

Investigação da influência dos erros de medição de pressão na determinação do superaquecimento do refrigerante em sistemas frigoríficos por compressão de vapor.

Francisco Lucas Alves de Lima¹, Clodoaldo de Oliveira Carvalho Filho¹, Luiz Soares Júnior¹.

¹Universidade Federal do Ceará.

E-mail: fl.lucaslima@gmail.com; clodoaldo@ufc.br; lsj@ufc.br.

Resumo: Manômetros são usualmente empregados em sistemas frigoríficos para medir pressões do refrigerante em diferentes pontos desses sistemas. As pressões medidas e parâmetros calculados a partir dos resultados dessas medições são utilizados para inferir o desempenho do sistema frigorífico. Contudo, os erros de medição podem levar a conclusões equivocadas na instalação, operação e manutenção desses sistemas. Neste trabalho, foi realizada a avaliação numérica da influência dos erros de medição de pressão na determinação do grau de superaquecimento dos refrigerantes R134a e R717 na saída do evaporador de um sistema frigorífico por compressão de vapor, mostrando a necessidade da utilização de manômetros calibrados e de classe de exatidão adequada, uma vez que os erros de medição de pressão geraram variações no grau de superaquecimento superiores a 150%.

Palavras-chave: Pressão, Manômetro, Superaquecimento, Refrigeração.

Abstract: Pressure gauges are commonly used in refrigeration systems to measure the refrigerant pressure in different points of these systems. The measured pressures and parameters calculated with this data are used to infer the refrigeration system performance. However, measurement errors can lead to wrong conclusions in installation, operation and maintenance of these systems. In this paper, a numerical evaluation of these errors influence, in the determination of superheating of the refrigerants R134a and R717, is made in the outlet of the evaporator of a vapor compressor refrigeration system, showing the need to use calibrate and accurate pressure gauges, once measurement errors can produce variations in refrigerant superheating over 150%.

Keywords: *Pressure, Gauge, Superheating, Refrigeration.*

1. INTRODUÇÃO

Medições de pressão são realizadas na instalação, operação e manutenção de sistemas frigoríficos por compressão de vapor, seja na evacuação e carga de gás refrigerante no sistema, na regulagem da válvula de expansão termostática em sistemas dotados deste componente etc. São empregados usualmente manômetros de elemento elástico de classe de exatidão B, de acordo com a norma

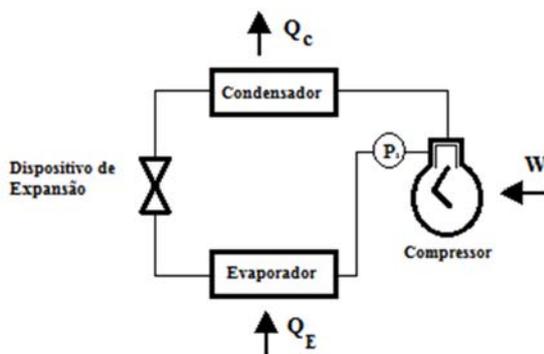
ABNT NBR 14105-1:2013, ou transdutores de pressão piezoelétricos.

Um sistema frigorífico por compressão de vapor e expansão direta típico consiste de: compressor, evaporador, condensador, dispositivo de expansão ou estrangulamento, linhas de conexão, medidores e um fluido de trabalho (refrigerante), conforme mostrado na Figura 1. Com o sistema em funcionamento, o refrigerante líquido na maior

parte retira o calor do meio refrigerado e evapora (expansão direta) a baixa temperatura e pressão. Para assegurar que a toda a capacidade frigorífica seja aproveitada de forma útil, e proteger o compressor da entrada de refrigerante líquido, o vapor de refrigerante deve superaquecer ainda no evaporador, e na linha de sucção do compressor. A pressão do vapor é elevada no compressor até a pressão de condensação, com conseqüente aumento de temperatura. O vapor superaquecido passa ao condensador, para rejeitar calor para o meio externo, e voltar à fase líquida. O ciclo termodinâmico é completado com a redução de pressão e temperatura do refrigerante, e seu retorno ao evaporador.

Nos sistemas dotados de válvula de expansão termostática, essa válvula controla a alimentação de refrigerante para o evaporador, em função do superaquecimento do refrigerante na saída do evaporador. Nestes sistemas, o superaquecimento costuma ser da ordem de 5 K ou mais (Hundy *et al.*, 2008).

Figura 1. Representação esquemática de um Sistema Frigorífico de Compressão de Vapor.



Fonte: Próprio autor

A determinação do superaquecimento do refrigerante na linha de sucção do compressor requer as medições da temperatura do refrigerante θ_1 e da sua temperatura de orvalho θ_0 , determinada pela substância do refrigerante e pela pressão P_1 em que se encontra. Dado o refrigerante, a determinação da temperatura θ_0 requer a medição da pressão P_1 .

Em geral os manômetros (montados manifolds portáteis) empregados na instalação e manutenção de sistemas frigoríficos são raramente calibrados. Tipicamente são medidores analógicos pressão com elemento elástico tipo Bourdon de classe de exatidão A ou B, conforme a norma ABNT 14105-1:2013.

Nesses sistemas, erros na medição de pressão podem acarretar conseqüências indesejáveis, como a subalimentação ou o excesso de refrigerante no evaporador, devido à regulagem da válvula de expansão termostática, com conseqüente redução do coeficiente de desempenho (COP) do sistema e risco de admissão de refrigerante líquido no compressor. Esses inconvenientes podem ser minimizados com o emprego de instrumentos de classe de exatidão adequada, calibrados em laboratórios de reconhecida competência técnica.

Este trabalho objetiva quantificar numericamente o desvio na determinação da temperatura de orvalho do refrigerante devido ao erro de medição de pressão do fluido na linha de sucção do compressor, em valores comparáveis aos observados em manômetros calibrados em laboratório, e avaliar a influência desse desvio sobre a determinação do superaquecimento do refrigerante na saída do evaporador de sistemas frigoríficos por compressão de vapor e expansão direta, com os refrigerantes R134a e R717 (amônia), amplamente empregados no mercado.

2. MODELO MATEMÁTICO

O grau de superaquecimento do refrigerante $\Delta\theta_{\text{sup}}$ nos sistemas frigoríficos considerados pode ser definido como a diferença entre a temperatura do refrigerante medida na sucção do compressor (θ_1) e a temperatura de orvalho (θ_0) do fluido na pressão na saída do evaporador. Exceto nos sistemas com linhas de gás muito longas, a queda de pressão nestas linhas costuma ser pequena quando comparada à magnitude da pressão no evaporador, que pode ser aproximada pela pressão de sucção (P_1) do compressor.

$$\Delta\theta_{\text{sup}} = \theta_1 - \theta_0(P_1) \quad (1)$$

A temperatura de orvalho varia com a pressão, em função da substância do refrigerante. Essa variação é representada pela curva de saturação $\theta(P)$ do refrigerante, expressada como:

$$\theta_0(P) = aP^2 + bP + c \quad (2)$$

onde a , b e c são os coeficientes polinomiais da curva de saturação.

O desvio ϵ_{θ_0} da temperatura θ_0 devido ao erro de medição ϵ_{P_1} da pressão P_1 pode, portanto, ser quantificado como:

$$\epsilon_{\theta_0} = \theta_0(P_1 - \epsilon_{P_1}) - \theta_0(P_1) \quad (3)$$

e expressado percentualmente como $|\epsilon_{\theta_0}/\theta_0| \cdot 100\%$

3. ESTUDO DE CASO

Para avaliar a influência do erro ϵ_{P_1} sobre a determinação do grau de superaquecimento do refrigerante $\Delta\theta_{\text{sup}}(1)$, os desvios ϵ_{θ_0} (3) foram quantificados para os refrigerantes considerados nas condições típicas de operação (Hundy *et al.*, 2008) indicadas na Tabela 1.

Tabela 1. Faixa de temperatura de aplicação dos refrigerantes R134a e R717

Refrigerante	Faixa de aplicação	Temperaturas
R134a	média e alta	-25°C a 10°C
R717	baixa, média e alta	-40°C a 10°C

Fonte: Adaptado de Hundy *et al.* (2008)

As curvas de saturação dos refrigerantes foram obtidas com auxílio de rotinas computacionais da biblioteca de propriedades termofísicas CoolProp®. Mais detalhes das rotinas e da equação de estado que descreve essas curvas são encontrados em Bell *et al.* (2014).

Na simulação numérica, a faixa de ϵ_{P_1} variou de 1 a 3% da amplitude do intervalo de medição dos manômetros de sistemas frigoríficos, classes A e B (NBR 14105-1:2013), calibrados em laboratório

acreditado (Tabela 2). Cabe destacar que o valor máximo de ϵ_{P_1} considera o erro sistemático acrescido da sua incerteza associada.

Tabela 2. Dados dos Manômetros calibrados

Manômetro (NBR 14105-1)	Faixa nominal (bar)	Erro máximo (%)	Incerteza Expandida de medição (%)
Classe B	0 – 10	1,4	1,0
Classe A	0 – 10	1,9	1,0
Classe B	0 – 10	1,8	1,0
Classe B	0 – 10	1,1	1,0

1 bar = 0,1 MPa

De acordo com os resultados de calibração, o manômetro classe A foi reprovado com erro superior ao tolerado para classe ($\leq 1,6\%$), e os da classe B aprovados com erros inferiores a 2%.

Os erros de medição de temperatura θ_1 são normalmente da ordem de 10^0 - 10^1 °C (DAIKIN, 2011) e podem influenciar significativamente o desvio no grau de superaquecimento determinado. Essa influência não avaliada, entretanto, por estar além dos objetivos deste trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de saturação dos refrigerantes R134a e R717 são apresentadas na Figura 2, com as respectivas expressões polinomiais $\theta(P)$ ajustadas e os coeficientes de determinação R^2 correspondentes. As curvas de saturação indicam que a sensibilidade da temperatura de orvalho com a pressão para os refrigerantes considerados é maior nas pressões mais baixas.

Os desvios ϵ_{θ_0} calculados para o R134a e o R717 foram da ordem de 10^{-1} a 10^1 °C nas condições consideradas, comparáveis à ordem de grandeza dos erros de medição de θ_1 . Os valores percentuais dos desvios ϵ_{θ_0} para o R134a e o R717 são apresentados nas Figuras 3(a) e 3(b), respectivamente. De acordo com as Figuras 3(a) e 3(b), os desvios percentuais da temperatura de orvalho aumentam significativamente na faixa de temperaturas de orvalho entre -5°C e 5°C, para os

dois refrigerantes, superando 150%. As variações observadas são mais acentuadas para erros de medição de pressão maiores e não são simétricas em relação a 0°C. Nas temperaturas de orvalho abaixo de 0°C, os desvios tendem a estabilizar dentro da faixa considerada.

Figura 2. Curvas de saturação para os refrigerantes R134a e R717.

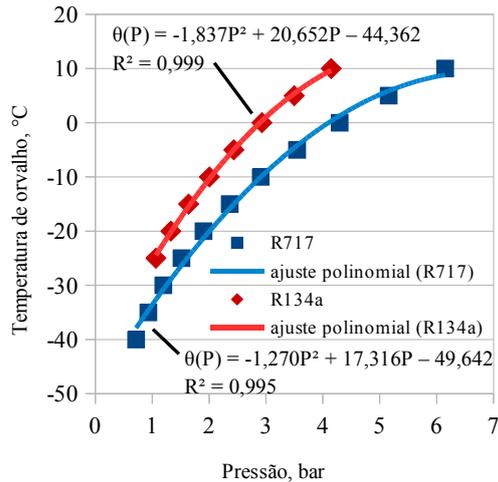
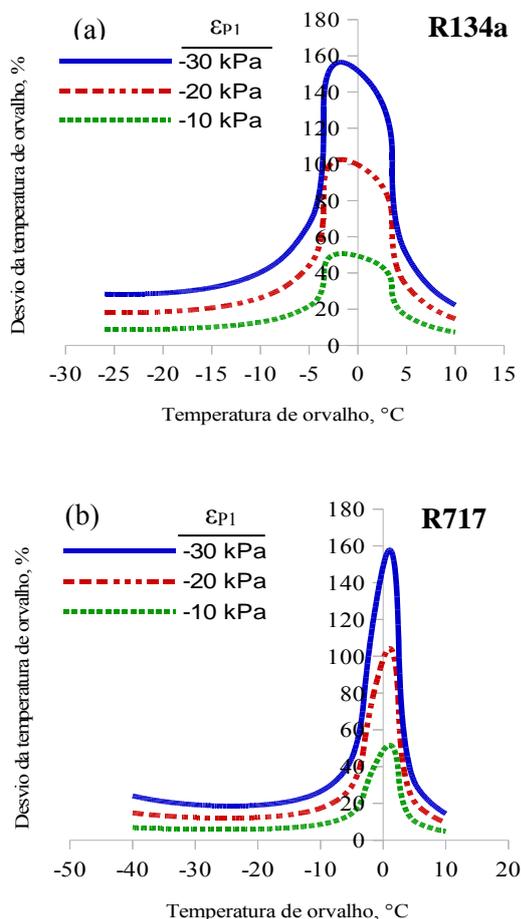


Figura 3. Desvios percentuais da temperatura de orvalho dos refrigerantes (a) R134a e (b) R717 para diferentes erros de medição de pressão.



5. CONCLUSÃO

A partir da análise apresentada pode-se prever e corrigir os desvios de temperatura de orvalho gerados a partir dos erros de medição de pressão. Nota-se que a ordem de grandeza destes desvios de temperatura é comparável aos desvios causados pelos erros de medição de temperatura na linha de sucção do compressor. Os desvios percentuais da temperatura de orvalho, superiores a 150%, não são aceitáveis e devem ensejar uma discussão sobre a adequação dos manômetros utilizados neste tipo de aplicação, em relação a sua classe e condições de uso, uma vez que a magnitude desses erros pode induzir decisões equivocadas na instalação, operação e manutenção destes sistemas. Não obstante, o modelo numérico apresentado requer validação prática, haja vista que os efeitos, desencadeados pelos erros de medição de pressão variem em função do refrigerante utilizado e da faixa de aplicação deste. Ademais, os erros relacionados à medição de temperatura na linha de sucção do compressor também devem ser levados em conta, uma vez que estes podem compensar ou somar-se aos desvios apresentados neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ABNT, 2013. NBR 14105. Medidores de Pressão. Parte 1: Medidores analógicos de pressão com sensor de elemento elástico – Requisitos de fabricação, classificação, ensaios e utilização. Rio de Janeiro;
- [2] Bell, I.H., Wronski, J., Quoilin, S., Lemort, V., 2014 “Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp”. Ind. Eng. Chem. Res., 53 (6), pp 2498–2508 (DOI: 10.1021/ie4033999);
- [3] DAIKIN, 2011. “Refrigerant Piping Design Guide”. AG 31-011. Daikin Air conditioning Portugal S.A. Disponível em: <http://lit.daikinapplied.com/bizlit/DocumentStorage/AirCooledChiller/ApplicationGuides/AG_31-011_120407_1.pdf>. Acessado em: 12-abr-2016
- [4] Hundy, G.F., Trott, A.R. and Welch, T.C., 2008. “Refrigeration and Air Conditioning”. 4th ed. Butterworth-Heinemann, Oxford. pp 74 – 348;