

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EVAPORADORES TUBO-ALETA UTILIZANDO UM CALORÍMETRO

Alexsander Cristo Piske

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, LST, R. Imaculada Conceição, 1155, Curitiba – PR, 80215-901
alex.piske@petrobras.com.br

Luís Mauro Moura

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, LST, R. Imaculada Conceição, 1155, Curitiba – PR, 80215-901
Luis.moura@pucpr.br

Nathan Mendes

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, LST, R. Imaculada Conceição, 1155, Curitiba – PR, 80215-901
nathan.mendes@ccet.pucpr.br

Eduardo Alves Cardoso

Marcelo Guillaumon Emmel

Electrolux do Brasil S.A., LP&D COLD/ ARCON, R. Ministro Gabriel Passos, 360, Curitiba – PR, 81520-900

Resumo. É apresentado neste trabalho a avaliação de um evaporador tipo tubo-aleta, largamente utilizado nos equipamentos de refrigeração doméstica especialmente em refrigeradores e condicionadores de ar, utilizando um calorímetro desenvolvido para medir a taxa de transferência de calor que o evaporador absorve em uma determinada temperatura ambiente. Resultados em função da temperatura são apresentados, além de uma análise da umidade absoluta para cada condição de ensaio.

Palavras chave: Evaporador, calorímetro, refrigeração, termodinâmica, sistema termo-energético.

1. Introdução

Grande parte da energia elétrica consumida no país é devido aos equipamentos eletrodomésticos, sendo os produtos refrigeradores aqueles que relativamente participam com a maior parcela de consumo com cerca de 33% do setor residencial, isto é, aproximadamente 7% do consumo energético nacional (Lamberts et al., 1997 e 1998). Nas empresas o cenário não é diferente, pois equipamentos de condicionamento de ar permanecem em funcionamento contínuo durante várias horas, sendo que o problema é mais grave nas regiões com clima mais quente.

Portanto, construir equipamentos frigoríficos mais eficientes, isto é, que consumam menos energia significa criar a oportunidade de trazer à sociedade um produto de refrigeração mais econômico; por outro lado permite que o governo redistribua a energia poupada, destinando-a à produção. Diversas ações podem ser tomadas a fim de melhorar o desempenho funcional destes equipamentos (tanto para o condicionamento de ar quanto para a refrigeração de alimentos), sendo a otimização de componentes, como os trocadores de calor, vital para propiciar ao produto um bom funcionamento com menor consumo.

A redução do consumo de energia tem sido foco de estudo dos fabricantes de eletrodomésticos, principalmente aqueles responsáveis pela linha “branca”. O baixo consumo energético de um refrigerador ou mesmo de um condicionador é um diferencial que o consumidor tem adotado como argumento de decisão na compra de um novo produto. Diante deste panorama, reduzir o consumo de um determinado produto refrigerador significa compor o ciclo de refrigeração com componentes otimizados e que juntos produzam um bom conjunto, refletindo em um produto com o consumo de energia minimizado. O foco deste trabalho está na avaliação de um dos componentes que compõem o ciclo frigorífico, o evaporador. Este componente é submetido a complexas condições de transferência de calor, por um lado um fluxo forçado de fluido refrigerante sob condições de mudança de fase, e por outro pelo fluxo de ar úmido proveniente do ambiente a que se deseja ter a temperatura reduzida. A avaliação é feita por meio da utilização de um calorímetro (Piske, 2004 e Piske et al., 2004b) desenvolvido de modo que se reproduza a condição de funcionamento do evaporador semelhante àquelas encontradas nos equipamentos domésticos. Desta forma é possível avaliar seu desempenho quanto à absorção de energia de um ambiente controlado e verificar o comportamento quando a temperatura de estabilização é alterada.

O calorímetro utilizado é estabilizado dentro de uma câmara climatizada para assegurar uma distribuição térmica uniforme, estabilizada e aproximadamente constante. O ambiente interno do calorímetro é seco pelo próprio evaporador, durante o regime transiente, a fim de evitar a condensação de ar úmido, evitando desse modo perdas por taxa de calor latente. Um sistema similar é utilizado por Liang et al. (2001), embora nesse equipamento não existisse condição de troca adiabática com as paredes; como a nossa proposta. Lee et al. (2002) propuseram um equipamento no qual o processo de admissão de ar mantivesse o estado de entrada de ar higrotermicamente constante. Entretanto, eles

não apresentam um meio para a medição do calor latente gasto para condensar o ar úmido sobre o evaporador, além de como levantar as incertezas desse processo na determinação da taxa de transferência de calor do evaporador. Por outro lado, acredita-se que o equipamento seja eficiente para elevadas taxas de trocas térmicas, diferentes do escopo proposto, para avaliação de trocadores destinados à refrigeração doméstica.

2. O aparato calorimétrico

O calorímetro (Piske, 2004), Fig (1), é um equipamento composto por uma unidade de refrigeração de simples compressão, na qual é possível escoar fluido refrigerante sob condições similares àquelas encontradas nos equipamentos de refrigeração domésticos. Todo o sistema de refrigeração exceto o evaporador estão submetidos à temperatura controlada, promovida por uma câmara de climatização externa. A temperatura foi arbitrada em $32 \pm 1^\circ\text{C}$, pois se sabe que a condensação no ciclo depende fortemente da temperatura ambiente e deste modo é possível obter grande estabilização do ciclo frigorífico do calorímetro. O evaporador é acondicionado dentro de um sistema fechado no qual é realizado o controle de temperatura de modo a obter diferentes condições de estabilização térmica no ambiente calorimétrico. As potências dissipadas tanto pelo ventilador quanto pelo resistor elétrico que é servo-pilotado, bem como a taxa de transferência de calor devido à diferença de temperatura com as faces internas e externas das paredes do calorímetro, são consideradas pois elas se estabilizam no regime permanente com a absorção de energia pelo evaporador. Deste modo é possível avaliar a taxa de transferência de calor que o evaporador retira do ambiente calorimétrico. A formulação obtida através de balanço de energia para o cálculo da transferência de calor do evaporador é apresentada na Eq. (1).

$$\dot{Q}_{evap} = UA_{parede}(T_{parede,ext} - T_{parede,int}) + \dot{Q}_{heater} + \dot{Q}_{vent} \quad (1)$$

onde:

\dot{Q}_{evap} é a taxa de calor que o evaporador retira do ambiente calorimétrico.

$UA_{parede}(T_{parede,ext} - T_{parede,int})$ representa a taxa de transferência de calor pelas paredes do calorímetro e compensada através de uma calibração prévia..

\dot{Q}_{heater} é potência dissipada por efeito Joule no resistor.

\dot{Q}_{vent} é a potência do ventilador.

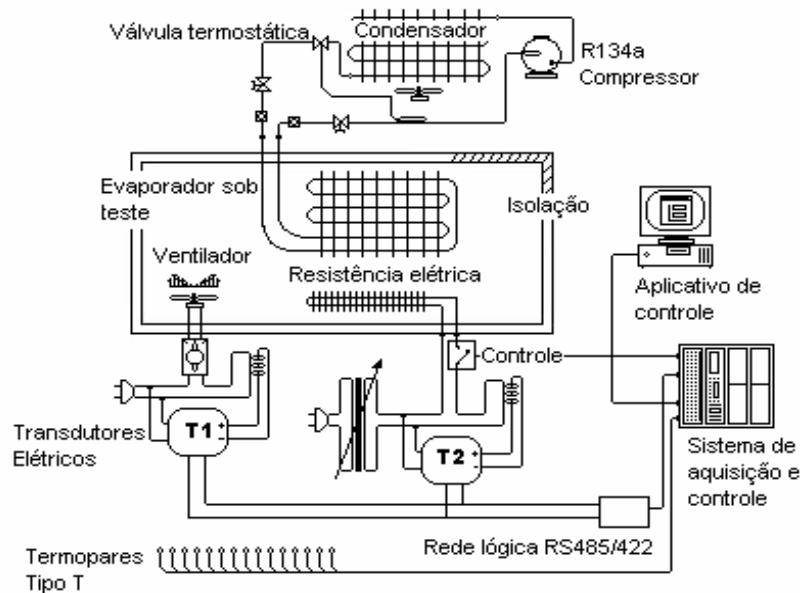


Figura 1. Diagrama esquemático do calorímetro (Piske, 2004).

O fluxo de ar dentro do calorímetro é de circulação fechada, diferente de Horuz et al. (1998) que propõem sem realimentação de ar, ocasionando grande variação das grandezas térmicas em torno de uma média. A circulação de ar é obtida por um ventilador e a energia adicional é dissipada por uma resistência elétrica controlada por um algoritmo de controle que faz o chaveamento da energia.

3. O evaporador testado

O evaporador ensaiado é o tipo tubo-aletas construído com tubo de cobre e aletas de alumínio. Na Fig. (2) nota-se o evaporador de teste e sua preparação no calorímetro. Também é possível observar o retificador de fluxo que uniformiza o escoamento sob o evaporador. Na Tab. (1) apresentam-se os principais parâmetros do evaporador ensaiado.

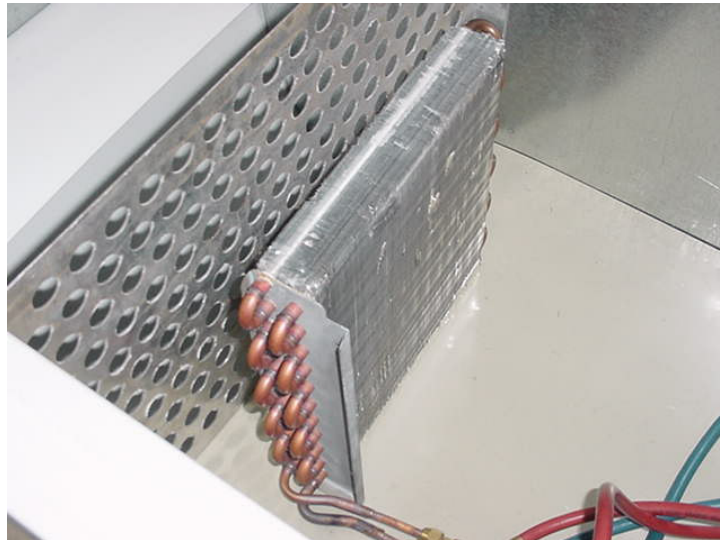


Figura 2. Evaporador instalado.

Tabela 1 Especificação do evaporador submetido ao calorímetro.

TIPO	Comprimento do tubo (mm)	Diâmetro externo do tubo (mm)	Nº de aletas (larg. x altura)	Densidade de aletamento (aletas/mm)	Área de troca (m ²)
01	6420	6,7	156 (275x42) mm	0,57	3,739

4. Resultados

O evaporador foi ensaiado sob várias condições de estabilização do calorímetro, sendo possível levantar a taxa transferida de calor pelo evaporador com o meio controlado. A Tab. (2) apresenta os ensaios para o evaporados com as características construtivas descritas na Tab. 1. Apresentam-se nesta tabela os valores de temperatura obtidos do sistema de refrigeração do calorímetro, do ambiente externo e interno do calorímetro, além das medidas elétricas dos elementos dissipadores necessários ao balanço energético do calorímetro. Como dados complementares foram avaliadas as incertezas de medição de todas as grandezas da Tab (2). É importante ressaltar a influência da temperatura de condensação do calorímetro que é bastante sensível à temperatura ambiente externa do meio calorímetro. Esta influência foi minimizada mantendo a temperatura externa controlada a $32 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Desta forma, a variação apresentada na Tab. (2) é resultado exclusivo da variação da condição termodinâmica do sistema de refrigeração, alterado pela temperatura do ambiente interno do calorímetro, que é controlado nas condições específicas de cada estabilização definindo um ensaio.

As medições apresentadas na Fig. (3) demonstram a influência da temperatura de estabilização calorímetro com a taxa de transferência de calor retirada pelo evaporador do meio calorimétrico. A Fig. (3) mostra a similaridade da curva gerada com uma linha de tendência linear. O coeficiente de correlação é próximo da unidade ($R^2=0,9965$).

Nota-se na Fig. (4) que a umidade absoluta obtida no interior do dispositivo calorimétrico está diretamente ligada à condição de estabilização deste equipamento. À medida que a temperatura de aumento o evaporador se estabiliza em uma condição de desumidificação distinta. É notável que o evaporador tem uma capacidade definida de desumidificação do ambiente, porém com a variação da temperatura da superfície do evaporador essa capacidade é alterada proporcionalmente.

Tabela 2 Dados dos ensaios do evaporador submetido ao calorímetro

Evaporador de teste		Ensaio 6		Ensaio 16		Ensaio 20		Ensaio 24		Ensaio 32	
Carga de Gás Refrigerante		220g		220g		220g		220g		220g	
Medição	Unidade	Média	IM	Média	IM	Média	IM	Média	IM	Média	IM
Sistema – Ent.											
Condensador	°C	59,0	0,3	65,6	0,3	67,6	0,3	69,7	0,3	71,6	0,3
Sistema – Saída											
Condensador	°C	43,6	0,3	49,8	0,3	50,6	0,3	51,6	0,3	47,4	0,3
Sistema – Entrada											
Evaporador	°C	4,8	0,3	14,1	0,3	17,1	0,3	20,4	0,3	25,4	0,3
Sistema – Saída											
Evaporador	°C	-11,0	0,3	0,8	0,3	10,6	0,3	16,9	0,3	24,7	0,3
Sistema – Sucção	°C	11,1	0,3	15,2	0,3	19,5	0,3	23,4	0,3	26,9	0,3
Sensor de controle	°C	6,4	0,3	16,1	0,3	20,1	0,3	23,9	0,3	31,6	0,3
Média Ambiente Interno	°C	6,8	0,3	16,5	0,3	20,3	0,3	24,0	0,3	31,6	0,3
Média Ambiente Externo	°C	32,3	0,3	35,4	0,3	35,5	0,3	35,9	0,3	34,5	0,3
Tensão Ventilação	V	127,0	0,3	127,0	0,3	127,2	0,3	127,4	0,3	127,4	0,3
Corrente Ventilação	A	1,106	0,003	1,106	0,003	1,106	0,003	1,107	0,003	1,106	0,003
Potência Ventilação	W	74,7	0,2	74,6	0,2	74,9	0,2	75,0	0,2	75,1	0,2
Frequência Ventilação	Hz	60,0	0,1	60,0	0,1	60,0	0,1	60,0	0,1	60,0	0,1
Tensão Resistência	V	101,4	0,2	102,8	0,2	102,6	0,2	102,5	0,2	101,8	0,2
Corrente Resistência	A	0,8	0,0	1,9	0,0	2,5	0,0	2,9	0,0	4,0	0,0
Potência Resistência	W	82,3	0,6	188,0	0,6	247,9	0,6	295,8	0,6	406,7	0,6
Frequência Resistência	Hz	60,0	0,1	60,0	0,1	60,0	0,1	60,0	0,1	60,0	0,1
UA	W	2,4	0,0	2,4	0,0	2,4	0,0	2,4	0,0	2,4	0,1
Potência UA	W	60,7	0,2	45,2	0,2	36,6	0,3	28,4	0,3	7,0	0,7
Potência de evaporação	W	217,6	0,6	307,8	0,6	359,3	0,7	399,2	0,7	488,8	0,9

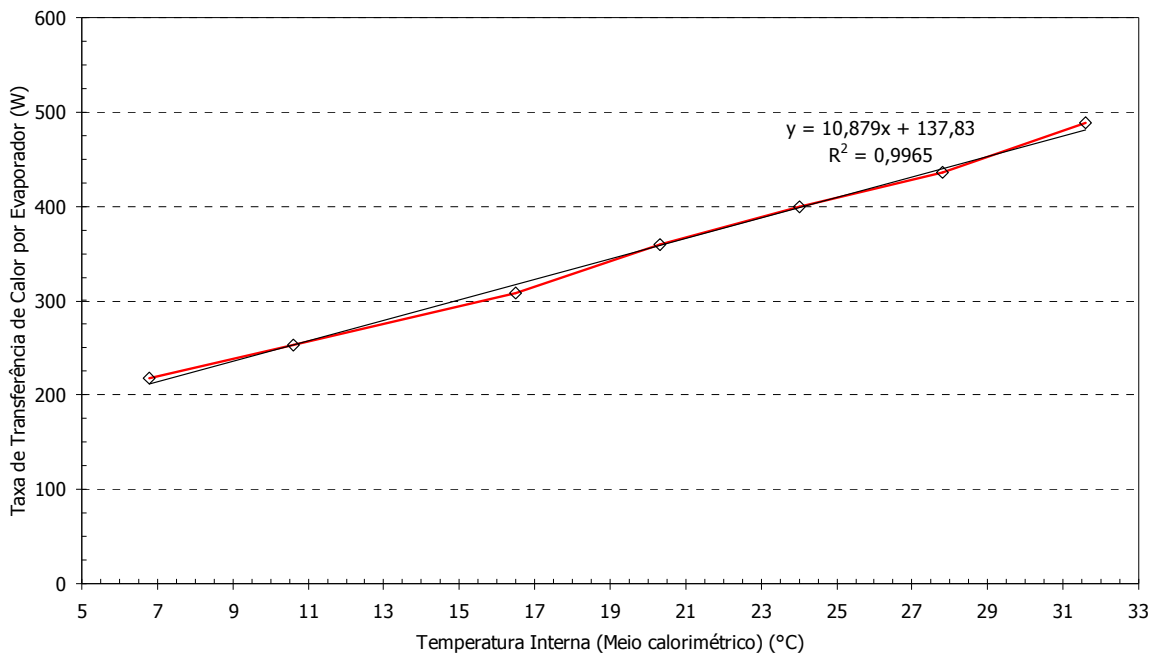


Figura 3. Avaliação da influência da temperatura de estabilização interna do calorímetro com a taxa de transferência de calor.

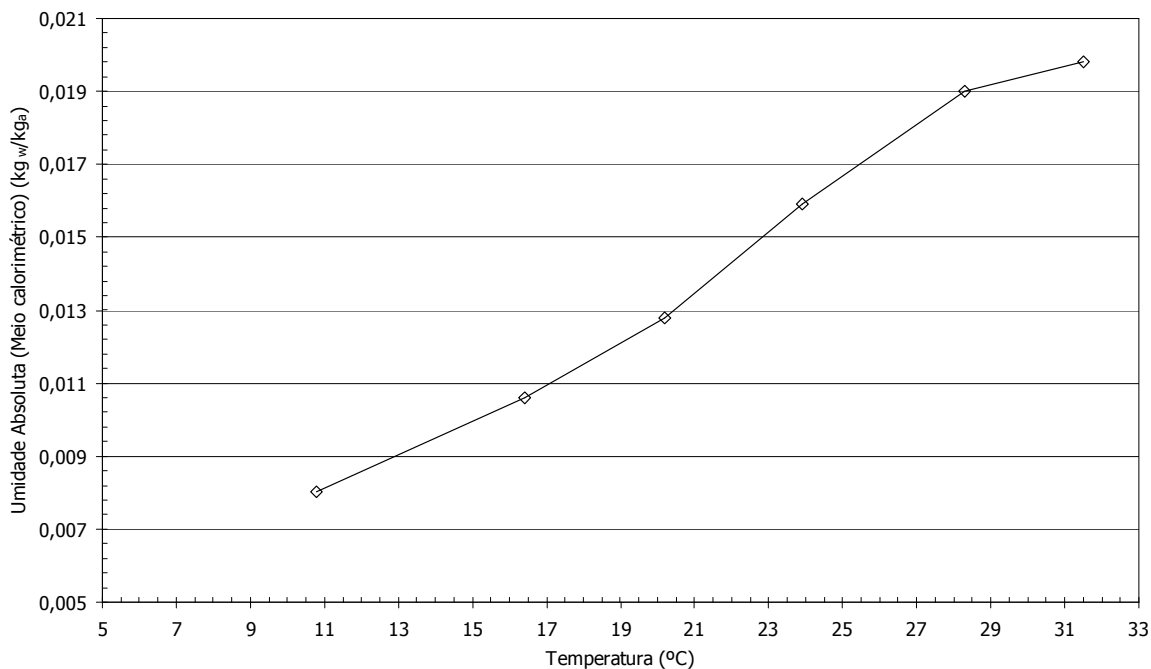


Figura 4. Comportamento da umidade absoluta presente no ambiente controlado pelo calorímetro com a temperatura interna desse meio controlada para diversas condições de ensaio.

A Figs.(5) e (6) representam os testes sob cada condição de estabilização do calorímetro. A temperatura interna, T_{int} , representa a médias das temperaturas internas do ambiente calorímetro cujos pontos são tomados no ar. A temperatura externa, T_{ext} , representa a média das temperaturas externas tomadas na câmara de ensaio na qual todo o calorímetro está submetido. A taxa de transferência de calor dissipada pela resistência elétrica é representada pela linha de tendência Potência A, demonstrando a condição de estabilidade do controle utilizado. Por fim, a taxa de

transferência de calor dissipada pelo sistema de circulação de ar, Potência B. Oscilações da temperatura interna são decorrentes do sistema de controle de potência do resistor ser realizada através de um relé de estado-sólido, em liga-desliga. A ciclagem do sistema é maior (tempo menor do ciclo) para a temperatura de 24°C que para 6°C pois a diferença de temperatura entre o evaporador e o fluido ambiente é maior, aumentando a taxa de transferência de calor, como pode ser observado na Fig. (3).

Nas Figs. (7) e (8) apresentam-se estão registrados os valores de pressão parcial de vapor para as condições de regime permanente do ar interno do calorímetro nas respectivas condições de ensaio, Piske et al. (2004a). As variações higroscópicas foram satisfatórias para os ensaios. Sendo esta influência mais sensível para baixas temperaturas, como observado na Fig. (8). Com uma melhoria da resposta do sistema de controle, as variações seriam menores.

As variações observadas nas Figs. (7) e (8) da pressão de vapor são decorrentes das oscilações do controle de temperatura do ambiente interno do calorímetro.

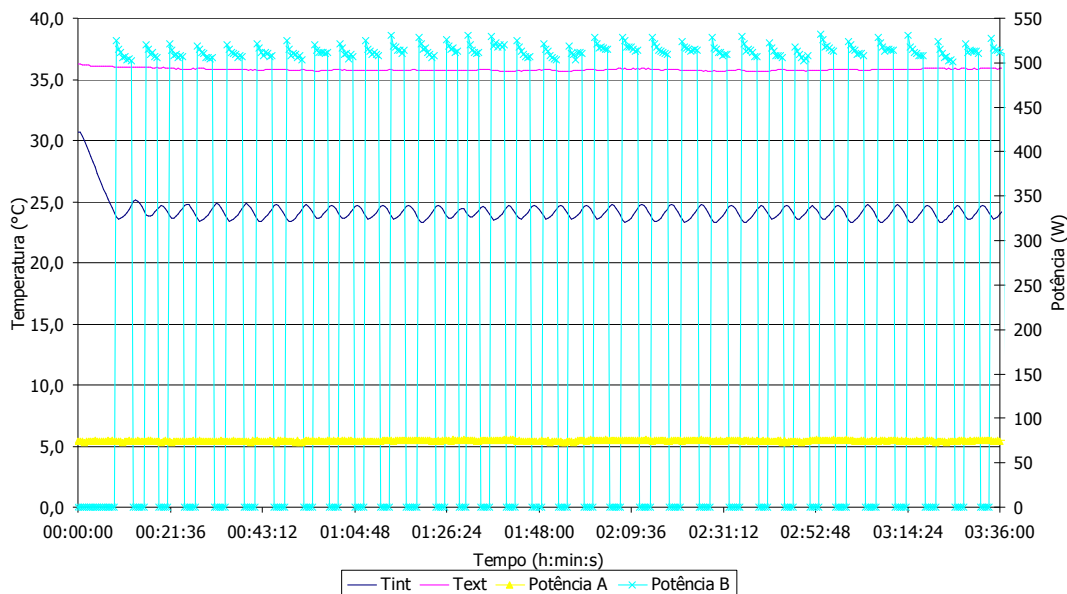


Figura 5. Ensaio calorimétrico realizado com controle ajustado para 24°C.

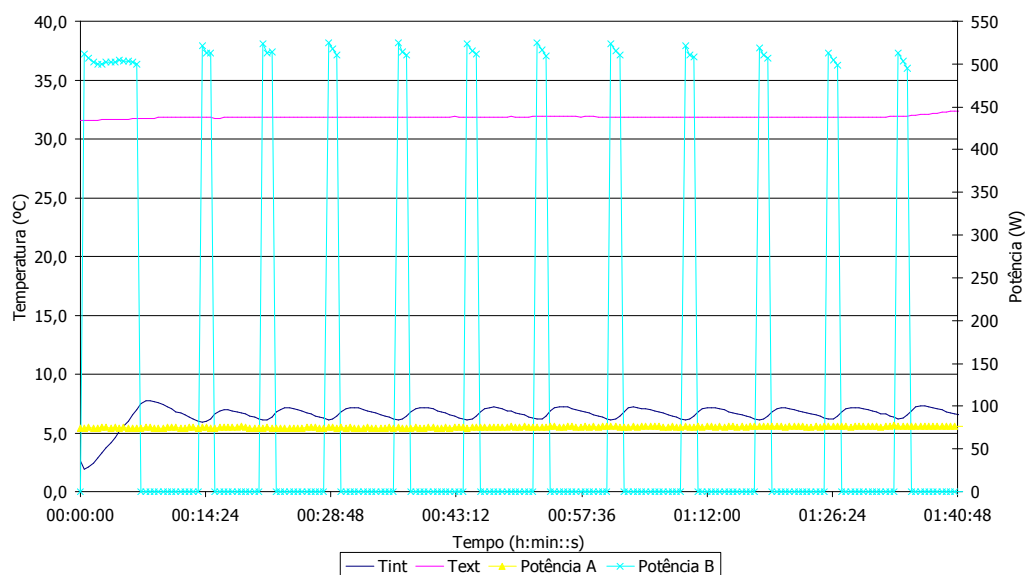


Figura 6. Ensaio calorimétrico realizado com controle ajustado para 6°C.

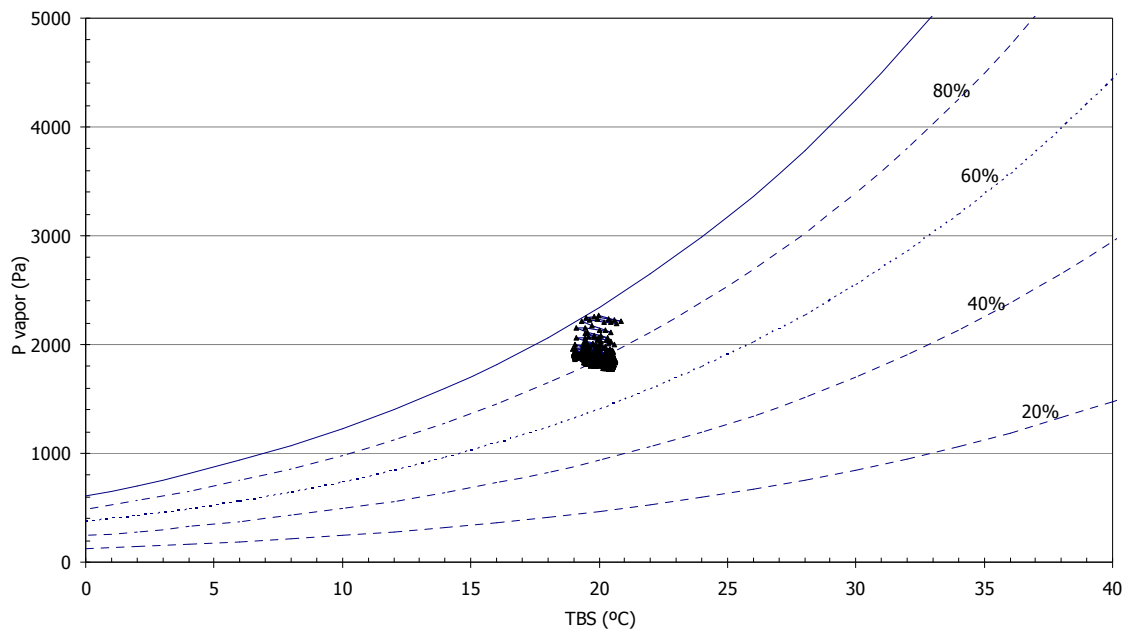


Figura 7. Ensaio calorimétrico realizado com controle ajustado para 24°C: Variação da umidade.

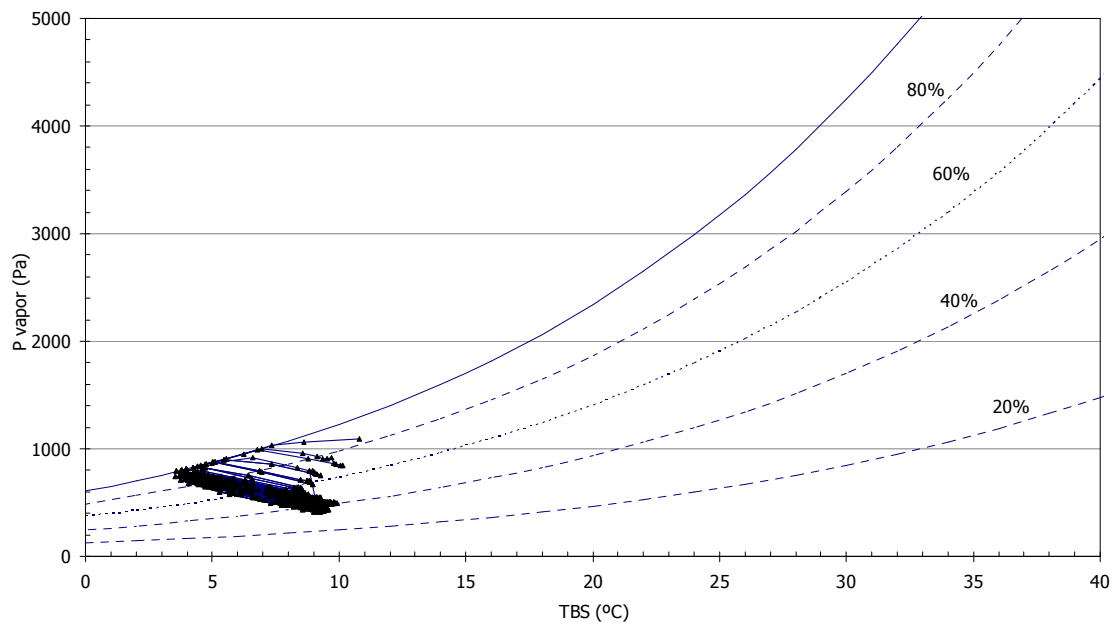


Figura 8. Estabilização do calorímetro sob 6°C. Variação da umidade.

5. Conclusão

É possível, por meio de um levantamento de informações de um determinado evaporador, optar dentre vários protótipos por aquele que reúna as condições mais desejadas para o equipamento em questão. Dados da taxa de transferência de calor, assim como da desumidificação, nas diversas condições ambientais são importantes quando se deseja pela escolha de um determinado layout de evaporador para equipar um refrigerador doméstico. Os resultados experimentais obtidos neste trabalho demonstram a capacidade do equipamento desenvolvido para a análise de

evaporadores tubo-aletas. A possibilidade de medição das condições higroscópicas do ambiente calorimétrico permitirá estudar futuramente o efeito da formação de condensado na superfície do evaporador.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o conselho de pesquisa da Secretaria de Ciência e Tecnologia do Brasil (CNPq-Energia, Ref. 550093/01-0) pelo patrocínio de nossos bolsistas do Laboratório de Sistemas Térmicos da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Especiais agradecimentos à Electrolux do Brasil S.A.

5. Referências

- Horuz, L., Kurem, E., Yamankaradeniz, R., 1998, "Experimental and Theoretical Performance Analysis of Air-cooled Plate-finned-tube Evaporators", *Int. C. in H. and M. Transfer*, Vol 25, n° 6, pp. 787-798.
- Lamberts R., Dutra L. e Pereira F.O.R., 1997, "Eficiência Energética na Arquitetura", PW Editora, São Paulo.
- Lamberts R., Thomé M., Lomardo L. and Mascarenhas A.C., 1998, "Retrofit Demonstration in Brazilian Commercial and Public Buildings", ACEEE – Summer Study on Energy Efficiency in Buildings.
- Liang, S.Y., Wong, T.N., Nathan, G. K., 2001, "Numerical and Experimental Studies of Refrigeration Circuitry of Evaporators Coils", *Int. J. of Refrigeration* 24, pp. 823-833.
- Lee, J. H., Bae, S. W., Bang, K. H., Kim, M. H., 2002, "Experimental and Numerical Research on Condenser Performance for R-22 and R-407 Refrigerants", *Int. J. of Refrigeration* 25, pp. 372-382.
- Piske, A. C., Moura L. M., Mendes N., 2004a, "Development of a Calorimeter for Evaluating Thermal Performance of Evaporators", 7th Biennial ASME Conference: Engineering Systems Design and Analysis, Manchester, UK, 8 p.
- Piske, A. C., Moura L. M., Mendes N., 2004b, "Avaliação Psicrométrica de um Processo Calorimétrico", CONEM2004 - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (aceito para publicação).
- Piske, A. C., 2004, "Desenvolvimento de um Calorímetro para Avaliação de Evaporadores", Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUCPR, Curitiba, Brasil, 135 p.

THERMAL PERFORMANCE OF A FIN-AND-TUBE EVAPORATOR USING A CALORIMETER APPARATUS

Alexsander Cristo Piske (alex.piske@petrobras.com.br)

Luís Mauro Moura (Luis.Moura@pucpr.br)

Nathan Mendes (Nathan.Mendes@pucpr.br)

Pontifical Catholic University of Paraná, CCET, Thermal Systems Laboratory

R. Imaculada Conceição, 1155

Curitiba – PR, 80215-901

Eduardo Alves Cardoso

Marcelo Guillaumon Emmel

Electrolux of Brazil S.A., Research and Development Laboratory Cold/AC

R. Ministro Gabriel Passos, 360

Curitiba – PR, 81520-900

Abstract

It is presented in this work an evaluation for fin-and-tube evaporator which is widely uses in the household refrigeration equipments especially in refrigerators and air conditioning appliances. A calorimeter was utilized in order to obtain the heat transfer rate absorbed by the test evaporator in a temperature control ambient condition. The results under temperature and humidity conditions are presented.

Keywords: Evaporator, calorimeter, refrigeration, thermodynamics, thermal systems