

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE UM TUBO CAPILAR E UMA VÁLVULA DE EXPANSÃO ELÉTRICA NUM SISTEMA DOMÉSTICO DE REFRIGERAÇÃO

Jackson Braz Marcinichen

Cláudio Melo

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica
88040-900 – Florianópolis – SC
Fone: 55 48 3234 5691 – Fax: 55 48 3234 5166
melo@polo.ufsc.br

Resumo. O objetivo principal deste trabalho foi comparar o desempenho de um refrigerador doméstico montado inicialmente com um tubo capilar (TC) e posteriormente com uma válvula de expansão elétrica (VEE). Para tanto um refrigerador do tipo top-mount de 513litros, montado originalmente com um tubo capilar, foi adaptado para operar com uma válvula de expansão controlada por PWM (pulse width modulated). Análises comparativas entre os resultados obtidos através de testes normalizados de pull-down e de consumo de energia, realizados em três temperaturas ambientes (18°C, 32°C e 43°C) e com três rotações do compressor (2000rpm, 3600rpm e 4500rpm), foram então realizadas. Os resultados mostraram que o sistema VEE apresenta um menor consumo de energia somente em condições de elevada carga térmica (temperatura ambiente de 43°C) e de baixa capacidade de refrigeração (rotação do compressor de 2000 rpm). Com relação aos testes de pull-down, as diferenças se mantiveram dentro da faixa de $\pm 3\%$.

Palavras chave: tubo capilar, válvula de expansão elétrica, refrigerador doméstico, energia.

1. Introdução

Tubos capilares (TC) são universalmente empregados em sistemas domésticos de refrigeração, principalmente devido ao seu baixo custo, a ausência de partes móveis e principalmente devido a possibilidade de utilização de compressores de baixo torque de partida. Tubos capilares são, entretanto, dispositivos de expansão que não se ajustam às variações das condições de operação do sistema. Na presença de tais variações quem se ajusta é o próprio sistema de refrigeração, e o faz sempre com redução do coeficiente de performance. Tubos capilares são ainda facilmente obstruídos por elementos estranhos ao circuito, o que pode afetar a eficiência do sistema e até interromper a sua operação (Marcinichen, 2001).

Válvulas de expansão elétricas (VEE) apresentam mecanismos de controle realimentados, os quais ajustam a abertura da válvula mantendo constante o grau de superaquecimento na saída do evaporador em todas as condições de operação do sistema. Em contrapartida tais dispositivos possuem partes móveis e um custo relativamente elevado.

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar as potencialidades de utilização de uma válvula de expansão elétrica num sistema doméstico de refrigeração. O sistema foi primeiramente montado com um tubo capilar e posteriormente com uma válvula de expansão controlada por PWM (pulse width modulated). Testes normalizados de pull-down e de consumo de energia, com carregamento nos dois compartimentos (refrigerador e congelador), foram então realizados com o objetivo de comparar o desempenho dos sistemas TC e VEE.

Numa primeira etapa, Marcinichen et al. (2004) realizaram testes com o sistema descarregado, ou seja, em condições de baixa carga térmica. Os resultados dos testes de pull-down não foram inteiramente conclusivos, mas os testes de consumo de energia mostraram que o sistema TC era mais eficiente. Observou-se também que o consumo de energia do sistema VEE diminuía com o aumento da temperatura ambiente.

Diante desses fatos, realizou-se uma segunda etapa de testes, agora com carregamento nos compartimentos. A intenção foi a de aumentar a carga térmica e com isso tentar explorar eventuais benefícios da VEE sobre o comportamento do sistema. Nesses testes foram consideradas três temperaturas ambientes (18°C, 32°C e 43°C) e três rotações do compressor (2000rpm, 3600rpm e 4500rpm).

Trabalhos correlatos podem ser encontrados na literatura, Tassou e Al-Nizari (1991), Aprea e Mastrullo (2002), Choi e Kim (2002 e 2003), embora todos, sem exceção, sejam referentes a sistemas com elevadas capacidades de refrigeração, o que confere um caráter inédito a este trabalho.

As características de funcionamento da VEE e algumas recomendações para a sua instalação serão inicialmente apresentadas. Em seguida, os resultados obtidos com os sistemas TC e VEE serão apresentados e discutidos. Ao final do trabalho uma análise comparativa entre os dois sistemas será realizada como forma de se identificar eventuais potencialidades da VEE.

2. Sistema válvula de expansão elétrica (VEE) / placa eletrônica (PE)

Neste item serão apresentadas as principais características do sistema VEE/PE, juntamente com algumas recomendações de instalação.

2.1. Características do sistema VEE/PE

A válvula de expansão em questão consiste basicamente de um sistema palheta, orifício, bobina. A abertura da válvula é comandada pela aplicação de uma tensão na bobina, que gera um campo magnético responsável pela movimentação da palheta. O tempo de aplicação da tensão e conseqüentemente o tempo de abertura da válvula (largura de pulso) é proporcional ao grau de superaquecimento na saída do evaporador.

A placa eletrônica opera através de três parâmetros, quais sejam: período de pulso (T), ciclo ativo máximo (DM) e ciclo ativo (D). Esses parâmetros podem variar de acordo com a capacidade do sistema de refrigeração e devem ser adequadamente ajustados para garantir o correto funcionamento da válvula.

O máximo fluxo de massa fornecido por esse tipo de válvula é uma função do diâmetro do orifício e do DM. Dessa forma, para um mesmo diâmetro de orifício, a válvula pode trabalhar numa ampla faixa de capacidade de refrigeração, bastando para isso ajustar eletronicamente o parâmetro DM.

As principais vantagens deste tipo de válvula são as seguintes: controle adequado em baixos fluxos de massa, baixo consumo de energia (~0,5W), elevada vida útil (~30anos), baixo peso e pequeno tamanho, fechamento durante a parada de compressor (minimização das perdas cíclicas), operação estável sem compensação eletrônica e controle efetivo em baixos graus de superaquecimento (~3°C).

2.2. Recomendações para a instalação da VEE

Para evitar possíveis anomalias e/ou a perda de eficiência do sistema VEE/PE alguns cuidados devem ser tomados quando da sua instalação num sistema de refrigeração, quais sejam:

- i) instalar um trocador de calor linha de líquido/linha de sucção para garantir a presença de líquido na entrada da válvula (Figura. 1),
- ii) instalar dois termistores, um na entrada do evaporador e outro na saída do congelador, para controlar o grau de superaquecimento, e
- iii) instalar um acumulador de líquido (estabilizador) na saída do evaporador para garantir um grau de superaquecimento estável.

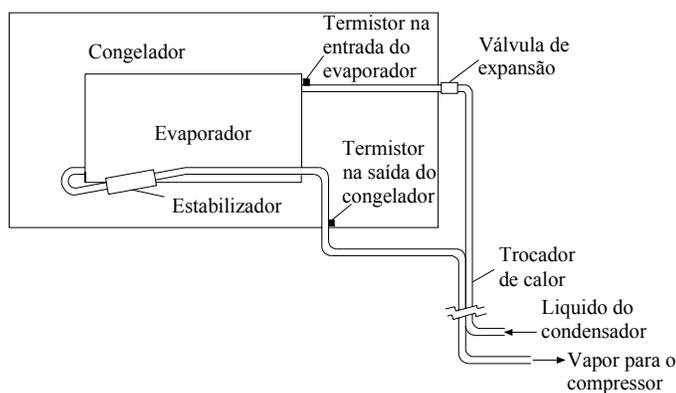


Figura 1. Instalação da VEE

3. Sistema TC

Os testes aqui reportados foram realizados com um refrigerador doméstico do tipo *top-mount*, de 513 litros, onde a operação do compressor era controlada através da temperatura do refrigerador, enquanto um *damp*er mecânico era utilizado para controlar a temperatura do congelador.

3.1. Instrumentação

O compressor original do sistema foi substituído por um de capacidade similar, mas com inversão de frequência (VCC – *variable capacity compressor*). Adicionalmente incorporou-se ao sistema um medidor de fluxo de massa do tipo *Coriolis*. Esse medidor foi instalado na descarga do compressor e devido ao seu pequeno volume interno, pouco afetou a carga de refrigerante originalmente empregada.

As pressões de sucção e descarga foram medidas através de dois transdutores de pressão absoluta. As temperaturas foram medidas através de cabos de compensação do tipo T, com bitola 24 AWG. Os termopares utilizados para medir a temperatura do ar foram inseridos e estanhados dentro de massas padrão de cobre (ISO 7371, 1985). Os demais foram estanhados diretamente sobre a superfície dos tubos.

A temperatura ambiente foi tomada como a média aritmética das indicações de três termopares colocados no centro geométrico das paredes laterais e da parede frontal e a 15cm dessas (ISO 7371, 1985).

O refrigerador foi posicionado a 30cm dos anteparos laterais e a 12cm da parede posterior, de acordo com as recomendações da norma ISO 7371(1985).

Para medição da tensão, corrente, potência, frequência e consumo de energia foram utilizados equipamentos específicos, devidamente calibrados. Todos os sinais gerados pelos transdutores foram adquiridos por um sistema de aquisição de sinais, de fabricação HP.

3.2. Resultados dos testes

O sistema original, com carregamento e com uma carga de HFC134a de 106,7gramas, foi submetido a testes normalizados de pull-down e de consumo de energia, de acordo com as condições indicadas na Tabela 1. Durante os testes de consumo de energia o congelador foi carregado com pacotes de tilose (ISO 8561, 1997). Nos testes de pull-down o congelador foi carregado com 16 potes de água de 1 litro e o refrigerador com 45 latas de refrigerante de 350ml, distribuídas entre as três prateleiras.

Tabela 1. Condições de teste para o sistema TC

Teste	Temperatura (°C) / rotação (rpm)
Pull-down	18 / 3600
	32 / 3600
	43 / 3600
Consumo de energia	18 / 3600
	32 / 2000, 3600 e 4500
	43 / 3600

O tempo de pull-down foi definido como aquele necessário para reduzir a temperatura média dos potes de água no congelador para 3°C. A Tabela 2 mostra os resultados obtidos.

Tabela 2. Tempos de pull-down / sistema TC

Temperatura ambiente (°C)	Tempo de pull-down
18,1	1h 59min
32,0	4h 00min
43,1	5h 43min

Como esperado, observou-se que o tempo de pull-down aumentou com o aumento da temperatura ambiente.

Os testes de consumo de energia foram realizados de acordo com as recomendações da norma ISO 8561 (1997), que utiliza como referência as temperaturas de -18°C e 5°C, respectivamente para os compartimentos do congelador e do refrigerador. Para tanto foram realizados dois testes, um com o termostato e o *dampers* posicionados para gerar temperaturas superiores as de referência e outro para gerar temperaturas inferiores as de referência. Os consumos de energia nas duas temperaturas de referência foram determinados através de interpolações lineares utilizando os resultados dos dois testes. O maior valor obtido foi adotado como representativo do consumo de energia do sistema. Deve-se ressaltar que para propósitos de análise considerou-se apenas o consumo do compressor. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos.

Tabela 3. Consumo de energia / sistema TC

Condição de teste	Consumo de energia (kWh / mês)
18°C / 3600rpm	23,41
32°C / 2000rpm	38,89
32°C / 3600rpm	46,57
32°C / 4500rpm	54,45
43°C / 3600rpm	76,13

Como esperado, verificou-se também que o consumo de energia aumentou com a temperatura ambiente e com a rotação do compressor.

4. Sistema VEE

Antes de instalar a VEE no sistema, tornou-se necessário promover algumas modificações na placa eletrônica. As principais alterações foram: i) implementação de um controle para a equalização das pressões no instante em que o compressor interrompe o seu funcionamento, ii) implementação de um controle para atuação da VEE no instante da partida do compressor, quando o superaquecimento é inexistente, iii) implementação de *trimpots* de ajuste de T e DM e iv) implementação de um sinal de tensão proporcional a D/DM. Esse sinal reflete o comportamento da válvula, permitindo, por exemplo, relações com o grau de superaquecimento ou com o fluxo de massa.

O sistema de refrigeração precisou também ser modificado para permitir a instalação da VEE. As principais alterações promovidas no sistema seguiram as recomendações apresentadas no item 2.2, quais sejam: instalação de um trocador de calor linha de líquido/linha de sucção de 1,20m de comprimento, instalação de uma VEE com diâmetro de orifício igual a 0,65mm, instalação de um acumulador de líquido (estabilizador de superaquecimento) com aproximadamente 50cm³ na saída do evaporador e instalação de dois termistores NTC (resistência nominal de 10kΩ a 25°C e classe 0,1°C), um na entrada do evaporador e outro na saída do congelador.

4.1. Determinação da carga de refrigerante e do parâmetro DM

Devido às alterações introduzidas no sistema, com o conseqüente aumento do volume interno, uma nova carga de refrigerante teve que ser determinada.

Durante os testes de determinação de carga o período (T) foi mantido em 2,0s, seguindo recomendações do fabricante, a temperatura ambiente em 32°C e a rotação em 3600rpm. Para cada carga de refrigerante ajustou-se o valor de DM até que o grau de superaquecimento na saída do evaporador se tornasse nulo. Os resultados dos testes com cinco diferentes cargas de HFC134a (109,9g, 120,1g, 130,8g, 141,0g, 151,1g) encontram-se ilustrados nas Figuras 2 e 3.

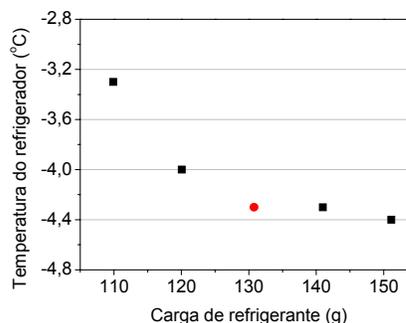
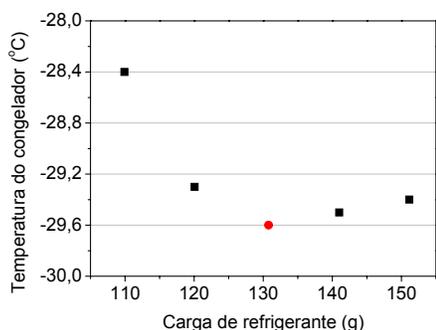


Figura 2. Temperatura do congelador vs. carga Figura 3. Temperatura do refrigerador vs. carga

Observou-se que a partir da carga de refrigerante de 130,8gramas o fluxo de massa, a pressão de sucção, a potência do compressor e as temperaturas dos compartimentos congelador e refrigerador, permaneciam praticamente constantes. Concluiu-se então que a carga ideal de refrigerante para o sistema VEE era de 130,8gramas.

4.2. Resultados dos testes

O sistema VEE, com carregamento e com uma carga de HFC134a de 130,8gramas, foi submetido a testes normalizados de pull-down e de consumo de energia, de acordo com as condições indicadas na Tabela 1.

Os parâmetros T e DM foram ajustados para os testes de pull-down, respectivamente nos valores de 2s e 80% (1,6s). O valor de DM adotado representa o máximo permitido pela PE e foi escolhido com a intenção de maximizar o fluxo de massa de refrigerante para assim minimizar o tempo de pull-down. Os resultados dos testes são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Tempos de pull-down / sistema VEE

Temperatura ambiente (°C)	Tempo de pull-down
18,8	1h 55min
32,6	3h 56min
42,8	5h 51min

A exemplo dos testes realizados com o sistema TC o tempo de pull-down cresceu com o aumento da temperatura ambiente.

Para realizar os testes de consumo de energia, primeiramente ajustou-se o parâmetro DM para cada condição de teste. O valor de ajuste foi definido como aquele que originava um superaquecimento mínimo na saída do evaporador na condição de regime permanente e com o sistema descarregado. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. Ciclo ativo máximo

Condição de teste	Ciclo ativo máximo (s)
18°C / 3600rpm	1,10
32°C / 2000rpm	1,30
32°C / 3600rpm	1,30
32°C / 4500rpm	1,30
43°C / 3600rpm	1,55

Os procedimentos utilizados durante os testes de consumo de energia com o sistema TC foram também aqui adotados. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Consumo de energia / sistema VEE

Condição de teste	Consumo de energia (kWh / mês)
18°C / 3600rpm	26,85
32°C / 2000rpm	37,63
32°C / 3600rpm	50,90
32°C / 4500rpm	58,74
43°C / 3600rpm	73,79

Neste caso, obteve-se também um aumento do consumo de energia com o aumento da temperatura ambiente e com a rotação do compressor. O consumo de energia do par VEE/PE foi medido de forma independente, obtendo-se um valor de 1,42kWh/mês.

5. Sistema VEE vs. TC

Os tempos de pull-down dos dois sistemas são comparados na Figura 4 e na Tabela 7.

Tabela 7. Tempos de pull-down / análise comparativa

Temperatura (°C)	Tempo de pull-down (h)	
	sistema TC	sistema VEE
18	1h 59min	1h 55min
32	4h 00min	3h 56min
43	5h 43min	5h 51min

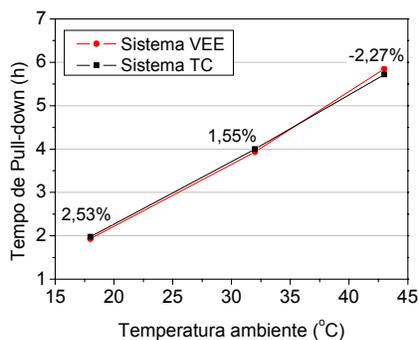


Figura 4. Tempos de pull-down / análise comparativa

Observa-se que os tempos de pull-down dos dois sistemas, para uma mesma temperatura ambiente, se mantiveram dentro de uma faixa de variação de $\pm 3\%$. Verifica-se também que o tempo de pull-down do sistema VEE foi menor do que do sistema TC em baixas temperaturas e maior em altas temperaturas.

A Figura 5 mostra a evolução temporal do grau de superaquecimento na saída do evaporador para os dois sistemas na temperatura ambiente de 43°C. Observa-se que o sistema VEE consegue manter um menor superaquecimento durante as 2 primeiras horas de teste, o que se reflete diretamente numa maior capacidade de refrigeração. Após esse

período, entretanto, o sistema TC passa a ser mais efetivo, alcançando um ponto ótimo em aproximadamente 5 horas, quando o fluxo de massa através do tubo capilar gera uma capacidade de refrigeração que produz um grau de superaquecimento nulo no evaporador.

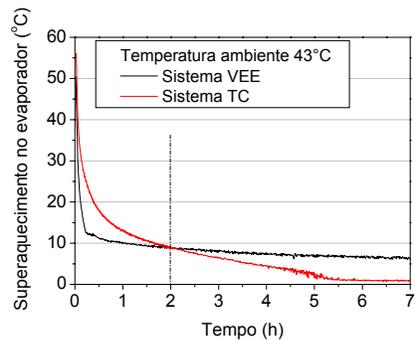


Figura 5. Superaquecimento no evaporador

A Tabela 8 mostra as capacidades médias de refrigeração dos dois sistemas durante os testes de pull-down. Verifica-se, como esperado, que as condições de maior capacidade se refletiram num menor tempo de pull-down (ver Tabela 7).

Tabela 8. Capacidades de refrigeração / análise comparativa

Temperatura (°C)	Capacidade de refrigeração (W)	
	sistema TC	sistema VEE
18	214,8	227,3
32	215,8	220,3
43	248,2	221,8

Os resultados dos testes de consumo de energia são sumarizados na Tabela 9 e nas Figuras 6 e 7. Os valores percentuais indicados nas Figuras 6 e 7 representam a diferença de consumo entre os dois sistemas em relação ao sistema TC.

Tabela 9. Consumo de energia / análise comparativa

Condições de teste Temperatura (°C) / rotação (rpm)	Consumo de energia (kWh / mês)	
	sistema TC	sistema VEE
18 / 3600	23,41	26,85
32 / 2000	38,89	37,63
32 / 3600	46,57	50,90
32 / 4500	54,45	58,74
43 / 3600	76,13	73,79

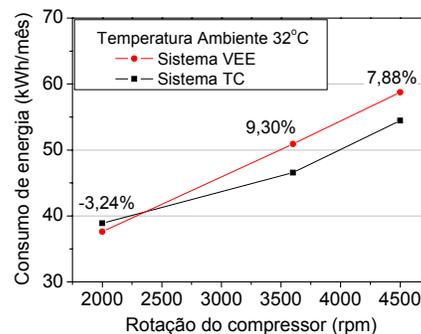
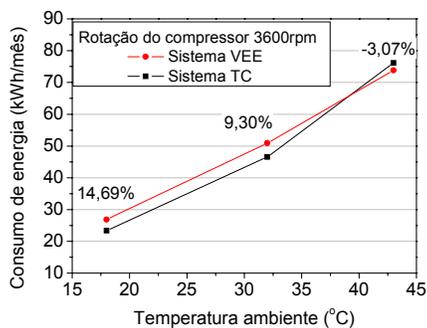


Figura 6. Consumo de energia vs. temperatura ambiente Figura 7. Consumo de energia vs. rotação do compressor

Observa-se que o sistema VEE apresenta um menor consumo de energia somente em condições de elevada carga térmica (ambiente a 43°C) e de baixa capacidade de refrigeração (rotação de 2000rpm).

As Figuras 8 e 9 mostram o grau de superaquecimento na saída do evaporador durante um ciclo de operação do compressor respectivamente para os sistemas VEE e TC, na condição 32°C/4500rpm.

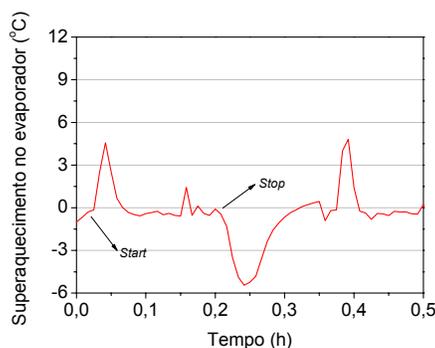
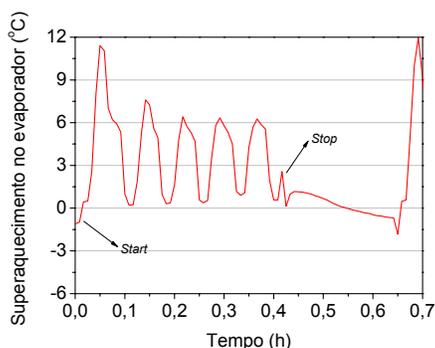


Figura 8. Superaquecimento no evaporador – sistema VEE Figure 9. Superaquecimento no evaporador – sistema TC

Verifica-se que o grau de superaquecimento na saída do evaporador não foi adequadamente controlado através da placa eletrônica do sistema VEE, a qual gerou um valor médio de superaquecimento (4,0°C) maior do que o obtido com o sistema TC (0,2°C). Isto significa que o fluxo de massa de refrigerante através do tubo capilar se adequa melhor a taxa de transferência de calor no evaporador do que aquele fornecido pela VEE. Como consequência a capacidade de refrigeração do sistema VEE foi menor e o consumo de energia maior do que o obtido com o sistema TC.

Deve-se mencionar que o desempenho do sistema VEE pode ser melhorado através da implementação de um algoritmo mais eficiente para controlar a abertura da VEE, mantendo dessa forma um superaquecimento reduzido e constante em todas as condições de teste. Parte da dificuldade de controle do superaquecimento pode estar também associado ao diâmetro do orifício da válvula, muito provavelmente superdimensionado para o sistema em questão.

6. Conclusões

Neste trabalho procurou-se comparar o desempenho de um mesmo sistema de refrigeração, em termos de tempo de pull-down e de consumo de energia, utilizando um tubo capilar e uma válvula de expansão elétrica comandada pelo grau de superaquecimento como dispositivos de expansão.

Observou-se que o sistema VEE apresenta um menor consumo de energia somente em condições de elevada carga térmica (ambiente a 43°C) e de baixa capacidade de refrigeração (rotação de 2000rpm). Em todas as outras condições de funcionamento o sistema TC apresentou um menor consumo de energia. Deve ser mencionado que o menor desempenho do sistema VEE foi associado com instabilidades no controle do superaquecimento, o que pode ser creditado em parte à uma deficiência do algoritmo de controle e em parte ao diâmetro do orifício da válvula.

Durante os testes de pull-down, observou-se que nas condições de 18°C e 32°C o tempo de pull-down do sistema VEE foi ligeiramente menor, o que não ocorreu a 43°C. Deve-se mencionar, entretanto, que as diferenças observadas foram menores do que 3%.

Recomenda-se fortemente que as análises realizadas no presente trabalho sejam estendidas para outros sistemas de maior capacidade, por exemplo, aos resfriadores de bebidas.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Embraco S.A. (Empresa Brasileira de Compressores), em particular aos engenheiros Roberto Horn Pereira e Reinaldo Maykot pelo apoio financeiro e discussões técnicas. Agradecimentos são também devidos ao acadêmico Érico Estevan Saquette dos Reis e ao técnico Luciano Vambömmel, pela montagem dos experimentos e processamento dos testes. O apoio recebido da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) é também devidamente reconhecido.

6. Referências

- Aprea, C., Mastrullo, R., 2002, "Experimental Evaluation of Electronic and Thermostatic Expansion Valves Performances using R22 and R407C", *Applied Thermal Engineering* 22, pp. 205-218.
- Choi, J. M., Kim, Y. C., 2002, "The Effects of Improper Refrigerant Charge on the Performance of a Heat Pump with an Electronic Expansion Valve and Capillary Tube", *Energy* 27, pp. 391-404.
- Choi, J. M., Kim, Y. C., 2003, "Capacity Modulation of an Inverter-driven Multi-air Conditioner using Electronic Expansion Valve", *Energy* 28, pp. 141-155.
- ISO 7371, 1985, "Performance of Household Refrigerating Appliances – Refrigerator with or without Low Temperature Compartment".

- ISO 8561, 1997, "Household Frost-Free Refrigerating Appliances – Refrigerators, Refrigerator-Freezers, Frozen Food Storage Cabinets and Food Freezers Cooled by Internal Forced Air Circulation – Characteristics and Test Methods".
- Marcinichen, J. B., 2001, "Avaliação Experimental da Redução do Fluxo de Massa em Tubos Capilares pela Deposição de Óleo Éster", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC.
- Marcinichen, J. B., Melo, C., Stähelin, R., 2004, "Análise Comparativa entre um Tubo Capilar e uma Válvula de Expansão Eletrônica num Sistema Doméstico de Refrigeração", *10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering -ENCIT*, paper CIT04-0748.
- Tassou, S. A., Al-Nizari, H., 1991, "Investigation of the Steady State and Transient Performance of a Reciprocating Chiller Equipped with an Electronic Expansion Valve", *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 11, N° 6, pp. 541-550.

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN A CAPILLARY TUBE AND AN ELECTRIC EXPANSION VALVE IN A HOUSEHOLD REFRIGERATOR

Jackson Braz Marcinichen
Cláudio Melo

Federal University of Santa Catarina
Department of Mechanical Engineering
88040-900 – Florianópolis – SC
Fone: 55 48 3234 5691 - Fax: 55 48 3234 5166
melo@polo.ufsc.br

Abstract

This study compares the performance characteristics of a household refrigerator equipped with an Electric Expansion Valve (EEV) with those with a capillary tube. A 513-liter top-mount refrigerator, originally equipped with a capillary tube, was retrofitted with a Pulse Width Modulated (PWM) expansion valve and extensively tested. Comparative analyses were performed based on standardized pull-down and energy consumption tests, carried out at three ambient temperatures (18°C, 32°C and 43°C) and with three compressor speeds (2000rpm, 3600rpm and 4500rpm). It was shown that the EEV system showed better performance in terms of energy consumption, as compared with the capillary tube system, only at high cooling loads (ambient temperature of 43°C) and at low cooling capacities (compressor speed of 2000rpm). For a wide range of operating conditions the Pull-down times of both systems were kept within a difference band of $\pm 3\%$.

Keywords: Capillary tube, electric expansion valve, household refrigerator, energy.