

ESTUDO DA RECUPERAÇÃO DO CALOR DISSIPADO PELO CONDENSADOR DE UM REFRIGERADOR DOMÉSTICO

Robert P. P. Pentagna, Alcides Padilha, Vicente L. Scalon

DEM-FEB/ UNESP - Campus Universitário de Bauru
Av. Eng.º Luiz Edmundo Carrijo Coube, S/Nº , CEP 17033-360, Tel 055-(14)-221-6119 -Bauru-SP
email: padilha@feb.unesp.br, scalon@feb.unesp.br web page: <http://www.feb.unesp.br/>

Palavras-Chave: Acumulador de Energia Térmica, Armazenadores Térmicos, Estocagem por Calor Sensível, Estratificação Térmica..

Resumo. *O aproveitamento da energia térmica rejeitada para o meio ambiente é um tema atual e de grande interesse dos ambientalistas. O armazenamento desta energia a partir da estratificação térmica de um líquido confinado em um tanque é um assunto de suma importância e desenvolvimento na atualidade. A partir do estudo do balanço de energia em um fluido (água) armazenado em um tanque, é proposto um modelo semi-empírico unidimensional que descreve a reologia (histórico) dos perfis de temperatura do líquido no decorrer dos processos de carga e descarga do mesmo para a sua utilização cotidiana. Os resultados teóricos são confrontados com os obtidos pela mensuração experimental, disponíveis na literatura, sendo então comprovado o modelo matemático proposto que permite englobar as grandezas físicas envolvidas, bem como a relação altura/diâmetro do reservatório, com vistas à sua eficiência.*

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de economia, ou mesmo, de um uso mais racional de energia no âmbito residencial é um dos principais objetivos de qualquer estudo sobre otimização do aproveitamento de energia realizado atualmente. Associado a este fato pode-se incluir ainda a possibilidade da utilização do calor rejeitado para o meio ambiente como outro tema atual que preocupa tantos em termos energéticos como ambientais. Desta maneira, qualquer estudo que envolva um destes temas representa um desenvolvimento importante para a sociedade e, muito melhor, se abordar os dois fatores de maneira simultânea.

Com relação ao processo de armazenagem de energia, via estratificação térmica de um fluido em um tanque isolado do meio, existe uma série de trabalhos importantes já publicados. Com base nestes estudos, demonstrou-se que este processo só é possível pela existência de forças ditas de empuxo, em conjunto com a morosidade do processo de difusividade térmica do fluido utilizado. Este fenômeno da estratificação térmica é caracterizado por uma porção de fluido quente, mantida no topo do reservatório, e por uma porção de fluido frio, que permanece restrita ao fundo do mesmo. Neste processo, ambas as camadas são separadas por uma delgada camada de fluido, denominada isoclina, que possui um grande gradiente de temperatura entre o topo e o fundo do reservatório.

O reservatório é provido de difusores dispostos de maneira a possibilitar o mínimo de agitação no interior do fluido ali armazenado. A operação de retirada de fluido quente é feita pela região superior do tanque, enquanto que a reposição da massa retirada, à temperatura ambiente, é feita pelo fundo do mesmo. A correta identificação da isoclina, bem como da sua posição ao longo da altura do tanque em intervalos de tempo conhecidos, é de vital importância para a correta avaliação da disponibilidade de energia nesse sistema. Somente desta maneira é possível preencher uma demanda de energia conhecida, mantendo constantes os níveis máximo e mínimo de temperatura do fluido de trabalho.

Esta maneira de armazenamento de energia possui características de simplicidade que a tornam atraente sob o aspecto econômico e tecnológico.

Dentre as abordagens encontradas na literatura, destaca-se a realizada por Carrocci [1], onde foi realizado um estudo teórico e experimental do armazenamento de energia por calor sensível em líquido estratificado para uso residencial. Outro estudo sobre estratificação térmica, no aspecto da influência da parede do reservatório na degradação térmica do fluido armazenado foi realizado por Carrocci [2], com contribuições quanto à condutividade térmica do material empregado na construção do reservatório. Berkel [3], por sua vez, realizou um estudo sobre o armazenamento de fluidos confinados em tanques, em regime quase estacionário, usando o método das diferenças finitas, revelou acentuada precisão para modelos que descrevem o comportamento das isoclinas em duas dimensões para a determinação da espessura das mesmas, bem como do comportamento da interface isoclina-fluido ao longo do tempo de armazenamento do fluido. Outro estudo realizado por Spall [4], avalia o comportamento da estratificação térmica em tanques cilíndricos, com entrada de água quente pela base, com os valores críticos para os números de Reynolds e de Arquimedes.

Em trabalho recente, Bouhdjar e Harhad [5], efetuaram estudos em tanques cilíndricos para

armazenagem de calor sensível estratificado, verificando a influência da geometria do tanque em três diferentes tipos de fluido. Para tanto, foram realizados diversos estudos relacionando o número de Prandtl na entrada e saída de fluido a partir dos quais foram obtidas correlações que possibilitam uma melhora na eficiência desse sistema de armazenagem de energia.

Este trabalho, por sua vez, analisa o processo de estratificação térmica de um fluido em um reservatório, mediante as operações de carga e descarga do mesmo são estudados exaustivamente, sob o aspecto teórico e prático do problema. São determinados os perfis transientes de temperatura da parede e do fluido armazenado, bem como é analisada a influência da relação altura/diâmetro do reservatório sobre esta eficiência. O modelo teórico proposto, cujas equações foram discretizadas pela técnica das diferenças finitas e resolvidas por método implícito, descreve as situações encontradas nos processos de armazenagem por estratificação térmica, englobando os casos particulares examinados por Cabelli [6] e Blay [7].

1.1 Simbologia

Neste trabalho a série de símbolos utilizados é dada por:

B : relação de aspecto do tanque = H/D

$$C = \frac{4 \cdot D \cdot H}{D_e^2 - D^2}$$

$C_p, C_{p'}$: calor específico a pressão constante para o fluido e isolante, respectivamente.

D, D_e : diâmetro interno e externo do tanque armazenador, respectivamente.

$$F = \frac{4 \cdot H}{D_e^2 - D^2};$$

Gr : número de Grashof = $\frac{g \cdot \beta \cdot (T - T') \cdot H^3}{\nu^2} = \frac{g \cdot \beta \cdot (\theta - \theta') \cdot H^3}{\nu^2}$

h : coeficiente de película entre a parede e o fluido no interior do reservatório, e entre a parede e o meio ambiente, respectivamente.

H : altura do reservatório.

k e k' : condutividade térmica do fluido e do isolante, respectivamente.

$$Nu: \text{número de Nusselt} = \frac{h \cdot H}{k}$$

$$Pr: \text{Número de Prandtl} = \frac{\mu \cdot c_p}{k}$$

$Q(x, t)$: taxa de calor transferido à parede por unidade de volume do fluido = $\frac{4 \cdot h}{D} \cdot (T - T')$.

$Q'(x, t)$: taxa de calor absorvido pela parede por unidade de volume de isolante = $\frac{4 \cdot h \cdot D}{(D_e^2 - D^2)} \cdot (T - T')$

$Q_o(x, t)$ = taxa de calor perdido para o meio ambiente por unidade de volume do isolante = $\frac{4}{(D_e^2 - D^2)} \cdot (T - T') \left[\frac{\ln(D_e/D)}{2k'} + \frac{1}{h_e \cdot D_e} \right]^{-1}$

$$Re: \text{número de Reynolds} = \frac{\rho \cdot u \cdot H}{\mu}$$

t : tempo.

$T(x, t), T'(x, t)$: temperatura do fluido, da parede e do meio ambiente, respectivamente.

T_{\max}, T_{\min} : temperaturas máxima e mínima do fluido no reservatório de estocagem.

$T_o(x)$: perfil inicial de temperatura.

u : velocidade do fluido no interior do reservatório para as operações de carga ($u>0$) e descarga ($u<0$).

U : velocidade adimensional do fluido= $u \cdot H/\alpha$.

x : ordenada com origem no topo do tanque.

X : ordenada adimensional com origem topo do tanque = x/H .

$W = k/k'$.

Letras Gregas

α, α' : difusividade térmica do fluido e isolante, respectivamente.

θ : temperatura adimensional do fluido = $\frac{T(x,t) - T_\infty}{\Delta T}$.

θ' : temperatura adimensional da parede = $\frac{T'(x,t) - T_\infty}{\Delta T}$.

μ : viscosidade do fluido de estocagem.

ξ : relação de capacidades térmicas = $\rho C_p / (\rho' C_p')$

ρ, ρ' : massa específica do fluido e do material isolante da parede, respectivamente.

τ : variável tempo adimensional ou número de Fourier= $\alpha \cdot t/H^2$.

2 MODELO MATEMÁTICO

As seguintes hipóteses simplificadoras foram utilizadas no desenvolvimento de um modelo teórico para o estudo do processo de armazenagem térmica em líquidos por estratificação:

- (i) As propriedades físicas do fluido e do material isolante empregado no revestimento térmico do reservatório são constantes, sendo seus valores numéricos tomados para valores médios entre o máximo e mínimo das temperaturas do fluido.
- (ii) O fluido utilizado (água) possui uma capacidade térmica elevada, não sendo a sua temperatura afetada pelo atrito, resultando em uma dissipação viscosa de energia desprezível.
- (iii) As perdas de calor para o meio ambiente são consideradas desprezíveis, sendo estudadas apenas as situações de carga e descarga. A transferência de calor do fluido armazenado para a parede do reservatório é feita por convecção natural, com altos números de Prandtl e Grashof. Entre a parede lateral e o ambiente, é admitida convecção natural.
- (iv) Nas operações de carga e descarga, são consideradas três regiões distintas: uma região com uma fina camada de líquido em contato com a face interior da parede do reservatório, uma região no seio do líquido onde a velocidade do escoamento é constante e unidimensional e por último, a região da parede do tanque com a camada de isolante.
- (v) Ao longo das operações de carga e descarga, na região central do fluido o mesmo apresenta baixos valores de velocidade, é incompressível, sendo o mecanismo de troca de calor com a parede realizada através de convecção forçada.

(vi) Não existe fluxo de calor entre as extremidades do reservatório com o meio ambiente.

A partir das hipóteses citadas e, tomando como referencial para a ordenada x a partir do topo do tanque, obtém-se dois elementos diferenciais no meio fluido e na parede. As seguintes equações de balanço de energia em termos dos campos de temperatura no meio fluido $T(x,t)$ e axialmente na parede $T'(x,t)$:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho C_p} Q(x,t) \quad 0 \leq x \leq H \quad t > 0$$

$$\frac{\partial T'}{\partial t} = \alpha' \frac{\partial^2 T'}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho' C_p'} Q'(x,t) - \frac{1}{\rho' C_p'} Q_0(x,t) \quad 0 \leq x \leq H \quad t > 0 \quad (1)$$

e sujeitas às seguintes condições de contorno e inicial:

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = \frac{\partial T'(0,t)}{\partial x} = 0; \quad t > 0$$

$$\frac{\partial T(H,t)}{\partial x} = \frac{\partial T'(H,t)}{\partial x} = 0; \quad t > 0 \quad (1')$$

$$T(x,0) = T'(x,0) = T_0(x); \quad 0 \leq x \leq H$$

sendo $Q(x,t)$; $Q'(x,t)$ e $Q_0(x,t)$, respectivamente, a taxa de calor transferido pelo fluido à parede por unidade de volume de fluido, a taxa de calor absorvido pela parede por unidade de volume do isolante, a taxa de calor perdido para o meio ambiente por unidade de volume do isolante.

Realizando adimensionalização do sistema de equações mostrado em (1) e (1'), tem-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - U \frac{\partial \theta}{\partial x} - 4BNu(\theta - \theta'); \quad 0 \leq X \leq 1; \quad \tau > 0$$

$$\frac{\partial \theta'}{\partial \tau} = \frac{\xi}{W} \frac{\partial^2 \theta'}{\partial X^2} + \xi CNu(\theta - \theta') - F\xi Nu_{eq} \theta'; \quad 0 \leq X \leq 1, \quad \tau > 0 \quad (2)$$

e das condições de contorno (1'):

$$\frac{\partial \theta(0,\tau)}{\partial X} = \frac{\partial \theta'(0,\tau)}{\partial X} = 0; \quad \tau > 0$$

$$\frac{\partial \theta(1,\tau)}{\partial X} = \frac{\partial \theta'(1,\tau)}{\partial X} = 0; \quad \tau > 0 \quad (2')$$

$$\theta(X,0) = \theta'(X,0) = \theta_0(X,0); 0 \leq X \leq 1$$

O número de Nusselt (Nu) é definido a partir de uma correlação empírica apropriada à situação de operações dinâmicas de carga ou descarga do sistema de estocagem. Desta maneira, para a situação de carregamento ou descarregamento do reservatório, tem-se o mecanismo de troca de calor por convecção forçada no interior do mesmo pode ser obtido a partir da correlação apresentada por Jones e Lior [8]:

$$Nu = 0,023 Re^{0,5} Pr^{0,4} \quad (3)$$

O coeficiente de película h_∞ , entre a parede externa do reservatório e o meio ambiente, que entra no cálculo de Nu_{eq} é determinado através da correlação empírica fornecida por Welty [9]:

$$h_\infty = 0,119 (Gr Pr)^{2/5} \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad \text{válido se } Gr Pr > 10^9 \quad (4)$$

2.1 Método de solução

O sistema de equações (2), associado às condições de contorno e inicial apresentados pelas expressões (2'), é resolvido numericamente através da discretização por diferenças finitas, sendo usado o método implícito de Crank-Nicolson. Nas regiões ditas de contorno (fundo e o topo do reservatório) é utilizada para a descrição das temperaturas uma expansão por série de Taylor até a derivada de 2ª ordem. Para a definição desta derivada nos pontos do contorno são usadas as equações diferenciais do próprio problema.

Nas situações de operação de carregamento e descarregamento do tanque de estocagem de água aquecida, as equações resultantes são algébricas e lineares, passíveis de resolução pelo método de Gauss - Seidel.

3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Com base no modelo matemático e esquema de solução anteriormente proposto, foram feitas algumas simulações sobre a influência dos parâmetros escolhidos sobre o funcionamento do tanque. O fluido utilizado para as simulações foi à água, com temperatura de ebulição à pressão atmosférica de 100°C. A vazão, na operação de descarga em 0,039 l/s. O reservatório térmico simulado possui as dimensões de 0,36m de diâmetro interno, 0,44 m de diâmetro externo e de 1,0 e 2,0 metros de altura. As soluções numéricas foram determinadas partindo-se de perfis iniciais de temperatura $T(x,0) = T^*(x,0) = T_0(x)$, mantidos fixos pelas condições experimentais de descarga do sistema.

A figura 1 mostra a história dos perfis de temperatura do líquido determinada numericamente a partir de um perfil experimental escolhido como o inicial. Estão também aí representados os pontos referentes aos dados experimentais, servindo para mostrar a validade do modelo. Observa-se na região de transição fluida quente-frio, a concordância verificada entre os valores teóricos e experimentais para a temperatura do líquido foi da ordem de 7%.

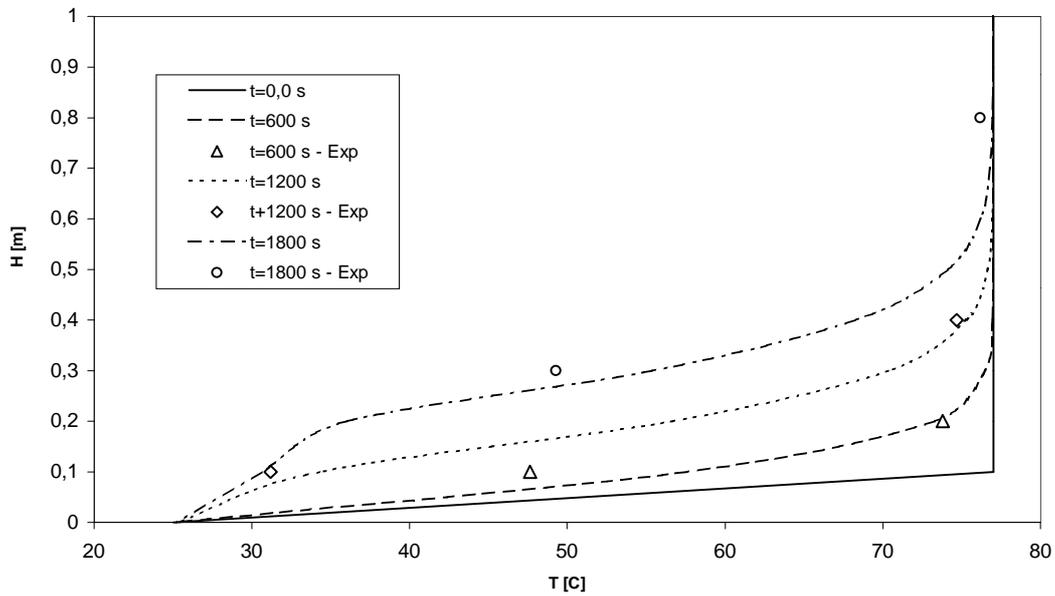


Figura 1 – Perfis de temperaturas teóricos e dados experimentais do líquido em função da altura do tanque e descarga de 0,039 kg/s.

A figura 2, por sua vez, apresenta os resultados numéricos para os perfis de temperatura do fluido estratificado no reservatório para os mesmos valores de tempo da figura 1 e várias espessuras de camada do isolante.

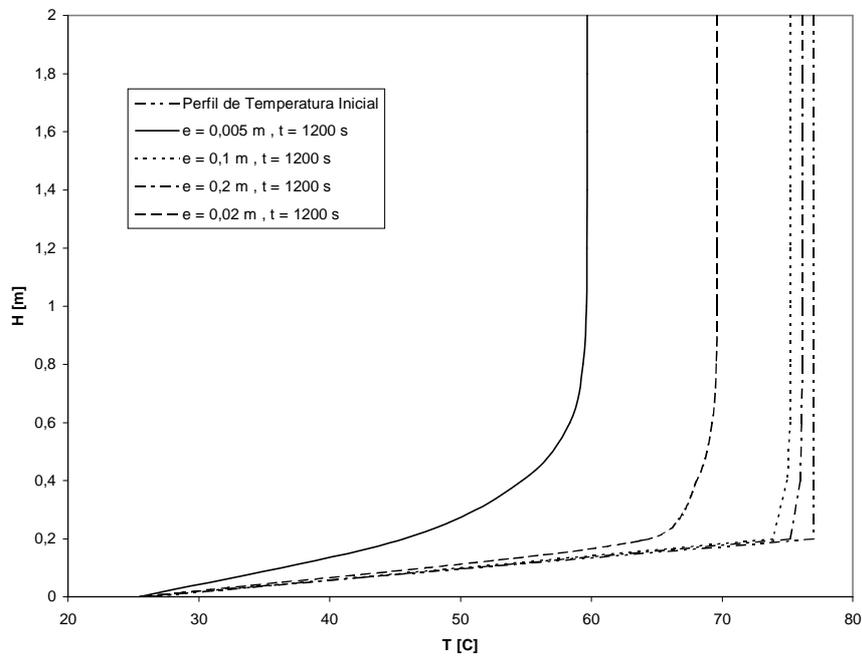


Figura 2 – Evolução dos perfis de temperaturas do líquido em função da altura do tanque para várias espessuras de isolante e descarga de 0,039 kg/s.

Com relação ao modelo numérico para o tratamento do isolante térmico, a figura 3 apresenta os resultados numéricos para os perfis de temperatura da parede isolante do reservatório. Para permitir uma melhor comparação entre os resultados, os mesmos valores de tempo da figuras 1 e 2 e várias velocidades de descarga de líquido.

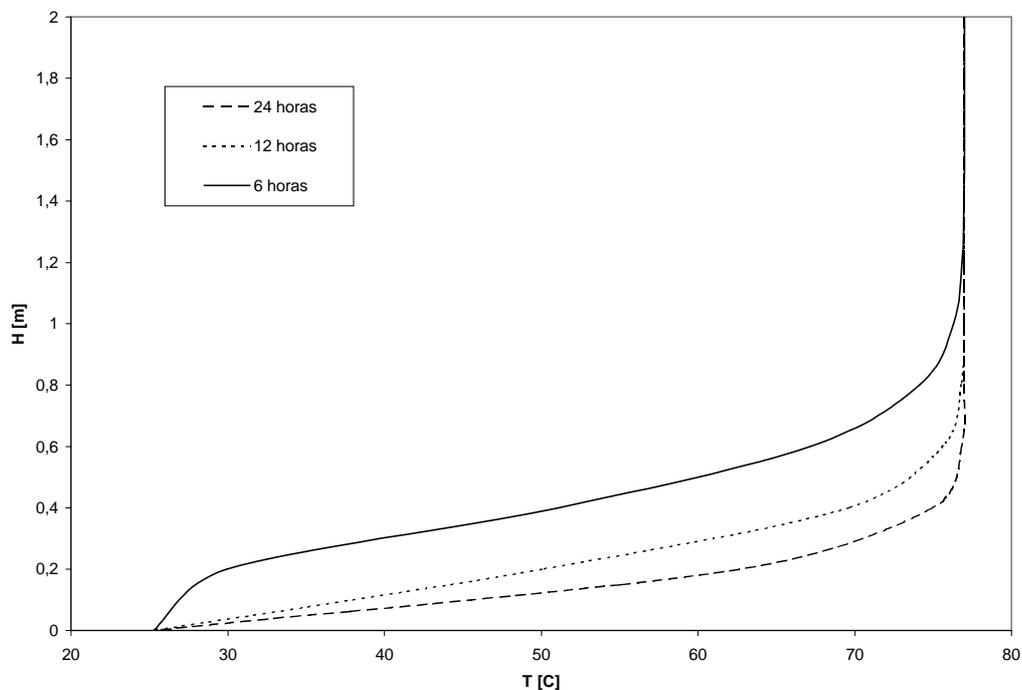


Figura 3 – Evolução dos perfis de temperaturas do isolante em função da altura do tanque para vários intervalos de tempo de descarga.

Por fim, na figura 4 é analisada a evolução dos perfis de temperatura do líquido em função da altura do tanque para várias velocidades de descarga. Nota-se que o aumento da vazão de descarga praticamente não destrói a estratificação do líquido no reservatório durante o processo de descarga.

4 CONCLUSÕES

A resolução do modelo teórico proposto, pelo emprego do método de diferenças finitas, usando-se o método implícito de Crank-Nicolson, possibilitou uma análise da estratificação térmica do líquido em tanque de armazenamento e da evolução dos perfis de temperatura do isolante, em relação ao processo de descarga do fluido. O estudo dos resultados teóricos para os perfis de temperatura do líquido em confronto com os dados experimentais permite inferir que o modelo é adequado para descrever com eficácia o problema em questão, inclusive para as regiões da isoclina.

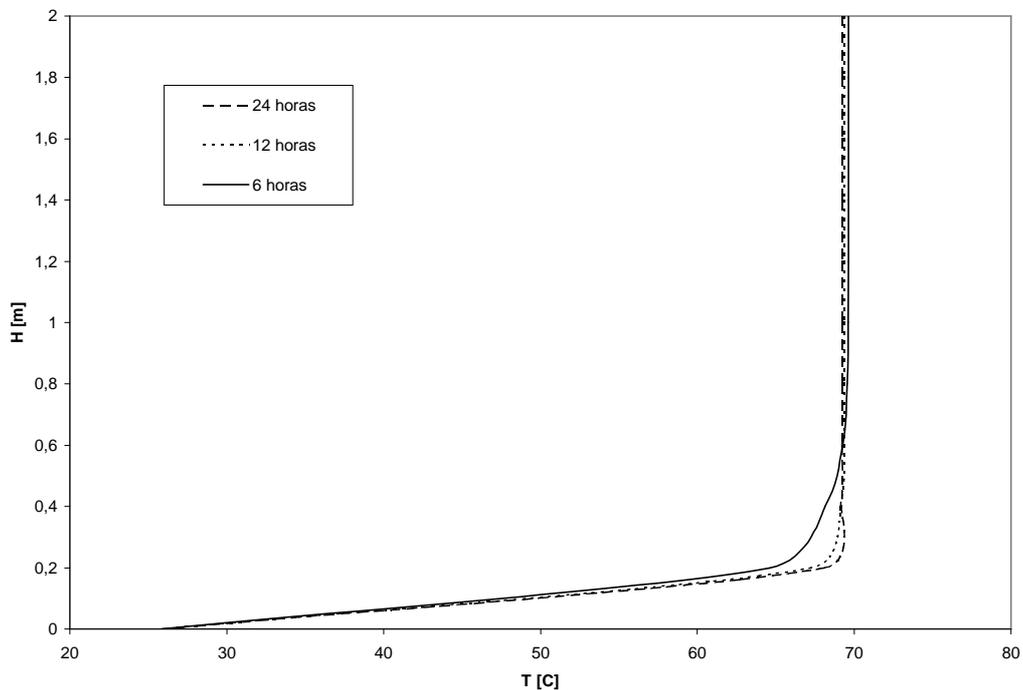


Figura 4 – Evolução dos perfis de temperatura do líquido em função da altura do tanque para vários intervalos de tempo de descarga.

5 REFERÊNCIAS

- [1] Carrocci, L. R., *Análise Teórica e Experimental de um Armazenador de Calor Sensível Estratificado*, Tese de Doutorado, FEC- UNICAMP, (1987).
- [2] Carrocci, L. R., Um Estudo sobre a Participação da Parede de um Tanque de Armazenamento na Degradação da Estratificação, Trabalho de pesquisa para a obtenção do título de Livre-Docente, FEG- UNESP, (1992).
- [3] Berkel, J. Van, “Mixing In Thermally Stratified Energy Stores”, *Solar Energy*, **58**, 203-211, 1996.
- [4] Spall, R. E., “A Numerical Study Of Transient Mixed Convection In Cilindrical Thermal Storage Tanks”, *Heat Mass Transfer*, 41, 2003-2011, 1998.
- [5] Bouhdjar A. e Harhad A, “Numerical Analysis of Transient Mixed Convection Flow in Storage Tank: Influence of Fluid Properties and Aspect Ratiuous on Stratification”. *Renewable Energy*, **25**, 555-567, (2002).
- [6] Cabelli, A., “Storage Tanks: A Numerical Experiment”, *Solar Energy*, **19**, 45 – 54, (1977).
- [7] Blay, D., “Behavior of a Stratified Sensible Heat Storage During Relaxation Phases”. *Proceedings of the Solar World Forum*, Brighton, UK, Aug, 23-28, (1980).

- [8] Jones, G. F. e Lior, N., ‘Optimal Insulation of Solar Heating systems Pipes and Tanks’, *Energy*, **4**, 593 – 621, (1979).
- [9] Welty, J. R., *Engeneering Heat Transfer*, John Willey, (1974).