

ANÁLISE COMPARATIVA DOS DESEMPENHOS DE VÁLVULA DE EXPANSÃO TERMOSTÁTICA E VÁLVULA DE EXPANSÃO ELETRÔNICA EM UMA MÁQUINA FRIGORÍFICA.

Geraldo Augusto Campolina França

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus Universitário
31270-901 – Belo Horizonte-MG.
E-mail: franca@demec.ufmg.br

Luiz Machado

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus Universitário
31270-901 – Belo Horizonte - MG
E-mail: luizm@demec.ufmg.br

Ralney Nogueira de Faria

UNIVERSIDADE DE ITAÚNA – Faculdade de Engenharia Mecânica
Rodovia MG 431 – km 45 – Caixa Postal 100
35680-142 – Itáúna-MG.
E-mail: ralney@uit.br

Resumo. Válvulas de expansão termostáticas e tubos capilares são dispositivos usuais no controle e otimização da expansão do fluido refrigerante em sistemas de compressão a vapor. Na busca pelo aumento da eficiência energética, novos dispositivos e estratégias de controle estão sendo desenvolvidos. Válvulas de expansão eletrônicas apresentam-se como uma promissora alternativa na substituição de válvulas termostáticas e tubos capilares. Seu emprego pode resultar em redução significativa de consumo de energia e de custos de manutenção, principalmente quando o controle da capacidade de refrigeração é auxiliado por um compressor com rotação variável. O sucesso no emprego de válvulas de expansão eletrônica depende essencialmente do conhecimento do comportamento dinâmico dos diversos componentes que compõem a malha de controle do sistema eletrônico. Neste trabalho, desenvolveu-se uma análise teórica e experimental comparativa dos desempenhos de uma válvula de expansão termostática e de uma válvula de expansão eletrônica operando sob condições de carga térmica variável no evaporador. Para isto, variações na carga térmica foram efetuadas em uma máquina frigorífica água-água e a resposta do grau de superaquecimento observada. A partir dos resultados experimentais, foi analisada a influência dos diversos componentes da malha de controle sobre o controle do grau de superaquecimento. Os dois métodos de sintonia de controladores investigados, Ziegler-Nichols e Bekker, levaram praticamente aos mesmos valores dos parâmetros de ajuste de um controlador PI. Os testes experimentais foram desenvolvidos no Laboratório de Refrigeração do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG.

Palavras chave: *Válvula de expansão, Carga térmica variável, Grau de superaquecimento, máquina frigorífica.*

1. INTRODUÇÃO

Estudos visando a redução do consumo de energia e o aumento da eficiência em sistemas de refrigeração são de extrema importância para o setor energético nacional, uma vez que esses sistemas representam uma parcela significativa no consumo.

Atualmente, grande parte dos sistemas de refrigeração controlam a temperatura do meio refrigerado através da partida e parada do compressor (on-off). O controle realizado desta forma não é o mais adequado, uma vez que esta técnica de controle penaliza o sistema com perdas de energia significativas em virtude dos transientes de partida e de parada do compressor, resultando num maior consumo de energia elétrica.

Trabalhos teóricos e experimentais em refrigeração têm comprovado que a operação contínua de uma máquina frigorífica apresenta aspectos bastante positivos em relação à operação descontínua (on-off). Entre eles podem ser citados, a economia considerável de energia elétrica e o menor desgaste eletro-mecânico do compressor e componentes.

A operação contínua de uma máquina frigorífica pode ser obtida por variações simultâneas na rotação do compressor e na abertura da válvula de expansão de modo a ajustar a operação da máquina a uma nova condição de carga térmica no evaporador.

Os dispositivos de expansão exercem um papel fundamental no controle e otimização do evaporador principalmente quando o mesmo opera em condições transientes e de carga térmica variável.

Neste artigo compara-se o desempenho de uma máquina frigorífica água-água operando com controles termostático e eletrônico de potência térmica visando, de um modo específico, aos seguintes objetivos:

- Identificar e quantificar variações em valores de parâmetros de processo importantes para o bom funcionamento da máquina frigorífica;
- Avaliar a influência e o comportamento da válvula termostática e eletrônica no controle do grau de superaquecimento quando o evaporador opera com carga térmica variável;
- Estabelecer um limite inferior de potência frigorífica abaixo do qual a viabilidade econômica de substituição da válvula de expansão termostática por uma eletrônica pode ficar comprometida.

Como técnicas de sintonia para o controlador do sistema eletrônico de potência foram selecionados o tradicional método de Ziegler-Nichols e o método de Bekker et al. cuja técnica foi especialmente desenvolvida para aplicações HVAC.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Dispositivo experimental

O banco de ensaios do laboratório de refrigeração do DEMEC/UFMG consiste de um sistema de refrigeração e aquecimento por compressão a vapor e de um sistema de medição e aquisição de dados.

O sistema opera com fluido R134a como fluido primário e, como fluido secundário, água pura no evaporador e no condensador. O banco de ensaios opera com uma potência frigorífica máxima de 3 kW e é composto basicamente pelos seguintes elementos: compressor alternativo, condensador, sub-resfriador, evaporador e três válvulas de expansão, sistema de aquisição e medição que permitem realizar medidas de temperatura, pressão e vazão.

O banco de ensaios apresenta três válvulas de expansão montadas em paralelo e acompanhadas por uma válvula de fechamento de forma a permitir a operação individual dos componentes.

A válvula de expansão manual é do tipo agulha, sendo que a quantidade de líquido refrigerante que passa através do orifício da válvula depende da abertura que é ajustável manualmente.

A válvula de expansão termostática utilizada no banco de ensaios é da marca Danfoss, modelo TEN2 com equalização externa, orifício nº 1 e capacidade de refrigeração de 1,86 kW para uma perda de carga (ΔP) de 4 bar e temperatura de evaporação de 10°C.

A válvula de expansão utilizada no sistema de controle eletrônico é da marca Danfoss, modelo TQ-5 com equalização externa, orifício nº 1 e capacidade nominal de 10,8 kW.

2.2 Metodologia para avaliação do desempenho da válvula de expansão e termostática

Para analisar o desempenho das válvulas termostática e eletrônica juntamente com os métodos de sintonia propostos para o controlador, essas foram submetidas a uma série de testes experimentais. Os testes consistiam em perturbar o evaporador através da variação da carga térmica do fluido secundário conforme a descrição a seguir.

Inicialmente, as válvulas termostática e eletrônica foram ajustadas para operar com um grau de superaquecimento de 7°C, temperatura de condensação 50°C e a uma temperatura de ebulição de 0°C correspondente a uma carga térmica intermediária de 2300 W. Devido às limitações de ajuste do controlador, o ganho proporcional e tempo integral foram ajustados para $K_p=1,75$ e $T_i=30$ s para o método de Ziegler-Nichols e $K_p=1$ e $T_i=30$ s para o método de Bekker et al.

Com o sistema operando em regime permanente, variações na carga térmica eram efetuadas e a resposta do grau de superaquecimento observada. As variações na carga térmica foram obtidas através do uso de um variômetro que permitia variar a tensão de saída de 0 a 240 volts para a resistência elétrica. Para a realização dos ensaios, as variações na carga térmica foram definidas para valores correspondentes a 1500, 1900, 2300 e 2800 W. Esses valores foram definidos com base nos limites operacionais obtidos através da caracterização em regime permanente da válvula termostática e eletrônica.

Os dispositivos de expansão foram submetidos a dois tipos de testes específicos conforme o modo como as variações na carga térmica eram aplicadas ao sistema.

No primeiro teste, o sistema era ajustado para operar com uma carga térmica baixa (1500 W) e, quando o mesmo alcançava o regime permanente, iniciava-se a gravação dos dados. A cada 20 minutos de operação aplicava-se um degrau na carga térmica sucessivamente até que o sistema atingisse a carga máxima de 2800 W conforme pode ser observado na Fig. 1.

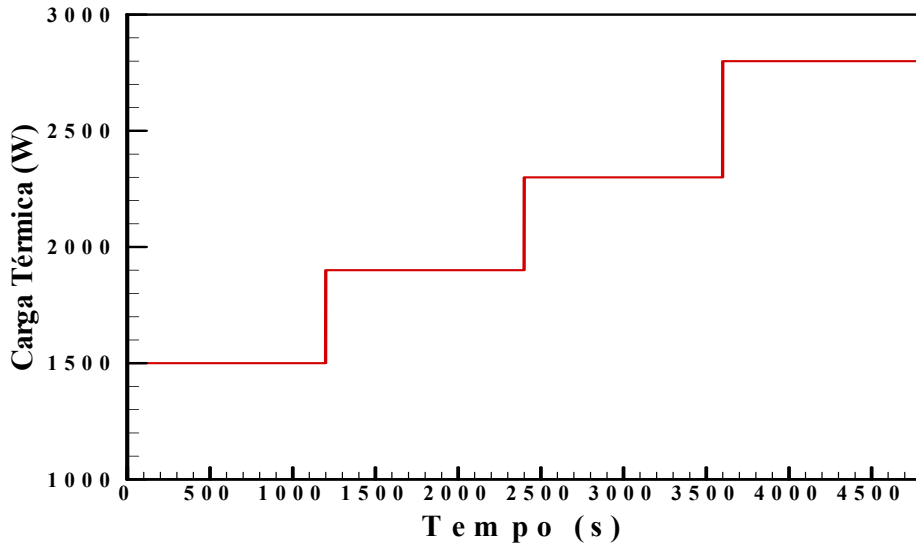


Figura 1. Representação da variação da carga térmica aplicada através do aumento gradual no sistema.

No segundo teste, o sistema foi ajustado para operar com carga térmica máxima (2800 W) e sucessivas reduções na carga térmica foram efetuadas através da aplicação de degraus em intervalos de 20 minutos até que o sistema alcançasse a carga térmica mais baixa correspondente a 1500 W (Fig.2).

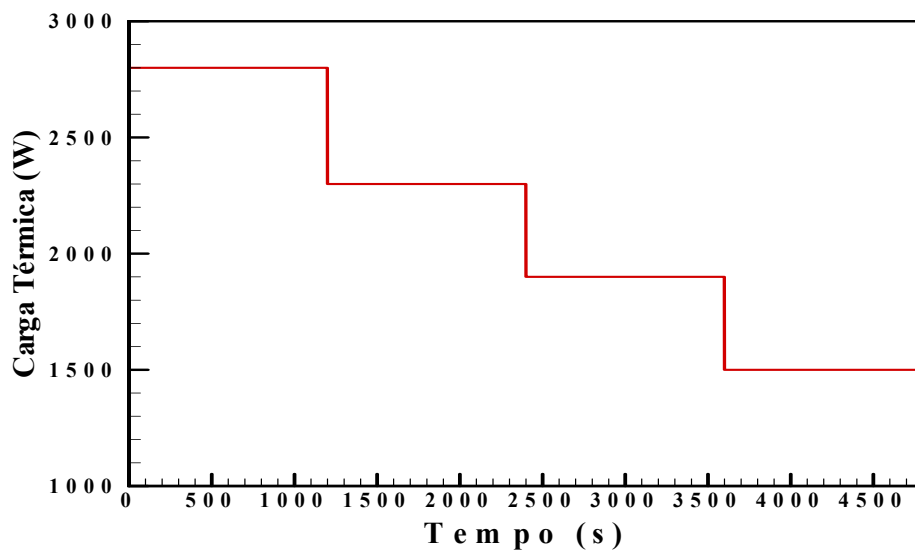


Figura 2. Representação da variação da carga térmica aplicada através da redução gradual no sistema.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise do desempenho da válvula de expansão eletrônica e termostática

A partir da identificação dos parâmetros de controle para os métodos de sintonia propostos, as válvulas termostática e eletrônica foram submetidas a testes para avaliar o desempenho de ambas em condições de carga térmica variável conforme a metodologia descrita.

3.1.1 Válvula de expansão termostática

O controle preciso do grau de superaquecimento realizado por válvulas de expansão termostática depende da maneira como estas fornecem a vazão e o título do fluido refrigerante para o evaporador, onde se completa a sua vaporização.

Vários fatores podem afetar o comportamento da válvula no controle do grau de superaquecimento como a diferença de pressão através da válvula correspondente à diferença entre as pressões de condensação e de ebulição, sub-resfriamento do fluido refrigerante, massa específica do fluido na entrada da válvula, super ou subdimensionamento da válvula e variações da carga térmica no evaporador.

A vazão mássica, que define a capacidade da válvula, pode ser estimada conforme a Eq. (1) abaixo:

$$\dot{m}_f = C_v \cdot A_v \cdot \sqrt{\rho \cdot (P_{cond} - P_e)} \quad (1)$$

onde: \dot{m}_f = Vazão mássica de fluido refrigerante;
 C_v = Coeficiente de vazão;
 A_v = Porcentagem de abertura da válvula;
 P_{cond} = Pressão de condensação;
 P_e = Pressão de ebulição;
 ρ = massa específica do fluido na entrada da válvula.

Uma análise da Eq. (1) mostra que, para uma determinada válvula, a vazão poderia ser continuamente aumentada simplesmente pelo aumento da pressão diferencial na válvula. Na realidade, a Eq. (1) só pode ser usada para uma faixa limitada de vazão. Observando a Fig. 3, nota-se que com o aumento da pressão diferencial atingem-se condições em que o aumento da vazão mássica é menor do que o esperado. Esse fenômeno continua até que não haja qualquer aumento da vazão, apesar do aumento da pressão diferencial. Essa condição de limitação da vazão é conhecida como escoamento bloqueado.

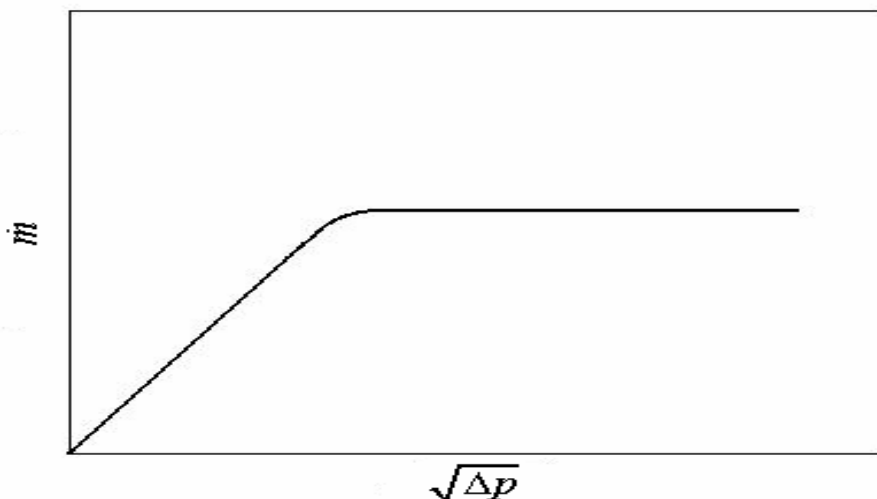


Figura 3. Curva típica de vazão versus pressão diferencial numa válvula de expansão.
 FONTE – RIVELAND., 1985. p. 5.

Analisando as Fig. 4 e 5, observa-se que o superaquecimento diminui à medida que a carga térmica é reduzida para valores de 1900 e 1500 W em relação ao ponto inicial de ajuste de 2300 W, e aumenta para cargas térmicas superiores.

O grau de superaquecimento foi obtido através da diferença de temperatura entre os termopares instalados na entrada e na saída do evaporador.

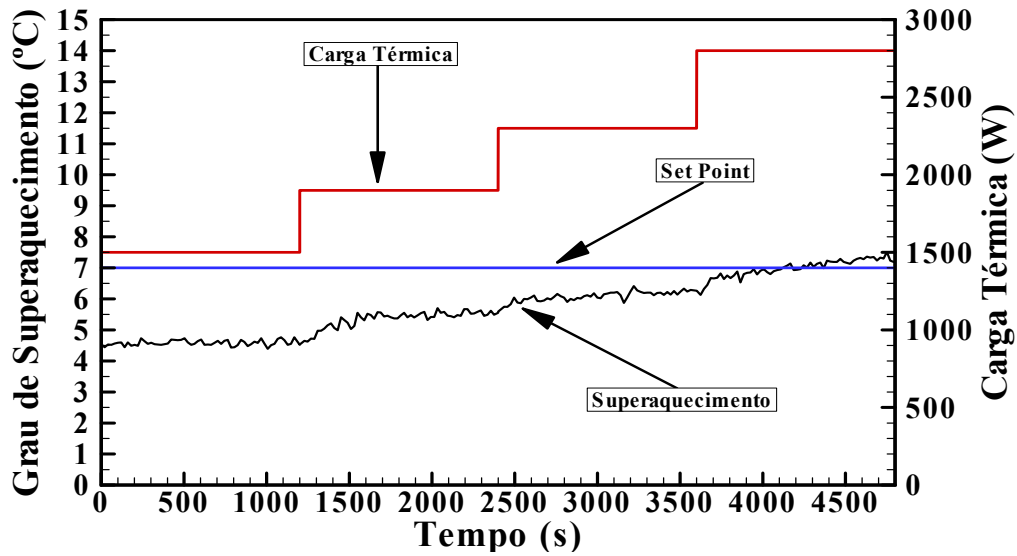


Figura 4. Evolução do grau de superaquecimento para a válvula de expansão termostática com o aumento gradual da carga térmica no evaporador.

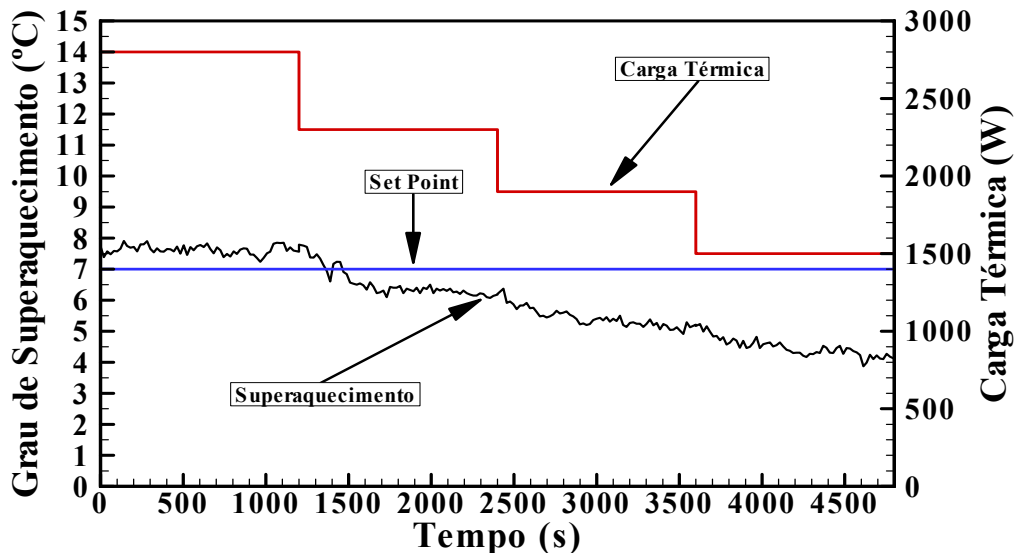


Figura 5. Evolução do grau de superaquecimento para a válvula de expansão termostática com a redução gradual da carga térmica no evaporador.

Através da análise da capacidade de vazão e da queda de pressão na válvula em função das cargas térmicas no evaporador, pode-se justificar as variações ocorridas com o superaquecimento. A Tabela 1 e a Figura 6 apresentam a capacidade da válvula em função da temperatura de evaporação e da queda de pressão através da válvula. Os valores obtidos para as temperaturas de evaporação -3 e 7°C foram interpolados através da utilização da função *interp2* do Matlab cuja função de interpolação utiliza um polinômio linear para análise comparativa com os dados obtidos com a aplicação das cargas térmicas no evaporador.

Tabela 1. Capacidade em kW para válvula de expansão termostática TEN2 orifício nº1.

Queda de pressão através da válvula (bar)	Temperatura de Evaporação -10°C	Temperatura de Evaporação Interpolada -3°C	Temperatura de Evaporação 0°C	Temperatura de Evaporação Interpolada 7°C	Temperatura de Evaporação 10°C
2	1,01	1,18	1,25	1,43	1,50
4	1,25	1,46	1,55	1,77	1,86
6	1,39	1,61	1,71	1,95	2,05
8	1,46	1,7	1,80	2,05	2,15
10	1,49	1,73	1,83	2,08	2,19

FONTE – DANFOSS FOLHETO TÉCNICO RK.0X.A5.28, 2002. p. 12.

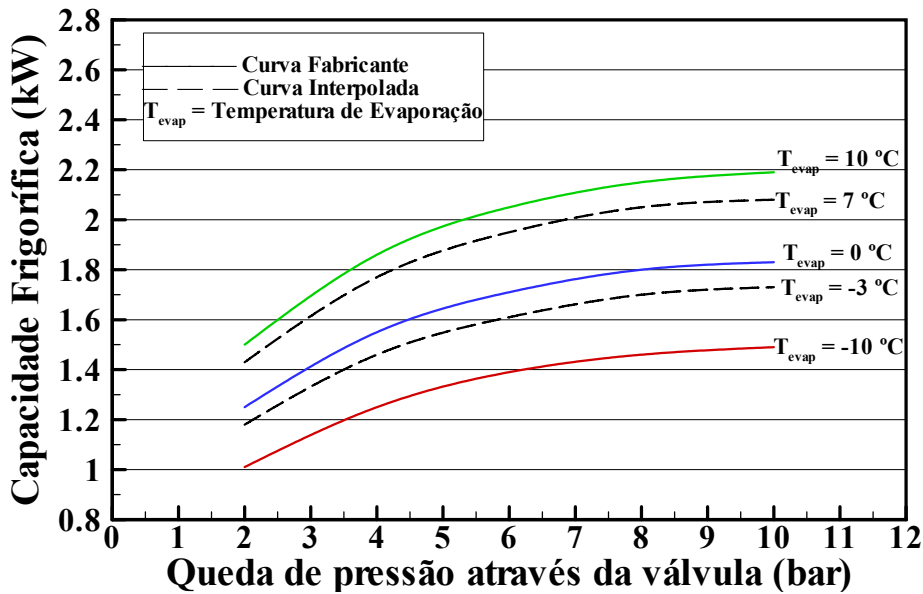


Figura 6. Capacidade em kW para uma determinada diferença de pressão através da válvula TEN2 orifício nº 1.

FONTE – DANFOSS FOLHETO TÉCNICO RK.0X.A5.28, 2002. p. 12.

A Tabela 2 fornece a diferença de pressão através da válvula e a temperatura de evaporação em função da carga térmica aplicada.

Tabela 2. Diferença de pressão e temperatura de evaporação através da válvula de expansão termostática TEN2 orifício nº 1 em função do aumento gradual da carga térmica.

Carga Térmica (W)	1500	1900	2300	2800
Temperatura de Evaporação (°C)	-3,3	0,80	3	7
Queda de pressão através da válvula (bar)	12,17	12,52	13,31	14,35

A redução do grau de superaquecimento como consequência da redução da carga térmica se deve ao modo como a válvula termostática responde às solicitações de cargas térmicas reduzidas.

Válvulas termostáticas não apresentam características de antecipação e compensação, ou seja, não são capazes de responder instantaneamente a variações térmicas no evaporador e impedir variações em torno do ponto de controle. Isso significa que sempre haverá um tempo de atraso entre a demanda e a resposta da válvula.

Admitindo que haja um aumento na temperatura do gás na sucção em decorrência do aumento do grau de superaquecimento, o intervalo de tempo entre o instante em que o bulbo detecta o aumento no superaquecimento e

provoca a abertura da válvula faz com que o superaquecimento aumente ainda mais. Em resposta ao aumento do superaquecimento durante o tempo de atraso, o obturador da válvula move-se com maior intensidade na direção da abertura fazendo com que o evaporador receba mais fluido refrigerante que o necessário para a carga térmica estabelecida. Com o aumento da vazão de fluido refrigerante o superaquecimento diminui fazendo com que a válvula responda no sentido de fechamento, porém entre a detecção do bulbo e o fechamento da válvula existe o atraso fazendo com que a válvula continue a alimentar o evaporador. A tendência na variação da vazão do fluido frigorífico torna-se mais crítica quanto menor for o grau de superaquecimento ajustado e menor a carga térmica no evaporador. Aliado ao fato acima, pode-se verificar que a capacidade da válvula para a carga térmica de 1500 W, temperatura de ebulição – 3,3°C e queda de pressão de 12,17 bar corresponde a 1730 W evidenciando assim a tendência ao aumento da carga de fluido frigorífico no evaporador.

Em relação ao aumento do superaquecimento para a carga térmica de 2800 W, é possível observar que a válvula nessa condição apresenta uma capacidade da ordem de 2080 W em função da queda de pressão através da mesma. Uma vez que essa carga térmica necessita de uma válvula com maior capacidade para manter o superaquecimento de 7°C, a carga de fluido frigorífico no evaporador torna-se insuficiente o que resulta numa elevação do grau de superaquecimento.

4.4.2 Válvula de expansão eletrônica

Uma das maneiras de se medir o desempenho do conjunto controlador-válvula de expansão eletrônica juntamente com os métodos de sintonia propostos está na sua habilidade em reduzir variabilidades do processo. Um parâmetro que permite avaliar o desempenho em malha fechada de um controle denomina-se variabilidade do processo.

Variabilidade do processo pode ser definida como uma medida estatística que mede o modo como o processo está sendo controlado em torno do ponto de ajuste (*set point*). A variabilidade do processo pode ser calculada através da seguinte relação:

$$VP = \frac{2\sigma}{\mu} \tag{2}$$

onde: VP = Variabilidade do processo em porcentagem;
 σ = Desvio padrão da variável do processo;
 μ = Valor do *set point* ou a média da variável do processo.

O desvio padrão (σ) é um parâmetro estatístico utilizado para medir a dispersão de uma função aleatória e pode ser calculado, conforme Gonçalves Jr. (2001), através da seguinte relação:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \tag{3}$$

onde: x_i = valor do evento “i”;
 \bar{x} = valor médio de todos os eventos;
 n = número de amostras.

Uma vez obtido o grau de superaquecimento por medição com os sensores Pt-1000, a variabilidade do processo foi calculada para os métodos de sintonia propostos. A Tabela 3 fornece os resultados obtidos, nos quais é possível verificar que os dois métodos de sintonia apresentam comportamento similar não sendo possível quantificar diferenças no controle do grau de superaquecimento.

Tabela 3. Variabilidade do processo obtida com a válvula de expansão eletrônica para os métodos de sintonia de Ziegler-Nichols e Bekker et al.

	Carga Térmica Crescente	Carga Térmica Decrescente
Bekker et al.	0,232	0,178
Ziegler-Nichols	0,225	0,157

Através da análise da Tab. 3, é possível observar diferenças na variabilidade do processo para cargas crescente e decrescente. Essa diferença é atribuída a histerese da válvula de expansão eletrônica. A histerese é definida como sendo um fenômeno no qual a resposta de um sistema depende não somente da magnitude da influência externa, mas também do comportamento prévio do sistema. Matematicamente, a resposta a uma influência externa é uma função de duplo valor, isto é, o valor da função depende se a influência externa está em processo de aumento ou diminuição (Entech, 1998).

As Figuras 7 e 8 mostram o comportamento do grau de superaquecimento em função do aumento e redução da carga térmica, respectivamente, com os parâmetros de controle ajustados pelo método de Bekker et al. Observam-se nessas, diferenças nas medidas obtidas para o grau de superaquecimento com a utilização dos termopares e sensores Pt-1000. Essas diferenças de medidas devem-se principalmente às características da aquisição das medidas e das características dinâmicas dos sensores e válvula de expansão eletrônica.

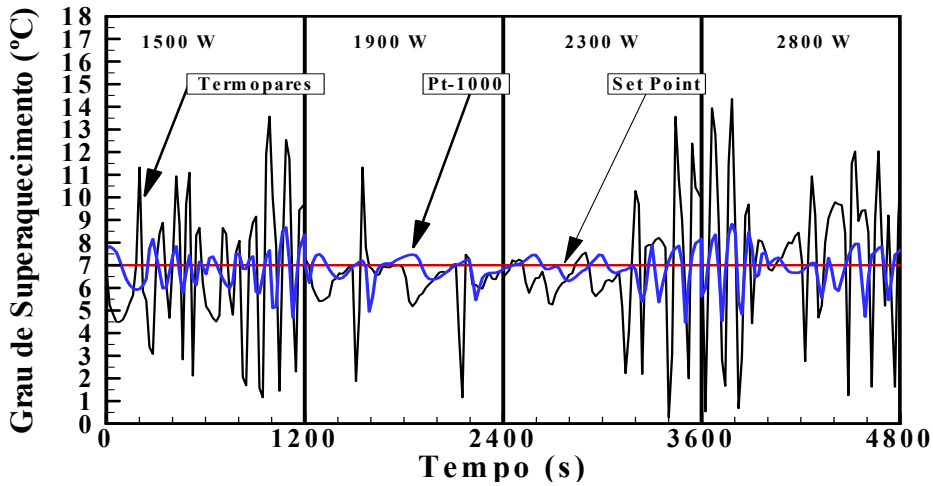


Figura 7. Evolução do grau de superaquecimento para a válvula eletrônica com o aumento gradual da carga térmica utilizando método de sintonia de Bekker et al.

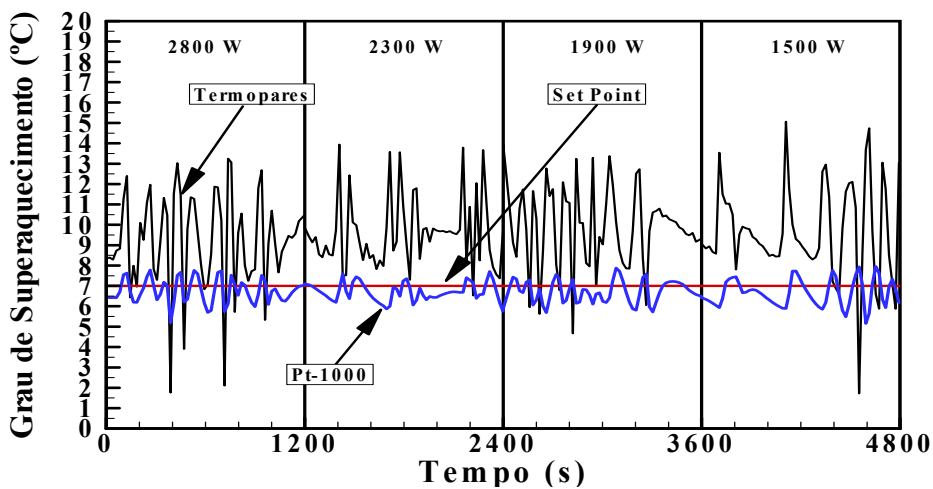


Figura 8. Evolução do grau de superaquecimento para a válvula de expansão eletrônica com a redução gradual da carga térmica utilizando método de sintonia de Bekker et al.

As Figuras 9 e 10 mostram o comportamento do grau de superaquecimento em função do aumento e redução da carga térmica, respectivamente, com os parâmetros de controle ajustados pelo método de Ziegler-Nichols. Nelas observam-se, também, diferenças nas medidas do grau de superaquecimento utilizando termopares e os sensores Pt-1000.

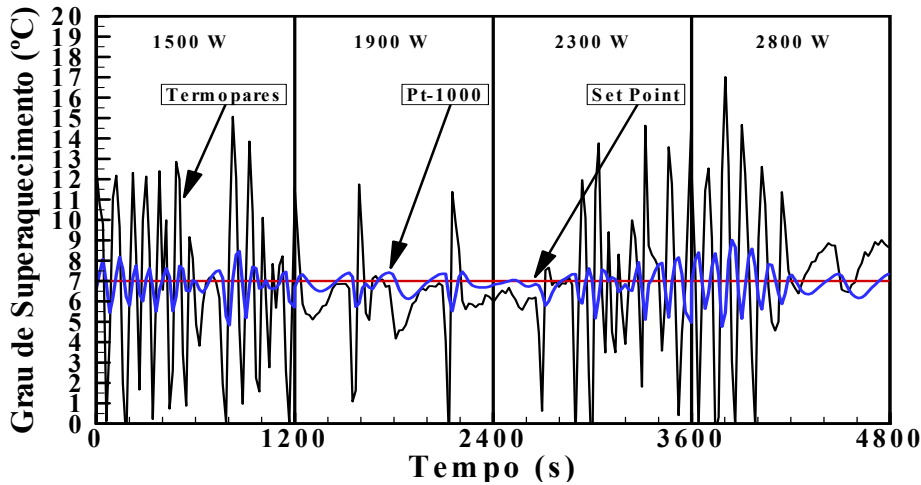


Figura 9. Evolução do grau de superaquecimento para a válvula expansão eletrônica com o aumento gradual da carga térmica utilizando o método de sintonia de Ziegler-Nichols.

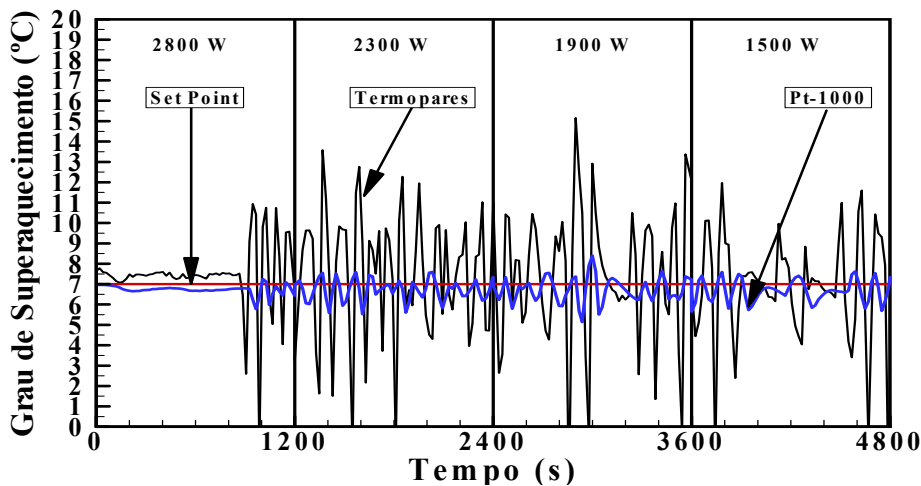


Figura 10. Evolução do grau de superaquecimento para a válvula de expansão eletrônica com a redução gradual da carga térmica utilizando o método de sintonia de Ziegler-Nichols.

Essas diferenças de medidas também foram atribuídas a característica da aquisição das medidas e da dinâmica dos sensores e da válvula de expansão eletrônica.

Sensores de temperatura são fortemente afetados por fatores como: condutibilidade térmica do elemento primário, variações do meio que afetam as condições de transferência de calor para o elemento primário e a localização do sensor.

Além disso, sensores não respondem instantaneamente a mudanças nos parâmetros físicos que estão medindo. O parâmetro mais importante que caracteriza a rapidez com que o sensor detecta mudanças ocorridas no meio é a constante de tempo, quanto menor, mais rápida a resposta do sensor.

Pode-se concluir, então, que as características dos sensores e a maneira como eles estão instalados na máquina frigorífica influenciam diretamente nos valores medidos do grau de superaquecimento. Os termopares e sensores Pt-1000 apresentam constantes de tempos diferentes, quais sejam, 0,3 s para o termopar no ar e 10 s para o sensor Pt-1000 fixado no tubo, respectivamente.

Para um elemento primário imerso em um fluido, a temperatura indicada por um sensor, conforme Doebelin (1990), é representada por:

$$\frac{T_{ind}}{T_{atual}}(s) = \frac{1}{\theta_s s + 1} \tag{4}$$

$$\theta_s \triangleq \frac{M.C}{U.A} \tag{5}$$

onde: T_{ind} = Temperatura indicada pelo sensor;
 T_{atual} = Temperatura atual do fluido adjacente ao elemento primário;
 θ_s = Constante de tempo do sensor;
 M = Massa do elemento primário;
 C = Calor específico do elemento primário;
 U = Coeficiente global de transferência de calor;
 A = Área de transferência de calor.

Pode-se verificar, pela análise da Eq. (5), que a velocidade de resposta de um sensor imerso em um fluido depende exclusivamente do valor de U , uma vez que, M , C e A são constantes para um determinado sensor. O coeficiente U depende das características dinâmicas e geométricas do escoamento onde o sensor está imerso, como velocidade média do fluido e posição do sensor no escoamento.

Conclui-se, então, que os sensores Pt-1000 impõem um atraso na malha de controle com a válvula de expansão eletrônica e um amortecimento na curva do grau de superaquecimento.

A análise seguinte é no sentido de explicar as causas das variações bruscas no grau de superaquecimento medida pelos termopares com a válvula eletrônica, fato que não ocorreu na operação com a válvula termostática. As variações são decorrentes das oscilações na vazão de fluido refrigerante produzidas pela válvula de expansão TQ5-1. Essas oscilações são causadas principalmente pela variação brusca (não linear) na área de escoamento do fluido entre o assento e o obturador de uma válvula superdimensionada. Válvulas superdimensionadas apresentam um elevado ganho, reduzindo a flexibilidade do controlador e aumentando a variabilidade do grau de superaquecimento.

O ganho da válvula pode ser definido como:

$$K_v = \frac{\Delta \dot{m}}{\Delta a} \tag{6}$$

onde: $\Delta \dot{m}$ = Variação da vazão;
 Δa = Variação na abertura da válvula.

Pela Equação (6), verifica-se que, numa válvula com ganho elevado, um pequeno incremento na abertura da válvula produz um aumento significativo na vazão do fluido. O superdimensionamento da válvula TQ5-1 está caracterizado na Tab. 4 que mostra que a sua capacidade máxima é de 13 kW, enquanto as exigências de carga térmica do evaporador não ultrapassam 2,8 kW como mostrado na Tab. 5.

Tabela 4. Capacidade em kW como função da diferença de pressão através da válvula TQ5-1

ΔP (bar)	Diferença de Pressão (ΔP) Através da Válvula em bar							
	2	4	6	8	10	12	14	16
Capacidade (kW)	8	11	12	12	13	13	12	12

FONTE – DANFOSS TECHNICAL LEAFLET RD.8A.L1.04, 2001. p. 6.

Tabela 5. Diferença de pressão em bar através da válvula em função da carga térmica e do método de sintonia.

	Carga Térmica (W)			
	1500	1900	2300	2800
Ziegler – carga crescente	10,90	11,30	11,80	12,40
Ziegler – carga decrescente	11,70	12,40	13,00	13,50
Bekker – carga crescente	10,85	11,15	11,70	12,35
Bekker – carga decrescente	10,70	11,40	11,90	12,25

Fabricantes de válvulas de controle recomendam que a válvula seja especificada para operar na faixa de 30 e 75% da sua capacidade máxima de vazão. Assim, a potência térmica mínima no evaporador deveria ser de 3900 W, bem superior aos 1500 W dos testes.

4. CONCLUSÕES

A metodologia apresentada permitiu avaliar o comportamento das válvulas termostática e eletrônica operando em regime permanente ou transiente e sob condições de carga térmica variável.

No que diz respeito à válvula de expansão termostática operando com carga térmica variável, verificou-se uma redução do grau de superaquecimento com a diminuição da carga térmica e um aumento do superaquecimento com o aumento da carga térmica em relação ao ponto inicial de ajuste. A redução foi consequência do tempo de atraso entre a demanda e a resposta da válvula aliada à superioridade da capacidade da mesma para as correspondentes cargas térmicas utilizadas. O aumento do grau de superaquecimento foi atribuído à insuficiência da válvula em alimentar corretamente o evaporador uma vez que a mesma apresentava uma capacidade inferior para as cargas térmicas utilizadas. Com este comportamento caracteriza-se que válvulas termostáticas não são capazes de garantir uma vazão correta quando trabalham com carga térmica variável.

Com relação à válvula de expansão eletrônica, os resultados experimentais demonstraram a importância da caracterização dinâmica do evaporador juntamente com a válvula eletrônica e os sensores. A variação do grau de superaquecimento observado refere-se à dinâmica dos sensores e da válvula de expansão eletrônica evidenciado pelo superdimensionamento da mesma.

Este fato contradiz muitos fabricantes de válvula de expansão eletrônica, uma vez que os mesmos atribuem o controle do grau de superaquecimento de suas válvulas como independentes da carga térmica utilizada no evaporador, o que através dos resultados experimentais não pode ser comprovado.

5. REFERÊNCIAS

- Bekker, J. E.; Meckl, P. H.; Hitle, D. C., 1991, "A tuning method for first-order processes with PI controllers", ASHRAE Transactions, v. 97, part 2, p. 19-23.
- Broersen, P. M. T., Van Der Jagt, M. F. G., 1980, "Hunting of evaporators controlled by a thermostatic expansion valve", ASME Transactions, v. 102, p. 130-135.
- Doyle, C. J.; FINN, Donal P., 2000, "Control and optimization issues associated with algorithm-controlled refrigerant throttling devices", ASHRAE Transactions, v. 106, part 1, p. 1-10.
- Danfoss, 1995, "Electronic system for evaporator liquid injection", Manual RS.1D.A2.02, Denmark: [s.n].
- Danfoss, 1999, "Temperature sensors type AKS and ESM", Data sheet, Denmark: [s.n].
- Danfoss, 2001, "Electronically operated expansion valves – TQ, PHTQ", Technical leaflet RD.8A.L1.04, Denmark: [s.n].
- Danfoss, 2002, "Controles automáticos para instalações de refrigeração e sistemas de ar condicionado", Catálogo técnico, São Paulo: [s.n].
- Doebelin, E. O., 1990, "Measurement systems – application and design", McGraw-Hill Book, 4. ed. Singapore, 428 p.(xxx)
- Entech, 1998, "Control valve dynamic specification", Data sheet, Toronto: [s.n].
- Fisher Controls International, Inc, 2001, Control valve performance. In: _____. "Control valve handbook", 3. ed., Marshalltown: [s.n.], chapter 2, p. 23-39.
- Gonçalves Jr., A. A., 2001, "Metrologia", Notas de aula, Florianópolis: LabMetro, 117 p.
- Maia, A. A. T., 2000, "Estudo experimental do comportamento transiente do conjunto evaporador-válvula de expansão", Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica UFMG, Belo Horizonte.
- Maxwell, G. M., Shapiro, H. N., 1989, "Dynamics and control of a chilled water coil", ASHRAE Transactions, v. 95, part 1, p. 1243-1255.
- Ogata, K., 1993, "Engenharia de controle moderno", Prentice hall do Brasil Ltda, 2 ed., Rio de Janeiro, 781p.
- Pedersen, P. H., Poulsen, C. S., Gundtoft, S., 1999, "Refrigerator and freezers with variable speed compressors", International Congress Of Refrigeration IIR/IIF, 20th, Sydney, paper code 153, preprints, pp. 1-7.
- Pena, R. T., Aguirre, L. A., 1997, "Modelagem matemática de sistemas", Notas de aula, Belo Horizonte: Departamento de engenharia eletrônica da UFMG.
- Resende, B. A., 2001, "Desenvolvimento de modelo matemático para controle do grau de superaquecimento em um evaporador alimentado por uma válvula de expansão eletrônica", Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica UFMG, Belo Horizonte.
- Riveland, M., 1985, "Fundamentals of valve sizing for liquids", Technical monograph 30, Fisher-Rosemount, Marshalltown, 9 p.
- Schmidt, F., 1999, "Optimal control of electronic expansion valves in modern low charge evaporator systems requires fast reacting expansion valves and new controller design", International Congress Of Refrigeration IIR/IIF, 20th, Sydney, , paper code 394, preprints, pp. 1-8.
- Ziegler, J., Nichols, N., 1942, "Optimum settings for automatic controllers", ASME Transactions, v. 64, 759.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PERFORMANCES OF VALVES OF THERMOSTATIC EXPANSION AND VALVE OF ELECTRONIC EXPANSION IN A REFRIGERATING MACHINE

Geraldo Augusto Campolina França

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
6627, Antônio Carlos Avenue
31270-901 – Belo Horizonte-MG – Brazil
E-mail: franca@demec.ufmg.br

Luiz Machado

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
6627, Antônio Carlos Avenue
31270-901 – Belo Horizonte-MG – Brazil
E-mail: luizm@demec.ufmg.br

Ralney Nogueira de Faria

UNIVERSIDADE DE ITAÚNA – Mechanical Engineering
MG 431 Road – km 45 – Postal box 100
35680-142 – Itaúna-MG – Brazil
E-mail: ralney@uit.br

Abstract: Thermostatic expansion valves and capillary tubes are devices used in the control and optimization of refrigerant fluids within the system of compressed vapour. In searching for energy efficiency new devices and strategies for refrigerant fluid control systems are being developed. Electronic expansion valves show promising alternatives to thermostatic expansion valves and capillary tubes. Their use can significantly reduce energy consumption together with cost reduction in maintenance, especially when the capacity of the refrigeration unit is assisted by a variable rotating compressor. The success of electronic expansion valves depends essentially on the understanding of the dynamic behavior of several components, which forms the basis of electronic control systems.

In this research there was a theoretical and experimental analysis of comparative performance between thermostatic expansion valve and electronic expansion valve, when both systems were operated in either steady or transient mode with a variable thermic charge within the evaporator and used in a variable thermic charge water-water refrigerator unit. It was noticed that superheating was directly linked and influenced by several components in the basic electronic system of control. There were two control methods investigated (1) Ziegler-Nichols (2) Bekker which have value parameters identical to those of a PI controller. This research and experimental development was conducted in the Refrigeration Laboratories of the Mechanical Engineering Faculty at UFMG.

Key Words: *Expansion valves, Variable thermic charge, Superheating, Refrigerating machine*