

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM 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 apresentam-se os resultados encontrados na determinação experimental do coeficiente global de transferência de calor de reservatório térmico em sistemas de aquecimento de água por energia solar. No trabalho foram realizados experimentos com a finalidade de obtenção da curva de resfriamento para um dado reservatório térmico. Nestes experimentos a água do reservatório foi aquecida até a temperatura de equilíbrio de 72 °C e o fluxo da água a partir dos coletores solares e para os coletores solares, bem como os fluxos para o consumo e da rede foram interrompidos e foram monitoradas a temperatura ambiente (nas vizinhanças do reservatório) e as temperaturas em 6 camadas ao longo da posição vertical do tanque. A aquisição de dados foi realizada ao longo de vários dias, finalizando quando a temperatura média da água atingiu a temperatura de 50 °C. Foram utilizados diferentes métodos para se determinar/calcular o coeficiente global de perdas do reservatório. Os mesmos foram comparados com aquele obtido a partir do conhecimento dos materiais constituintes do reservatório, suas dimensões e propriedades termofísicas.

Palavras-chave: Energia Solar, Reservatório Térmico, Estratificação Térmica, Coeficiente Global de Transferência de Calor.

1. INTRODUÇÃO

As perdas de calor a partir de reservatórios térmicos em sistemas de aquecimento de aquecimento de água por energia solar, representam cerca de 10 a 15 % de todo o ganho útil de energia nos coletores solares (Smith, 1997). Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos para a determinação do coeficiente global de perdas do reservatório, parâmetro este indicativo das perdas de calor do reservatório para o ambiente, e fundamental nos procedimentos de simulação do desempenho dos sistemas de aquecimento de água por energia solar.

Inicialmente, apresenta-se uma sucinta descrição dos componentes do sistema, enquanto, no item seguinte, faz-se uma apresentação da instrumentação empregada na aquisição das medidas experimentais de temperatura, vazão mássica e irradiância solar. Apresenta-se, ainda, a sistemática empregada na aquisição das medidas experimentais e dos métodos de aferição dos sensores de temperatura. E finalmente, no item 4 são apresentados os resultados obtidos e a discussão dos mesmos.

2. EQUIPAMENTOS

O trabalho experimental foi desenvolvido no Laboratório de Energia Solar (LES) do Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos (GESTE) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS (Siqueira, 2003). Foi utilizado para as medidas experimentais o sistema solar de aquecimento de água instalado em 1989, por doação da empresa IEM - Intercâmbio Eletro Mecânico Ltda.

A Fig. 1 mostra um desenho esquemático da instalação e a Fig. 2 mostra uma fotografia do arranjo de coletores solares.

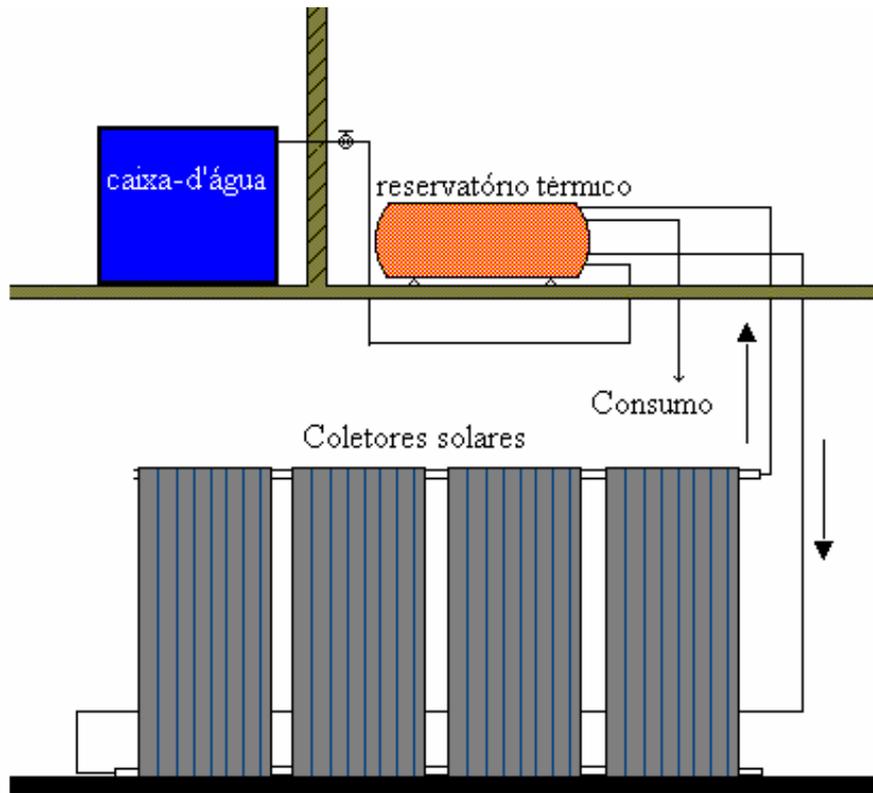


Figura 1 – Desenho esquemático do SSAA operando por termossifão.



Figura 2 – Fotografia do SSAA operando por termossifão na bancada de testes.

2.1 Coletores Solares

A instalação dos coletores solares é composta por quatro unidades do tipo placa-tubos conectadas em paralelo. Cada unidade é constituída por uma grade de 8 tubos paralelos, de diâmetro igual a 7,9 mm (5/16 polegadas). Os tubos são soldados nas extremidades a um tubo distribuidor

(na base) e a um tubo coletor (no topo), ambos com 25,4 mm (1 polegada) de diâmetro. A separação entre os tubos é de 60 mm. A grade de tubos é soldada a uma chapa de cobre de 3 mm de espessura, com solda de estanho ao longo dos tubos. A chapa de cobre é recoberta com tinta preta fosca resistente a altas temperaturas. Cada coletor tem as medidas: 1,5 m de comprimento e 0,58 m de largura; de modo que a área total de coleta é de aproximadamente 3,48 m². A inclinação dos 4 coletores é de aproximadamente 42° em relação ao plano horizontal.

A placa absorvedora (chapa de cobre e tubos) é montada em uma caixa de fibra de vidro. A parte inferior da placa é isolada com uma camada de 70 mm de lã de vidro. A parte frontal é recoberta com uma lâmina de vidro de 4 mm de espessura, a uma distância de 35 mm da placa absorvedora.

Testes de desempenho realizados no LES, de acordo com as normas ABNT NBR 10184 (1988), ASHRAE Standard 93-77 (1977) e Duffie and Beckmann (1991) mostram que parâmetros de qualidade para os coletores solares instalados na bancada de testes são: $F_R(\tau\alpha) = 0,72$ e $F_R U_L = 8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

2.2 Reservatório Térmico

O reservatório de água quente é do tipo cilíndrico horizontal (1,10 m de comprimento e 0,46 m de diâmetro), confeccionado em chapa de aço inoxidável, revestido externamente com 22,5 mm de lã de vidro.

Na parte frontal do tanque são conectadas as tubulações hidráulicas: entrada de água oriunda dos coletores, entrada de água fria da rede, saída de água para o consumo, saída de água de retorno para os coletores. No reservatório existem 5 posições para tomada de medidas de temperatura. Para tal, foram instaladas 3 bainhas de latão e uma de aço. Na parte superior do tanque existe um tubo de cobre vertical com a extremidade aberta, com a finalidade de manter o tanque a pressão atmosférica e ainda, servir de "ladrão" no caso de transbordamento de água.

Na construção do cilindro foram utilizadas chapas de aço inoxidável com 1,2 mm de espessura. A massa total do tanque é avaliada em 26 kg. As posições das tubulações estão esquematizadas na Fig. 3.

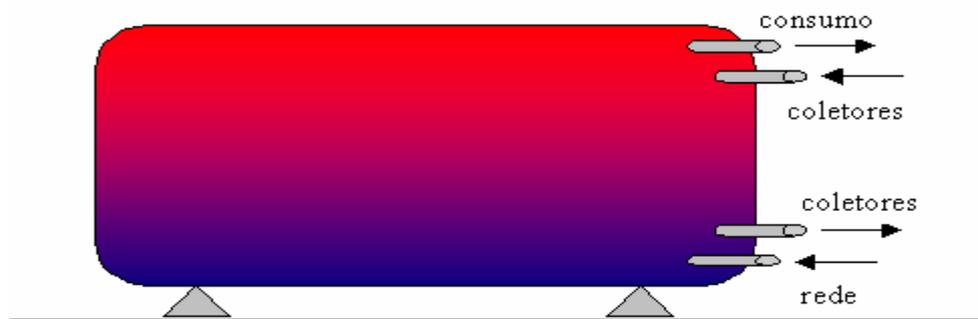


Figura 3 - Desenho esquemático do reservatório térmico.

2.3 Tubulações Hidráulicas

Todas as tubulações são de cobre comercial, com diâmetro de 25,4 mm (1 polegada), contendo registros gaveta de latão. As tubulações são isoladas com 0,10 m de espuma térmica sintética. Em alguns trechos ao longo do circuito existem mangueiras de borracha próprias para água quente com o mesmo diâmetro, que servem para permitir curvas suaves na tubulação.

A tubulação compreendida entre a saída dos coletores e a entrada do reservatório tem 4,5 m de comprimento, enquanto aquela entre a saída do reservatório e a base do arranjo de coletores tem aproximadamente 10,5 m.

3. INSTRUMENTAÇÃO

Para avaliar corretamente o desempenho do sistema de aquecimento solar, necessita-se conhecer o coeficiente de perdas térmicas do reservatório térmico. Neste caso é necessário um equipamento que seja capaz de fazer e registrar várias medições simultaneamente com confiabilidade e precisão. Invariavelmente a escolha recai sobre um sistema de aquisição de dados computacional, devido às suas inúmeras vantagens no processamento e armazenamento de dados, bem como na operação com cálculos matemáticos complexos.

Com o intuito de se avaliar o coeficiente global de perdas térmicas do reservatório térmico do sistema de aquecimento de água apresentado anteriormente, decidiu-se utilizar sensores de temperatura termo-resistivos - Pt100. Estes sensores foram instalados ao longo da posição central do reservatório, a fim de se verificar o fenômeno da estratificação térmica no mesmo. Abaixo dos coletores, foi instalado um Pt100 para medir a temperatura média ambiente. Não foram realizadas medidas da velocidade do vento e a temperatura no entorno do tanque foi assumida como igual à temperatura ambiente.

Os sensores de temperatura já conectados à caixa de aquisição nos canais correspondentes (de acordo com a Tab. 1) foram novamente mergulhados no banho termostático LAUDA MGW com agitação a uma temperatura inicial de aproximadamente 65 °C. A resistência elétrica foi então desligada, de modo que se iniciou o processo de resfriamento lento da água contida no banho até que se atingiu uma temperatura de cerca de 10 °C. A cada medida calculou-se o desvio da leitura de cada sensor, tomando-se como temperatura de referência a média das leituras de todos os sensores. Os resultados mostraram que o desvio absoluto médio para todos os sensores é de aproximadamente 0,13 °C, enquanto o desvio máximo é de 0,35 °C e o mínimo é de 0,02 °C na faixa de 0 a 65 °C.

Tabela 1 – Informações relativas aos Pt100 internos ao reservatório térmico (bainhas)*

Temp. Internas Tanque	Pt100 Associado	Distância a partir da Base [m]	Distância a partir da Lateral [m]	Raio [m]
Tanque-Nó1	Pt100-A1	0,46	0,55	0,230
Tanque-Nó2	Pt100-12	0,31	0,84	0,150
Tanque-Nó3	Pt100-A6	0,25	0,55	0,105
Tanque-Nó4	Pt100-A2	0,23	0,55	0,230
Tanque-Nó5	Pt100-4	0,15	0,55	0,230
Tanque-Nó6	Pt100-5	0,00	0,55	0,230

*valores aproximados, conforme Figuras 4 a 6.

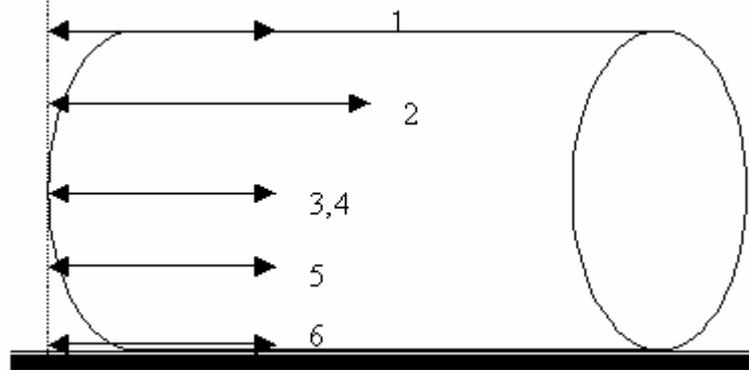


Figura 4 – Distâncias a partir da lateral esquerda do tanque - 6 pontos de medida de temperatura. (Vista Frontal).

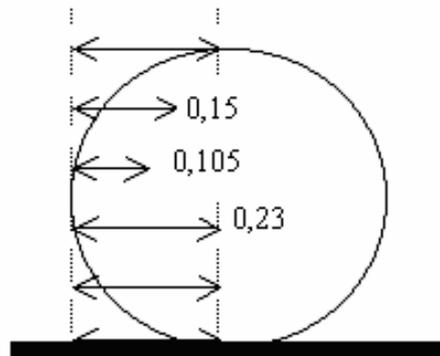


Figura 5 – Posições no tanque - 6 pontos de medida de temperatura (Vista Lateral).

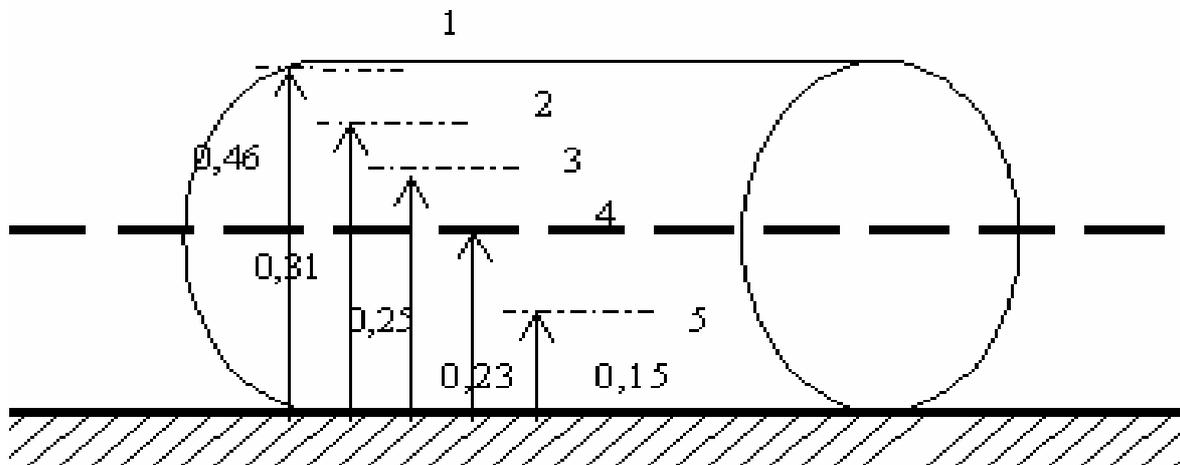


Figura 6 – Distâncias a partir da base do tanque - 6 pontos de medida de temperatura (Valores em metros).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a determinação experimental do coeficiente global de transferência de calor do reservatório térmico (UA) foram realizados experimentos para obtenção da curva de resfriamento, conforme metodologia apresentada em ASHRAE (1995), que estabelece que os reservatórios térmicos devem ser mantidos a uma temperatura mínima de 65°C e monitorados por no mínimo 12 horas, enquanto todas as válvulas são mantidas fechadas, isolando o reservatório do aquecedor solar. Desta forma também não é permitida a retirada de água quente para consumo.

Assim, nos experimentos realizados a água do reservatório foi aquecida até a temperatura de equilíbrio de 72 °C e o fluxo da água a partir dos coletores e para os coletores solares, bem como os fluxos para o consumo e da rede foram interrompidos e foram monitoradas a temperatura ambiente (nas vizinhanças do reservatório) e as temperaturas em 6 pontos (correspondendo a altura média das camadas) ao longo da posição vertical do mesmo.

A aquisição de dados foi realizada ao longo de 4 dias, finalizando quando a temperatura média da água atingiu cerca de 50 °C. Os resultados dos primeiros 2,5 dias podem ser visualizados pela curva de resfriamento apresentada na Fig. 7.

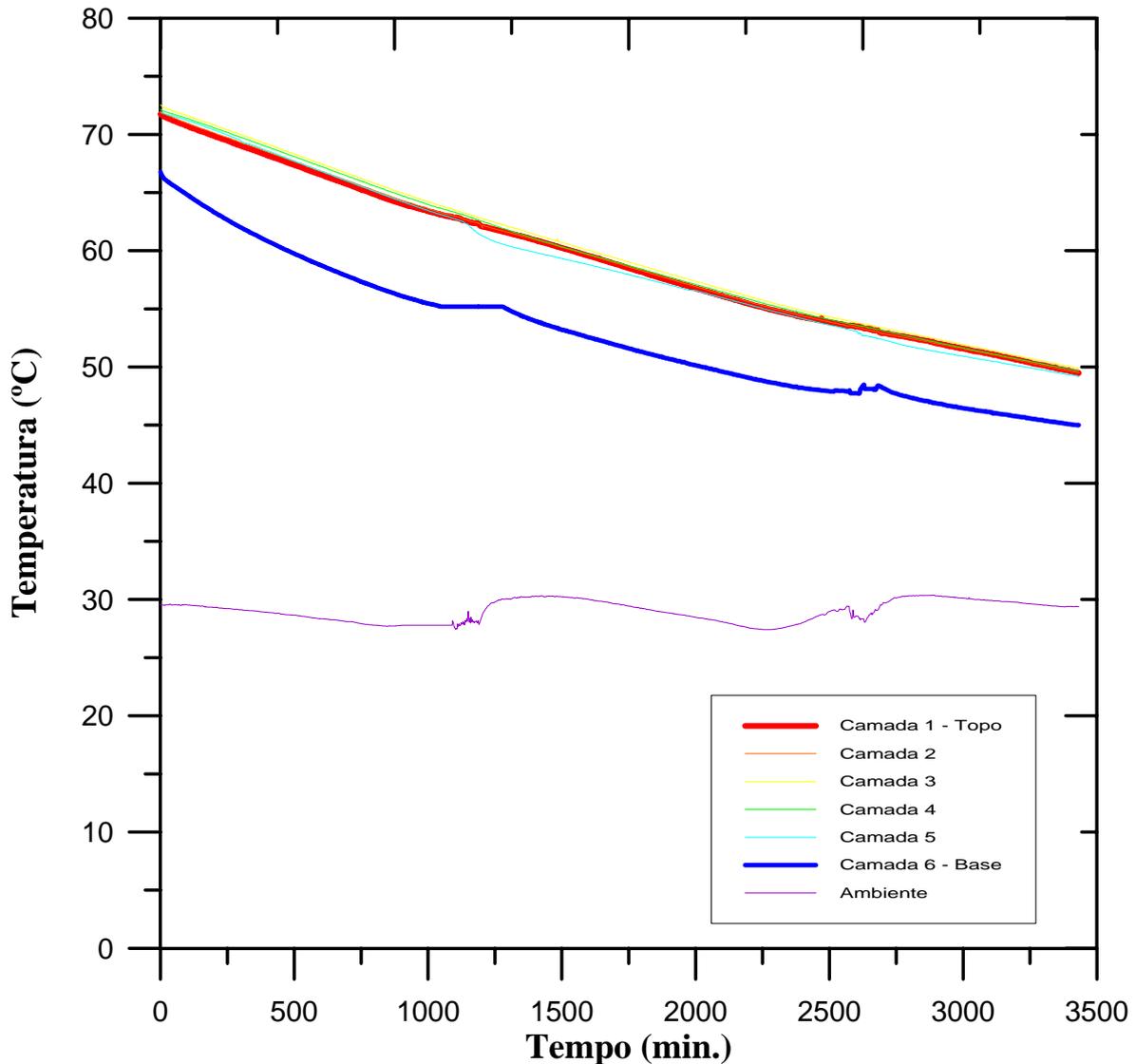


Figura 7 – Curvas experimentais do resfriamento do tanque.

A aquisição dos dados foi realizada a cada 2 minutos. A razão entre \dot{Q}_{perdas} e a diferença entre a temperatura média do reservatório e a temperatura ambiente fornece uma estimativa do coeficiente global de transferência de calor do tanque, (UA) , conforme equação:

$$\dot{Q}_{perdas} = \sum_{i=1}^n \left\{ (U_{L_i} A_{L_i} + U_{D_i} A_{D_i} + U_{E_i} A_{E_i}) (T_i - T_a) \right\} \quad (1)$$

onde, os coeficientes globais de transferência de calor para o reservatório U_L , U_D e U_E são definidos, respectivamente, numa área arbitrária lateral A_L , direita e esquerda do reservatório, A_D e

A_D , conforme detalhado em Siqueira (2003).

Para efeitos de cálculo, na determinação de (UA) foram considerados 3 diferentes intervalos de tempo Δt (1, 5 e 8 horas). Os valores de (UA) obtidos para cada um destes valores mostra a pequena influência no intervalo no resultado, conforme listado na Tab. 2. A Fig.8 mostra os resultados para o intervalo de tempo de 8 horas. Os resultados obtidos mostram, portanto, que $(UA) = 2,73 \text{ W.K}^{-1}$.

Tabela 2. Determinação experimental do coeficiente global de transferência de calor.

Δt [horas]	(UA) [W.K ⁻¹]
1	2,73
5	2,73
8	2,74

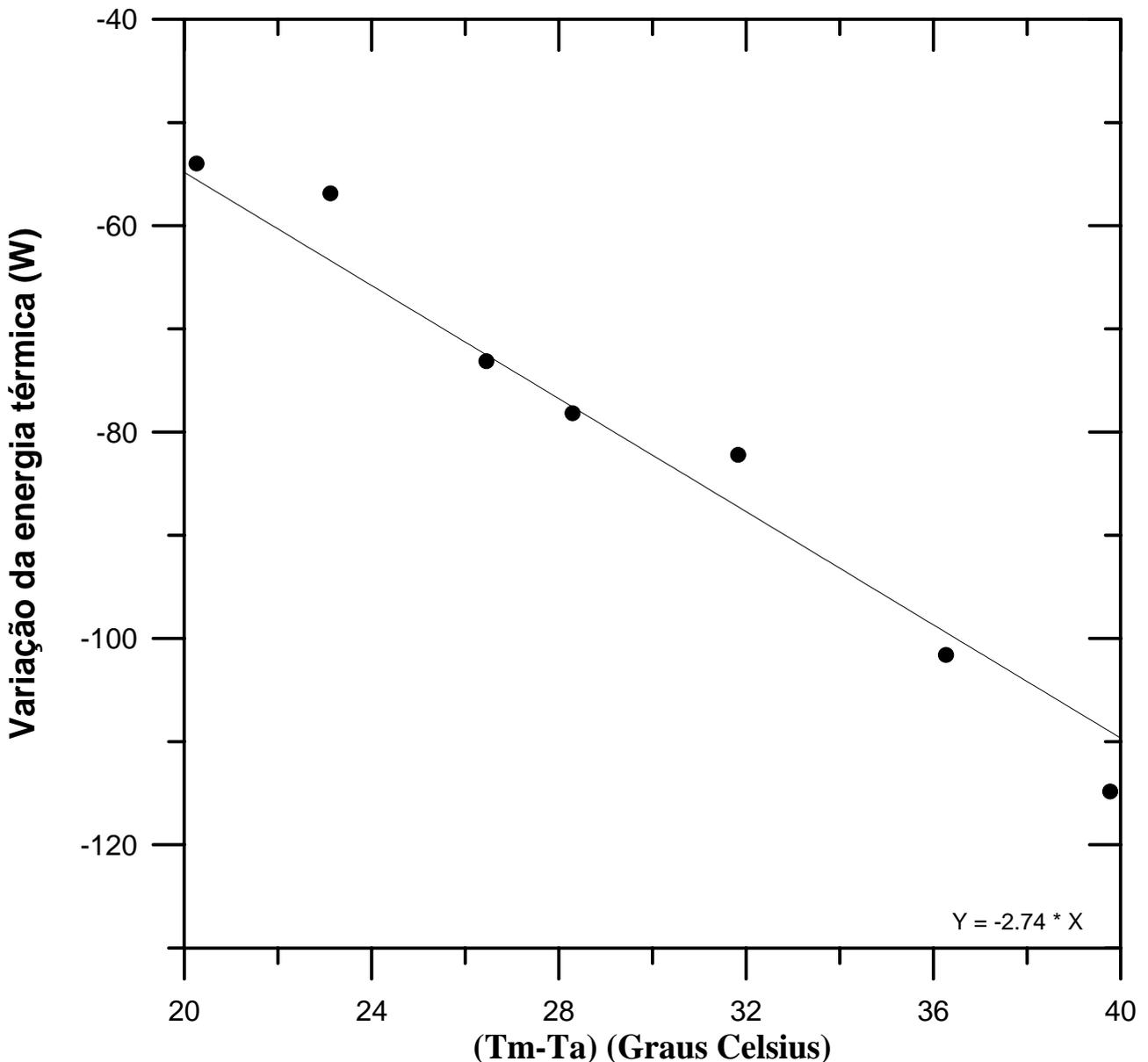


Figura 8 – Curva experimental para determinação de UA [W.K⁻¹] com $\Delta t = 8$ horas.

O coeficiente global de transferência de calor (UA) do reservatório térmico, também foi determinado por uma regressão linear da curva obtida pela plotagem do logaritmo da diferença de

temperatura (temperatura da água do reservatório menos a temperatura ambiente) versus o tempo, conforme Fig. 9. Esta abordagem proposta por Aranovitch et al. (1989) é a metodologia recomendada pela Comunidade Européia nos testes para determinação dos coeficientes de perdas de reservatórios térmicos em SSAA. Neste caso, o (UA) é determinado pela inclinação da curva apresentada na Fig. 9, obtendo-se: $(UA) = 2,80 \text{ W.K}^{-1}$.

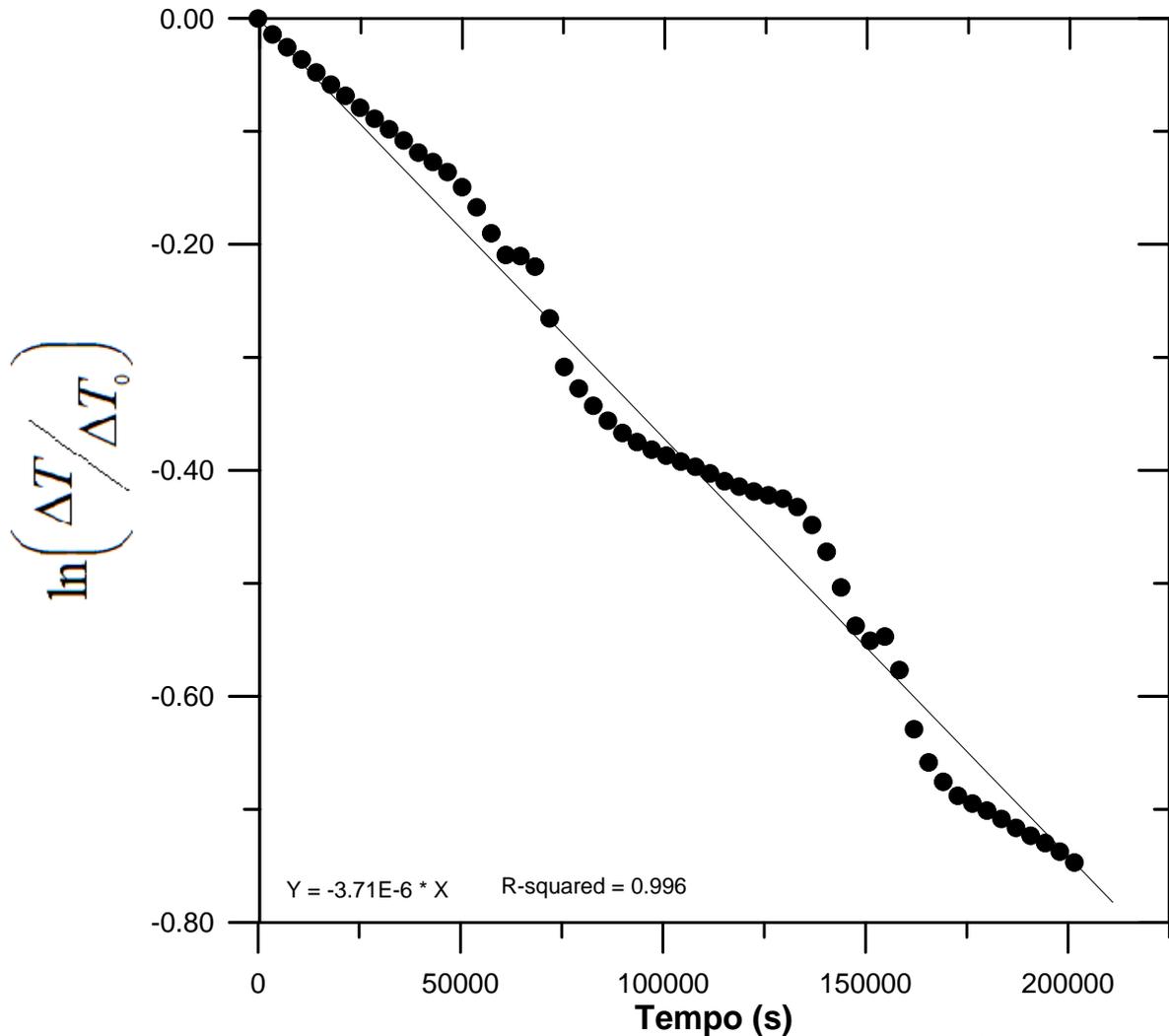


Figura 9 – Curva experimental para determinação de UA [W.K⁻¹].

Observa-se que, nesse caso, ΔT_0 é a diferença entre a temperatura média inicial do tanque e a temperatura ambiente e ΔT é a diferença entre a temperatura média num determinado instante de tempo do tanque e a temperatura ambiente. Em ambas abordagens, a temperatura média do tanque é calculada a partir das médias das temperaturas em cada camadas do reservatório ponderada pelos respectivos volumes médios (calculados como os volumes das camadas, onde é realizada a leitura de temperatura).

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i T_i)}{V} \quad (2)$$

O valo de r^2 , que reapresenta uma medida da variabilidade total é da ordem de 0,99.

No intuito de se validar os resultados anteriores obtidos para (UA), o balanço térmico no tanque num processo de resfriamento pode ser representado pela equação aproximada:

$$mC_p \frac{dT_m}{dt} = -(UA)(T_m - T_a) \quad (3)$$

que pode ser discretizada como:

$$mC_p \frac{T_m(t + \Delta t) - T_m(t)}{\Delta t} = -(UA)(T_m(t) - T_a(t)) \quad (4)$$

de onde vem:

$$T_m(t + \Delta t) = T_m(t) - \left[\frac{(UA)}{mC_p} (T_m(t) - T_a(t)) \right] \Delta t \quad (5)$$

A partir dos valores experimentais iniciais para a temperatura média armazenada no tanque, do perfil de temperatura ambiente ao longo do tempo e da capacitância térmica do tanque, usando-se a Eq. (5) para diferentes valores de (UA), construiu-se a Fig. 10.

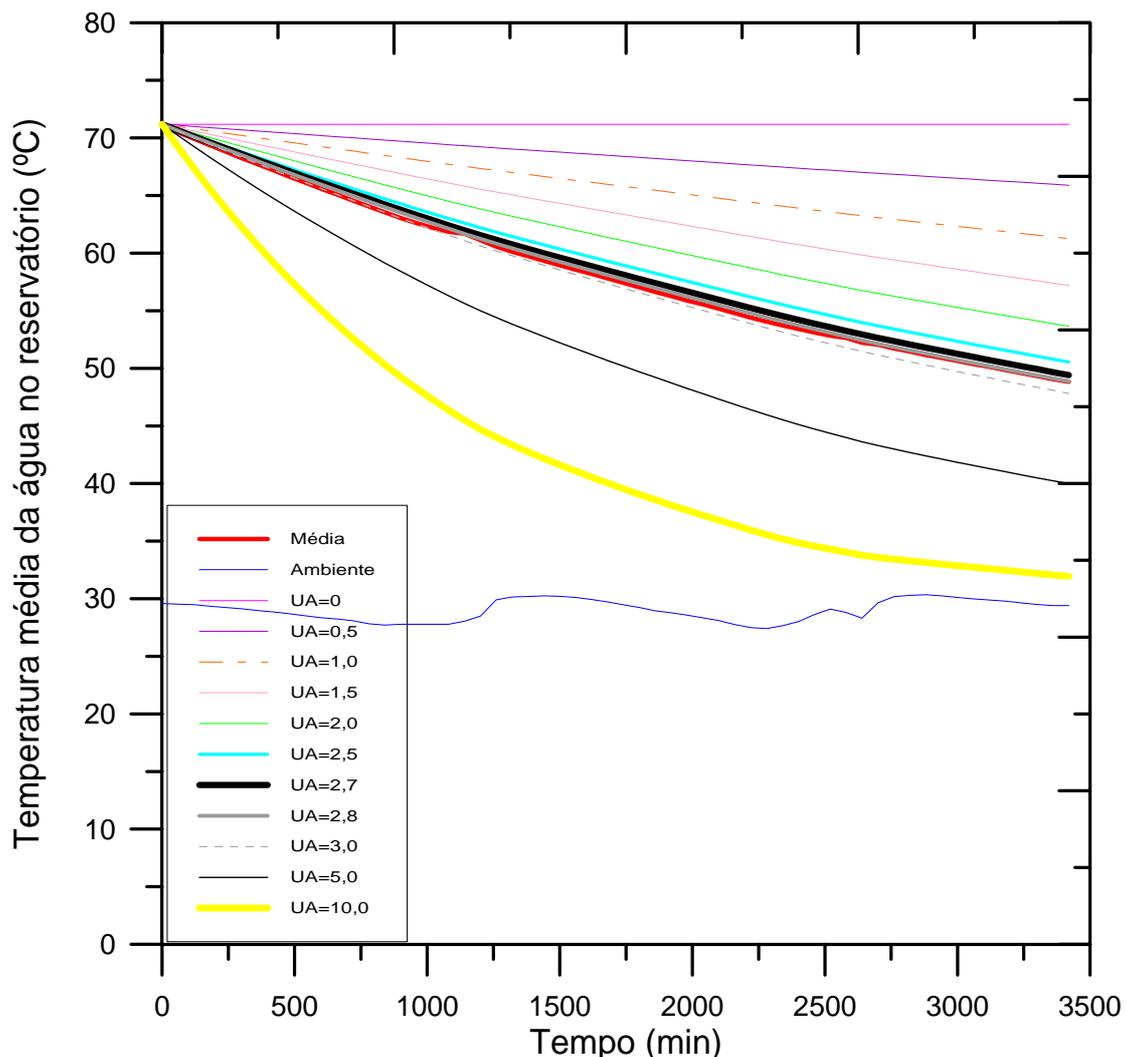


Figura 10 – Curvas de resfriamento para diferentes valores do coeficiente global de transferência de calor, UA [W.K⁻¹].

Portanto, os valores encontrados para o coeficiente global de transferência de calor do reservatório térmico, tanto pelo procedimento que envolve a determinação da energia armazenada na água em cada camada do reservatório, representado pela Fig. 8 e Tab. 2, bem como pelo método proposto por Aranovitch et al. (1989) (Fig. 9), estão de acordo com o resultado obtido pela Fig. 10, de modo que o coeficiente global de perdas do reservatório analisado neste estudo é da ordem de $2,7 \text{ W.K}^{-1}$.

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

- Aranovitch et al., 1989. "Non nuclear energies European solar collectors and systems testing group recommendations for performance and durability tests of solar collector and water heating systems", Commission of The European Communities EUR 11606 EN, may.
- 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.
- 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.

DETERMINATION OF OVERALL HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN SOLAR WATER HEATER SYSTEMS

Abstract. *This work presents results discussion about experimental determination of overall heat transfer coefficient in solar water heater systems. This study shows the experimental method in a determination of this parameter for a thermal storage tank. The water in the thermal storage was monitored along some days, from the global temperature of 72°C until 50°C . During this period, the mass flow rate from the solar collectors and for the solar collectors were interrupted. The study presents the different ways to estimation of the overall heat transfer coefficient. Some measurements were performed on ambient temperature and the temperatures in the six positions along the vertical interior of the storage tank. Comparison between experimental and predicted theoretical results is presented.*

Key words: *Solar Energy, Thermal Storage Tank, Thermal Stratification, Overall Heat Transfer Coefficient.*