

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

UMA METODOLOGIA PARA PREVER O DESEMPENHO DE VÁLVULAS DE EXPANSÃO ELETRÔNICAS COM FOCO EM REFRIGERAÇÃO DOMÉSTICA

André L. Montibeller, andre@polo.ufsc.br
Fernando T. Knabben, fernandok@polo.ufsc.br
Claudio Melo*, melo@polo.ufsc.br

POLO Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica, Universidade Federal de Santa Catarina
88040-900, Florianópolis, SC, Brasil, Tel: 55 48 3234 5691, * Autor para correspondência: melo@polo.ufsc.br

Resumo: Políticas governamentais cada vez mais ambiciosas têm pressionado as indústrias do setor de refrigeração a fabricar produtos cada vez mais eficientes. A necessidade de refrigeradores que operam eficientemente numa ampla faixa de condições de operação tem estimulado o desenvolvimento de componentes de ação variável, como compressores e dispositivos de expansão. Dentro desse contexto, desenvolveu-se uma metodologia para prever o desempenho de válvulas de expansão eletrônicas com foco em refrigeração doméstica. Para tanto, três válvulas de expansão, com orifícios de diâmetros distintos, foram primeiramente testadas numa bancada de medição de vazão de nitrogênio. Os valores de vazão foram então utilizados para gerar geometrias - comprimento e diâmetro interno - de tubos capilares equivalentes. A partir da geometria do capilar e com o auxílio de um modelo matemático foi possível prever a vazão mássica de HFC-134a e estimar a capacidade de refrigeração correspondente. Dessa forma, pôde-se verificar, de uma forma rápida e relativamente precisa, se tais válvulas eram adequadas para uso em sistemas domésticos de refrigeração. Percebeu-se que as válvulas de diâmetro pequeno e intermediário conseguiam controlar adequadamente a vazão de refrigerante apenas a partir de frações de abertura superiores a 30%. Por outro lado, a válvula de maior diâmetro apresentou um bom comportamento já a partir de frações de abertura de 2%. Observou-se ainda que a válvula de maior diâmetro é equivalente a capilares de 0,3 a 0,9 mm de diâmetro interno, dependendo da fração de abertura, podendo gerar capacidades de refrigeração entre 20 a 250 W sendo, portanto, adequada para uso em refrigeração doméstica.

Palavras-chave: válvulas de expansão, tubos capilares, refrigeração doméstica, vazão de nitrogênio

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de preservação dos alimentos tornou os refrigeradores domésticos itens indispensáveis para a sociedade moderna. Os refrigeradores domésticos operam, na sua maioria, de acordo com um ciclo de compressão mecânica de vapor, onde um compressor (normalmente de velocidade fixa) e um dispositivo de expansão definem as pressões de condensação e evaporação. O processo de expansão usualmente se dá através de um tubo capilar, que nada mais é que um tubo de diâmetro interno bastante reduzido e comprimento relativamente longo. Como a restrição é fixa, o tubo capilar não permite que o sistema de refrigeração se adapte adequadamente às variações das condições de operação, o que gera degradações de desempenho sempre que o sistema se afasta da sua condição de *check-point*.

Os refrigeradores domésticos são responsáveis por uma parcela significativa do consumo de energia elétrica do país (PROCEL INFO, 2015). O governo brasileiro, a exemplo de outros países, estabelece periodicamente novas metas de consumo de energia e novas classificações energéticas para os refrigeradores domésticos. Na América Latina, por exemplo, o refrigerador mais eficiente é classificado como A. Já na Europa, novas classes foram introduzidas como A+, A++ e A+++ , que são respectivamente 25, 60 e 150 % mais eficientes que um produto classe A (Directive 2003/66/EC). Como consequência, os fabricantes de refrigeradores procuram aumentar constantemente o desempenho dos seus produtos, não raramente através da utilização de compressores de capacidade variável.

Todo refrigerador deve ser projetado para suprir uma demanda de carga térmica. Na essência, o refrigerador deveria produzir capacidades de refrigeração que pudessem balancear as variações de carga térmica, evitando assim oscilações de temperatura e desperdício de energia. Todavia, esse *match* entre carga térmica e capacidade de refrigeração não é normalmente alcançado em sistemas dotados de dispositivos de restrição fixa, como os tubos capilares. Tais sistemas

não conseguem controlar adequadamente o grau de superaquecimento na saída do evaporador, sob condições de operação variáveis, gerando perdas substanciais de performance (Pöttker, 2006).

Além disso, com a introdução da nova norma global de ensaio de consumo de energia (IEC 62552, 2015), os refrigeradores precisarão ser testados em duas temperaturas ambientes, 32°C e 16°C. A expectativa é que sob tais condições, refrigeradores dotados de tubos capilares e, especialmente, de compressores do tipo *on-off*, não consigam manter um nível satisfatório de performance. Daí infere-se a necessidade do desenvolvimento de válvulas de expansão de ação variável, específicas para o setor de refrigeração doméstica, em paralelo com metodologias para mapear o seu desempenho.

As válvulas de expansão termostáticas (TEVs) são bastante comuns em sistemas comerciais de refrigeração (Eames et al., 2014), onde controlam a vazão mássica de refrigerante de acordo com o grau de superaquecimento na saída do evaporador. No entanto, a sua utilização em sistemas domésticos é ainda restrita, não apenas pelo custo, mas principalmente pela necessidade de orifícios extremamente pequenos, que colocariam em risco a integridade do sistema. As válvulas de expansão eletrônicas (EEVs), por sua vez, conseguem controlar eletronicamente a área de passagem, têm um tempo de resposta inferior às termostáticas e promovem um controle mais estável do grau de superaquecimento na saída do evaporador (Park et al., 2007). No entanto, o uso de tais válvulas também é restrito em sistemas de pequeno porte devido à dificuldade de se encontrar modelos adequados às condições de pressão e vazão mássica tipicamente encontradas na prática.

Apesar da vasta literatura sobre válvulas de expansão eletrônicas, são raros os trabalhos com foco em sistemas domésticos de refrigeração. Nesse contexto, o objetivo geral desse trabalho reside no desenvolvimento de uma metodologia rápida e confiável para prever o desempenho e, consequentemente, a viabilidade de uso de válvulas de expansão em sistemas domésticos de refrigeração. Como objetivos específicos, destacam-se: (i) medir a vazão de nitrogênio através de três válvulas eletrônicas, de diâmetros distintos, utilizando uma bancada experimental especialmente construída para tal finalidade. Correlacionar a vazão com a fração de abertura e pressão na entrada; (ii) utilizar a equação proposta por Kipp e Schmidt (1961) para calcular a geometria dos capilares cujas respostas seriam equivalentes às das válvulas em questão; (iii) com base nas geometrias obtidas prever numericamente a vazão mássica de HFC-134a (Hermes et al., 2010) e as capacidades de refrigeração correspondentes.

2. METODOLOGIA

As válvulas em questão são na verdade microválvulas eletrônicas, tão pequenas quanto à ponta de um lápis, também conhecidas como MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*), que funcionam através do princípio eletrotérmico. O corpo da válvula é formado por três camadas sobrepostas de silício (ver Fig. 1). A superior inclui os terminais para conexão elétrica e serve como uma capa para a camada intermediária. Esta contém o atuador térmico e a placa deslizante. O atuador térmico serve para mover a placa deslizante sobre as portas de passagem de fluido localizadas na camada inferior. Esse movimento se dá através da aplicação de uma corrente elétrica sobre a camada intermediária. Devido à variação de sua resistividade térmica a placa dilata ou contrai em função do calor gerado e se movimenta sobre o orifício de passagem do fluido, permitindo, então, o controle proporcional da abertura. A Figura 3 mostra três portas na camada inferior. A terceira é opcional e permite que a válvula opere com três vias, uma de entrada e duas de saída (o que foge do escopo do presente trabalho). Antes de ser instalado num sistema de refrigeração, o corpo da válvula é encapsulado num invólucro metálico (ver Fig. 2) com dois tubos de cobre, uma para a entrada e outro para a saída de fluido refrigerante.



Figura 1. Vista explodida do corpo da válvula

Como mostrado na Fig. 1, as válvulas possuem orifícios retangulares de largura fixa. A regulação da abertura se dá pela variação do comprimento coberto pela placa deslizante. A Tabela 1 mostra as faixas de variação desses parâmetros para cada uma das três válvulas usadas nesse trabalho.

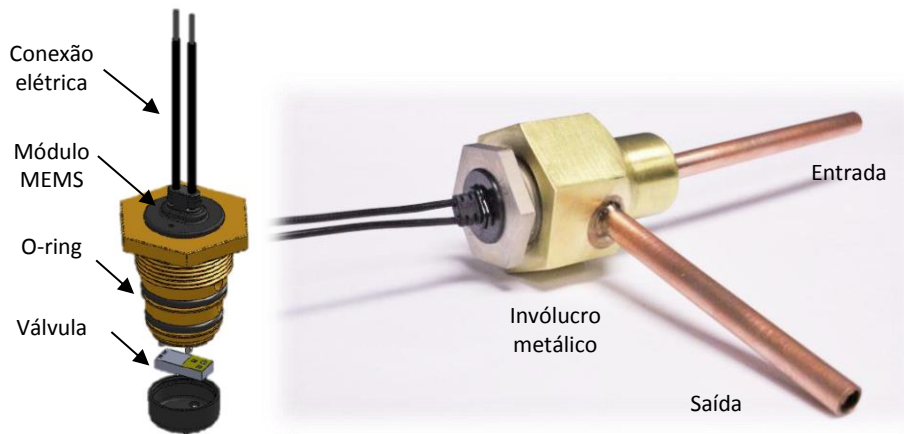


Figura 2. Componentes do dispositivo de expansão eletrônico

Tabela 1. Características geométricas dos orifícios das válvulas

Válvula	Largura fixa [mm]	Comprimento máximo [mm]	Área máxima [mm ²]
1	0,22	0,120	0,0264
2	0,26	0,135	0,0351
3	0,32	0,135	0,0432

A metodologia de análise consiste inicialmente em medir a vazão de nitrogênio através de cada uma das válvulas utilizando uma bancada de testes específica, ilustrada na Fig. 3. Para tanto, abre-se o registro, libera-se o nitrogênio para o circuito, regula-se a pressão de entrada por meio de uma válvula micrométrica e mede-se a vazão mássica através de um medidor do tipo Coriolis. Dessa forma pode-se obter a vazão em função da fração de abertura da válvula e da pressão de entrada.

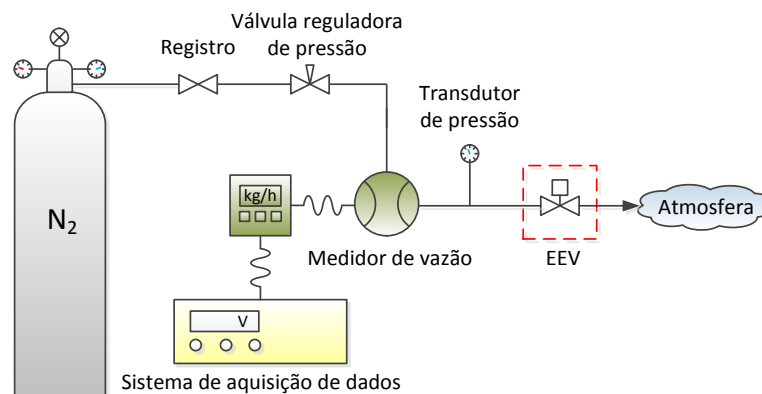


Figura 3. Bancada para medição da vazão de nitrogênio em dispositivos de expansão

Obtidos os valores de vazão, pode-se calcular a geometria dos tubos capilares equivalentes, ou seja, do tubo capilar que fornece a mesma vazão da válvula na mesma pressão de entrada. Para tanto, utiliza-se a Eq. (1), proposta originalmente por Kipp e Schmidt (1961) e aprimorada por Montibeller (2015). Como indicado, o diâmetro interno do tubo capilar (D) é uma função do comprimento (L), da pressão de entrada (P) e da vazão volumétrica (V).

$$D = \left(\frac{VL^{0,465}}{2,369\sqrt{P^2 - 1}} \right)^{1/2,574} \quad (1)$$

Em seguida, estima-se a vazão mássica de refrigerante com base no modelo matemático proposto por Hermes et al. (2010) e nas geometrias dos tubos capilares equivalentes. De acordo com esse modelo a vazão mássica pode ser estimada, de maneira explícita, através da Eq. (2), indicada a seguir:

$$\dot{m} = \left\{ \frac{\pi^{2-d} 2^{2d-3}}{c} \frac{D^{(5-d)}}{\mu_f^d L} \left[\frac{P_c - P_f}{v_f} + \frac{P_f - P_e}{a} + \frac{b}{a^2} \ln \left(\frac{aP_e + b}{aP_f + b} \right) \right] \right\}^{1/(2-d)} \quad (2)$$

onde $c = 0,14$, $d = 0,15$, $a = v_f(1-k)$, $b = v_f P_f k$ e $k = 1,63 \times 10^5 P_f^{-0,72}$. Os símbolos P_c , P_e , P_f , μ_f e v_f representam respectivamente as pressões de condensação, evaporação e *flash* e a viscosidade e o volume específico do líquido saturado na pressão de *flash*.

Finalmente, pode-se estimar a capacidade de refrigeração através da seguinte equação:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_1 - h_3) \quad (3)$$

onde h_1 e h_3 representam respectivamente a entalpia do refrigerante na pressão de evaporação e na temperatura de 32°C (ASHRAE 23, 2005) e a entalpia do líquido sub-resfriado na saída do condensador. Dessa forma, impondo pressões e graus de sub-resfriamento típicos pode-se delimitar o envelope de aplicação das válvulas.

3. RESULTADOS

As Figuras 4 a 6 mostram o comportamento da vazão volumétrica de nitrogênio com a fração de abertura e a pressão de entrada, para as três válvulas consideradas nesse trabalho. Nota-se que as válvulas 1 e 2 são praticamente insensíveis a frações de abertura inferiores a 30 %. A válvula 3, por outro lado, apresentou uma faixa de operação bem mais ampla, inclusive em frações de abertura inferiores a 30 %.

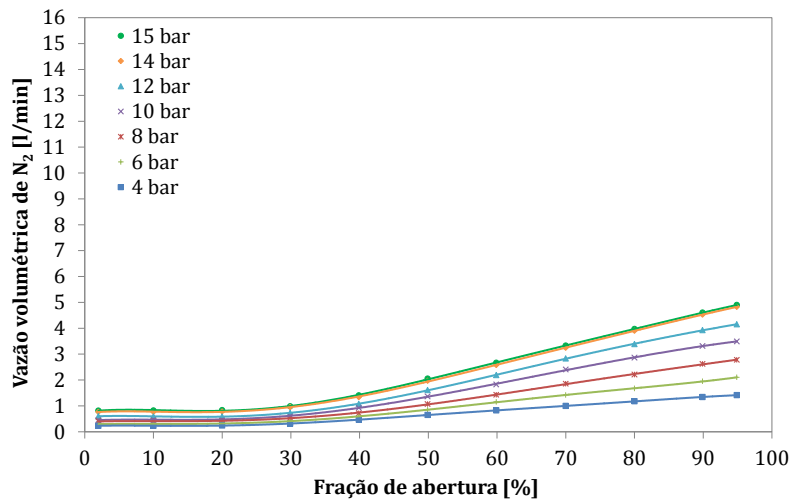


Figura 4. Vazão volumétrica em função da fração de abertura e da pressão de entrada: válvula 1

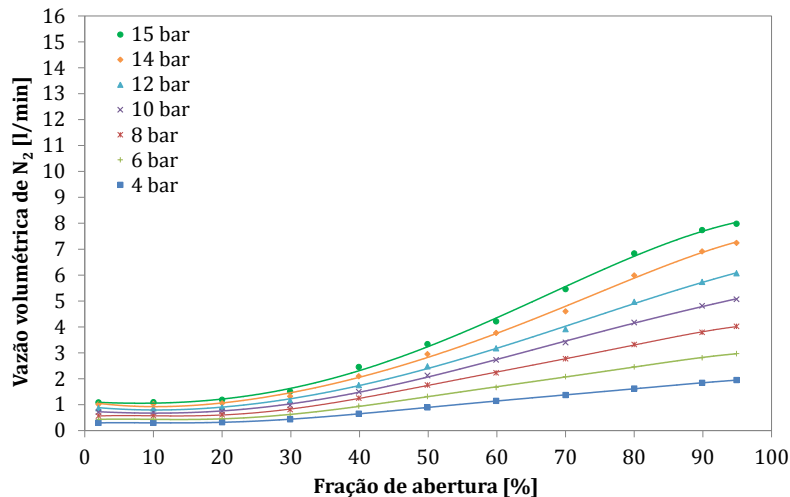


Figura 5. Vazão volumétrica em função da fração de abertura e da pressão de entrada: válvula 2

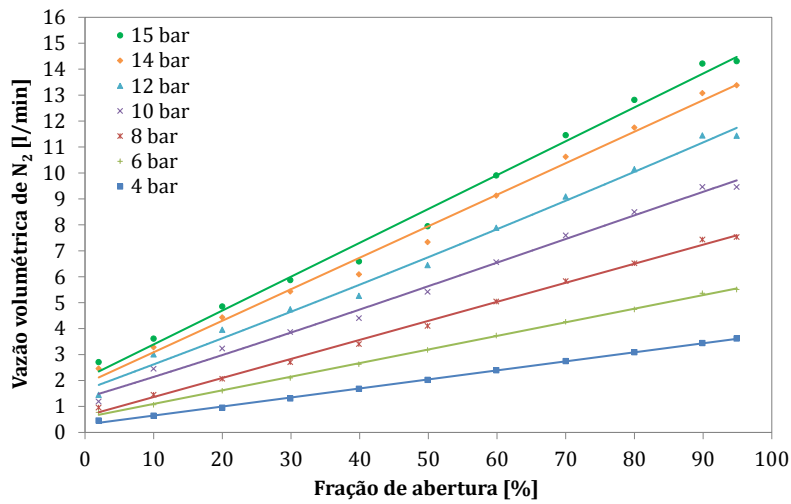


Figura 6. Vazão volumétrica em função da fração de abertura e da pressão de entrada: válvula 3

Com base nos resultados anteriores e na Eq. (1), calculou-se o diâmetro de capilar equivalente para três comprimentos distintos, 2, 3 e 4 m. As Figuras 7 a 12 mostram os resultados obtidos com cada uma das válvulas para as pressões de 4 e 15 bar.

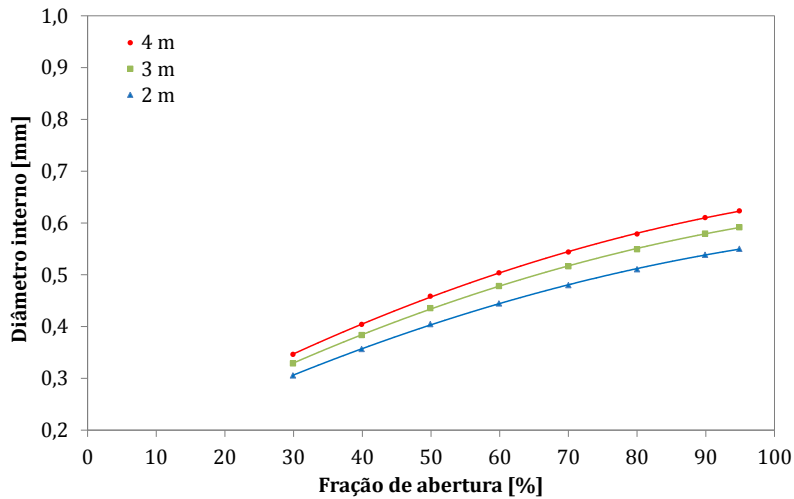


Figura 7. Tubos capilares equivalentes: válvula 1, pressão de entrada de 4 bar

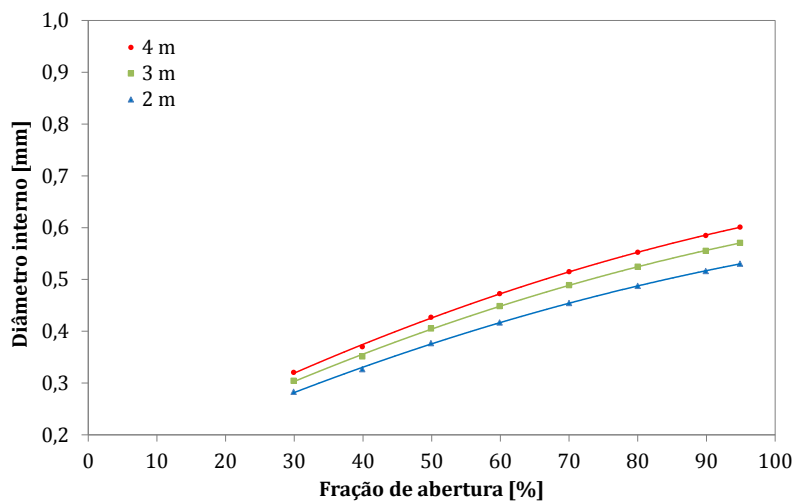


Figura 8. Tubos capilares equivalentes: válvula 1, pressão de entrada de 15 bar

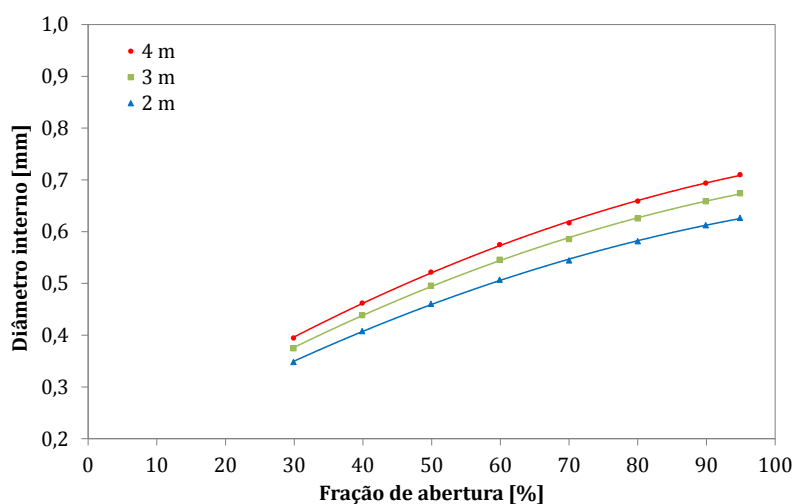


Figura 9. Tubos capilares equivalentes: válvula 2, pressão de entrada de 4 bar

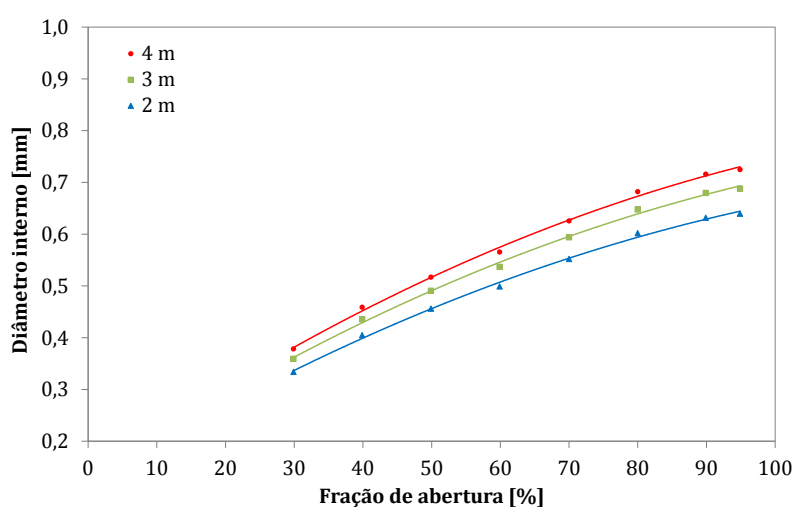


Figura 10. Tubos capilares equivalentes: válvula 2, pressão de entrada de 15 bar

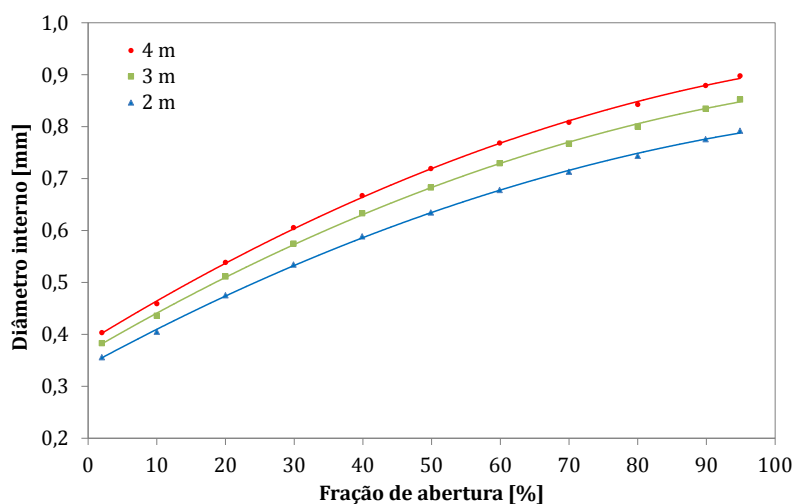


Figura 11. Tubos capilares equivalentes: válvula 3, pressão de entrada de 4 bar

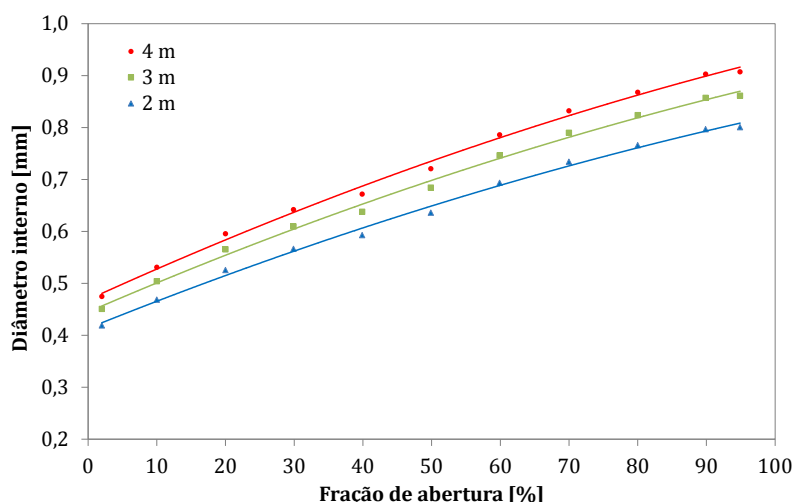


Figura 12. Tubos capilares equivalentes: válvula 3, pressão de entrada de 15 bar

Percebe-se que a válvula 1 corresponde a tubos capilares com diâmetros internos entre 0,3 a 0,6 mm. Tubos capilares com essa geometria são normalmente empregados em micro-sistemas de refrigeração (Lara, 2014) ou em aplicações que exigem baixas vazões mássicas e/ou baixas temperaturas de evaporação. Por exemplo, com uma pressão de entrada de 4 bar e fração de abertura de 90%, a válvula 1 produz uma vazão mássica equivalente a um capilar de 4 m e 0,6 mm. Percebe-se também que o comportamento da válvula 2 é similar ao da válvula 1, enquanto que a válvula 3 é equivalente a tubos capilares de até 0,9 mm, dependendo das condições de operação.

Com base nas geometrias dos capilares equivalentes e admitindo-se pressões de evaporação de 1 bar e condensação de 8 e 15 bar e um grau de sub-resfriamento de 2 °C, calculou-se a vazão mássica de HFC-134a e a capacidade de refrigeração correspondente, respectivamente através das Eq. (2) e (3). Os valores obtidos são mostrados nas Fig. 13 a 18.

Uma breve inspeção dos resultados mostra que a válvula 1 pode produzir capacidades de refrigeração relativamente baixas, entre 20 a 85 W, sendo atrativa para alguns refrigeradores domésticos disponíveis no mercado, especialmente para os mais eficientes. Observa-se ainda que a válvula 2 consegue produzir capacidades de refrigeração de até 150 W, quando a pressão de entrada é de 15 bar e a fração de abertura superior a 80%. Percebe-se também que a válvula 3 cobre a faixa de aplicação das válvulas 1 e 2, gerando capacidades de refrigeração entre 20 a 250 W, com frações de abertura entre 2 a 95%.

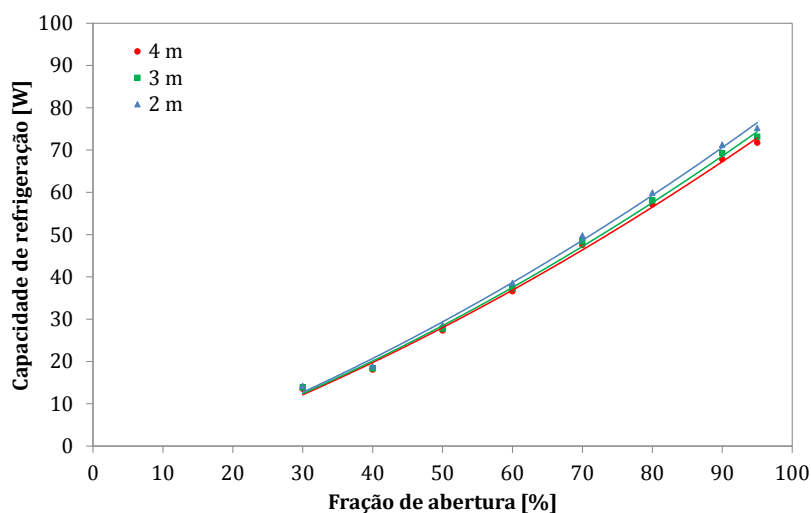


Figura 13. Capacidade de refrigeração: válvula 1, pressão de entrada de 8 bar

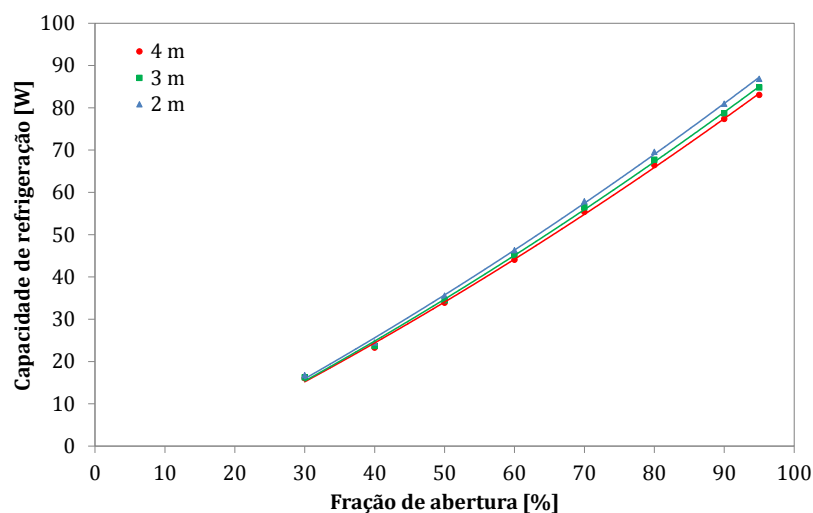


Figura 14. Capacidade de refrigeração: válvula 1, pressão de entrada de 15 bar

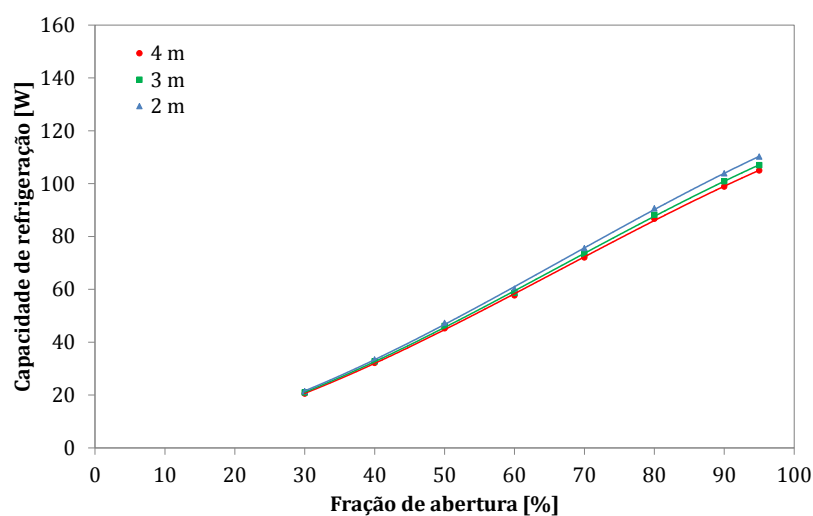


Figura 15. Capacidade de refrigeração: válvula 2, pressão de entrada de 8 bar

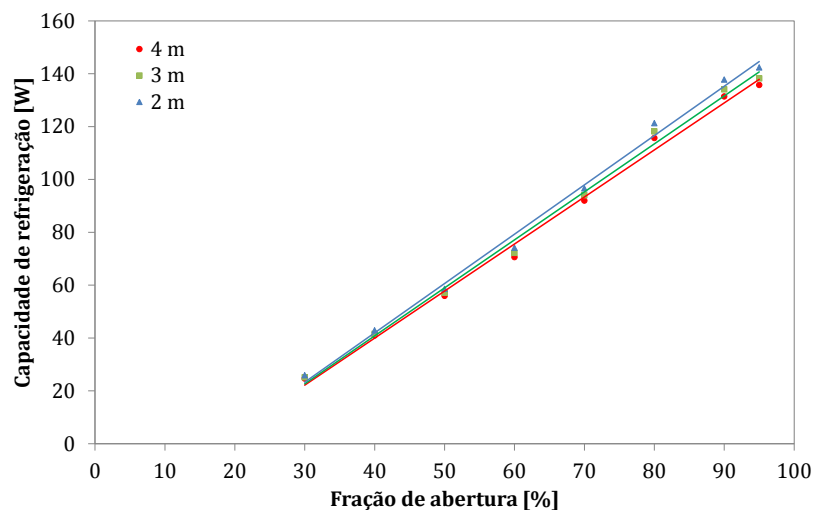


Figura 16. Capacidade de refrigeração: válvula 2, pressão de entrada de 15 bar

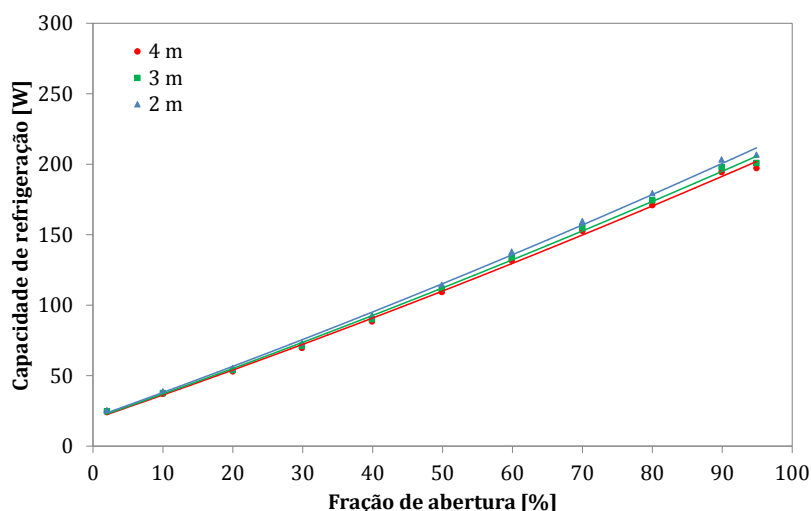


Figura 17. Capacidade de refrigeração: válvula 3, pressão de entrada de 8 bar

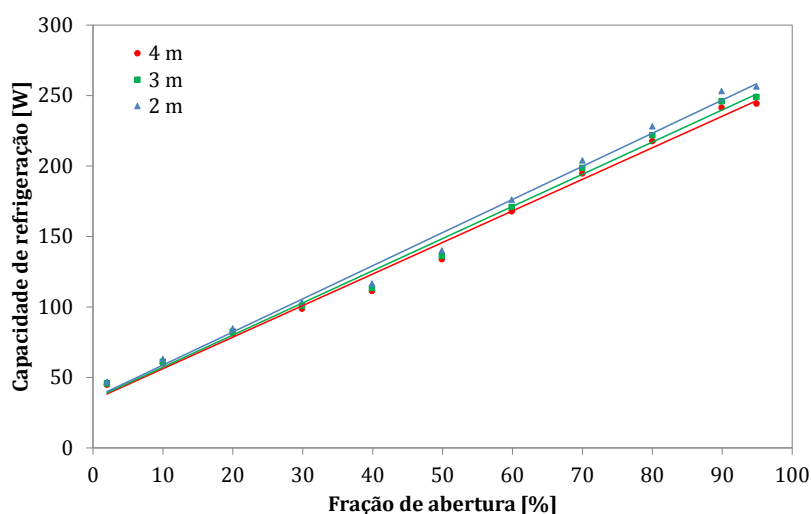


Figura 18. Capacidade de refrigeração: válvula 3, pressão de entrada de 15 bar

4. CONCLUSÕES

Nesse trabalho apresentou-se uma metodologia teórica e experimental para prever o desempenho de válvulas de expansão eletrônicas, visando o setor de refrigeração doméstica. Três válvulas de orifícios distintos foram submetidas a testes de vazão de nitrogênio e correlacionadas com tubos capilares de geometrias equivalentes. Mostrou-se que as válvulas 1 e 2, com orifícios de passagem pequeno e intermediário, podiam ser razoavelmente controladas a partir de frações de abertura de 30%. A válvula 3, de maior diâmetro, por outro lado, pôde ser controlada já a partir de frações de abertura de 2%. Mostrou-se também que a válvula 3 é equivalente a capilares com diâmetro interno entre 0,3 a 0,9 mm, dependendo das condições de operação. Mostrou-se ainda que a válvula 1 é capaz de produzir capacidades de refrigeração entre 20 e 85 W e que a válvula 2 produz capacidades de até 150 W, mas só em pressões e frações de abertura mais elevadas. A válvula 3 é a mais promissora para refrigeração doméstica, porque cobre uma larga faixa de capacidade de refrigeração, entre 20 a 250 W, e pode ser controlada a partir de frações de abertura de 2%. Testes em refrigeradores devem, no entanto, ser realizados para verificar o desempenho dos dispositivos de expansão considerados nesse trabalho em situações reais de operação.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no POLO – Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica da Universidade Federal de Santa Catarina, através do programa Embrapii (UE – Tecnologias Inovadoras de Refrigeração e Termofísica). Os autores agradecem a Embraco S.A. pelo suporte financeiro e ao Sr. Matheus Cé Machado pelo suporte dado durante os experimentos.

6. REFERÊNCIAS

- ANSI/ASHRAE 23, 2005, "Methods of testing for rating positive displacement refrigerant compressors and condensing units", Atlanta-GA, USA.
- Commission Directive 2003/66/EC, 2003, "Amending Directive 94/2/EC implementing Council Directive 92/75/EEC with regard to energy labeling of household electric refrigerators, freezers and their combinations", Official Journal of the European Union.
- Eames, I.W., Milazzo, A., Maidment, G.G., 2014, "Modelling thermostatic expansion valves", International Journal of Refrigeration, Vol. 38, pp.189-197.
- Hermes, C.J.L., Melo, C., Knabben, T.F., 2010, "Algebraic solution of capillary tube flows Part I: Adiabatic capillary tubes", Applied Thermal Engineering, Vol. 30(5), pp.449-457.
- IEC 62552, 2015, "Household refrigerating appliances – Characteristics and test methods", Geneva, Switzerland.
- Kipp, E., Schmidt, H., 1961, "Bemessung von Kapillarrohren als Drosselorgan für Kältesätze", Kältetechnik, 13 Jahrgang, Heft 2.
- Lara, J.F.P., 2014, "Análise teórico-experimental do escoamento de HFC-134a através de dispositivos de expansão para meso-sistemas de refrigeração", Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Montibeller, A.L., 2015, "Caracterização do desempenho de dispositivos de expansão de ação variável para sistemas domésticos de refrigeração", Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Park, C., Cho, H., Lee, Y., Kim, Y., 2007, "Mass flow characteristics and empirical modeling of R22 and R410A flowing through electronic expansion valves", International Journal of Refrigeration, Vol. 30(8), pp.1401-1407.
- Pöttker, G., 2006, "Análise do efeito combinado de compressores e expansores de ação variável sobre o desempenho de sistemas de refrigeração", Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- PROCEL INFO. Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética, disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp>>. Acesso em: 29 mai. 2015.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

A METHODOLOGY TO FORECAST THE PERFORMANCE OF ELECTRONIC EXPANSION VALVES FOCUSED IN HOUSEHOLD REFRIGERATION

André L. Montibeller, andre@polo.ufsc.br
 Fernando T. Knabben, fernandok@polo.ufsc.br
 Claudio Melo*, melo@polo.ufsc.br

POLO Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica, Universidade Federal de Santa Catarina
 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil, Tel: 55 48 3234 5691, *Corresponding author: melo@polo.ufsc.br

Abstract. Increasingly ambitious government policies are pushing the refrigeration sector industries towards more efficient products. The need for efficient refrigerators in a wide range of operating conditions has encouraged the development of variable action components, such as compressors and expansion devices. Within this context, a methodology for predicting the performance of electronic expansion devices focused in household refrigeration has been devised. To this end, three expansion valves with distinct orifice sizes were firstly tested in a nitrogen flow testing apparatus. The nitrogen flow values were then used to estimate the length and the inner diameter of equivalent capillary tubes. The HFC-134a mass flow rate and the corresponding cooling capacity were then mathematically predicted, based on the capillary geometries and on the use of an available in-house capillary flow model. It has been found that the small and intermediate size valves properly control the refrigerant flow, but only for opening fractions higher than 30%. It has also been found that the large size valve properly control the refrigerant flow from opening fractions of 2%. Moreover, it was observed that the large size valve is equivalent in terms of mass flow rate to capillary tubes ranging from 0.3 to 0.9 mm I.D., depending on the opening fraction. This translates into cooling capacities ranging from 20 and 250 W, which makes this valve suitable for household refrigeration applications.

Keywords: expansion valves, capillary tubes, domestic refrigeration, nitrogen flow