

MODELO PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DE AQUECEDORES DE ACUMULAÇÃO EM SISTEMAS PREDIAIS DE ÁGUA QUENTE.

Aron Lopes Petrucci (1); Eduardo Ioshimoto(2);

(1) Universidade Estadual de Londrina, aron@uel.br

(2) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, eduardo.ioshimoto@poli.usp.br

RESUMO

O presente trabalho propõe um método, baseado em diferenças finitas de tempo, que permite, dado um perfil de consumo de água quente, à temperatura de utilização ou de saída do aquecedor de acumulação, prever o comportamento desse tipo de aquecedor, inserido em um sistema predial de água quente. Apresenta-se de início uma revisão dos métodos mais utilizados, no Brasil, para o dimensionamento de aquecedores de acumulação; seguido do estudo de cada componente relevante, do aquecedor e do sistema predial de água quente, propondo-se a seguir, o método para previsão de seu comportamento. Ao final são apresentados os registros do comportamento de um aquecedor típico, submetido a ensaio, assim como comparativos com a previsão desses resultados através do modelo proposto. Por fim, tem-se um modelo adequado, a menos de pequenas restrições, a satisfazer as exigências de cálculo da NBR-7198/93, assim como proporcionar melhores resultados, em termos de dimensionamento e verificação de funcionamento, aos diversos sistemas prediais de água quente.

Palavras-chave: aquecedores, água, sistemas prediais.

1. INTRODUÇÃO

Uma das definições mais importantes em uma instalação predial de água quente é, sem dúvida, aquela referente à especificação do aquecedor.

Tal decisão deve ser tomada de maneira a contemplar tanto as necessidades e requisitos do usuário final, como aquelas correspondentes às expectativas sociais, no que se refere a investimentos públicos, implicações ecológicas ou outras questões em efeito.

Nota-se na literatura técnica, em especial naquela de origem nacional, uma total carência de métodos analíticos, ou ferramentas seguras, para a efetivação da tarefa nos moldes exigíveis pelo atual estado da arte.

Esta situação faz com que se tornem comuns os casos em que se procura subsídios para tal junto aos fabricantes ou lojas especializadas, que mesmo conhecendo muito bem o produto, poucas vezes conhecem os detalhes do funcionamento do sistema específico, onde tal componente está inserido, especialmente quando o mesmo difere da aplicação mais comum, ou seja, a unidade residencial unifamiliar.

Devido a essa carência de métodos, que proporcionem a correta especificação do aquecedor, vê-se, por vezes, a omissão dessa informação nos projetos dos sistemas prediais, ou sua citação de maneira incompleta.

Diante de especificações excessivamente abertas ou incompletas, a pessoa encarregada da decisão final sobre tal equipamento, busca auxílio no fabricante ou vendedor de aquecedores, sendo então, o modelo de aquecedor, definido por métodos que não condizem com a atual normalização do assunto, em função de parâmetros insuficientes como número de pessoas ou consumo diário, e mesmo parâmetros pouco técnicos, como presença ou não de banheira, número de banheiros, preço dos aparelhos, ou ainda elementos totalmente alheios à técnica, como disponibilidade de determinado modelo na loja ou mesmo uma boa “conversa de vendedor”.

Um aquecedor subdimensionado geralmente traz desconforto ao usuário, que o abandona, às vezes optando pela utilização de chuveiros elétricos, o que constitui-se em prejuízo institucional, devido às características de demanda elétrica de tais dispositivos.

A presença de unidades superdimensionadas, é mais comum devido a um antigo enfoque de engenharia que pregava o superdimensionamento, conforme HILLER et. al. (1994) e SPIELVOGEL (1972), ou a argumentos de venda, medo de se cometer erros de subdimensionamento e portanto prejudicar a marca e a loja, ou mesmo como resultado de substituições de unidades subdimensionadas que trouxeram aborrecimentos no passado.

Contemplando tais questões, a *Norma Brasileira para Projeto e Execução de Instalações Prediais de Água Quente - NBR 7198/93*, sobre dimensionamento de aquecedores, determina, em seus itens 5.1.2 e 5.1.2.1, os parâmetros que devem ser considerados na escolha de aquecedores para sistemas prediais de água quente.

Se por um lado tais determinações constituem avanço, pois abrem o caminho para o desenvolvimento de técnicas mais elaboradas de dimensionamento de aquecedores, por outro lado impõem a existência de tais técnicas, e invalidam o antigo método de dimensionamento, pois o mesmo não leva em consideração uma série de parâmetros agora exigidos.

Diante disso, presente trabalho, propõe uma metodologia para o tratamento da questão, pela qual se considere, no mínimo, as grandezas relativas a volume, capacidade de recuperação, temperaturas máximas e mínimas de utilização, parâmetros exigidos pela NBR-7198/93; apresenta uma implementação prática de tal metodologia, a análise de exemplos e, por fim, resultados de ensaios laboratoriais, com a finalidade de aquilatar o comportamento prático do modelo.

2. MÉTODOS USUAIS DE DIMENSIONAMENTO

Como descrito por PETRUCCI (1998), os métodos de dimensionamento de aquecedores de acumulação mais conhecidos pelos projetistas brasileiros na atualidade: método da NB-128/68, método de Spelvogel e Werden e método da ASHRAE, trazem uma série de inconvenientes quer vão desde o subdimensionamento, até o superdimensionamento dessas unidades, mesmo quando levam em conta os parâmetros solicitados pela NBR7198/93.

3. PRINCIPAIS COMPONENTES DO SISTEMA

Para o estudo dos aquecedores de acumulação e sua interação com os sistemas prediais de água quente e seus usuários, é necessário o conhecimento dos aspectos fundamentais dos principais subsistemas e componentes do sistema predial de água quente.

O aquecedor de acumulação é um dispositivo utilizado para aquecer água, sendo composto fundamentalmente de um tanque, com um certo volume “V”, dotado de uma fonte de calor com um determinada potência útil “ P_u ”, que pode utilizar um dentre vários combustíveis.

A atuação desses dispositivos se baseia na possibilidade do mesmo acumular água quente em seu tanque, nos momentos em que a demanda é menor que a produção de água quente, determinada pela potência da fonte de calor, quando então esta pode recuperar a temperatura da água, cedendo esta água quente armazenada, como suplemento, nos momentos em que a demanda supera a capacidade de sua fonte de calor.

O acionamento da fonte de calor é regido por um sistema que controla a magnitude da potência entregue por esta à água do tanque, em função de grandezas como: temperatura da água no tanque,

temperatura da água fria, vazão de consumo, hora do dia e outras, considerando tais grandezas de forma isolada ou conjunta, com complexidade que pode variar desde um simples termostato até sistemas digitais dotados de microprocessador

3.1 Principais componentes dos aquecedores de acumulação.

Um aquecedor de acumulação consiste basicamente de três partes essenciais: um tanque de água, uma fonte térmica e um sistemas de controle. Desse modo encaminha-se o estudo das principais características e fenômenos ligados a cada um desses componentes e sua interação.

3.1.1 Reservatório de água quente.

O reservatório de água quente geralmente é constituído de um tanque, construído em chapa metálica, revestido externamente por camadas de material de baixa condutibilidade térmica.

Para efeito de análise físicas, o parâmetro básico associado a tal elemento é seu volume (V).

Devido à variação do peso específico da água em função da temperatura, a água que entra no tanque do aquecedor, em temperatura mais baixa que aquela que se encontra em seu interior, tende a se posicionar abaixo desta. A este fenômeno dá-se o nome de estratificação, pois a água se dispõe no interior do tanque como que em camadas, segundo suas temperaturas (ou densidades). Segundo BAINES et alli. (1982), na maioria das aplicações que visam armazenamento de energia, é desejável que a água introduzida no tanque permaneça separada daquela disponível para utilização, mantendo-se à temperatura em que foi gerada inicialmente, de forma que o aquecedor ideal seria aquele descrito como “modelo estratificado”.

Em oposição ao “modelo estratificado”, teríamos outro modelo idealizado, o “modelo de mistura total”, onde, por algum artifício, não haveria a formação de “camadas” de água, com densidades e temperaturas diferentes, mas ao entrar, a água fria seria totalmente misturada com a água quente, resultando em um conteúdo com temperatura, e portando densidade, uniformes. Tal modelo “de mistura total”, também uma simplificação do caso real, é explorado na presente análise.

3.1.2 Fontes de calor.

Por fonte de calor designamos o dispositivo encarregado de transformar a energia, contida nos diversos tipos de combustíveis utilizáveis, em calor, e de efetuar sua transferência para a água a ser aquecida.

Os principais parâmetros de análise associados às fontes térmicas dizem respeito a sua potência, consumo e rendimento, e são definidos, segundo a NBR 10540/88.

3.1.3 Sistemas de Controle da Fonte Térmica.

Genericamente os sistemas de controle de potência para aquecedores de acumulação atuam de forma a modular a potência útil da fonte térmica, segundo um coeficiente, como se vê na equação 1.

$$P_u = \beta \cdot P_{um} \quad (1)$$

O coeficiente “ β ”, apresentado na equação 1, assume valores situados entre o nulo e a unidade ($0 \leq \beta \leq 1$), segundo a lógica própria de cada sistema de controle.

Dentre os dispositivos de controle mais usuais destaca-se o termostato, que tem a função de ativar ou desativar a fonte de calor segundo a temperatura do tanque, tomada por seu sensor.

Com temperaturas abaixo do limiar de acionamento (T_{li}), a fonte de calor permanece acionada ($\beta_{tm}=1$). Com temperaturas superiores ao limiar de parada (T_{ls}), a fonte de calor permanece desativada ($\beta_{tm}=0$). Já na chamada banda morta, entre “ T_{li} ” e “ T_{ls} ”, temos a fonte ligada ($\beta_{tm}=1$), para temperaturas ascendentes, encaminhando-se ao limite de parada (“ T_{ls} ”) e desativada, para temperaturas descendentes, encaminhando-se ao limite de partida (“ T_{li} ”).

Outros dispositivos de controle, e combinações entre eles podem ser vistos em PETRUCCI (1998).

3.2 Descrição do funcionamento do aquecedor de acumulação.

Segundo o modelo de “mistura total”, toda água que se encontra no interior do tanque do aquecedor é tida como de temperatura uniforme. Grandezas como a temperatura da água quente que sai do aquecedor (T_{aq}), ou a temperatura da água na sonda do termostato (T_{st}) são tomadas com valores idênticos à temperatura média do tanque (T_m).

Para descrever o comportamento do aquecedor de acumulação, é necessário a consideração de 4 estados distintos do mesmo:

- a) vazão de água quente nula e fonte de calor desligada;
- b) vazão de água quente não nula e fonte de calor desligada;
- c) vazão de água quente não nula e fonte de calor ligada;
- d) vazão de água quente nula e fonte de calor ligada.

Para qualquer um desses estados a temperatura média do conteúdo do tanque, após um determinado intervalo de tempo “ Δt ”, pode ser avaliada pela equação 2 (HEJAZI, 1989).

$$T_{mf} = T_{af} + (T_{mi} - T_{af}) \cdot e^{\frac{-\Delta t (\rho q_{aq} \cdot c + k)}{\rho V c}} + \left(1 - e^{\frac{-\Delta t (\rho q_{aq} \cdot c + k)}{\rho V c}} \right) \cdot \frac{P_u}{\rho \cdot q_{aq} \cdot c + k} \quad (2)$$

a) Vazão de água quente nula e fonte de calor desligada.

Este estado, descrito pela equação 3, corresponde àquele no qual não há calor sendo fornecido pela fonte térmica, tampouco saída de água quente, portanto sem entrada de água fria, e corresponde ao caso específico da equação 2 onde potência e vazão são nulas ($P_u=0$ e $q_{aq}=0$).

$$T_{mf} = T_{ar} + (T_{mi} - T_{ar}) \cdot e^{\frac{-k \cdot \Delta t}{\rho \cdot V \cdot c}} \quad (3)$$

b) Vazão de água quente não nula e fonte de calor acionada.

Este estado ocorre geralmente quando o sistema solicita água quente do aquecedor, e esse a fornece com queda de temperatura apreciável. Descreve-se tal estado pela equação 4.

$$T_{mf} = T_{af} + (T_{mi} - T_{af}) \cdot e^{\frac{-\Delta t \cdot q_{aq}}{V}} + \left(1 - e^{\frac{-\Delta t \cdot q_{aq}}{V}} \right) \cdot \frac{P_u}{\rho \cdot q_{aq} \cdot c} \quad (4)$$

c) Vazão de água quente não nula e fonte de calor desligada.

Ocorre geralmente no início da solicitação de água quente, e perdura até que o sistema de controle acione a fonte de calor. Fazendo $P_u=0$ na equação 2, tem-se a equação 5.

$$T_{mf} = T_{af} + (T_{mi} - T_{af}) \cdot e^{\frac{-\Delta t (\rho \cdot q_{aq} \cdot c + k)}{\rho \cdot V \cdot c}} \quad (5)$$

d) Vazão de água quente nula e fonte de calor ligada.

Este estado ocorre geralmente quando, ao cessar o consumo de água quente, a temperatura média do tanque se encontra com valor inferior à temperatura máxima desejada e, portanto, a fonte de calor permanece ligada até que a temperatura limite superior seja atingida. Tal estado é descrito pela equação 6.

$$T_{mf} = T_{mi} + \frac{\Delta t \cdot P_u}{\rho \cdot V \cdot c} \quad (6)$$

3.3 Comportamento do Usuário

O conhecimento do comportamento do usuário é fator determinante para a avaliação da capacidade de atendimento de um sistema de abastecimento de água quente e, em especial, dos aquecedores de acumulação.

As características fundamentais a serem tomadas do usuário são: a temperatura da água na utilização e sua variação e o perfil de vazões de consumo.

4. FORMULAÇÃO DO MODELO

O funcionamento do sistema predial de água quente acontece de maneira contínua no tempo. No entanto, é possível, para efeito de estudo, e com erro controlado, supor seu funcionamento como a sucessão de pequenos intervalos de tempo (Δt), que ao serem feitos próximos de zero, fazem com que a análise tenda ao contínuo.

Utilizando-se das características peculiares de cada componente do sistema, e assemelhando-se o funcionamento do mesmo a uma sucessão de intervalos de tempo, onde, ao final de cada um, os componentes do sistema “se avaliam”, segundo sua lógica própria, e estabelecem suas características para adentrarem ao próximo intervalo de tempo, descreve-se a operação do sistema ao longo do tempo. Para um aquecedor de acumulação controlado apenas por um termostato, utilizando-se a formulação do item 3, obtém-se o fluxograma apresentado na Figura 1.

4.1 Grandezas intervenientes.

No início do processo de análise, devem ser estabelecidas as grandezas apresentadas na Figura 1.

4.2 Passos da análise.

Na análise do conjunto, para cada intervalo “ Δt ”, procede-se segundo os seguintes passos:

- a) Determinação da vazão de água quente a que está submetido o aquecedor: etapa situada entre os pontos ① e ② da Figura 1.
- b) Alterações na temperatura do volume de água retido no aquecedor: etapa situada entre os pontos ② e ③, da Figura 1.
- c) Lógica de controle da fonte térmica: etapa apresentada entre os pontos ③ e ④, a lógica de controle corresponde ao conjunto de tomadas de decisões que se deve perpetrar, a fim de estabelecer como se comportará a fonte térmica no próximo intervalo “ Δt ”. A Figura 1 apresenta lógica de controle para simples termostato;
- d) Registro de grandezas: nesta etapa, assinalada na Figura 1 entre os pontos ④ e ⑤, procede-se o registros das grandezas que tenham interesse para posterior análise conceitual.
- e) Testes de encerramento e preparação de um novo ciclo: à sequência do ponto assinalado como ⑤ na Figura 1, procede-se o teste de algum critério de final de análise.

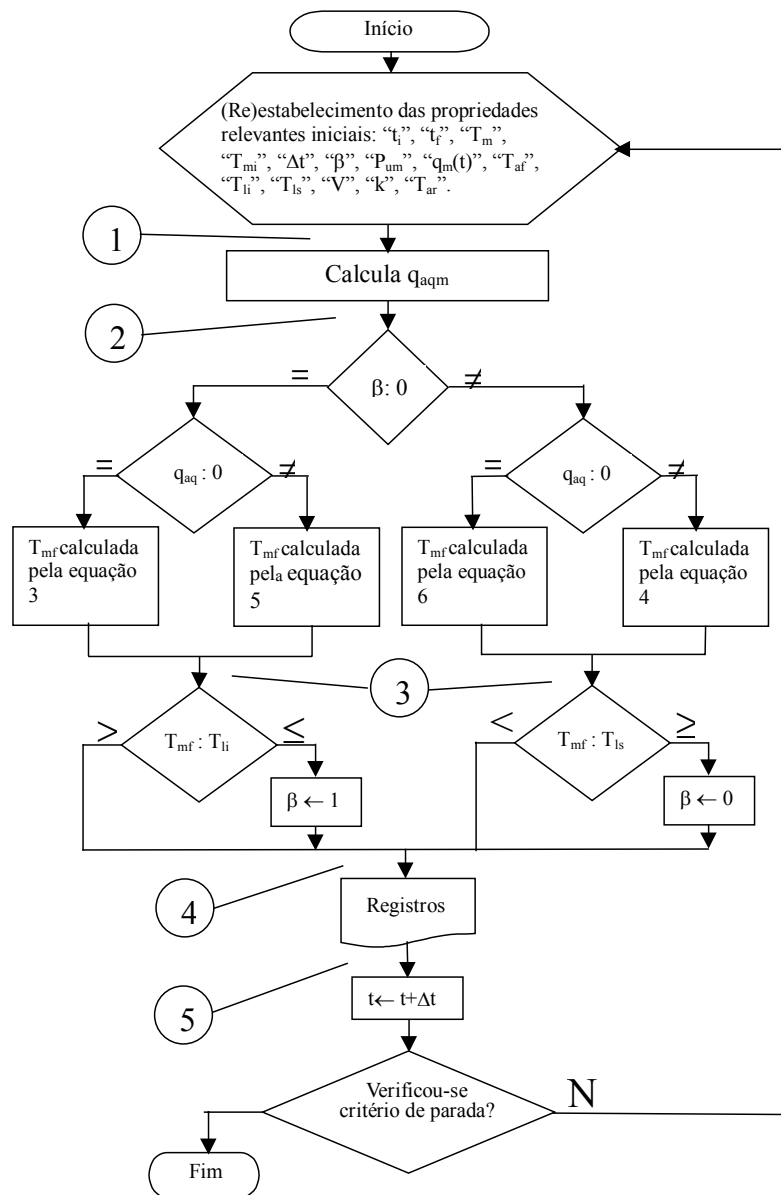


Fig. 1 Fluxograma de simulação para aquecedor com termostato

4.3 Implementação do modelo

Partindo-se para um enfoque mais prático, e menos genérico, procedeu-se uma implementação computacional preliminar do modelo apresentado na Figura 1.

Ao processo de simulação foram adicionados os seguintes aspectos particulares:

o perfil de consumo consta de uma tabela de intervalos, com vazão fixa para cada intervalo. Os períodos não apresentados nesta tabela serão tomados como de vazão nula;

Através de um seletor de duas opções, pode-se indicar se o dado perfil refere-se ao consumo de água misturada, a uma dada temperatura, ou se a referência diz respeito a um perfil de consumo de água quente medido diretamente na saída do aquecedor;

o processo de avaliação se aplica a um único usuário, ou a um grupo homogêneo desses, ou seja, com as mesmas características de temperatura de consumo e de variação máxima tolerável da mesma;

Dentre vários exemplos verificados, chama a atenção o comparativo entre dois casos hipotéticos, de mesmo volume consumido de água misturada, e utilizada à mesma temperatura, mas com perfis de consumo diferentes.

a) Caso N.º 1 – Clube esportivo.

À saída de determinada prática esportiva, em um vestiário, 10 pessoas utilizam-se de ducha, simultaneamente, por cerca de 7 minutos, com vazão de água misturada de 0,15 L/s em cada ducha, tendo como perfil de água misturada aquele apresentado na Figura 1.



Fig. 2 Perfil de consumo de água misturada para o Caso 1

Ajustando-se unidades comerciais, utilizando o modelo através de tentativas, determina-se que, para o bom atendimento da demanda, faz-se necessário um aquecedor com volume de 600 L, e potência útil de 30.000 Kcal/h (25.795 W)

O perfil de temperaturas para esse primeiro caso é apresentados na Figura 3.

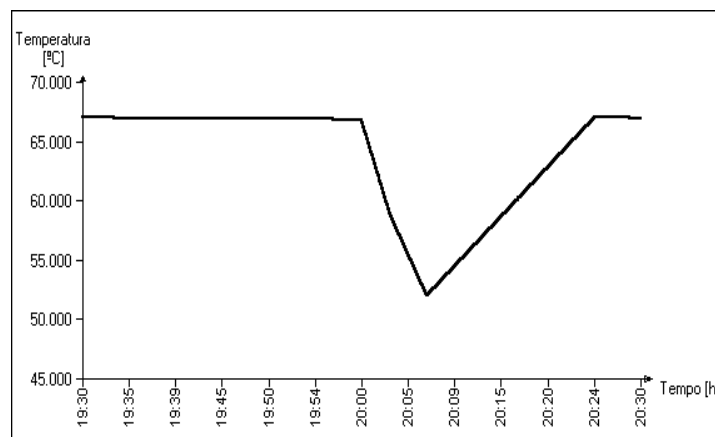


Fig. 3 – Perfil de temperaturas para o Caso 1.

b) Caso N.º 2 – Pequeno pensionato.

Para este segundo caso, tomou-se um pequeno pensionato, onde dez pessoas utilizam a ducha por 7 minutos, com vazão de 0,15 L/s, de maneira distribuída ao longo do dia, como pode ser observado no perfil da Figura 4.



Fig. 4 Perfil de Consumo de água misturada para o Caso 2.

Neste caso, para o bom atendimento da demanda imposta, foi utilizado um aquecedor com 200 L de volume reservado, e 6200 Kcal/h (5330 W) de potência útil, valores estes bem abaixo dos apresentados no Caso 1; para um mesmo volume consumido verificado no período, diferindo somente pela distribuição desse ao longo do mesmo.

O perfil de temperaturas para esse segundo caso pode ser visto na Figuras 5.

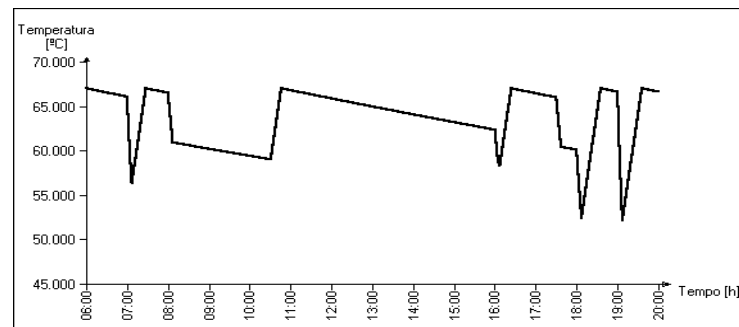


Fig. 5 Perfil de temperaturas para o Caso 2.

5. VERIFICAÇÕES EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de proceder uma avaliação experimental, instalou-se, no Laboratório de Sistemas Prediais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, um aquecedor do tipo conjugado, com volume nominal de 300 litros, tendo como fonte térmica um aquecedor de passagem de chama modulada, para vazão de 30 L/min e potência nominal de 38.000 Kcal/h (32674 W).

5.1 Ensaios Efetuados

Dentre os diversos ensaios efetuados, como apresentado em PETRUCCI (1998), destaca-se aquele efetuado com a utilização de um perfil de consumo de água quente relativamente longo, em termos de tempo.

Tendo sido utilizado, tanto no ensaio como na simulação, o perfil de vazão de água quente e o comparativo de temperaturas médias é apresentado nas Figuras 6. e 7 respectivamente.

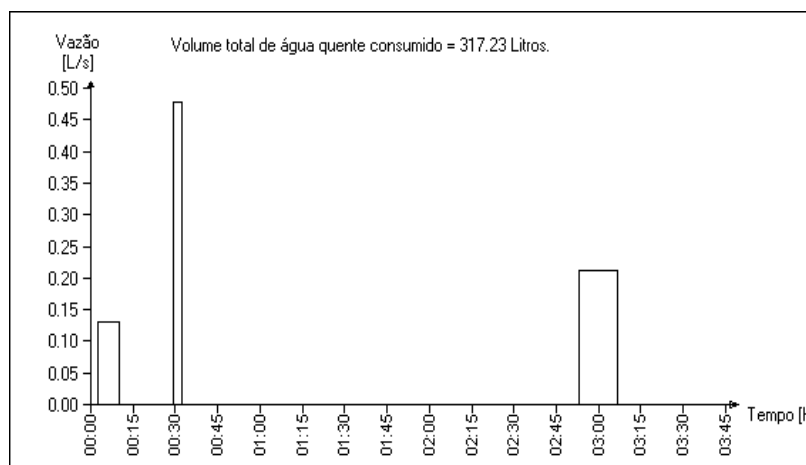


Fig. 6 – Perfil de vazão de água quente.

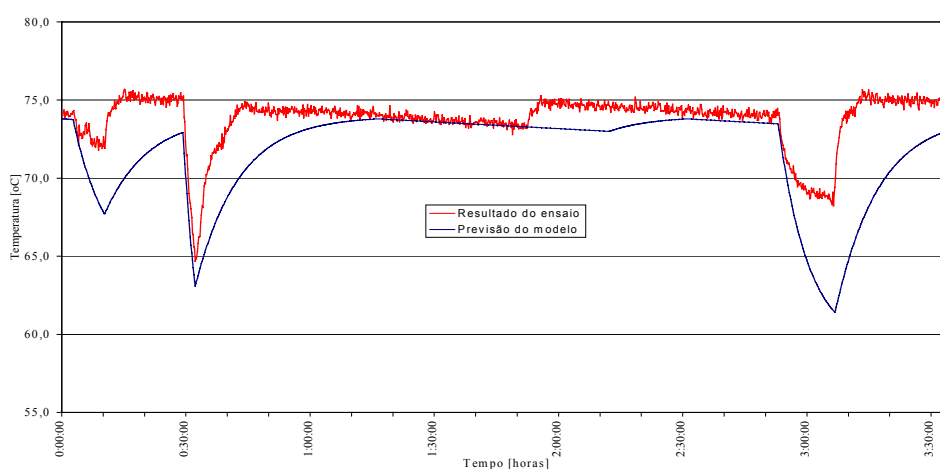


Fig. 7 - Comparativo de temperaturas médias para o ensaio de período alongado

Na figura 7 observa-se o modelo prevendo um comportamento aquém daquele que é atingido pelo aquecedor, no que se refere à capacidade real de recuperação, mas muito próximo deste. Tal efeito se deve ao fenômeno da estratificação, presente no aquecedor real, diferindo do modelo que prevê seu comportamento como modelo de “mistura total”.

6. COMENTÁRIOS FINAIS

As definições e análises do modelo experimental, quando comparadas àquelas do modelo simulado, levam a concluir que se pode prever o comportamento dos aquecedores de acumulação com boa aproximação, em especial nos casos em que o fenômeno da estratificação não se mostra muito pronunciado.

Por fim, dado as características do aquecedor, as características ambientais e do usuário, e, principalmente, o perfil de consumo, o modelo proposto se mostra adequado para a solução do problema de dimensionamento e verificação de aquecedores de acumulação em sistemas prediais de água quente, vindo ao encontro do requerido nos itens 5.1.2 e 5.1.2.1 da NBR-7198/93.

Pesquisas futuras no sentido de aprimorar o modelo proposto são apontadas em PETRUCCI (1998).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Instalações prediais de água quente - NB 128. Rio de Janeiro, 1968.

- _____. Projeto e execução de instalações prediais de água quente - NBR 7198. Rio de Janeiro, 1993.
- _____. Aquecedores de água a gás tipo acumulação - terminologia - NBR 10540. Rio de Janeiro, 1988.
- BAINES, W. D. et alli. On the design of stratified thermal storage tanks. In: **Transactions of the ASHRAE semianual meeting**, v. 88, Part 2. Toronto, 1982, p.426-38
- HEJAZI, S. A. Sizing a storage type water heating system. **ASHRAE Journal**, v.31, n.2, p.35-40, 1989.
- HILLER, C. C. et alli. Detailed water heating simulation model. In: **Transactions of the ASHRAE semianual meeting**, v.100, Part 1, New Orleans, 1994, p.948-55
- PETRUCCI, A. L. **Modelo para Previsão do Comportamento de Aquecedores de Acumulação em Sistemas Prediais de Água Quente**. São Paulo, 1998. 167p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- SPIELVOGEL, L. G. Sizing of Water Heating Equipment. In: National Bureaus of Standards. Special Publication 361, Vol. 1: **Proceedings of the Joint RILEM-ASTM-CIB Symposium**, May, 2-5, 1972, Philadelphia, p. 451-463.