

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DA CAPTAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO CALOR DISSIPADO NO CONDENSADOR DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Paper CIT04-0176

Paulo Henrique Ferraz do Amaral Filho

Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP – Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube S/N, CEP. 17033-360, Bauru S.P.
pauloaferraz@yahoo.com.br

Dr. Alcides Padilha

Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP – Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube S/N, CEP. 17033-360, Bauru S.P.
padilha@feb.unesp.br

Dr. Vicente Luiz Scalon

Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP – Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube S/N, CEP. 17033-360, Bauru S.P.
scalon@feb.unesp.br

Resumo. *O aproveitamento da energia dissipada pelo condensador de um refrigerador doméstico, utilizando o princípio da estratificação térmica de fluido em um reservatório, é um tema atual de pesquisa e desenvolvimento. Tema que assume uma relevância ainda maior, quando se considera a crise energética atual e questões relativas ao conforto ambiental. Com as expectativas de esgotamento das fontes torna-se premente a necessidade de um uso mais racional da energia e a busca de novas formas de seu reaproveitamento. Neste sentido, desenvolveu-se um estudo experimental buscando a captação, armazenamento e utilização, desta forma de energia residual do condensador e, conseqüentemente, diminuição dos custos de consumo de energia residencial. A água será utilizada como fluido de trabalho do dispositivo e uma análise das condições de estratificação térmica no interior do reservatório também serão avaliadas.*

Palavras chave: Refrigerador Doméstico, Rejeito Térmico, Tanque de Armazenamento, Estratificação Térmica.

1. Introdução

A partir da década de setenta, com o advento da crise energética, ocorreu uma elevação nos preços da energia devido a ameaça de esgotamento dos combustíveis fósseis no mundo. Esse panorama levou a uma intensificação no desenvolvimento dos processos de aproveitamento energético. Nesse momento intensificou-se a preocupação com formas alternativas de energia, tais como as energias solar, eólica, potencial hidráulico, das ondas, das marés, dos resíduos de animais e vegetais e do calor das águas subterrâneas. Essas formas de energia, além de renováveis, são também limpas, tornando-as ainda mais atrativas para uma sociedade que já se preocupava com a degradação ambiental.

Com essa problemática em destaque, o uso racional e a economia de energia começam a ganhar destaque, inserindo-se, então, o estudo de armazenamento e conservação visando à minimização das perdas de energia e conseqüentemente reduzindo os custos de operação dos processos.

Nos sistemas de refrigeração e de condicionamento de ar, que estão largamente difundidos entre as porções habitadas pelo homem no planeta Terra, grande parcela da energia, é rejeitada para o meio em forma de energia térmica. Torna-se, então, importante o estudo desses rejeitos a fim de aproveitá-los, transformando parte dessa energia dissipada em energia utilizável.

No ciclo de refrigeração por compressão, o refrigerante é aspirado pelo compressor como vapor superaquecido a baixa pressão. O vapor superaquecido a altas temperatura e pressão é então descarregado do compressor para o condensador e deste o calor é dissipado para o meio ambiente. O refrigerante então sai do condensador, no estado líquido a alta pressão. O fluido no estado líquido, após queda brusca de pressão, na válvula de expansão, tem sua temperatura reduzida, resultando também em uma mistura saturada de líquido mais vapor. Esta mistura, agora a baixa pressão e temperatura é transformada em vapor super aquecido no evaporador, resultado da transferência de calor do espaço refrigerado para o fluido refrigerante. Após esta operação o vapor é aspirado pelo compressor, completando o ciclo.

Uma das maneiras de aproveitar a energia térmica dissipada para o ambiente pelo condensador dos sistemas de refrigeração, é sua captação, através de um fluido de trabalho, e seu armazenamento em tanques, para posterior utilização. O efeito imediato desse aproveitamento é a economia de energia, seja elétrica ou térmica. Além disso, resolve-se também parte do problema da poluição térmica, que apesar de não ser visível é sentida, cada vez mais, por toda a humanidade.

Dentre os trabalhos recentemente publicados sobre armazenadores térmicos estratificados e condensadores do tipo tubo aletado, cumpre destacar o desenvolvido por Rosen (2001), que analisou a performance da energia e exergia em sistemas de armazenamento térmico por estratificação, essa análise facilita o desenvolvimento de um método, baseado na exergia, para avaliar e comparar a estratificação térmica em sistemas armazenadores de energia. Leal e Ismail (2001) realizaram um estudo teórico e experimental de tanques armazenagem por estratificação térmica obtendo uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Apresentaram também análise de parâmetros, tais como,

razão de aspecto do tanque, diferença de temperaturas entre a entrada e a saída e a vazão mássica do fluido, em relação a eficiência da estratificação do fluido. Shin et al (2004) propôs um estudo numérico da estratificação térmica em tanques armazenadores para determinar condições ótimas de projeto e operações desses equipamentos, cujo método numérico foi validado com sucesso pelos dados obtidos em um bancada experimental. Tagliafico e Tanda (1997) apresentaram um estudo sobre a transferência de calor por radiação e convecção natural em trocadores de calor do tipo tubo aletado, que são os mais utilizados em sistemas de refrigeração de pequeno porte, como os refrigeradores domésticos, no qual foi também desenvolvido um modelo teórico validado por dados experimentais. Bansal e Chin (2003) apresentaram um modelo numérico, utilizando a técnica dos elementos finitos, para condensadores do tipo tubo aletado utilizando, no desenvolvimento do modelo, um condensador operando em condições normais, obtendo um fator de otimização, f_o , para o equipamento avaliado.

O objetivo desse estudo é avaliar o funcionamento de um sistema de aquecimento, para utilizações residenciais, que aproveita o calor dissipado pelo condensador do refrigerador para o ambiente.

2. Aparato Experimental

O aparato experimental, utilizado nos ensaios, constituiu-se basicamente de um refrigerador doméstico duplex de 260 litros de capacidade, um tanque de armazenamento de fluido aquecido com 85 litros, ou seja, de 1,2m de altura e 0,3m de diâmetro, construído em PVC, dotado de uma sonda contendo termopares, para a captação das temperaturas ao longo da sua altura, um registrador gráfico para a captação das temperaturas. A Fig.1 mostra uma visão geral da bancada experimental.



Figura 1. Refrigerador e Tanque Armazenador.

O tanque armazenador possui duas entradas e duas saídas, sendo: as superiores entrada e saída de água quente, e as inferiores entrada e saída de água fria da rede. A entrada de água quente localiza-se a 0,15m acima da saída de água quente, devido ao projeto interno do difusor. A Fig.2. mostra o tanque em detalhe.



Figura 2. Tanque Armazenador de PVC.

Primeiramente o refrigerador foi instrumentado para o levantamento das suas características térmicas de funcionamento em regime a plena carga. Estes dados servem de parâmetros para a posterior mudança na configuração do ciclo de refrigeração do equipamento analisado, uma vez que, o objetivo foi de manter as características originais de funcionamento do refrigerador. Foram coletadas as temperaturas de diversos pontos do sistema frigorífico, tais quais: saída do compressor, entrada e saída do condensador, três pontos intermediários entre a entrada e a saída do condensador conforme mostrado na Fig. 3, temperatura interna do ar e parede tanto para o congelador quanto para o gabinete, entrada do compressor e temperatura ambiente da sala.

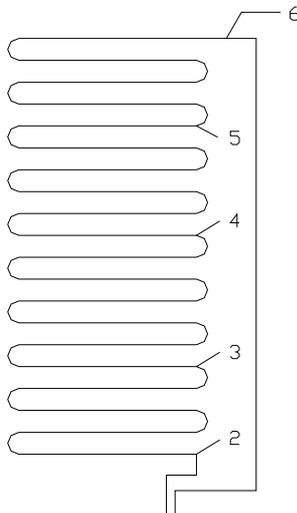


Figura 3. Esquema dos Pontos Analisados no Condensador.

De posse destes dados, foi instalado no condensador um tanque de aço, que o revestiu completamente. O tanque armazenador e conseqüentemente o tanque de troca foram totalmente carregados com água da rede a temperatura ambiente. As válvulas de carga e descarga foram fechadas, e apenas as válvulas das linhas de recirculação permaneceram abertas durante o experimento. Partiu-se, então, com o refrigerador em equilíbrio térmico com o ambiente na potência máxima do termostato. Como esperado, ocorreu um grande desequilíbrio no ciclo de refrigeração, pois como o condensador foi projetado para trocar calor com o ar, o mesmo estava super dimensionado para a troca de calor com a água, uma vez que este fluido possui uma resistência térmica muito inferior a do ar. Notou-se que o fluido refrigerante do sistema de refrigeração, que devia mudar de fase ao longo do condensador, passava de vapor superaquecido para líquido sub-resfriado próximo à região de entrada do mesmo, o que ocasionou uma perda de carga acentuada dentro do condensador, e conseqüentemente queda de vazão de fluido refrigerante. Com a diminuição de vazão mássica de fluido refrigerante no sistema, diminuiu-se, conseqüentemente, a quantidade de calor retirado do ambiente refrigerado pelo fluido, no evaporador, o que ocasionou uma diminuição da capacidade de refrigeração do sistema. A Fig. 4 mostra o tanque de aço instalado no condensador.



Figura 4. Tanque de Aço Revestindo o Condensador.

Após uma análise teórica para estimar os coeficientes de película para a troca de calor convectiva, com o ar e com a água, reduziu-se o sistema de troca de calor para apenas um tubo. O tubo, que conduz o fluido refrigerante, foi encamisado por um tubo de PVC de 20mm de diâmetro, como pode ser visto na Fig. 5. A circulação da água ocorreu de maneira natural, ou seja, apenas pela força de empuxo gerada pela diferença de densidade entre a porção quente e fria da água.



Figura 5. Vista em Detalhe do Trocador de Calor Casco Tubo.

Os dados de temperatura foram captados por um registrador gráfico da marca Jumo no qual estão conectados os termopares. Para o monitoramento do fenômeno da estratificação térmica da água, foi utilizada uma medida a cada 60 segundos. Os dados registrados pelo sistema foram transferidos ao computador via disquete onde foram analisados.

Os procedimentos experimentais, utilizando o trocador do tipo casco tubo, foram repetidos com o tanque armazenador isolado, utilizando uma camada de manta sintética revestida com folha de alumínio e a tubulação de água quente foi encamisada com isolante à base de polímero conforme mostrado na Fig.6.



Figura 6. Tanque e tubulação isolada.

3. Análise Teórica da Troca de Calor do Condensador com o Ambiente

Nesta seção é apresentado o procedimento matemático utilizado para estimar a quantidade de calor rejeitada ao ar pelo condensador, e o comprimento equivalente necessário para que essa mesma quantidade seja transferida à água. Como hipótese simplificadora considera-se o condensador como uma placa plana vertical, aquecida a uma temperatura média, que é dada pela média aritmética entre as temperaturas na região de entrada e saída do condensador.

Com a temperatura da placa, T_s [°C], e a temperatura ambiente, T_∞ [°C], calcula-se a temperatura média do filme, T_f [°C], ou seja, pela Eq. 1:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (1)$$

A partir do valor da temperatura do filme obteve-se os dados de propriedades termodinâmicas do ar, segundo Incropera e DeWitt (1998). Calculou-se, então o número de Rayleigh, Ra , de acordo com a Eq. 2.

$$Ra = Gr.Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (2)$$

Onde: Gr é o número de Grashof, Pr é o número de Prandtl, g aceleração da gravidade [m/s^2], β coeficiente volumétrico de expansão térmica [K^{-1}], α difusividade térmica [m^2/s], ν viscosidade cinemática [m^2/s], L comprimento característico [m], que no caso de placa plana foi considerada sua altura.

Incropera e DeWitt (1998) apresentam, na pág.268, a Eq. 3 para o cálculo do número de Nusselt, Nu , para qualquer Rayleigh.

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3)$$

Aplicando-se a correlação dada pela Eq. 4, obtém-se o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção, h [$W/m^2.K$],

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \quad (4)$$

onde k é a condutividade térmica do material [$W/m.K$].

Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção para a água, foi utilizado um procedimento semelhante, porém utilizou-se as relações propostas por Incropera e DeWitt (1998), para a transferência de calor em uma região anular de tubos concêntricos, onde com a relação entre os diâmetros interno e externo, D_i / D_e , respectivamente, obtém-se o valor do número de Nusselt para o tubo interno, Nu_i , tabelado. Calculando o diâmetro hidráulico, D_h [m], dado pela Eq. 5, e utilizando a Eq. 4, substituindo o comprimento característico pelo diâmetro hidráulico, obtém-se o valor coeficiente de transferência de calor por convecção para a água líquida, h_l [$W/m^2.K$].

$$D_h = D_e - D_i \quad (5)$$

Com os valores dos coeficientes de convecção calcula-se o comprimento equivalente do trocador, quando substitui-se o ar pela água segundo a relação apresentada na Eq. 6.

$$h_{ar} \cdot A_{ar} = h_l \cdot (\pi \cdot D_i \cdot l) \quad (6)$$

onde, A_{ar} é a área da placa plana e l é o comprimento de tubo equivalente a área total do condensador, para promover a mesma troca de calor.

Os valores obtidos dos coeficientes de troca de calor por convecção para o ar e a água estão apresentados na Tab.1.

Tabela 1. Resultados Teóricos para o Dimensionamento do Trocador Casco Tubo.

| | |
|--|------------------------------|
| Diâmetro do tubo interno | 0,005 [m] |
| Área do condensador original | 0,47 [m ²] |
| h do condensador original | 4,02 [W/m ² .K] |
| h do tubo interno no trocador casco tubo | 342,58 [W/m ² .K] |
| Comprimento do trocador casco tubo | 0,35 [m] |

4. Resultados e Discussão

Utilizando os dados experimentais, apresenta-se diversos gráficos para melhor visualização dos resultados.

A Fig. 6 e a Fig. 7 mostram os valores das temperaturas, medidas experimentalmente, ao longo do tempo para o condensador com e sem o trocador de calor casco tubo. Nota-se que a temperatura na parede do tubo do condensador próximo a entrada e a saída do trocador casco tubo para ambas situações, estão um pouco abaixo da temperatura do sistema original. Isto ocorreu devido a temperatura ambiente, no ensaio com o casco tubo instalado, estar mais baixa que no ensaio com o sistema original. Este resultado demonstra que o ciclo de refrigeração foi muito pouco afetado pela instalação desse aparato.

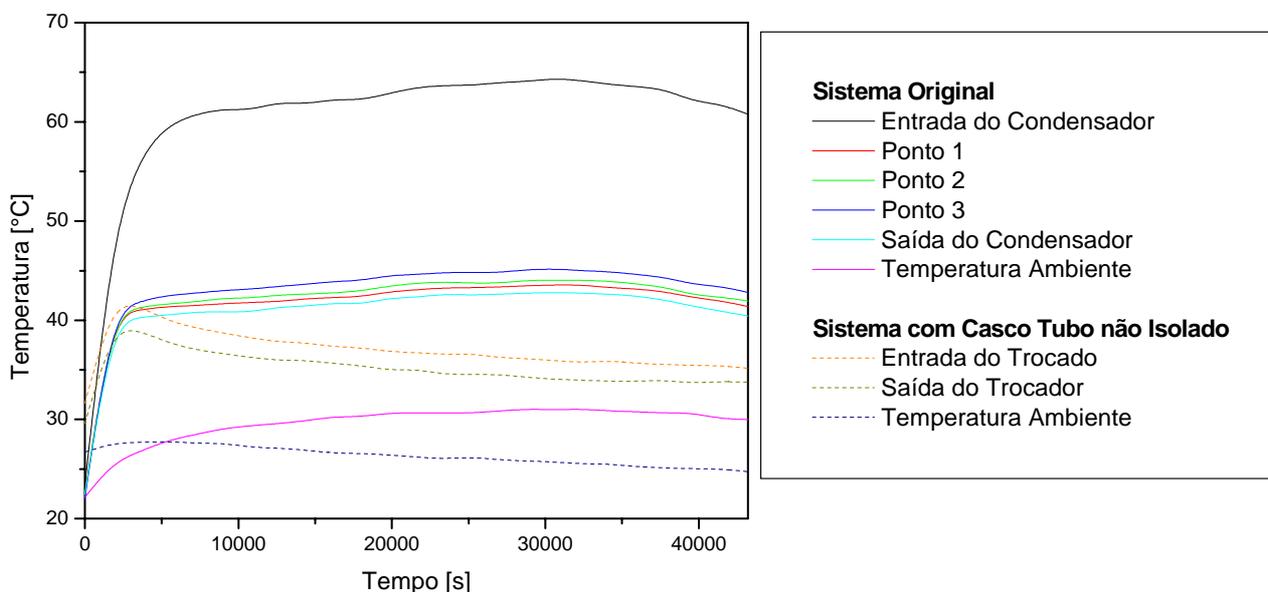


Figura 6. Perfis de Temperatura do Condensador Original e com o Trocador Casco Tubo com o Tanque não Isolado.

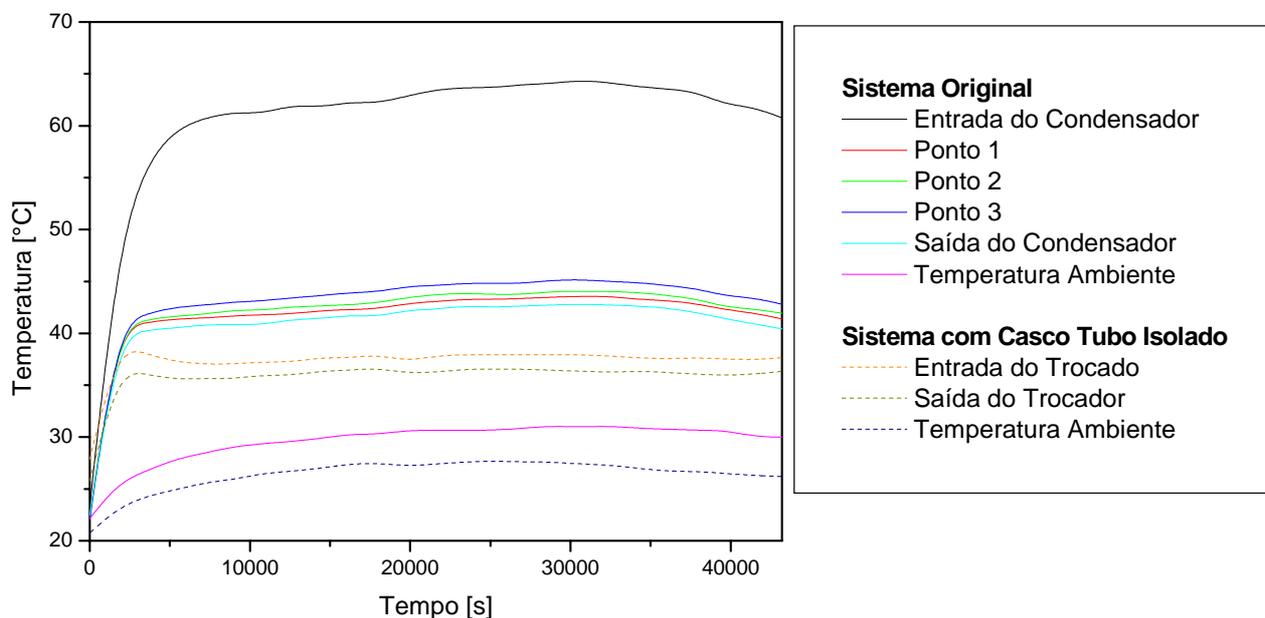


Figura 7. Perfis de Temperatura do Condensador Original e com o Trocador Casco Tubo com o Tanque Isolado.

A Fig. 8 mostra que a instalação do trocador de calor casco tubo no condensador do refrigerador causou uma pequena alteração no comportamento do ciclo de refrigeração uma vez que o refrigerador não atingiu o mesmo patamar de temperatura interna do sistema original. Essa pequena alteração não ocasiona nenhum problema significativo ao sistema, apenas uma pequena redução no seu rendimento térmico. Além disto, houve também uma mudança do patamar de vazão do fluido refrigerante, uma vez que a quantidade de refrigerante líquido no interior do condensador aumentou, alterando, assim, os níveis de pressão de operação do sistema.

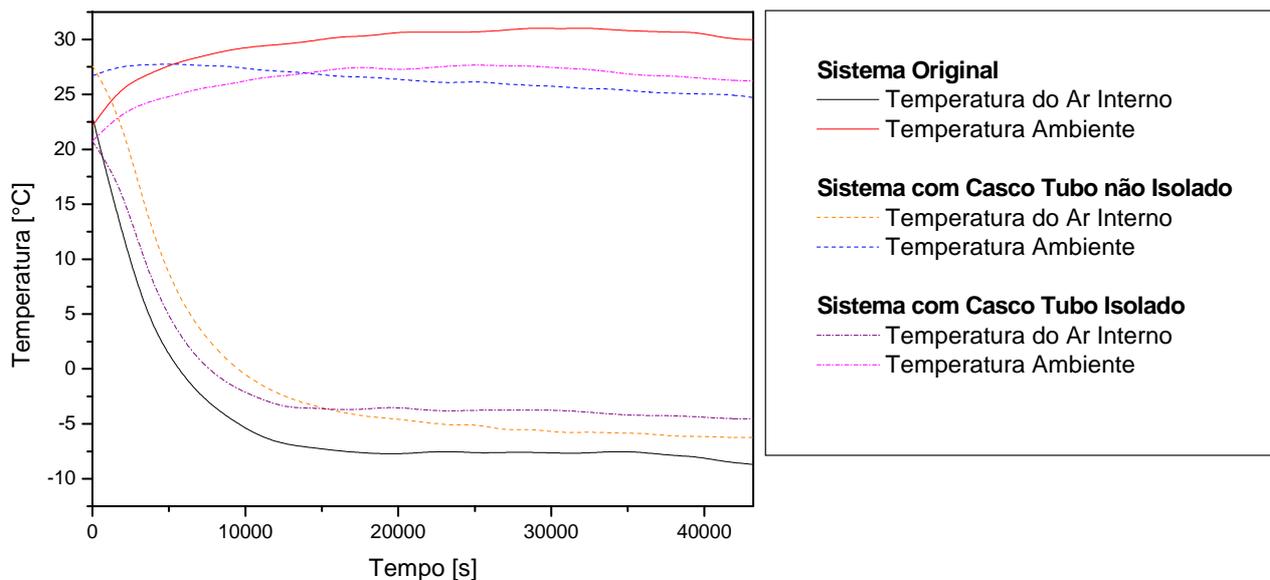


Figura 8. Perfis de Temperaturas para o Ar Interno ao Gabinete.

Na Fig. 9, observa-se que com o isolamento da tubulação a temperatura da água na entrada não variou em função da variação da temperatura ambiente e sim aumentou progressivamente com o passar do tempo. Tal procedimento resultou no aumento do aproveitamento do calor rejeitado pelo refrigerador.

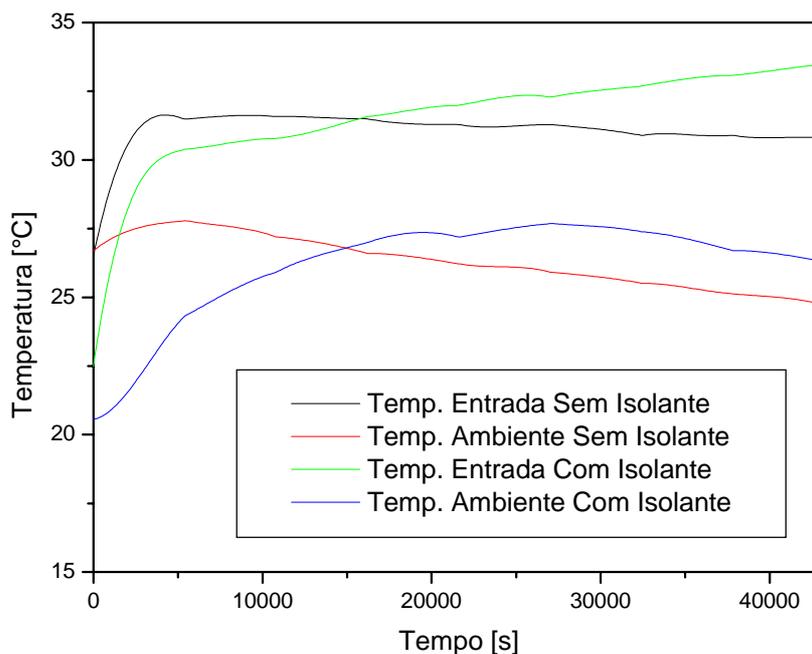


Figura 9. Perfil da Temperatura de Entrada no Tanque de Armazenamento.

Os perfis de temperaturas no interior do tanque em relação a altura e ao tempo podem ser observados nas Fig. 10 e Fig. 11.

Pode-se observar, na Fig. 10, o aparecimento do fenômeno da estratificação térmica do fluido no interior do tanque. A partir da curva de 28.800s, nota-se o efeito da falta de isolamento térmico no tanque, pois desse momento em diante a temperatura ambiente começou a cair e o fluido mais quente, localizado no topo do tanque, tem sua transferência de calor para o meio, intensificada fazendo com que sua temperatura diminua. Outro fenômeno notado é a formação de uma região de instabilidade térmica no topo do tanque, por volta de 1m, em que, após a curva de 21.600s percebe-se uma queda localizada de temperatura. Isto é justificado pela incerteza do instrumento de medida para esta faixa de temperatura, uma vez que, repetiu-se o resultado em outro tanque geometricamente semelhante. Agora tendo como fonte quente, um aquecedor elétrico que trabalha com temperaturas superiores as do sistema estudado, não apresentou o mesmo comportamento, o que descarta a possibilidade de ser um fenômeno físico de formação de bolsões de água fria aprisionados entre porções de água aquecida. Nota-se também que parte do calor perdido pelo fluido na região superior

do tanque é transmitido por condução, através do próprio fluido, ao fundo do tanque, o que contribui também para o pequeno acréscimo na temperatura na região de água fria no fundo do reservatório.

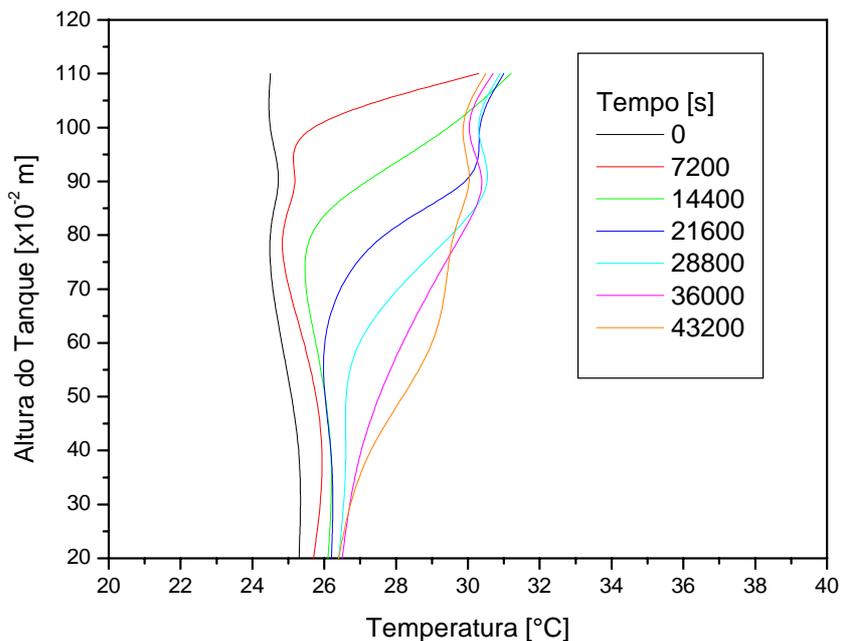


Figura 10. Perfil de Temperatura do Fluido no Interior do Tanque sem Isolamento.

Analisando a Fig. 11, observa-se que o tanque, quando isolado, a quantidade de calor transmitida para o fluido na sua região inferior, devido condução pelo mesmo, se intensifica, uma vez que a troca de calor da parede para o meio ambiente é desprezível. Em comparação ao tanque não isolado, o isolamento ocasionou um aumento na velocidade de avanço da frente de estratificação e a água atingiu patamares de temperatura mais elevados. Nestas curvas nota-se, também, a incerteza do instrumento que gera nos perfis uma deformação, que conforme já explicado, não existe na realidade apenas a faixa de incerteza do instrumento. Em média, segundo a Fig. 11, pode-se calcular que a quantidade de água quente captada no tanque é de 7 litros/hora.

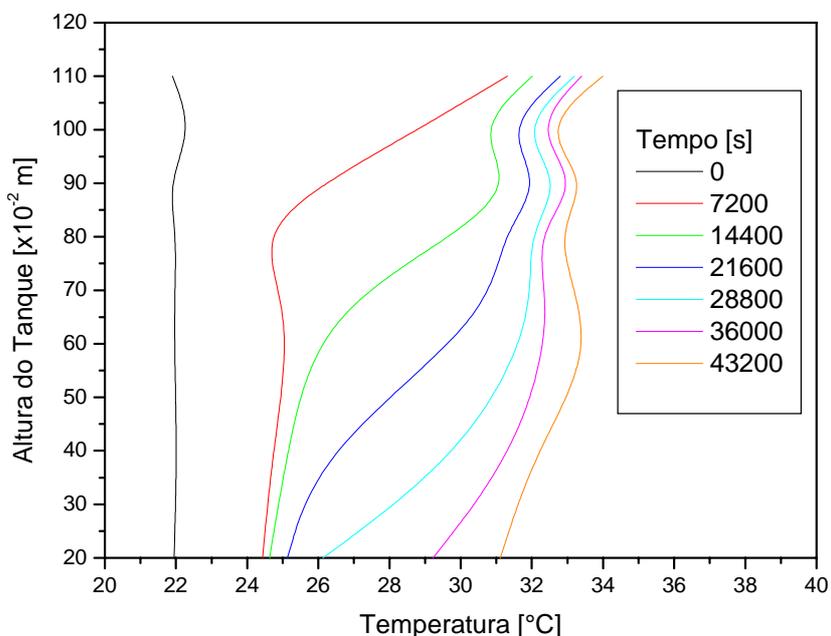


Figura 11. Perfil de Temperatura do Fluido no Interior do Tanque com Isolamento.

A quantidade de energia útil recuperada do refrigerador pode ser observada na Fig. 12. Estas curvas mostram a quantidade de energia que foi armazenada no tanque em relação ao tempo, tomando como referência a quantidade de energia inicialmente presente no mesmo, ou seja, mostram, apenas, a energia captada do refrigerador por unidade de tempo.

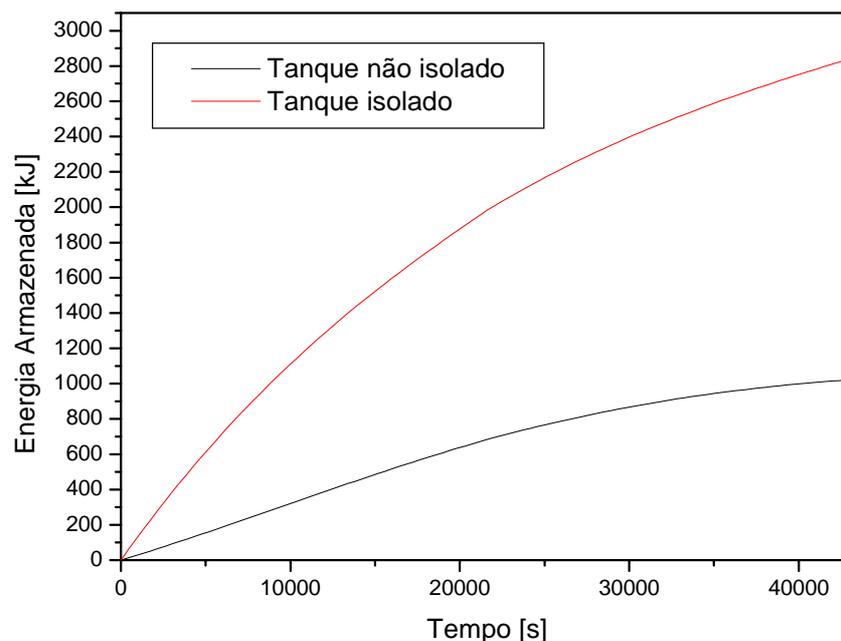


Figura 12. Quantidade de energia armazenada no tanque por unidade de tempo.

5. Conclusões

De acordo com a análise dos resultados, pode-se concluir que o sistema apresenta um bom desempenho na recuperação do calor rejeitado pelo refrigerador. Os experimentos foram realizados num sistema de pequeno porte e, por conta disto, não houve um aumento significativo da temperatura da água. Este fato apenas dificulta o aproveitamento direto da água representado por uma baixa disponibilidade exergética. Entretanto, associado a um aquecedor complementar, este sistema pode representar uma economia de energia de 44 kW.h/mês no consumo residencial de água quente, devendo-se descontar aí alguns gastos com sistemas de bombeamento do fluido. Cabe ressaltar ainda, que o sistema apresenta como efeito adicional uma diminuição da carga térmica no ambiente do refrigerador. Este fenômeno é explicado pelo aproveitamento da energia que era anteriormente rejeitada para o meio ambiente, melhorando assim o conforto térmico no local.

6. Agradecimentos

Agradeço a CAPES pela bolsa de Mestrado, a FUNDUNESP pelo financiamento na aquisição do aparato experimental e ao aluno de graduação Ernesto Souza Volpe pelo auxílio na construção do aparato experimental.

7. Referencias

- Bansal, P. K., Chin, T. C., 2003, "Modelling and Optimization of Wire-and-Tube Condenser", International Journal of Refrigeration, Vol. 26, pp.601-613.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., 1998, "Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa", Ed. LTC, Rio de Janeiro, Brazil, 494 p.
- Leal, J. F. B., Ismail, K. A. R., 2001 "A numerical and experimental study on thermally stratified cold and hot storage tanks" Proceedings of the 2th International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, Rio de Janeiro, Brazil.
- Rosen, M. A., 2001, "The Exergy of Stratified Thermal Energy Storage", Solar Energy, Vol. 71, pp. 173-185.
- Shin, M. S., Kim, H. S., Jang, D. S., Lee, S. N., Lee, Y. S., Yoon, H. G., 2004, "Numerical and Experimental Study on the design of a stratified thermal storage system", Applied Thermal Engineering, Vol. 24, pp.17-27.
- Tagliafico, L., Tanda, G., 1997, "Radiation and Natural Convection Heat Transfer from Wire-and-Tube Heat Exchangers in Refrigeration Appliances", International Journal of Refrigeration, Vol. 20, No. 7, pp.461-469.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE COLLECTION AND UTILISATION OF THE HEAT DISSIPATED IN CONDENSER OF REFRIGERATION SYSTEMS

Paulo Henrique Ferraz do Amaral Filho

Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP – Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube S/N, CEP. 17033-360, Bauru S.P.
pauloaferraz@yahoo.com.br

Dr. Alcides Padilha

Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP – Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube S/N, CEP. 17033-360, Bauru S.P.
padilha@feb.unesp.br

Dr. Vicente Luiz Scalon

Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP – Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube S/N, CEP. 17033-360, Bauru S.P.
scalon@feb.unesp.br

Abstract

The utilization of the energy dissipated by a condenser of domestic refrigerator, using the thermal stratification technique, is a current theme of research and development, due to the energy crisis. In this manner, new alternative forms of energy generation and energy transformation have been searched, remaining also evident the necessity of its rational use. In this way, it has been developed an experimental study of the collection, storage and utilization of energy, seeking the losses energy minimization and consequentially decrease the house costs. The thermal reject of the condenser is captured by a work fluid, now warm, and transferred to a storage tank, where it will remain stocked in a stratified way.

Keywords: Household Refrigerators, Thermal reject, Storage Tanks, Thermal Stratification