

UM NOVO ALGORITMO PARA CÁLCULO DE PERDAS TÉRMICAS EM RESERVATÓRIOS DE ÁGUA QUENTE DE SISTEMAS SOLARES

Arno Krenzinger, Rejane de César Oliveski e Antônio Marcos Siqueira
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
 Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

Este trabalho apresenta um algoritmo que permite o cálculo da distribuição de temperatura dentro de um reservatório de água quente de um sistema de energia solar, incluindo o efeito de estratificação que é produzido quando há transferência de calor pelas paredes durante a noite. A única variável que é ajustada a partir de dados experimentais é a vazão das correntes internas de resfriamento, que ocorrem na forma de um fluxo pistonado ascendente central. O uso deste modelo permite levar em conta efeitos não incluídos em softwares de simulação de energia solar, além disso, o tempo computacional do presente modelo é de cerca de 3000 vezes menor que tempo de processamento de modelos bidimensionais acoplados em regime transiente.

INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas de aquecimento solar de água tem aumentado no Brasil. O aumento na demanda deste tipo de equipamento pode ser atribuído à combinação entre a elevação do custo das formas convencionais de aquecimento com o aumento da conscientização com respeito à diminuição de danos ecológicos quando a opção é utilizar energia solar. Como a instalação de sistemas solares envolve também custos significativos, é importante conhecer plenamente todos os processos térmicos envolvidos para melhor poder otimizar o sistema.

Uma das maneiras de buscar a plena compreensão dos fenômenos envolvidos e simultaneamente obter um enorme número de parâmetros para otimizar sistemas como estes é proceder simulações numéricas do comportamento térmico dos mesmos sistemas por períodos de tempo adequados a cada pesquisa. Em geral na simulação de sistemas solares são utilizados métodos transientes que levam em consideração as características de capacidade térmica dos componentes e que tem uma boa representação do comportamento das partes do sistema. O comportamento do reservatório é analisado através de uma combinação dos efeitos da movimentação da água que circula pelos coletores e pelo circuito de alimentação/consumo com um cálculo difusivo da redistribuição de temperaturas no volume com o tempo (Duffie e Beckmann, 1991). Esta hipótese puramente difusiva não é verdadeira pois sempre que há perda de calor pelas paredes do reservatório, correntes convectivas se formam, tendendo a acentuar a estratificação do reservatório. Os softwares conhecidos de simulação de sistemas solares, como TRNSYS (Klein, 1997), apenas reorganizam as temperaturas para evitar as conseqüentes falsas inversões térmicas que ocorrem no cálculo difusivo.

Sistemas solares em operação nos países mais frios geralmente usam circulação forçada e um líquido anticongelante como fluido de troca. A perda de carga no circuito passa a ter pouca importância e todos os efeitos conseqüentes das variações de densidade são minimizados, incluindo os causados pela estratificação de temperaturas na água do reservatório. Já nos sistemas solares de aquecimento mais utilizados no Brasil, que operam em regime de termossifão, a estratificação de temperaturas no reservatório exerce importante influência. A força que impele a água através da tubulação depende do exato valor da temperatura da água em seu interior. Como a água da coluna mais fria provém do fundo do reservatório, todo o comportamento

seqüencial das velocidades de circulação do fluido nestes sistemas está intimamente correlacionado com esta estratificação. Para sua mais exata simulação faz-se necessário incluir nos algoritmos de distribuição de temperaturas os efeitos das mencionadas correntes convectivas.

CIRCULAÇÃO DO FLUIDO NO RESERVATÓRIO.

Circulação no Sistema. O reservatório de água quente de um sistema solar que opere por termossifão está necessariamente instalado em altura acima dos coletores que promovem a conversão da energia solar. Durante o dia, especialmente quando os raios solares incidirem com intensidade adequada, a parte superior dos coletores formarão o ponto mais quente da instalação. A tubulação que leva a água aquecida dos coletores ao reservatório estará preenchida também por uma coluna de água muito quente. Por outro lado, no fundo do reservatório estará a água mais fria da instalação, tendo muitas vezes a mesma temperatura da água do principal de distribuição, pois sempre que há consumo de água quente, a reposição de água no reservatório deve ser realizada nesta região para evitar mistura indesejável de temperatura.

Nos sistemas mais simples há dois circuitos independentes interconectados através do reservatório. O circuito de aquecimento solar retira água do ponto mais baixo do reservatório, circula a mesma pelos coletores e retorna a água aquecida em um ponto geralmente a 2/3 da altura total do reservatório. O circuito de consumo retira água quente de um ponto elevado (4/5 da altura) e devolve água fria pelo ponto mais baixo do reservatório. Enquanto o primeiro circuito provoca um deslocamento descendente da água no reservatório, o segundo produz um deslocamento ascendente. O movimento de água dentro do reservatório é muito lento tendo em vista a relação entre a vazão e o diâmetro interno do tanque. Mesmo sendo um movimento brando, sua consideração permite desprezar as muito mais fracas correntes convectivas oriundas da não uniformidade de temperatura em cada camada térmica. Estas correntes internas serão sentidas justamente quando ambos os circuitos externos estão inativos, fato que ocorre todas as noites sempre que o consumo é interrompido. Os efeitos da estratificação provocados pela circulação externa são adequadamente tratados nos programas de simulação por meio de simular no cálculo o ingresso da água na camada térmica correspondente

à sua temperatura, como foi examinado por Salvadoretti e Krenzinger (1995) para o programa SOLARCAD, Krenzinger (1995). Quando a circulação externa cessa, surge a importância das correntes de resfriamento.

Correntes internas no resfriamento. Com os circuitos externos inoperantes, a água do reservatório passa a perder calor pelas paredes isoladas do mesmo. As moléculas mais próximas da parede lateral são as primeiras a diminuir suas temperaturas. Assumindo um reservatório cilíndrico vertical, um dos desenhos mais utilizados para sistemas de energia solar, pode-se dizer que se forma um anel de água mais fria e mais densa nas cercanias da parede lateral. Esta água tende a submergir arrastando as moléculas que estão acima e produzindo uma corrente que só é interrompida no fundo do tanque quando a água se choca contra a parede inferior. Ali a água mais fria será distribuída em toda a camada inferior e formará um núcleo com diâmetro apenas um pouco menor que o diâmetro do reservatório que ascende muito lentamente em forma de um pistão, dando a necessária continuidade ao movimento. Esta descrição do movimento da água durante o resfriamento do reservatório é especialmente válida para as situações em que o sistema parte de uma completa uniformidade de temperatura.

Havendo uma estratificação preliminar, o comportamento descrito será limitado a camadas térmicas diferenciadas e o comportamento geral seria obtido de combinações das correntes de cada camada. Por exemplo, se há uma camada de 15 cm no fundo do reservatório com água a 18°C e o restante do reservatório está a 50°C, o escoamento junto à superfície somente existirá na camada quente e a água resfriada que desce por este cinturão ocupará o espaço imediatamente acima dos 15 cm, empurrando o núcleo da água quente para cima.

OBJETIVOS DO TRABALHO

O procedimento necessário para incluir o efeito desta corrente convectiva nos cálculos das perdas térmicas de tanques cilíndricos verticais levando em consideração o comportamento real do fluido, envolve o uso de, por exemplo, o método dos volumes finitos. Como as dimensões nos intervalos de tempo e na definição das malhas deve ser refinado para garantir a convergência, o tempo computacional resultante para resolver o problema passa a ser proibitivo, especialmente se o objetivo é analisar todo o sistema solar por um longo período de tempo. O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo alternativo que reproduz os resultados experimentais com uma velocidade de mais de 3 mil vezes mais rápida, apesar de ter um desenvolvimento também numérico. Esta proposta é dependente de ajuste do comportamento térmico das camadas com resultados experimentais e por isto sua validade é, pelo menos por enquanto, limitada a situações similares àquelas ensaiadas em laboratório.

PROCEDIMENTO

O desenvolvimento experimental para obter os dados sobre o qual o presente trabalho está estruturado está descrito em Oliveski et. all (1997). A análise experimental foi realizada sobre um reservatório de aço inox com 55 cm de altura e 26 cm de raio interno. A parede do reservatório tem 1 mm de espessura e o mesmo estava isolado com uma camada de 3 cm de isopor. Para monitorar a temperatura foram utilizados termopares do tipo ferro-constantan de 0,18 mm de diâmetro. Os sinais provenientes destes foram medidos

através de um sistema de aquisição de dados HP75000, equipado com um multimetro de 5 ½ dígitos e multiplexadores a relé, acoplado a um microcomputador via GP-IB. Os dados foram adquiridos e gravados minuto a minuto. Inicialmente foram montados termopares em várias distâncias radiais a partir do centro e várias profundidades. Como resultado confirmou-se que a variação radial da temperatura durante um ensaio de resfriamento natural é quase nula, com exceção das proximidades da parede. Posteriormente, para otimizar os canais de medida, foram monitorados 28 pontos de temperatura, sendo 14 destes localizados na linha de centro e 14 medindo a temperatura da parede.

Os estudos demonstram uma significativa separação da água do reservatório em camadas de diferentes temperaturas. Para proceder o modelo foi elaborado um algoritmo baseado na introdução de um coeficiente de transferência de calor entre diferentes camadas horizontais do reservatório, contemplando o efeito do deslocamento vertical descendente de massa de água junto à parede. Como resultado, o perfil de temperaturas depois de um longo período de repouso do reservatório se assemelha muito mais ao perfil medido do que ao perfil que seria calculado por um modelo difusivo.

O algoritmo utiliza uma falsa superfície cilíndrica com diâmetro um pouco menor que o diâmetro do reservatório. O espaço entre esta superfície e a parede do reservatório foi denominado cinturão virtual, onde o efeito do resfriamento do tanque induz uma corrente descendente, conforme indica a Figura 1. A temperatura de todo o volume de cada camada i no cinturão é considerada igual e representada por TC_i . A vazão é igual em todas as camadas a menos que a camada do núcleo do reservatório tenha temperatura superior. Neste caso o fluxo é desviado para a região central do reservatório. O mesmo valor de vazão descendente no cinturão ocorre para vazão ascendente no volume central do reservatório.

A Figura 2 apresenta o esquema de transferência de calor. O cálculo é iniciado pelo cinturão considerando uma situação de regime permanente e repetindo todas as iterações para determinar TC_i até que haja convergência. A principal vantagem de

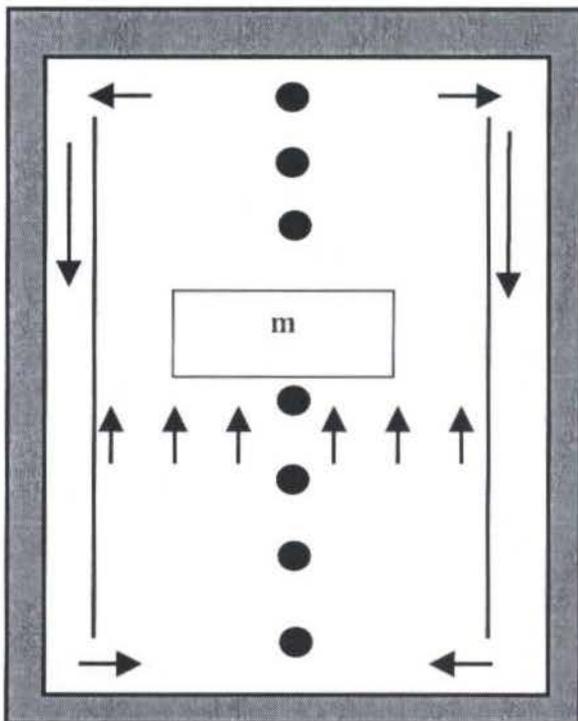


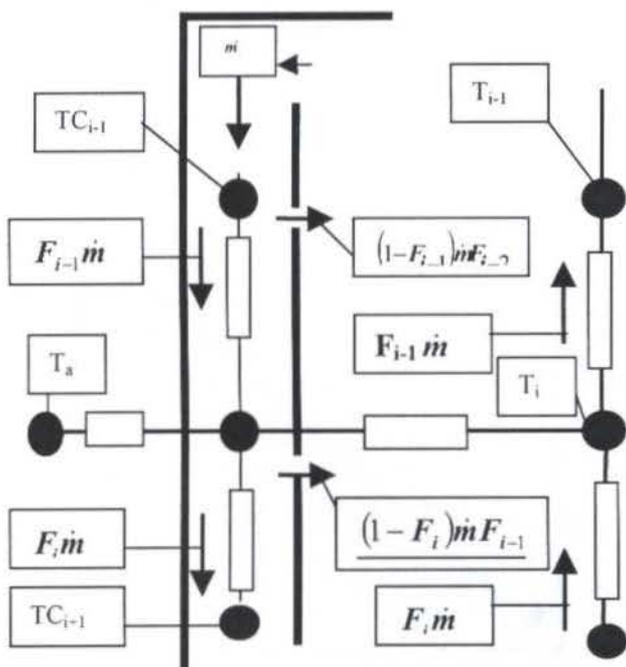
Figura 1 – Representação esquemática das correntes de resfriamento e massa utilizado para o modelo.

considerar nesta etapa de cálculo um regime permanente é que neste caso a espessura do cinturão não necessita ser determinada e não será considerado nenhum armazenamento de calor nesta região. Como a evolução do resfriamento é lenta, esta aproximação não acarreta erros importantes. A temperatura da parede do reservatório foi considerada igual à temperatura da água no cinturão em cada altura. Conhecendo os valores de TC_i são calculados os estados das válvulas de fluxo F_i para todas as alturas. As válvulas regulam a direção do escoamento em cada camada e são determinadas imediatamente a partir da distribuição de temperaturas no centro e no cinturão, pelas relações:

$$F_i = 1 \text{ se } TC_i > T_A \text{ e } TC_i < T_i \quad (1)$$

$$F_i = 0 \text{ se } TC_i < T_A \text{ ou } TC_i > T_i \quad (2)$$

A seguir são calculados os valores das temperaturas centrais T_i , de baixo para cima, apenas uma vez, passando-se logo a seguir para o intervalo de tempo seguinte. Foi utilizado um intervalo de tempo de um minuto entre cada varredura de cálculo. As Eq.(3), Eq.(4) e Eq.(5) são resolvidas para T_i enquanto que na Eq.(6) a variável a ser calculada é TC_i . Nestas equações A_p representa área da seção reta da parede ($2 \cdot \pi \cdot r \cdot e$ onde e é a espessura da parede); A_L é a área lateral de uma camada ($2 \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta Z$ sendo ΔZ a altura da camada); A_S é a área da seção do tanque ($\pi \cdot r^2$); A_T é a área no topo (no caso igual a A_S); k é condutividade térmica; U_L , U_B e U_T são respectivamente os coeficientes globais de transferência de calor pela lateral, por baixo e por cima do reservatório; C_p é o calor específico da água; M_i é a massa de água contida na camada i ; m é a vazão de resfriamento; T é a temperatura da água objeto do cálculo, no centro do reservatório, sendo seu sobrescrito indicador do intervalo de tempo e seu subscrito indicador da posição vertical; TC é a temperatura da água no cinturão virtual e ΔE é a espessura de gradiente térmico na água nas proximidades da parede, sendo este um valor fixado em 20mm com base em observações



experimentais.

Figura 2 - Esquema de transferência de calor e massa no reservatório, no qual se baseia o algoritmo apresentado

Ponto Central

$$\begin{aligned} \frac{M_i C_p}{\Delta \tau} (T_i^{t+1} - T_i^t) = & \\ \frac{k^{agua} A_S}{\Delta Z} [T_{i-1}^t + T_{i+1}^t - 2T_i^t] + & \\ F_{i-1} \cdot m \cdot C_p \cdot (1 - F_i) [TC_i^t - T_i^t] - & \\ \frac{k^{agua} A_L}{\Delta E} [T_i^t - TC_i^t] + m \cdot C_p \cdot F_i [T_{i+1}^t - T_i^t] & \end{aligned} \quad (3)$$

Ponto Superior

$$\begin{aligned} \frac{M_1 C_p}{\Delta \tau} (T_1^{t+1} - T_1^t) = U_T A_T [T_A^t - T_1^t] + & \\ m \cdot C_p [T_2^t - T_1^t] + \frac{k^{agua} A_L}{\Delta E} [TC_1^t - T_1^t] + & \\ \frac{k^{agua} A_S}{\Delta Z} [T_2^t - T_1^t] & \end{aligned} \quad (4)$$

Fundo

$$\begin{aligned} \frac{M_n C_p}{\Delta \tau} (T_n^{t+1} - T_n^t) = \frac{k^{agua} A_S}{\Delta Z} [T_{n-1}^t + T_n^t] + & \\ F_n \cdot m \cdot C_p [TC_n^t - 2T_n^t + T_{n-1}^t] + & \\ U_B A_B [T_A^t - T_n^t] + \frac{k^{agua} A_L}{\Delta E} [TC_n^t - T_n^t] & \end{aligned} \quad (5)$$

Cinturão Virtual

$$\begin{aligned} m \cdot C_p (TC_{i-1}^{t+1} - TC_i^{t+1}) + & \\ \frac{k^{parede} A_p}{\Delta Z} [TC_{i-1}^{t+1} + TC_{i+1}^t - 2TC_i^{t+1}] + & \\ \frac{k^{agua} A_L}{\Delta E} [T_i^t - TC_i^{t+1}] + & \\ A_L U_L [T_A^t - TC_i^t] = 0 & \end{aligned} \quad (6)$$

RESULTADOS

Aplicando o algoritmo descrito obtém-se diversos tipos de resultados diferentes, demonstrando pouca sensibilidade do sistema de cálculo ao valor de vazão (m) arbitrado, enquanto este varia 2 ou 3 vezes. Por outro lado quando m varia 10, 100 ou 1000 vezes, os efeitos são claramente percebidos. A Figura 3 apresenta as curvas de resfriamento para cada uma de 7 profundidades na linha vertical do centro do reservatório teste para os casos (a) $m = 5E-2$, (b) $m = 5E-4$, (c) $m = 5E-5$ e (d) $m = 5E-6$ kg/s. Observe-se que no caso (a) a alta vazão leva a uma situação de mistura total. No caso (c) ocorre um perfil bem diferente do observado experimentalmente (ver figura 4); mais longe da realidade está o caso (d) onde a vazão é tão pequena que o efeito difusivo é dominante. Fica evidente depois de examinar a

Figura 5 que o caso (b) é o único que pode representar a realidade. O valor atribuído à vazão de escoamento no cinturão depende do total das perdas laterais. Para o tanque estudado experimentalmente um valor de m foi determinado pelo direto ajuste do presente modelo aos dados

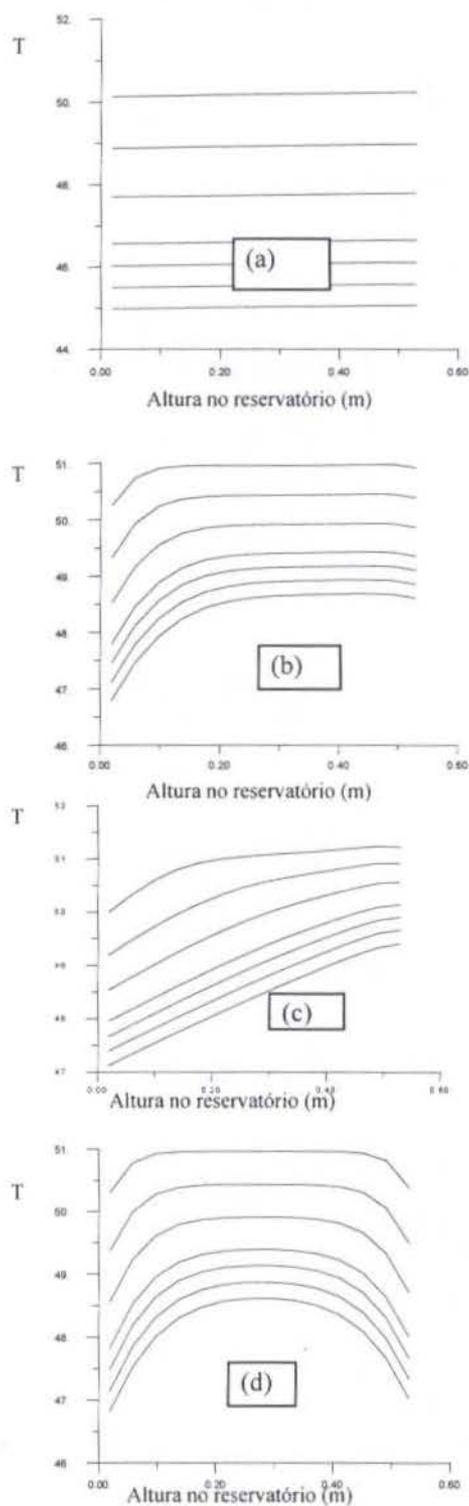


Figura 3. Perfis de temperatura ao longo da altura no reservatório obtidos para a linha central do mesmo pela aplicação do algoritmo proposto com diferentes vazões m sendo (a) vazão muito elevada, (b) vazão adequada, (c) vazão baixa e (d) vazão quase nula. As diversas linhas em cada gráfico representam diferentes intervalos de tempo transcorrido: 2h, 4h, 6h, 8h, 10h, 12h e 14h.

experimentais medidos. Para tanques com razão de aspecto e volumes diferentes, evidentemente a vazão não poderia ser arbitrada com o mesmo valor.

Uma série de simulações com um modelo bidimensional acoplado e em regime transiente, discretizado pelo método dos volumes finitos permitiu confirmar que o comportamento da distribuição de temperaturas em reservatórios de diferentes dimensões acompanha o mesmo padrão da Figura 3. Estas simulações que estão sendo realizadas no nosso grupo de pesquisa, produzem como resultado muito mais informações que ajudam a alcançar a plena compreensão dos incorporadas em programas de simulação do sistema como um todo tendo em vista o enorme tempo de processamento necessário para sua perfeita convergência. Como base de comparação, um reservatório como o descrito para os testes experimentais, pequeno para os padrões solares em instalações domésticas, gasta cerca de 3000 vezes mais tempo de processamento que o tempo utilizado pelo algoritmo aqui descrito. Para reservatório maiores, a malha a ser utilizadas exige mais elementos para a convergência e, conseqüentemente, o tempo de processamento é muito maior.

Com a base de comportamento revelada nas simulações empregando o método dos volumes finitos, foi possível experimentar com o algoritmo em diversos tanques e combinar os resultados do valor operativo de m em função do produto $U_L A_L$. A Figura 4 apresenta esta relação, sendo que cada ponto representa um tanque de diferentes dimensões. Na mesma Figura pode-se ver a linha reta que ajusta os pontos e dá origem à Eq.(7), com a qual se estima o valor de m a ser utilizado para qualquer tanque cilíndrico vertical.

A equação de ajuste do gráfico da Figura 4 é

$$m = R \cdot U_L A_L \quad (7)$$

onde $R=0,00354 \text{ kg} \cdot ^\circ\text{C}/\text{J}$. Usando esta correlação e o algoritmo proposto para comparar com os ensaios experimentais obtém-se finalmente os resultados apresentados na Figura 5. Cada linha representa a distribuição de temperaturas depois de duas horas de esfriamento em relação à linha anterior. O ensaio foi iniciado com o reservatório (0,55m de altura) com água em temperatura uniforme de $51,5^\circ\text{C}$. O reservatório estava isolado com uma espessura média de 1,6 cm de isopor na lateral e um isolamento bem mais reforçado no topo e no fundo, com a intenção inicial de praticamente eliminar o fluxo de calor axial nas tampas (em função da utilização de modelo numérico de volumes finitos mais

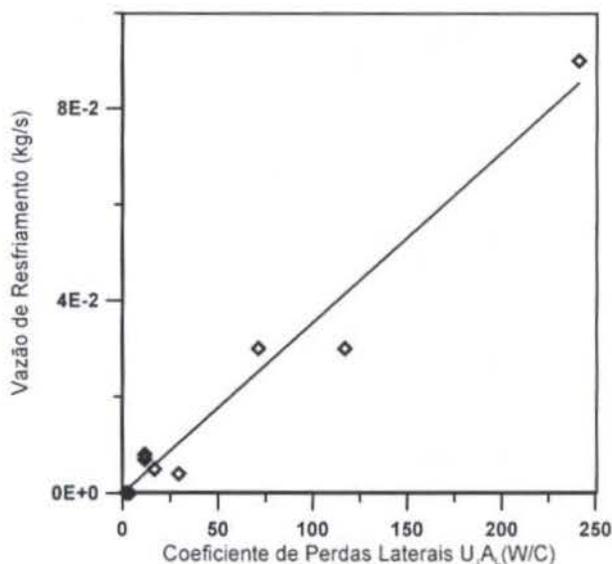


Figura 4. Relação entre a vazão de resfriamento e o fluxo de calor lateral dos reservatórios, expresso pelo produto $U_L A_L$.

simples). O valor de U_L foi estimado considerando condução do isolante ($k=0.04\text{W/mC}$) e convecção com o ar ambiente ($h=10\text{W/m}^2\text{C}$) de forma a produzir valores globais de $U_L=2\text{W/m}^2\text{C}$. U_T e U_B foram estimados como $0,3\text{W/m}^2\text{C}$. A parede lateral tem continuidade vertical na base do reservatório formando um suporte cilíndrico para o apoio do mesmo. Esta base funciona como uma aleta e retira calor mesmo estando isolada como o resto da parede. Para levar em conta este fato foi considerado que a área lateral da camada mais baixa tem o dobro do valor real, levando o modelo a acentuar as perdas nesta região. Estas considerações dos coeficientes globais são sustentadas pela análise da curva de resfriamento da temperatura média da água do reservatório. A área lateral do reservatório tem $0,79\text{m}^2$ e usou-se uma vazão de $m=5,6\text{g/s}$ na circulação de resfriamento. A Figura 5 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais (círculos) e o calculado pelo algoritmo, em 14 alturas correspondendo aos pontos onde foram instalados os termopares.

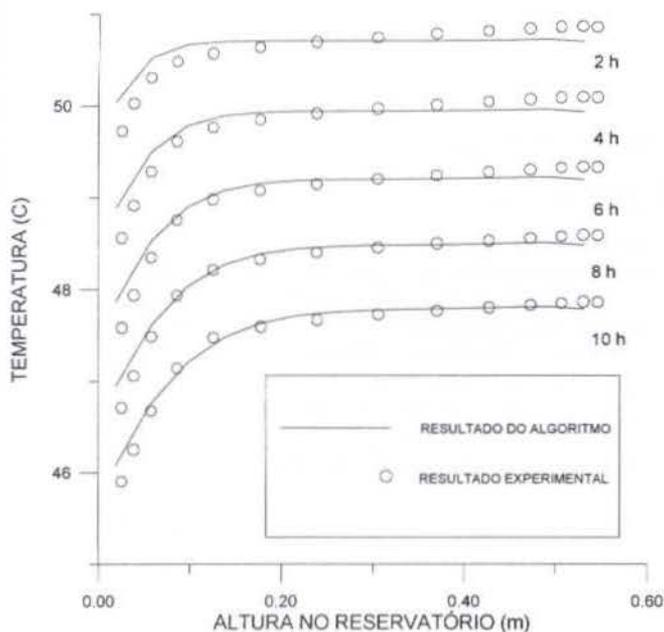


Figura 5. Comparação entre temperaturas medidas e calculadas em função da altura do reservatório para 2h, 4h, 6h, 8h e 10 h depois de iniciado o processo de resfriamento sem circulação externa.

CONCLUSÕES

Foi apresentado um novo algoritmo como uma alternativa rápida e precisa de inserir os efeitos das correntes internas de resfriamento nos modelos de operação de reservatórios de água quente em programas de simulação de sistemas solares. Comparando-se o tempo de processamento com métodos bidimensionais acoplados observou-se que além da simplicidade o algoritmo acelera o procedimento em cerca de 3 mil vezes para tanques de dimensão pequena e muito mais para tanques maiores. Na forma como foi elaborado, o algoritmo depende de um valor de vazão de resfriamento prescrito mas sua sensibilidade a este valor é pequena. O valor de vazão que confere a característica de operação adequada ao algoritmo pode ser obtido de uma simples relação linear onde é necessário conhecer apenas as dimensões e a qualidade de isolamento do reservatório. A implementação do algoritmo em sistemas de simulação deve

selecionar os momentos quando as circulações externas, tanto dos coletores quanto do consumo, são nulas, tendo em vista a sutileza do efeito aqui considerado frente àquelas correntes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e CAPES pelo apoio financeiro através de bolsas de pesquisa e pós-graduação.

REFERÊNCIAS

- Duffie, J.A. and Beckman, W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley, New York, 1991.
- Klein, et al., *TRNSYS, A Transient Simulation Program*, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA, 1997.
- Krenzinger, A., SOLARCAD - Sistema de Simulação de Instalações de Energia Solar, *Anais do CIDIM-COBEM*, Belo Horizonte, 1995 (em cd-rom).
- Oliveski, R. D-C., Krenzinger, A., Viêlmo, H. A. e Prieb, C. W. M., 1997, "Numeric-Experimental Analysis of the Temperature Distribution in a Reservoir of Hot Water", XIV Brazilian Congress of Mechanical Engineering, in CD-ROM, Baurú, S.P.
- Salvadoretti, J.L. e Krenzinger, A. Comparação entre duas Abordagens para Distribuição da Água Quente em Reservatórios na Simulação de Sistemas Solares. *Anais do CIDIM-COBEM*, Belo Horizonte, 1995 (em cd-rom).

SUMMARY

This work presents an algorithm that allows the calculation of the temperature distribution inside a hot water reservoir of a solar system, including the stratification effect that happens when there is heat transfer through the walls during the night. The only variable to be adjusted from experimental information is the internal flow rate that occurs in the form of an ascending central plug flow. The use of this model allows to consider effects that are not included in solar systems simulation softwares and it is 3000 times faster than high quality numeric methods.