

# SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA CIRCULAÇÃO REVERSA EM COLETORES SOLARES PLANOS EM REGIME DE TERMOSSIFÃO

Felipe Pozzebon – felipebarin@hotmail.com

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufgrs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica.

## 2.2 Equipamentos e Sistemas de Aquecimento de Água

**Resumo.** Em instalações de aquecimento de água por energia solar, um fator importante em suas aplicações é a análise de seu desempenho. Ensaios são realizados e seus resultados comparados com os obtidos por programas de simulação, que são desenvolvidos pois permitem uma análise com maior rapidez e com resultados confiáveis do comportamento destes sistemas. Nestes ocorrem perdas de energia térmica durante o dia e a noite, e essas últimas, em geral, são negligenciadas. Estudos têm mostrado que uma adequada instalação minimiza as perdas térmicas. Para considerar este efeito, foi incorporado ao software de simulação de sistemas térmicos, Termosim, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da UFRGS, o cálculo destas perdas, possibilitando análise deste fenômeno através da variação de parâmetros geométricos. Este artigo descreve os modelos empregados para o cálculo da vazão da circulação reversa e das perdas energéticas associadas à mesma. As simulações realizadas confirmam que as perdas térmicas a noite são reduzidas quanto maior for distância entre o fundo do tanque e o topo do coletor e que as mesmas podem ter um impacto significativo na estratificação térmica das temperaturas do reservatório.

**Palavras-chave:** coletores planos, aquecimento de água, simulação computacional, circulação reversa.

## 1. INTRODUÇÃO

Um sistema solar instalado para aquecimento de água, quando operando em regime de termossifão, tem como padrão algumas regras quanto a sua configuração, como por exemplo, o fato de o coletor solar dever ser sempre montado abaixo do reservatório térmico. O motivo disso é evitar a circulação reversa à noite, situação em que o coletor funciona como um difusor de calor para o ambiente, fazendo com que o sistema perca parte da energia acumulada durante o dia, energia esta armazenada no tanque de acumulação.

Existem cotas mínimas para a separação do topo do coletor e o fundo do tanque em diversos manuais de instalação que variam de 200 mm a 1000 mm, em geral. Na literatura científica, como os estudos de Norton *et al* (1983), também confirma-se esses requisitos geométricos. Os mesmos autores (1983) citam uma pesquisa realizada sobre dimensões recomendadas em sistemas já instalados, que revelou que as distâncias utilizadas estão entre 500 mm e 2000 mm em média, conferindo melhor performance.

Em uma nota técnica Morrison (1985) cita a realização de uma simulação utilizando o programa TRNSYS, com um modelo modificado, ao final da qual obteve resultados que estavam de acordo com os esperados quanto à ocorrência do fenômeno e sua magnitude, avaliado o comportamento da vazão e das perdas instantâneas.

Há poucos estudos relacionados a esse assunto, provavelmente por causa das perdas de energia, que na maioria dos casos podem ser negligenciadas por serem de baixo valor, e por existir uma dificuldade em medir baixas velocidades de vazões durante a noite.

Este artigo, entretanto, descreve o desempenho de um sistema de aquecimento solar utilizando como ferramenta computacional o programa Termosim e incorporando em seu modelo as perdas de energia que ocorrem durante a noite. Desta forma será possível realizar uma análise de sensibilidade das variáveis de temperatura do tanque, vazão, consumo de água quente e parâmetros geométricos que influenciam no fenômeno de circulação reversa.

## 2. CIRCULAÇÃO NATURAL

Nos sistemas de aquecimento de água residencial por coletores solares, é de relevada importância a minimização das perdas térmicas durante o período em que não há radiação solar, ou seja, durante a noite. A circulação natural da água em sistemas solares tem sua maior dificuldade na determinação da magnitude da vazão, diretamente influenciada pela radiação solar, que é variável ao longo do dia, pelas posições geométricas e pelas perdas da tubulação.

O modelo do cálculo da vazão mássica no software utiliza o balanço da quantidade de movimento no sistema, sendo aquela determinada pelo balanço entre a queda de pressão pelas perdas por atrito e pela diferença de densidade no circuito do termossifão. A carga de termossifão  $H_s$ , vide Eq. 1, e a densidade do fluido, durante o percurso no circuito

são determinados pela equação desenvolvida por Close (1962), que considera algumas hipóteses simplificativas, como que a distribuição da temperatura dentro do tanque se dá de forma linear e que a água que passa pelo absorvedor sobe para o topo do tanque e não há perdas nas conexões com as tubulações, sendo:

$$H_t = \frac{1}{2}(SG_1 - SG_2)[2(H_3 - H_1) - (H_2 - H_1)] - \frac{(H_3 - H_4)^2}{(H_5 - H_4)} \quad (1)$$

onde as alturas geométricas se referem segundo a Fig. 1 e  $SG$  é a massa específica relativa para a água dada pela equação de Huang (1980), conforme Eq. 2:

$$SG(T) = -4,05 \times 10^{-6} T^2 - 3,906 \times 10^{-5} T + 1,0002556 \quad (2)$$

onde  $SG_1$  e  $SG_2$  são dados à temperatura de entrada e saída do arranjo dos coletores e na eq.(2)  $T$  é dado em graus Celsius.

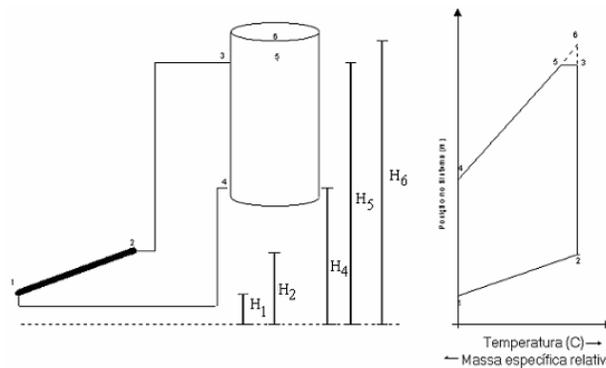


Fig. 1. Desenho geométrico da instalação. Fonte: Siqueira [2003].

Existem muitos artigos e modelos que predizem a performance de sistemas funcionando em regime de termossifão, inclusive por longos períodos, possibilitando as análises comparativas e de sensibilidade de variáveis como consumo, geometria, etc; porém, não se encontram análises de performance que considerem as perdas de energia pela circulação reversa.

É, então, proposta neste artigo, a aplicação do cálculo das perdas de energia que possam ocorrer durante a noite, em análise complementar na ferramenta computacional utilizada para cálculo de desempenho e comportamento de sistemas térmicos, conforme modelos descritos neste trabalho.

### 3. CIRCULAÇÃO REVERSA

Durante a noite a perda de calor se dá em função da temperatura ambiente e da temperatura do céu. Em casos onde a temperatura do céu está muito abaixo da temperatura ambiente, a temperatura da água que atravessa o coletor irá perder calor, chegando a uma temperatura abaixo da ambiente, o que ocasiona um aquecimento da tubulação que liga os coletores solares com o tanque, gerando, por sua vez, a circulação reversa do sistema.

O software Termosim possibilita a verificação da magnitude da circulação reversa após simulação através da análise gráfica da distribuição da vazão mássica no sistema. Avaliam-se, assim, os parâmetros necessários para minimizar a sua ocorrência, que está diretamente relacionada às geometrias do sistema e às temperaturas da região à noite. A maior dificuldade para o modelo é obter um histórico de temperatura do céu à noite. A temperatura do céu  $T_{sky}$  pode ser estimada pela fórmula, vide Eq. 3, de Swinbank (*apud* Duffie & Beckman, 1991):

$$T_{sky} = 0,0552 + (T_a + 273)^{1,5} - 273 \quad (3)$$

Na eq. (3) as temperaturas devem ser dadas em Kelvin, e  $T_a$  é a temperatura ambiente.

No modelo matemático, ao final do dia, quando a radiação solar é nula, é realizado o cálculo da distribuição dos gradientes de temperatura no coletor e das perdas térmicas da placa superficial com a radiação do céu.

Algumas hipóteses são consideradas para avaliação do fenômeno: a) considera-se, no primeiro minuto após o pôr do sol, que o sistema está em repouso, parado, e faz-se o cálculo das perdas de calor; b) calcula-se a vazão com as novas temperaturas e, em caso da água do coletor esfriar abaixo da temperatura que está na tubulação de retorno para o

tanque, a água do coletor não retorna ao tanque, ocorrendo uma queda de pressão do sistema, o que succiona a água do canal de retorno do reservatório para o coletor. Esse é o fenômeno que provoca o início da circulação reversa.

Ao constatar a circulação reversa, as seqüências computacionais dos gradientes de temperatura ao longo do circuito sofrem um “loop” inverso, com conseqüentemente aquecimento da tubulação de retorno do coletor solar até o equilíbrio das forças de empuxo e atrito. Quando a radiação torna a aparecer, cessam os cálculos de perdas pelo coletor.

Na Fig. 2 apresenta-se o diagrama do cálculo para a circulação à noite no programa:

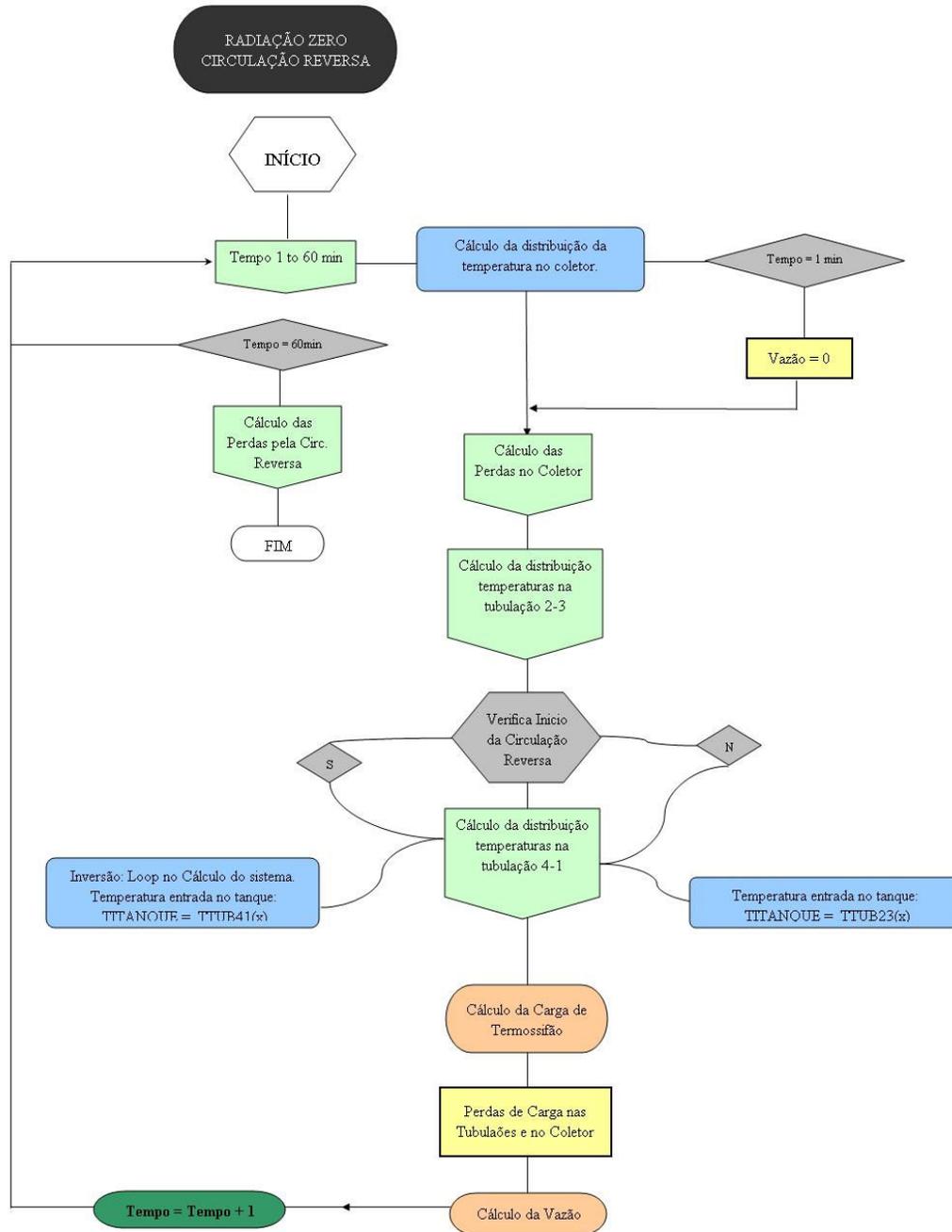


Fig. 2. Diagrama do algoritmo de cálculo para circulação reversa.

No modelo do cálculo do coletor, à noite, definem-se algumas hipóteses simplificativas: a temperatura do coletor é considerada uniforme, sendo seu valor igual à média da temperatura de entrada e saída da água e o coeficiente de perdas térmicas do coletor solar é considerado independente da temperatura. A Fig. 3 representa as perdas térmicas por convecção e radiação do coletor.

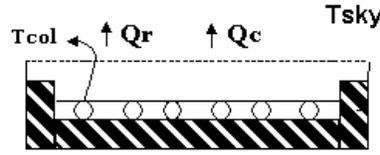


Fig. 3. Perdas térmicas por radiação e convecção.

Deste modo, como mostrado na Fig. 3, as perdas térmicas pelo topo no coletor são dadas pela Eq. 4:

$$Q_p = Q_c + Q_r = h_r(T_{col} - T_{sky}) + h_c(T_{col} - T_a) \quad (4)$$

onde  $Q_c$  é a taxa de transferência de calor por convecção externa,  $Q_r$  é a taxa de transferência de calor por radiação,  $h_r$  é o coeficiente de convecção e  $h_c$  é o coeficiente de convecção externo.

No momento que se considera o sistema parado por um instante de tempo, é realizado o balanço de energia no coletor para obter as novas temperaturas no sistema, possibilitando a avaliação da distribuição de temperaturas ao longo do circuito e permitindo o cálculo da vazão sem a radiação solar.

Para o cálculo da temperatura do fluido no coletor,  $T_{col(t+\Delta t)}$ , procede-se com o cálculo da capacidade calorífica efetiva entre o fluido e o absorvedor pelas Eqs. 5, 6, 7, 8, 9 e 10:

$$M_{\acute{a}gua} = \frac{1}{4}(NT \cdot L_{col} \cdot \pi \phi_{int}^2) \rho_{\acute{a}gua} \quad (5)$$

$$M_{cobre} = \rho_{cobre} \left[ (AC \cdot \delta_{col}) + (NT \cdot \left( \frac{\pi(\phi_{ext} - \phi_{int})^2}{4} \right) Y_{tub}) \right] \quad (6)$$

$$C_{\acute{a}gua} = M_{\acute{a}gua} (CP)_{\acute{a}gua} \quad (7)$$

$$C_{cobre} = M_{cobre} (CP)_{cobre} \quad (8)$$

$$C_{ef} = C_{\acute{a}gua} + C_{cobre} \quad (9)$$

$$T_{col(t+\Delta t)} = T_{col(t)} - \frac{Q_p \cdot \Delta t}{C_{ef}} \quad (10)$$

onde  $M_{\acute{a}gua}$  é massa de água,  $NT$  é o número de tubos do coletor,  $L_{col}$  é a largura do coletor,  $\phi_{int}$  é o diâmetro interno dos tubos do coletor (*risers*),  $\rho_{\acute{a}gua}$  é a densidade da água,  $M_{cobre}$  é a massa de cobre,  $AC$  é a área do absorvedor,  $\delta_{col}$  é a espessura do absorvedor,  $\rho_{cobre}$  é a densidade do cobre,  $\phi_{ext}$  é o diâmetro externo dos tubos do coletor,  $Y_{tub}$  é o comprimento dos tubos do coletor,  $C_{\acute{a}gua}$  é a capacidade térmica da água,  $C_{cobre}$  é a capacidade térmica do cobre,  $(CP)_{\acute{a}gua}$  é calor específico da água,  $(CP)_{cobre}$  é calor específico do cobre,  $C_{ef}$  é a capacidade térmica efetiva e  $Q_p$  são as perdas térmicas que ocorrem pelo coletor.

O mesmo processo é realizado no cálculo da temperatura das tubulações de saída e entrada do tanque. O gradiente de temperaturas no circuito é importante na verificação do início da circulação reversa, que deve ocorrer quando a temperatura do fluido saindo do coletor é inferior à temperatura do mesmo nas tubulações acima. Isso indica que haverá uma depressão, pois a água mais fria, portanto, mais pesada, não terá forças para empurrar o sistema no sentido natural, fazendo com que a água mais quente entre no coletor. A água quente deve perder energia térmica para o ambiente, geralmente a uma temperatura inferior, por transferência de calor, resfriando-se.

No cálculo da força de termossifão (*driving head*)  $H_s$ , quando se inicia a circulação reversa, o sentido do circuito de cálculo no programa se altera, passando então a temperatura do fluido na entrada no coletor a ser a referenciada pela temperatura do fluido que vem do topo do tanque, pela tubulação *Tub.2-3*, vide Fig.4. E a temperatura do fluido que entra na base do tanque, seria referenciada pela temperatura do fluido que sai do coletor, pela tubulação *Tub.4-1*. Como a temperatura esperada da saída da água no coletor é menor que a temperatura que ela entrou, o “*driving head*” deve ser negativo, indicando a reversão do sistema.

Pelo método iterativo, o ajuste da temperatura no acumulador (reservatório térmico) é realizado com constantes de controle, conforme Siqueira [2003] aborda em seu estudo para a circulação natural.

A determinação da vazão no sistema utiliza o modelo teórico do Balanço de Energia e da Quantidade de Movimento (B.E.Q.M). Deste modo, a queda de pressão devido ao atrito em um conduto fechado é dada pela Eq. 11.

$$H_f = 2f \frac{L}{D} \frac{v^2}{g} \quad (11)$$

onde  $f$  é o fator de atrito,  $L$  é o comprimento do conduto fechado,  $D$  é o diâmetro do duto,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $v$  é a velocidade do escoamento.

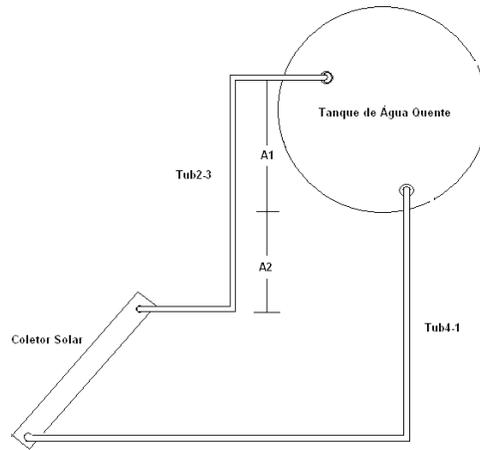


Figura 4. Circuito do sistema de termossifão simulado.

No circuito de um sistema de aquecimento solar, as perdas por atrito no interior das paredes tubos no coletor solar e ao longo das tubulações do sistema são calculadas pela Eq. 12:

$$H_f = \left( 2f \frac{L}{D} \frac{v^2}{g} \right)_{Col} + \left( 2f \frac{L}{D} \frac{v^2}{g} \right)_{Tub2-3} + \left( 2f \frac{L}{D} \frac{v^2}{g} \right)_{Tub4-1} \quad (12)$$

As perdas por atrito são apenas partes das perdas que existem nos tubos, pois há também que se considerar as perdas pela presença de válvulas, conexões, e qualquer peça que possa provocar alterações no fluxo do fluido. As perdas nestas juntas, vide Eq. 13, são consideradas independentes do número de Reynolds e são calculadas pela expressão:

$$H_f = \left( K \frac{v^2}{2g} \right) \quad (13)$$

onde que  $K$  é um fator que depende do tipo de conexão presente.

Combinando as equações 12 e 13 teremos como realizar o cálculo das perdas de pressão no circuito do sistema solar instalado, chegando-se a Eq. 14:

$$H_f = \left( 2f \frac{L}{D} \frac{v^2}{g} \right)_{Col} + \left( 2f \frac{L}{D} \frac{v^2}{g} \right)_{Tub2-3} + \left( 2f \frac{L}{D} \frac{v^2}{g} \right)_{Tub4-1} + \left( K \frac{v^2}{2g} \right)_{Tub2-3} + \left( K \frac{v^2}{2g} \right)_{Tub4-1} \quad (14)$$

De acordo com Shitzer (1979), o escoamento nos sistemas solares para aquecimento de água geralmente são laminares, valendo a Eq. 15.

$$f = \frac{16}{Re}, \text{ para } Re < 2000 \quad (15)$$

No entanto, aplica-se que a Eq. 16, em casos quando o escoamento é turbulento, o valor do fator de atrito é:

$$f = 0,032, \text{ para } Re > 2000 \quad (16)$$

Para finalizar, Morrison & Ranatunga (1980a e 1980b), concluíram que é necessário corrigir o fator de atrito independente do tipo de escoamento, de acordo com a Eq. 17.

$$f_{corrigido} = f \left( 1 + \frac{0,038}{(L/D)^{0,964}} \right) \quad (17)$$

A vazão é definida pela Eq. 18 como:

$$\dot{m} = Av\rho \quad (18)$$

Portanto, em cada componente do sistema, a vazão se apresenta pela Eq. 19:

$$\dot{m} = \rho u_{col} \frac{\pi D_{col}^2}{4} n_{col} = \rho u_{Tub2-3} \frac{\pi D_{Tub2-3}^2}{4} = \rho u_{Tub4-1} \frac{\pi D_{Tub4-1}^2}{4} \quad (19)$$

Pela igualdade de  $H_f = H_t$ , isolando-se a velocidade de cada componente da Eq. 19 e substituindo na Eq. 14, conclui-se que a vazão mássica é igual a Eq. 20:

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{2gH_t}{EF}} \quad (20)$$

sendo  $EF$  o somatório da parcela de perdas nas tubulações por atrito e conexões, dado pela Eq. 21.

$$EF = \left( \frac{(\rho A_{col})^2}{fL} \right)_{col} + \left( \frac{(\rho A_{Tub2-3})^2}{fL} \right)_{Tub2-3} + \left( \frac{(\rho A_{Tub4-1})^2}{fL} \right)_{Tub4-1} \quad (21)$$

O cálculo da vazão por termossifão é um método iterativo, verificando-se sua convergência com um erro máximo de 1%. Para o cálculo da vazão à noite, por se tratar de uma vazão de magnitude baixa esperada, não se aplica esse critério de erro máximo.

Quando se tem a vazão reversa pelo balanço térmico no coletor, calcula-se, vide Eq. 22, a temperatura de saída do coletor por:

$$T_{out} = T_{Tub2-3AY} - \frac{Q_p \Delta t}{C_{ef} + (\dot{m} C_{p(água)} \Delta t)} \quad (22)$$

sendo  $T_{Tub2-3AY}$  a temperatura da tubulação de água quente que liga o topo do coletor ao tanque, na posição  $Y$  ao longo de seu comprimento.

Outro importante fenômeno que ocorre durante a circulação reversa é que a vazão aumenta correspondentemente com a temperatura do fluido após passagem pelo coletor solar. Em determinadas situações, quando a temperatura do céu está abaixo da temperatura ambiente o fluido perde calor. Pelo fato da tubulação estar com isolamento térmico, ela deve estar a uma temperatura maior que a temperatura do fluido. Desta forma, o ganho de temperatura do fluido pelas trocas térmicas com a tubulação, atua como uma força de termossifão adicional, provocando um aumento da vazão no sentido reverso.

As perdas de temperatura ao longo da tubulação, quando está isolada termicamente, são pequenas. Faz-se a modelagem matemática dividindo-se em  $n$  números de nós e é ignorada sua capacidade térmica. Entretanto, no caso da circulação reversa, considera-se a capacidade térmica da tubulação e determina-se a variação de temperatura do fluido em relação à temperatura do tubo. Esse ganho de energia é calculado, vide Eq. 23, na distribuição de temperaturas ao longo da tubulação:

$$T_{Tub4-1(i)} = T_{Tub4-1(i-1)} + (T_{tbo} - T_{Tub4-1(i-1)}) e^{-\frac{U_{pTub4-1} Y_{Tub4-1(i)}}{\dot{m} C_p}} \quad (23)$$

sendo  $T_{Tub4-1(i)}$  a temperatura da tubulação da água vinda do tanque para o coletor, o índice  $i$  indica o instante de tempo e  $U_{pTub4-1}$  o coeficiente de perdas da tubulação hidráulica do segmento 4-1.

A variação de temperatura do tubo é obtida após o cálculo do fluxo de calor transferido para a água pela Eq. 24:

$$\Delta T_{Tbo(Y_{Tub4-1})} = \frac{Q_f \delta_{Tbo}}{k_{Tbo}} \quad (24)$$

sendo  $Q_f$  a quantidade de calor transferida para água,  $\delta_{Tbo}$  a espessura do tubo e  $k_{Tbo}$  a condutividade térmica do material da tubulação.

#### 4. DISCUSSÕES E RESULTADOS

Utilizando o modelo apresentado, realizaram-se algumas simulações com o objetivo de verificar seu comportamento da simulação e validação na simulação de sistemas incluindo a análise de perdas térmicas à noite.

Os resultados de uma simulação computacional realizada por Morrison (1983), utilizando o software TRNSYS, foram usados como objeto de comparação. Não foi possível encontrar outros dados computacionais e/ou experimentais que fossem confiáveis para comparação, e mesmo os resultados apresentados por Morrison não são passíveis de

comparação numérica, pois não há suficiente informação para a mesma entrada de dados do sistema. Entretanto, um comportamento representativo de magnitudes compatíveis e mesmas tendências são aceitos como parâmetros para este estudo.

Deste modo procede-se, por este exemplo, a simulação com dados climáticos de Porto Alegre para dia típico de Janeiro e, conforme Tab. 1, com as seguintes características do sistema:

Tabela 1. Especificações técnicas do sistema solar simulado.

Comprimento Tubulação 2-3	Comprimento Tubulação 4-1	Ø Tub. 2-3	Ø Tub. 4-1	Volume Tanque
0,5m-2,4m	2,7m	22mm	22mm	300 litros
Altura Tanque	Temperatura do Tanque	Temperatura ambiente	Temperatura do céu	Número de Tubos
1,1m	80°C	20°C	0°C	10 tubos

O arranjo se configura com cinco coletores em paralelo, com uma área total de 3 m<sup>2</sup>, cuja eficiência é dada pela Eq. 25.

$$\eta = 0,76 - 7,72 \left( \frac{T_e - T_a}{G} \right) \quad (25)$$

Além disso, o reservatório térmico é de aço inoxidável, revestido com lã de vidro, instalado na posição vertical, com temperatura controlada por um termostato no fundo do tanque, que mantém a resistência elétrica acionada a fim de manter a temperatura do tanque constante, sempre em torno dos 80°C.

Na Fig. 4 encontra-se o esquema geométrico da instalação e os resultados são apresentados nas Figs. 5 e 6.

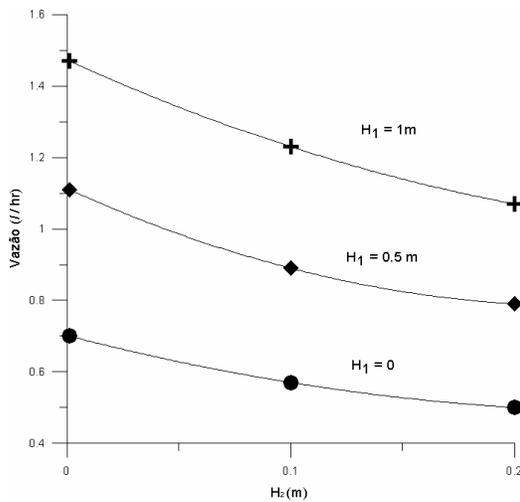


Fig. 5. Vazão da circulação reversa na condição de temperatura do tanque 80°C

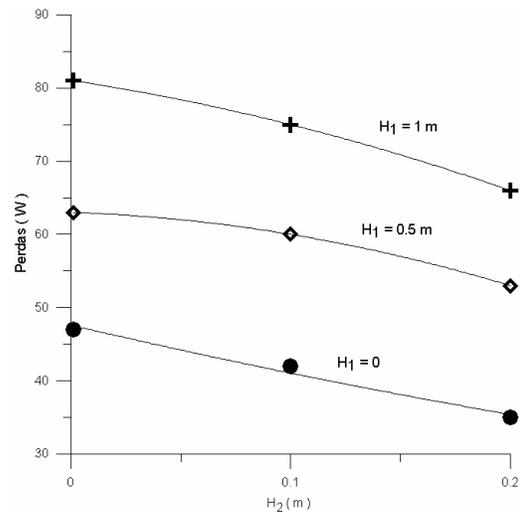


Fig. 6. Perdas pela circulação reversa na condição de temperatura do tanque a 80°C

Nota-se que quando o topo do coletor está no mesmo nível que o fundo do tanque, o que não seria a configuração recomendada pelos manuais de instalação, observa-se que a vazão reversa atinge seus maiores valores, com magnitude superior a 1,5 l/h. Aumentando a elevação do tanque em relação ao coletor, observa-se uma redução na vazão conforme o esperado. O mesmo fato é esperado quando a altura da linha de retorno da água quente do coletor está mais próxima ao fundo do tanque.

É importante observar na Fig. 6 as perdas de energia, que, na medida em que a cota do fundo do tanque ficar mais próxima do topo do coletor, são maiores e mais significantes. Entretanto, corroborou-se dizer que as perdas devido à circulação reversa podem ser negligenciadas se o sistema estiver bem isolado termicamente e se a altura de elevação do tanque estiver superior ao nível do coletor.

Morrison (1983) apresenta em sua simulação a resultados semelhantes. Conclui que a vazão é mínima quando a altura A1 e o fundo do tanque estão nivelados com o topo do coletor, verificando uma vazão na magnitude de 1,4 l/h. Em noites frias, com temperatura do céu abaixo da temperatura ambiente, afirma que uma separação de 50 mm entre o topo do coletor e o fundo do tanque é suficiente para manter uma perda térmica em torno de 20 W.

Em outra situação, simulou-se outra situação com as mesmas configurações dimensionais, porém sem apoio auxiliar de energia, à temperatura ambiente variável de acordo com arquivo climático de Porto Alegre. Apresenta-se, na Fig. 7 a estratificação das temperaturas no reservatório.

Nota-se que a temperatura no tanque possui uma perda, em torno de 3,5%, quando a elevação do tanque está no mesmo nível do topo do coletor. Observando-se na Fig. 8, verificou-se uma vazão reversa levemente maior na mesma situação com  $A_2 = 0$ . As perdas de potência podem ser conferidas na Fig. 9 e na comparação descrita não se tem uma significativa diferença de energia perdida, provavelmente porque a temperatura do céu não estava muito abaixo da temperatura ambiente, situação em que a perda de energia encontraria-se no pior caso, segundo Morrison (1983).

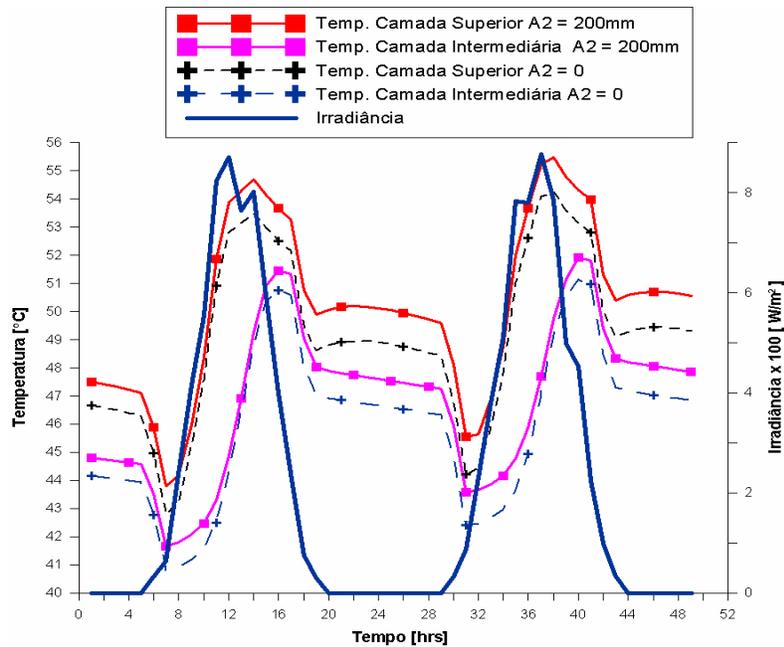


Figura 7. Distribuição de temperaturas no reservatório nas duas configurações simuladas

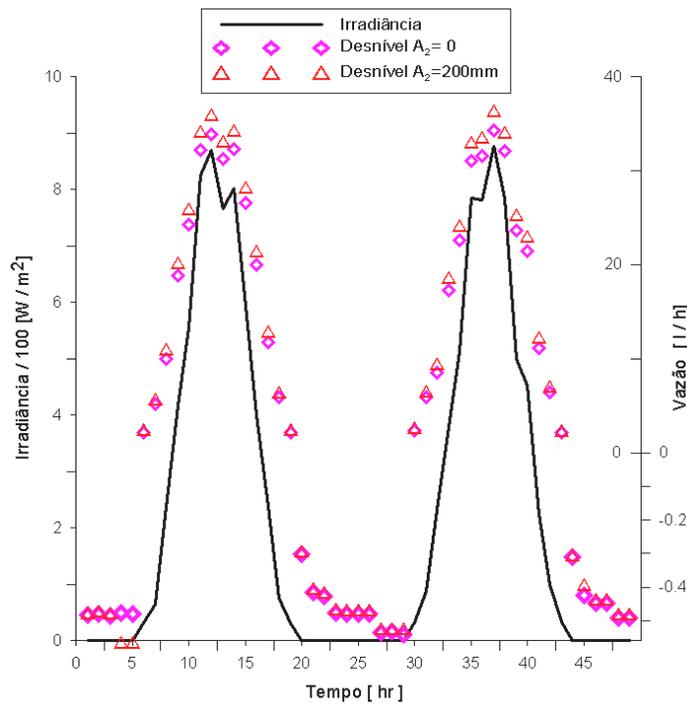


Figura 8. Vazão do sistema ao longo do dia.

Quando o sistema é simulado com um perfil de consumo de 200 litros por dia, pelo horário da manhã e à noite, na Fig. 10, tem-se a distribuição de temperatura no reservatório e é clara a diminuição dos gradientes de temperatura, principalmente nos horário de consumo. Como a temperatura nas camadas inferiores do tanque estão pouco acima da temperatura ambiente, as perdas térmicas devido à circulação reversa diminuem, com valores em torno de 16 W.

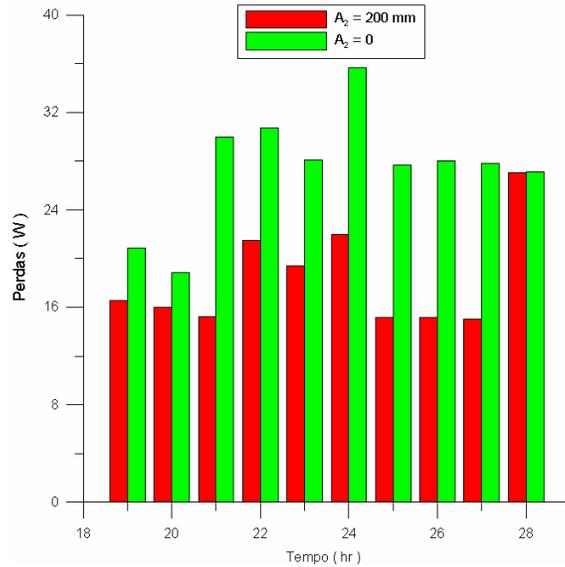


Figura. 9. Distribuição de temperaturas no reservatório nas duas configurações simuladas.

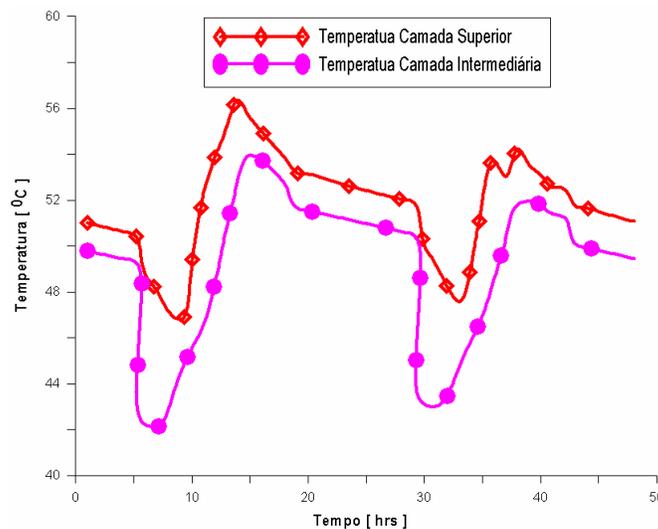


Figura. 10. Distribuição de temperaturas no reservatório com perfil de consumo diário.  $A_1=1$  m e  $A_2=200$  mm

Para outra configuração simulada considerou-se o topo do coletor na mesma altura da tubulação, *Tub2-3*, ligado ao reservatório, cota  $A_2$  da Fig. 4. Deste modo, buscou-se uma situação onde o fundo do tanque coincidia com a base do coletor, denominada neste trabalho de sistema “*bottom-bottom*”, configuração similar com os sistemas chineses “*built-in*”, na qual os tubos do coletor são conectados diretamente ao tanque.

Observou-se, conforme Fig. 11, que as perdas de energia térmica a noite são em torno de 30 W. Este sistema também caracteriza-se por uma perda significativa de eficiência durante seu funcionamento diurno, com uma eficiência média de 26.5% contra 37%, para o mesmo período simulado, em um sistema com  $A_2 = 200$  mm e características conforme Tab. 1, aqui já apresentadas.

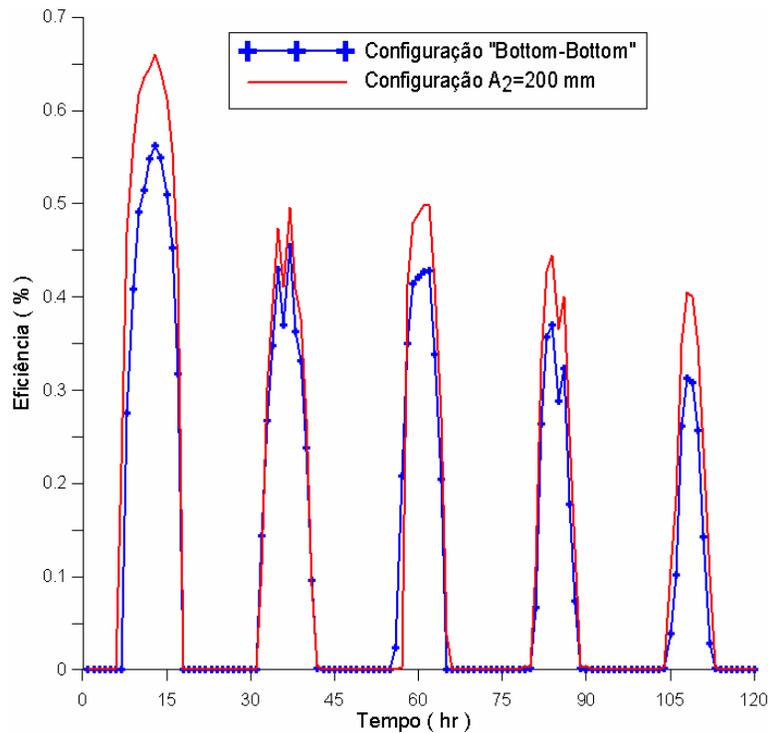


Figura. 11. Eficiência dos sistemas para cinco dias de Janeiro..

## 5. CONCLUSÕES

Um modelo matemático para o cálculo da circulação reversa foi apresentado, e foram realizadas simulações com o software Termosim, para dois casos de parâmetros geométricos de uma instalação de coletores solares planos.

Os resultados estão de acordo com análises existentes na literatura científica sobre a ocorrência da circulação reversa e indicam que quanto maior a diferença de altura do topo do coletor com o fundo do tanque menor as perdas térmicas à noite. As magnitudes das perdas de energia variam dependendo do perfil de consumo, da capacidade do reservatório, da temperatura ambiente e do uso de energia auxiliar. Suas perdas podem ser significativas, principalmente quando é analisada a estratificação das temperaturas nas camadas do tanque, para dias de inverno e para uma área de absorção maior.

É recomendado, portanto, colocar, em instalações de coletores para aquecimento de água, o reservatório a uma altura superior do topo do coletor, que, entretanto, não anula os efeitos da circulação reversa, mas com certeza, minimiza suas perdas e resultando ao sistema uma maior eficiência na conservação da energia armazenada.

Com os recursos computacionais atuais, uma análise levando em conta esta parcela de perdas à noite torna o software e os resultados mais precisos, um dos objetivos da implementação deste modelo de determinação do comportamento térmico de sistemas de aquecimento de água por energia solar.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro concedido por CNPq para a realização do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Cooper P. I., 1981. The Effect of Inclination on the Heat Loss from Flat Plate Solar Collectors, Solar Energy, Vol. 27, No 5, pp. 413-420.
- Close, D. J., 1962. The Performance of Solar Water Heaters with Natural Circulation, Solar Energy, Vol. 6, pp. 33-40.
- Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1991. Solar Engineering of Thermal Process, Wiley, New York.
- Jansa P., Chungpaibulpatana S. and Limmeechokchai B., 2004. A Simulation Model for Predicting the Performance of a Built in Storage Solar Water Heater, Thammasat Int. J. Sc. Tech, Vol. 9, No. 4, Thailand.
- Morrison G. L. e Tran H. N., 1984. Simulation of the Long Term Performance of Thermosyphon Solar Water Heaters, Australia.
- Morrison G. L. and Tran H. N. (1992). Energy Rating Domestic Water Heaters, Anzes, Annual Conference, Australia.

- Morrison G.L. and Wood B. D. Packed Solar Water Heating Technology Twenty Years of Progress, School of Mechanical and Manufacturing Engineering , The University of New South Wales, Australia.
- Riffel, B. D., 2007. Simulação do Aporte Térmico de Coletores Solares Planos em um Tanque Cilíndrico Estratificado, I CBENS – Congresso Brasileiro de Energia Solar, Florianópolis.
- Siqueira A.M.O. , 2003. Desenvolvimento de um Programa de Simulação Computacional de Sistemas de Aquecimento Solar para Água, Tese de Doutorado, Promec, UFRGS.
- Shitzer A., Kalmanovis D., Zvirin Y., Grossman G., 1979. Experiments with a Flat Plate Solar Water Heater System in Thermosiphon Flow, Solar Energy, Vol. 22, pp. 27-35.

### **SIMULATION FOR REVERSE FLOW ANALISYS IN FLAT-PLATE COLLECTORS WITH THERMOSIPHON SYSTEMS**

**Abstract.** *In the solar water heating systems (SWHS), an important factor in its application is the analyses of its performance. Experimental tests are made and compared with the results obtained from the software simulations that are developed, in order to improve the capacity of analysis, with reliable results and saving time. Heat losses are present in the SWHS, during the day and night, but the heat losses during the night in general are neglected. A few published articles revealed that an appropriate installation minimizes the thermal losses. With the objective to study this phenomena, called reverse circulation, it was incorporated in the software Termosim, developed by Solar Energy Lab from UFRGS, the heat losses calculus making possible the analysis of this issue changing geometric parameters of the system. This paper describes the mathematical models applied in the calculations of reverse flow circulation and energy losses associate to it. The simulations made resulted that the heat losses at night are minimized as much as the distance between the bottom of the tank and the top of the collector is bigger, and it can have a significant impact in the temperatures in a stratified tank.*

**Key words:** Solar Energy, Reverse Flow Circulation, Computational Simulation.