

ANÁLISE EXPERIMENTAL E MODELAGEM DO CONTROLE DE VAZÃO EM VÁLVULA PROPORCIONAL PARA SISTEMA TÉRMICO PNEUMÁTICO

Huber Andres Güiza Pabón, huber.pabon@ufu.br¹

Marcos Vinícius Espíndula Novaes, marcos.novaes@ufu.br²

João Rodrigo Andrade, joao.andrade@ufu.br³

¹Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila, 2121 Bloco 1M – Sala 1M212,

Resumo. Este artigo apresenta a caracterização experimental e numérica do controle de vazão em uma válvula proporcional de esfera utilizada em um sistema térmico pneumático composto por compressor, tanque de 5,7 litros, resistência de aquecimento e sensores de pressão e temperatura. A metodologia envolveu a aquisição de dados experimentais, o cálculo da abertura da válvula com base no balanço de energia e a comparação com resultados numéricos. Adicionalmente, foi proposta a aplicação de métodos de otimização para ajustar a abertura experimental. Os resultados mostram que a abertura da válvula pode ser representada de forma consistente por meio do coeficiente de vazão (C_v) e a modelagem termodinâmica, mas a falta de isolamento térmico do tanque aquecido pode gerar desvios em relação ao modelo ideal devido a troca de calor com o meio pelas paredes do tanque. O trabalho contribui com o estudo para caracterização de válvulas em sistemas térmico hidráulicos e abre caminho para aplicação de técnicas avançadas de controle multivariável.

Palavras chave: Coeficiente de vazão. Termodinâmica aplicada. Sistemas térmico pneumáticos. Otimização. Controle de processos.

Abstract. This article presents the experimental and numerical characterization of flow control in a proportional ball valve used in a Thermopneumatic system composed of a compressor, a 5.7-liter tank, a heating resistor, and pressure and temperature sensors. The methodology involved the acquisition of experimental data, the calculation of the valve opening based on the energy balance, and the comparison with numerical results. Additionally, the application of optimization methods to adjust the experimental opening was proposed. The results show that the valve opening can be consistently represented by means of the flow coefficient (C_v) and thermodynamic modeling, but the lack of thermal insulation of the heated tank can generate deviations in relation to the ideal model due to heat exchange with the environment through the tank walls. The work contributes to the study for the characterization of valves in thermal-hydraulic systems and opens the way for the application of advanced multivariable control techniques.

Keywords: Flow coefficient. Applied thermodynamics. Thermopneumatic systems. Optimization. Process control

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas térmico pneumáticos multivariáveis desempenham um papel fundamental na engenharia de controle de processos, pois envolvem a interação simultânea de variáveis como pressão, temperatura e fluxo de massa, permitindo aplicações em indústrias como automação industrial, sistemas de HVAC (aquecimento, ventilação e ar-condicionado), manufatura de precisão e até em dispositivos médicos e aeroespaciais, onde a eficiência energética e a precisão são críticas para otimizar o desempenho e reduzir custos operacionais. A caracterização de válvulas e compressores é essencial para o desenvolvimento de modelos precisos, que servem como base para estratégias de controle MIMO (Multiple Input Multiple Output), as quais permitem lidar com interdependências entre múltiplas entradas e saídas, melhorando a robustez e a resposta dinâmica dos sistemas. Young et al. (2008).

Estudos recentes destacam a importância dessas estratégias em sistemas pneumáticos, onde controladores MIMO podem mitigar oscilações e melhorar a estabilidade em cenários com fluxos reciclados ou compressores variáveis. No entanto, não encontramos referências que tratem com objetividade experimentalmente a abertura de uma válvula proporcional, comparando os resultados obtidos em ensaios com aqueles derivados de modelos numéricos baseados no balanço de energia, embora trabalhos como a caracterização e modelagem de válvulas proporcionais eletropneumáticas tenham avançado na análise estática e dinâmica. Ramadurai (2024).

Há limitações na representatividade da válvula a partir de dados experimentais. Existem fenômenos não ideais, como a falta de isolamento térmico do tanque, as considerações relativas ao funcionamento do compressor de ar utilizado, que alteram significativamente a resposta do sistema. Portanto o presente trabalho é dividido em dois enfoques: (1) Prover um modelo físico validado experimentalmente para o sistema térmico pneumático; e (2) Modelar computacionalmente a válvula de forma a validar seu funcionamento físico ajustando seu ponto ideal por meio uma metodologia de otimização (ajuste por mínimos quadrados ou métodos iterativos).

O presente trabalho tem como objetivo analisar experimentalmente a abertura de uma válvula proporcional, comparando os resultados obtidos em ensaios com aqueles derivados de modelos numéricos baseados no balanço de energia. Baseado nos conceitos da termodinâmica é caracterizado um sistema térmico de quatro pontos onde a transferência de energia térmica por meio do calor para o ar é definida pela primeira lei da termodinâmica entre os estados que antecedem e sucedem o tanque. Borgnakke e Sonntag (2018).

Além disso, busca-se discutir metodologias de ajuste da abertura de válvula, utilizando as normas brasileiras para a definição do equacionamento da válvula e destacando a aplicação de técnicas de otimização por meio do método de mínimos quadrados para a obtenção de sua abertura ideal de acordo com as condições iniciais fornecidas para o problema. Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012).

2. METODOLOGIA

2.1. Procedimentos Experimentais

A metodologia empregada foi estruturada em quatro fases: aquisição dos dados experimentais com diferentes aberturas da válvula e potências da resistência, cálculo do coeficiente C_v por meio do balanço de energia e da equação de escoamento, comparação dos valores experimentais com os calculados numericamente e discussão de técnicas de otimização para o ajuste da abertura de válvula.

Na primeira fase, o sistema experimental é composto por um compressor McCarthy de 2 HP e 24 litros de capacidade. O sistema conta com dois atuadores principais para o controle das variáveis físicas: uma válvula proporcional motorizada Tcrystal de 2 polegadas, responsável por ajustar o fluxo de ar, e uma resistência de aquecimento cuja potência é controlada por um conversor AC-DC com saída máxima de 180 V, modulado proporcionalmente por sinais PWM. Foram realizadas diferentes combinações de abertura da válvula e potência aplicada à resistência para posterior análise do impacto dessas variáveis de pressão e temperatura dentro do tanque.



Figura 1: Modulo experimental térmico pneumático em escala.

Posteriormente, foi implementado o sistema de instrumentação para aquisição de dados, com o objetivo de registrar as variáveis de interesse do processo. A temperatura foi monitorada por meio de um sensor do tipo PT100, instalado no interior de um filtro de ar localizado na saída do tanque, permitindo a detecção de variações térmicas no escoamento do fluido. A pressão foi determinada através de um manômetro acoplado à etapa de armazenamento do tanque, em conjunto com um transdutor de pressão com sinal de saída analógico. Como unidade de aquisição e armazenamento foi utilizada uma plataforma Raspberry Pi, configurada para registrar em tempo real os valores de temperatura e pressão em diferentes condições operacionais do sistema. Assim, foram estabelecidas seis combinações de operação com variações nos atuadores de entrada, o que permitiu analisar a resposta do sistema diante de diferentes configurações de abertura da válvula e potência da resistência. Esse processo possibilitou determinar se a temperatura e a pressão eram variáveis dependentes dos atuadores e em que medida eram afetadas por suas alterações.



Figura 2: Instrumentação do sistema de aquisição de dados.

2.2. Referencial Teórico

Para determinar a abertura de válvula ideal, utilizou-se o balanço de energia no tanque e a equação de escoamento da válvula. O sistema é modelado por estados numerados: 1 – entrada/atmosfera, 2 – após o compressor/tanque, 3 – fluido após o aquecedor e antes da válvula, 4 – saída após a válvula. Assume-se que a válvula provoca uma descarga isentálpica, aproximação usual para válvulas de controle quando as perdas de energia da válvula por atrito para o meio são negligenciáveis visto que a queda de pressão ocorre muito rapidamente e apesar da mudança de velocidade a energia cinética pode ser negligenciada no balanço de energia. Borgnakke e Sonntag (2018).

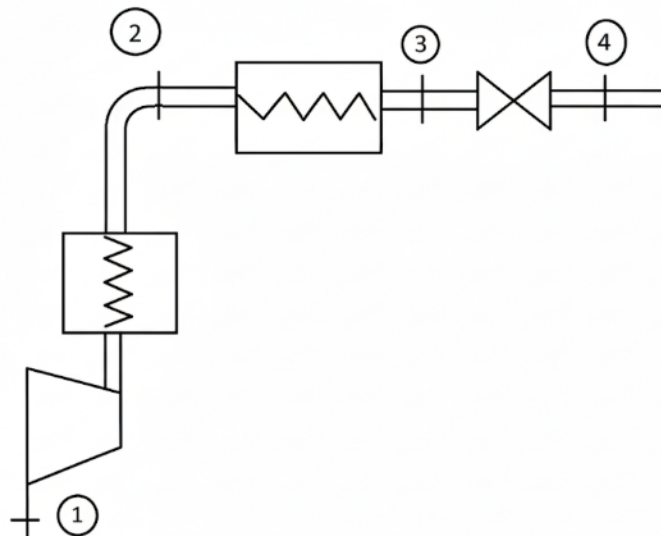


Figura 3: Imagem representativa do sistema idealizado

A Figura 3 representa o modelo do sistema experimental para a metodologia computacional, são feitas algumas hipóteses sobre o equipamento. Primeiramente o sistema é alimentado por um compressor de ar, nesse sentido é considerado que a temperatura após a compressão é retornada a temperatura ambiente no caso suposta 23°C. Outra hipótese é de que a pressão é controlada no segundo estágio, onde se define qual a diferença de pressão do sistema. Dessa forma a pressão interior entre os pontos dois e três é considerada a mesma e equivalente a pressão do tanque, assim como os pontos um e quatro onde a pressão é a atmosférica. A diferença de pressão é de menos de um bar e foi considerado que o sistema está sob o regime subcrítico para um escoamento compressível.

$$\Delta P = P3 - P4 \quad (1)$$

Para se calcular a vazão do sistema é considerada uma válvula de esfera cuja as informações foram obtidas a partir de um catálogo de válvulas de esfera da empresa <https://www.engvalves.com> similar à válvula utilizada no experimento para realizar a modelagem. Foram adicionados à Tabela 1.

Tabela 1: Válvula de esferas tamanho meia polegada similar a utilizada no experimento advinda de fabricante

Ângulo de Abertura [°]	Cv
30	0.1
40	0.3
50	0.9
60	1.4
70	2.2
80	3.5
90	8.4

Os dados da Tabela 1 são utilizados com interpolação linear para que seja determinada a abertura de válvula ideal em graus aproximada que proporciona o Cv ideal para o calor desejado da resistência elétrica, visto que a conversão de Cv e Kv é o fator $K_v = 0.86 * C_v$ utilizando a Equação 3 que é uma variação da equação introduzida pela norma para a equação de válvula para o ar comprimido aquecido em regime subcrítico Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). Considerando que a massa específica em condições normais de temperatura e pressão dado pela Equação 2 é possível determinar a vazão normal considerando que é conhecida a temperatura de saída no ponto quatro.

$$\rho_N = \rho(\text{Air}_{ha}, T = 0, P = 1.013 \text{ [bar]}) \quad (2)$$

$$V_N = 514 \cdot K_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P_4}{\rho_N \cdot T_4}} \quad (3)$$

Dada a vazão é possível calcular o fluxo mássico do sistema de acordo com a Equação 4 este fluxo mássico é utilizado de acordo com a primeira lei da termodinâmica para calcular o calor da resistência ideal utilizando a Equação 6. Borgnakke e Sonntag (2018).

Levando também em consideração que com a hipótese dada para a válvula é representada a Equação 5 e que a entalpia do quarto ponto é um estado determinado pela temperatura de saída do sistema. Uma eficiência arbitraria fora utilizada como exemplo.

$$\dot{m} = \rho_N \cdot V_N \quad (4)$$

$$h_4 = h_3 \quad (5)$$

$$Q = \frac{(h_3 - h_2) * \dot{m}}{\eta}; \eta = 0.8 \quad (6)$$

Determinada a abertura ideal da válvula utilizando o método de minimização de mínimos quadrados de acordo com as condições de entrada é possível realizar a comparação com o artigo de base referenciado. Pabón (2025).

O algoritmo fora escrito em python. Os cálculos das propriedades termofísicas do fluido neste caso o ar foram realizados utilizando a biblioteca de código aberto CoolProp. Bell, Wronski, Quoilin, e Lemort (2014).

3. RESULTADOS

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos conforme estabelecido na metodologia.

3.1. Aquisição dos dados

A montagem do sistema de ensaio mostrou-se eficiente, assegurando estanqueidade e confiabilidade nas medições, sem indícios de vazamentos que comprometessem os resultados. O tanque de 5,7 litros acoplado ao compressor McCarthy de 2 HP garantiu estabilidade da pressão interna, possibilitando a repetibilidade dos ensaios em diferentes condições operacionais. O sistema de aquisição, programado em Python no ambiente Thonny e executado em uma Raspberry Pi 2B+, permitiu registrar em tempo real as variações de pressão e temperatura, fornecendo uma base experimental consistente para a análise subsequente. A estratégia de controle por modulação PWM mostrou-se adequada: a resistência elétrica respondeu de forma linear ao sinal aplicado, permitindo variar a potência de aquecimento até o limite de 180 V, enquanto a válvula proporcional Tcrystal apresentou boa sensibilidade ao ajuste de tensão (0–10 V), o que viabilizou a imposição de diferentes aberturas de forma controlada. Os dados coletados em diferentes combinações de abertura da válvula e níveis de potência da resistência compõem a Tabela 2, que sintetiza os valores médios de temperatura e

pressão obtidos experimentalmente. Esses resultados constituem a primeira etapa para a caracterização do sistema, pois descrevem a influência direta dos parâmetros de atuação sobre as variáveis de saída e servem como referência para o cálculo da abertura de válvula ideal e sua posterior comparação com o modelo numérico.

Tabela 2: Cálculo a partir da abertura de válvula dos dados experimentais

#	1	2	3	4	5	6
Abertura [%]	0	50	100	0	50	100
Q Resistência [W]	0	0	0	50	50	100
Pressão [P]	1.00	0.85	0.80	0.95	0.80	0.80
Temperatura [T]	23.00	24.44	24.75	48.00	46.80	56.00

3.2. Abertura de válvula ideal

A tabela de resultados é gerada ao se definir qual a resistência alvo, a diferença de pressão no tanque e qual a temperatura de saída. Dessa forma é ajustada uma abertura de válvula ideal pelo método de minimização de erros por mínimos quadrados onde é modificado o valor de C_v no código até que a vazão ajustada determine o fluxo mássico que faz com que a primeira lei retorne o menor erro possível para a resistência almejada.

Tabela 3: Resultado da abertura de válvula nas mesmas condições dos dados experimentais

#	4	5	6
Q Resistência [W]	50	50	100
ΔPressão [bar]	0.95	0.80	0.80
Temperatura [C]	48.00	46.80	56.00
Abertura [%]	38.9119	40.5518	44.8773
Abertura [°]	35.3744	36.8653	40.7975
m [kg/h]	5.6718	5.9639	8.6191

As diferenças de abertura possivelmente são justificadas pelo modelo de válvula, funcionamento do controlador e das hipóteses iniciais feitas. Além disso a falta de isolamento térmico, o calor residual nos componentes entre as medições e a eficiência arbitrária são também fatores de influência do sistema.

Porém o comportamento está de acordo com o esperado, visto que o comportamento desse tipo de válvula não é linear em relação à mudança de vazão mássica. Além disso o controlador eletrônico da válvula não necessariamente consegue relacionar todos os ângulos de abertura possível da válvula podendo estar limitado a uma faixa onde o ajuste ocorre de fato.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte concedido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Agradecem também à Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e à Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM) no Brasil. Por fim, um agradecimento especial ao Laboratório de Investigação em Energia e Controle (LIEC) da Universidade Francisco de Paula Santander (UFPS) na Colômbia.

5. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas . (2012). *Nbr iec 60534: Válvulas de controle de processos industriais* (Tech. Rep.). Rio de Janeiro: ABNT.
- Bell, I. H., Wronski, J., Quoilin, S., e Lemort, V. (2014). Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library coolprop. *Industrial & Engineering Chemistry Research*.
- Borgnakke, C., e Sonntag, R. E. (2018). *Fundamentos da termodinâmica* (8th ed.). São Paulo: Blucher.
- Pabón, H. A. G. (2025). *Sistema de control multivariable para módulo termoneumático a escala* . Universidade Francisco de Paula Santander (UFPS), Colômbia.
- Ramadurai, V. (2024). *Mimo process control for compressor systems with recycled flow* . University of California San Diego, San Diego, CA.
- Young, P. M., Anderson, M., Buehner, M., Hittle, D., Anderson, C., Tu, J., e Hodgson, D. (2008). Mimo robust control for hvac systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*.