo de todo o sistema.

2.2 Metodologia 2 – equação de Hagen-Poiseuille

Esta metodologia – EHP - é baseada no trabalho desenvolvido por Uhlemann e Bansal (1985), em que se considera que a perda de carga ao longo do circuito do aquecedor solar operando em regime de termossifão é equivalente à diferença de pressão, que por sua vez, é uma função da massa específica da água na entrada e na saída dos coletores, ou seja:

$$\Delta p = (\rho_i - \rho_o)gH_{repr} \quad (8)$$

onde g é a aceleração da gravidade e H_{repr} é altura representativa, tomada pela Eq. (8), conforme alturas definidas na Fig. 2:

$$H \equiv H_c/2 + \Delta H + H_r/2 \quad (9)$$

Assumindo que o escoamento é laminar, a perda de carga pode ser determinada teoricamente pela equação clássica de Hagen-Poiseuille (Sissom e Pitts, 1972), em função da vazão volumétrica Q_c e dos parâmetros geométricos do coletor e da viscosidade dinâmica μ :

$$H_f = \frac{\Delta p}{\rho} = \frac{128Q_c L \mu}{\pi D^4 \rho} \quad (10)$$

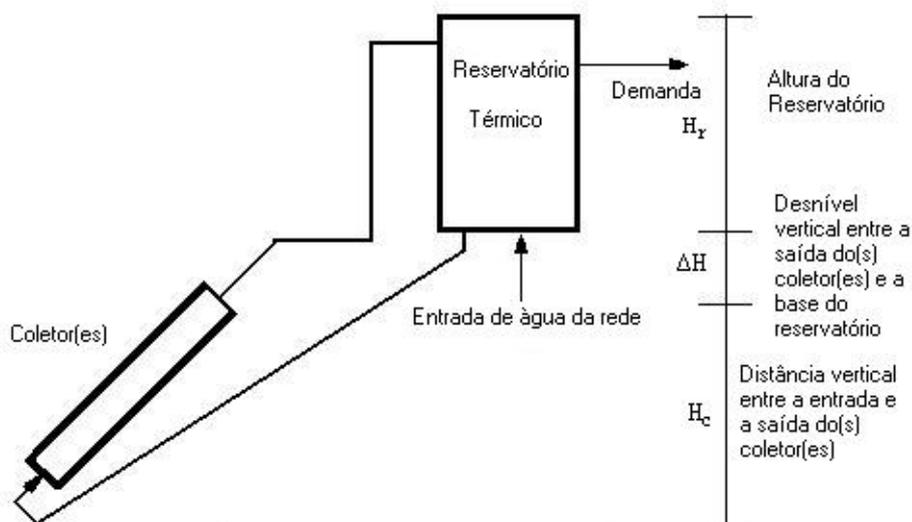


Figura 2 – Desenho esquemático do SSAA.

Uma vez que a vazão volumétrica Q_C e a vazão mássica estão relacionadas pela mássica específica, tem-se:

$$\dot{m}_C = \frac{(\rho_e - \rho_s)gH\pi D^4 \rho}{128L\mu} \quad (11)$$

e, considerando o coeficiente de expansão térmica β que mede a extensão da variação da densidade como resposta a uma variação da temperatura numa pressão constante, definido por Incropera e Witt (1992) na forma aproximada como:

$$\beta \cong \frac{-1(\rho_s - \rho_e)}{\rho_i (T_s - T_e)} \quad (12)$$

e, considerando a massa específica média como a média das massas específicas entre a saída e a entrada do coletor solar, a equação para a vazão mássica pode ser escrita como:

$$\dot{m}_C = \frac{\pi D^4 g H \beta \rho_e^2 \Delta T_C (2 - \beta \Delta T_C)}{256 L \mu} \quad (13)$$

Desta forma, obtêm-se uma equação para a vazão mássica como uma função da diferença de temperatura ao longo dos coletores e dos parâmetros geométricos diâmetro, comprimento e altura representativa:

$$\dot{m}_C = f(\Delta T_C, D, L, H_{repr}) \quad (14)$$

Assim, a vazão mássica pode ser estimada diretamente, em função de parâmetros diretamente determinados e de outros que podem ser facilmente medidos.

2.3 Metodologia 3 – correlação de Siddiqui

Nesta metodologia a vazão é determinada a cada intervalo de tempo, de modo a satisfazer a correlação desenvolvida por Siddiqui (1997), que realizou estudos a respeito da transferência de calor e do fluxo de massa resultante em sistemas de aquecimento solares operando em circulação natural. Nesse trabalho, Siddiqui observou uma relação linear entre o Número de Reynolds Re e um novo parâmetro adimensional Si :

$$Re = 560Si - 650 \quad (15)$$

onde Si é definido como a razão entre o fluxo solar absorvido $I_T(\tau\alpha)$ e o potencial de perdas de energia a partir da placa absorvedora nos coletores para o ar ambiente $U_L(T_p - T_a)$:

$$Si = \frac{I_T(\tau\alpha)}{U_L(T_p - T_a)} \quad (16)$$

Nesse mesmo trabalho, Siddiqui obteve uma correlação que relaciona o transporte de energia e de massa, que pode servir como uma equação fundamental no projeto de aquecedores solares em termossifão. A correlação resultante – CS - envolve a relação entre a razão do produto do Número de Nusselt e o Número de Grashof pelo Número de Prandtl e o número de Reynolds, ou seja:

$$\frac{NuGr}{Pr} = 4,12Re^{1,67} \quad (17)$$

2.4 Metodologia 4 – balanço simplificado da quantidade de movimento

Com o emprego do balanço simplificado da quantidade de movimento, a vazão é determinada a cada intervalo de tempo, de modo a satisfazer o balanço da quantidade de movimento, ou seja, a velocidade de circulação do fluido pelos coletores é calculada de forma que a soma das quedas de pressão nas tubulações e nos coletores seja equivalente à diferença de pressão resultante da distribuição de temperaturas no circuito (Siqueira, 2003). Deste modo, a vazão mássica pode ser calculada pela resolução da equação:

$$a(\dot{m}_c)^2 + b\dot{m}_c + c = 0 \quad (18)$$

se considerados os coeficientes a , b e c definidos como:

$$a = \frac{B_0\nu}{A_c} \quad (19)$$

$$b = \frac{B_1}{(A_c)^2} \quad (20)$$

$$c = -[SG(T_e) - SG(T_s)]H_c \quad (21)$$

onde A_c é a área de coleta, ν é a viscosidade cinemática, H_c é a altura do coletor e SG é a massa específica relativa. Nesta abordagem a carga de termossifão é assumida como a diferença de massa específica ao longo do coletor.

Os números B_0 e B_1 são parâmetros que representam respectivamente a resistência ao escoamento no coletor solar e ao longo das tubulações hidráulicas e a resistência ao escoamento do fluido que ocorre devido às perdas localizadas (também denominadas, perdas singulares):

$$B_0 = \frac{128A_c}{\pi\rho g} \left[\left(\frac{L}{nD^4} \right)_c + \left(\frac{L}{D^4} \right)_{TUB2-3} + \left(\frac{L}{D^4} \right)_{TUB4-1} \right] \quad (22)$$

$$B_1 = \frac{8A_c^2}{\pi^2\rho^2g} \left[\left(\frac{E}{D^4} \right)_{TUB2-3,loc} + \left(\frac{E}{D^4} \right)_{TUB4-1,loc} \right] \quad (23)$$

Este modelo – BSQM - é bastante simples para o cálculo da vazão de circulação no sistema, visto que basta se resolver uma equação de 2º grau cujos coeficientes a e b são fixos para um dado sistema, dependendo apenas dos parâmetros construtivos dos coletores solares e das tubulações hidráulicas. O parâmetro c , por sua vez, envolve a distribuição de temperatura ao longo do coletor solar ou do arranjo de coletores solares.

2.5 Metodologia 5 – equação simplificada de Hottel-Bliss-Whillier

Partindo-se do modelo térmico desenvolvido conforme Duffie e Beckman (1991), considerando que há um aumento constante da temperatura da água escoando através do arranjo de coletores, é possível calcular a vazão mássica que irá produzir essa diferença de temperatura a um dado ganho útil de energia, empregando a equação simplificada - ESHBW:

$$\dot{m}_c = - \frac{F' U_L A_c}{C_p \ln \left[1 - \frac{U_L (T_s - T_e)}{S - U_L (T_e - T_a)} \right]} \quad (24)$$

onde S é a energia solar absorvida pelos coletores e F' é o fator de eficiência do coletor, que para um determinado ponto do coletor representa a razão entre o ganho útil real e o ganho útil de energia que resultaria se toda a superfície absorvedora estivesse à temperatura local do fluido, ou seja, a relação entre as resistências à transferência de calor desde a placa absorvedora até o ambiente e as resistências à transferência de calor desde o fluido até o ambiente. T_e e T_s são, respectivamente, as temperaturas de entrada e na saída do arranjo dos coletores solares e T_a é a temperatura ambiente. Esta equação - ESHBW, embora, leve em consideração, várias simplificações, aplica-se satisfatoriamente na determinação da vazão mássica.

3. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados os resultados obtidos com o emprego das 5 abordagens distintas para o cálculo da vazão mássica da água que circula nos coletores ao longo do dia. Foi acrescentada a metodologia completa (aqui chamada de M6) descrita em detalhes por Siqueira (2003) e utilizada por Norton et al. (2001), Morrison e Tran (1984), Young e Bergquam (1984) e Ong (1974), entre outros. Estes procedimentos podem ser empregados quando da impossibilidade de realizar uma medida experimental da vazão ou mesmo para uma estimativa rápida da mesma. Os cálculos foram comparados com os dados experimentais de 5 ensaios realizados no laboratório de energia solar da UFRGS – LES, durante o trabalho de doutoramento de Siqueira (2003).

A metodologia M1 que decorre do balanço de energia no tanque, é um procedimento empírico, pois emprega medidas experimentais de temperatura da água na entrada e na saída dos coletores, distribuição de temperatura no reservatório térmico, temperatura ambiente e radiação solar incidente no plano dos coletores. Os resultados (Fig. 3) mostram que esta metodologia é adequada apenas para alguns períodos do dia, necessitando-se de uma análise mais profunda, principalmente, no que se refere à determinação da variação da energia armazenada no tanque.

Observa-se, a curva de vazão mássica teoricamente obtida pelo Método M1 está em uma parte do dia abaixo da curva experimental. Este fenômeno pode ser devido à dificuldade na determinação da energia armazenada no reservatório e conseqüentemente, na subestimação da variação da energia térmica associada à água armazenada, o que foi verificado por Uhlemann e Bansal (1980).

A metodologia M2 que estima a vazão mássica, partindo-se da Equação de Hagen-Poiseuille é apresentada na Fig. 4. Cabe destacar que nesse caso, tem-se a vazão mássica no SSAA como uma função de parâmetros geométricos (diâmetro e comprimento da tubulação, altura do tanque), da viscosidade da água e da diferença de temperatura entre a entrada e a saída dos coletores. Desta forma, essa equação para a estimativa da vazão é na verdade uma correlação semi-empírica, pois também emprega valores medidos experimentalmente.

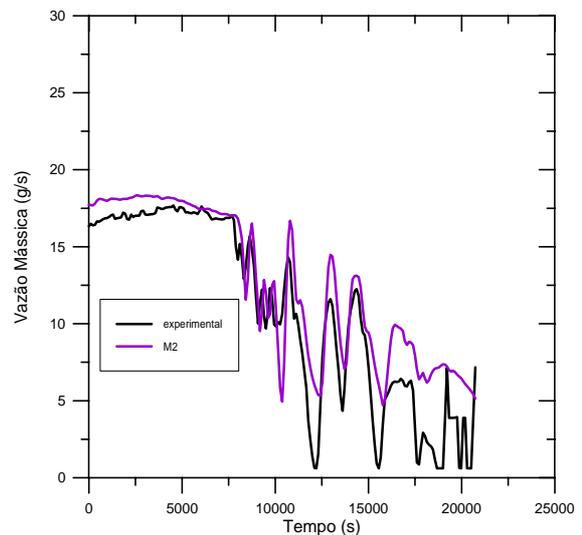
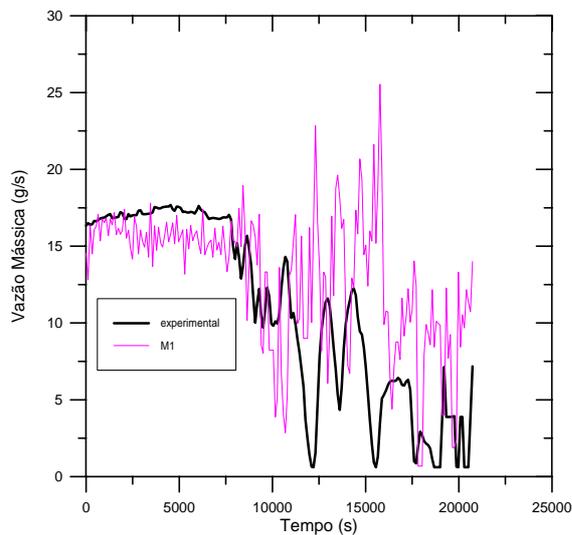


Figura 3 - Confronto teórico-experimental: M1.

Figura 4 - Confronto teórico-experimental: M2.

A metodologia de Siddiqui é apresentada na Fig. 5, que mostra que os resultados obtidos com este procedimento, é uma aproximação da medida experimental, mas não encontra-se nenhuma fundamentação física. A metodologia M4 que parte do balanço da quantidade de movimento no circuito do SSAA, se mostra adequada para indicar o comportamento da curva de vazão mássica, mas observa-se que os valores estimados para a vazão mássica quase sempre são superiores aqueles obtidos experimentalmente, como mostra a Fig. 6. Neste procedimento, a vazão mássica é obtida por uma equação um pouco mais complexa que a da Metodologia M1, onde se tem que a vazão é uma função dos parâmetros: diâmetro e comprimento das tubulações; área de coleta; número de tubos nos coletores; coeficientes de perdas secundárias, devido a acessórios, curvas, válvulas ao longo das tubulações hidráulicas; diâmetro e comprimento dos tubos ascendentes nos coletores; temperatura da água na entrada e na saída dos coletores; altura do reservatório térmico; viscosidade da água. Embora a Metodologia M4 utilize uma equação mais complexa que aquela da Metodologia M1, não se constata uma maior aproximação das medidas experimentais.

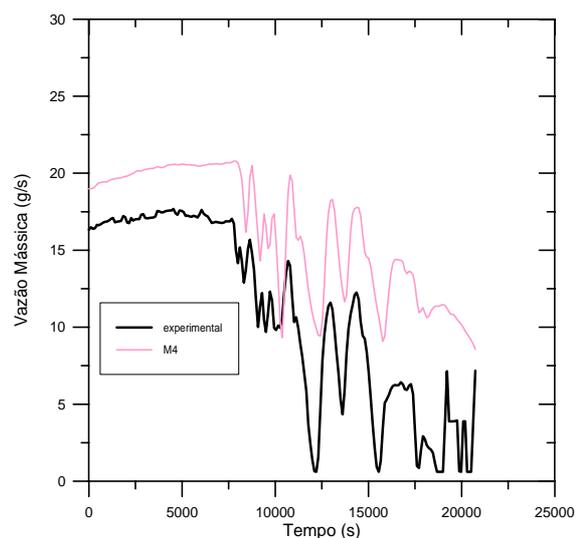
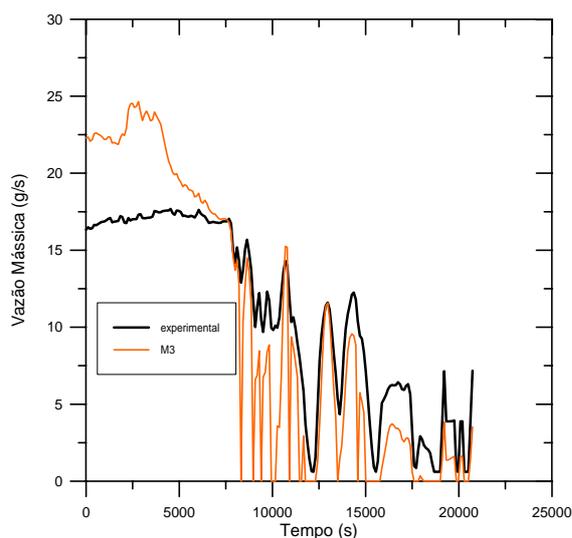


Figura 5 - Confronto teórico-experimental: M3.

Figura 6 - Confronto teórico-experimental: M4.

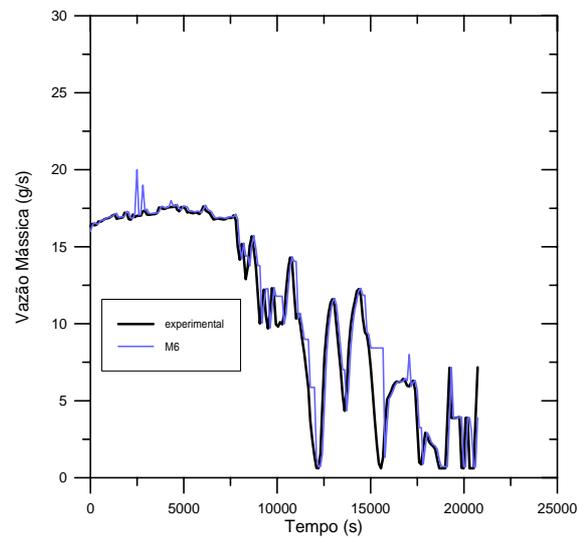
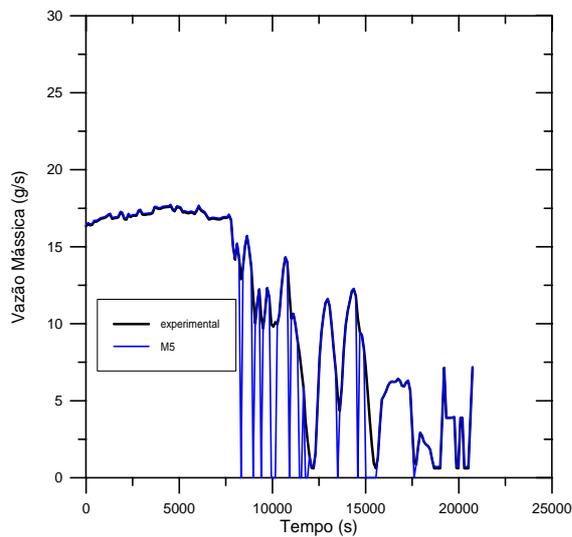


Figura 7 - Confronto teórico-experimental: M5.

Figura 8 - Confronto teórico-experimental: M6.

Os resultados da Fig. 7 mostram que a Metodologia M5, apesar de simples é mais adequada para a estimativa da vazão mássica para o SSAA operando em regime de termossifão. Em síntese, as comparações mostram que o emprego de métodos alternativos para a estimativa da vazão mássica de operação num aquecedor solar de água operando por termossifão, pode ser uma alternativa a ser considerada quando da impossibilidade de se realizar uma medida experimental da vazão de forma direta. Para integrar uma simulação computacional todos os métodos apresentados somente podem ser empregados dentro de um processo iterativo, onde inicialmente, se supõe os valores de alguns parâmetros que também deveriam ser resultados da própria simulação. Neste processo iterativo, outros procedimentos devem ser utilizados para verificar a convergência para os resultados reais. Tendo em vista este fato, o custo computacional acaba por ser muito parecido entre as diversas propostas. O confronto dos resultados simulados com a Metodologia M6 é apresentado na Fig. 8.

4. CONCLUSÕES

Considerando que nos sistemas solares de aquecimento de água operando por termossifão existe um acoplamento entre a distribuição de temperatura e a vazão mássica de operação, a simulação destas instalações torna-se uma tarefa bem mais delicada quando comparada à simulação de instalações operando por circulação forçada. Além disso, o estudo experimental do comportamento hidrodinâmico é dificultado, uma vez que qualquer acessório ou equipamento instalado ao longo da tubulação hidráulica pode afetar significativamente a determinação da vazão mássica pelo fato de esta ser baixa e sofrer influência das perdas singulares. Levando-se em consideração estes fatos, neste trabalho foi realizado o estudo do comportamento térmico, iniciando-se pela análise de diferentes modelos apresentados na literatura para a determinação alternativa da vazão mássica, e por conseguinte do desempenho térmico destes sistemas. Dos cinco modelos analisados o método da Equação Simplificada de Hottel-Bliss-Whillier – ESHBW - demonstrou ser o mais adequado para utilizar com temperaturas medidas.

Agradecimentos

O autor agradece à direção do Instituto Agricultura e Ambiente, à UFAM/PROPESP e à equipe do Laboratório de Energia Solar da UFRGS.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 10184, 1988. Coletores solares planos para líquidos, determinação do rendimento térmico, método de ensaio, ABNT NBR 10184, jan.
- ASHRAE STANDARD 93-1977, Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., 1992, Fundamentos de transferência de calor e de massa, LTC, Rio de Janeiro.
- Morrison, G. L., Tran, H. N., 1984. Simulation of the long term performance of thermosyphon solar water heaters, Solar Energy, vol. 33, pp. 515-526.
- Norton, B., Eames, P. C., Lo., S. N. G., 2001. Alternative approaches to thermosyphon solar-energy water heater performance analysis and characterization, Renewable & Sustainable Energy Reviews, vol. 5, pp. 79-96.
- Ong, K. S., 1974. A finite-difference method to evaluate the thermal performance of a solar water heater, Solar Energy, vol. 16, pp. 137-147.
- Siddiqui, M. A., 1997. Heat transfer and fluid flow studies in the collector tubes of a closed-loop natural circulation solar water heater, Energy Conversion and Management, vol. 38, pp. 799-812.
- Siqueira, A. M. O., 2003. Desenvolvimento de um Programa de Simulação Computacional de Sistemas de Aquecimento solar e sua validação experimental, Tese de Doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Sissom, L. E., Pitts, D. R., 1972, Fenômenos de Transporte, Guanabara Dois, Rio de Janeiro.
- Uhlemann, R., Bansal, N. K., 1985. Side-by-side comparison of a pressurized and a nonpressurized solar water heating thermosyphon system, Solar Energy, vol. 34, 317-328.
- Young, M. F., Bergquam, J. B., 1981. Performance characteristics of a thermosyphon solar domestic hot water system, Journal of Solar Energy Engineering, vol. 103, pp. 193-200.
- Young, M. F., Bergquam, J. B., 1984. The performance of a thermosyphon solar domestic hot water system with hot water removal, Solar Energy, vol. 32, pp. 655-658.

ALTERNATIVE METHODS FOR COMPUTATIONAL SIMULATION OF SOLAR WATER HEATERS

Abstract. *This work presents a discussion about different methods for the stimulation of mass flow rate in thermosyphon solar water heaters systems. This study makes a revision of the mainly theoretical and experimental papers have been conducted to investigate the transient performance of temperature and mass flow rates through the day in these systems. The fundamentals of the methods and associated equations are presented. The analyzed methods are: The energy balance in the storage tank, Hagen-Poiseuille Model, Siddiqui Correlation, Simplified Momentum Equation and Hottel-Bliss-Whillier Simplified Equation. The accuracy of these alternative methods is verified by comparison to the detailed energy balance and momentum balance through the system.*

Key words: *Solar Energy, Computational Simulation, Natural Circulation, Solar Water Heater.*