

MEDIDOR DE VAZÃO PELO PRINCÍPIO CALORIMETRICO: SIMULAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A.G.S. Barreto Neto^{1,2}, *A.M.N. Lima*², *C.A Souza*⁴, *Caio Luiz*², *H. Neff*^{2,3}

¹ Instituto Federal da Paraíba-IFPB, Cajazeiras-Paraíba, Brasil, arlindo.neto@ee.ufcg.edu.br

² Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Elétrica, Campina Grande, Brasil, amnlma@ee.ufcg.edu.br

³ Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste, Laboratório para Integração de Circuitos e Sistemas, Recife, Brasil, hneff@web.de

⁴ Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Elétrica, João Pessoa, Brasil, calberto@ct.ufpb.br

Resumo: O presente trabalho apresenta uma proposta de baixo custo para o desenvolvimento do medidor de vazão calorimétrico. Este medidor é formado por dois elementos sensores (termopar tipo K) disposto simetricamente a jusante e a montante de um elemento resistivo aquecido. O fluxo ao passar por estes três elementos provoca uma dissipação do calor no elemento aquecido resultando em uma diferença de temperatura entre os sensores. O software comercial baseado em elementos finitos, COMSOL Multiphysic, é usado para determinar as distancias ótimas entre os elementos sensor-aquecedor, e avaliar a sensibilidade em função das distâncias e da potência dissipada no resistor.

Palavras chave: medidor de vazão, princípio calorimétrico, elementos finitos.

1. INTRODUÇÃO

A utilização das técnicas de medição de fluxo e massa é muito importante na indústria para fins de controle de processos em líquido e gases [1]. Outro ramo de aplicação dos medidores de vazão é na biomedicina, através da medição da vazão de fluidos biológicos como sangue, oxigênio e gás carbônico sendo também usado na calibração de instrumentos de infusão de drogas. Ao longo dos anos um grande número de instrumentos e sensores foram desenvolvidos baseados em novas tecnologias, sempre visando à redução de custo, durabilidade, versatilidade e desempenho. Técnicas tradicionais como a calorimétrica [1-2] foram aperfeiçoadas através das tecnologias de Microssistemas Eletromecânicos (MEMS) e de uma instrumentação eletrônica com maior precisão [3].

O princípio calorimétrico é baseado na distribuição de calor ao redor do elemento aquecido no interior do tubo, devido a dissipação térmica ocorrida pela passagem do fluido. Na Figura 1 é apresentado um arcabouço do dispositivo calorimétrico, na qual a vazão é medida de forma indireta através da diferença de temperatura a jusante e a montante da fonte de calor. Os números “1”, “2” e “3” na Fig.1 são respectivamente a entrada de fluxo (inlet), paredes, e saída do fluxo (outlet). O perfil de fluxo é laminar apresentando um escoamento parabólico completamente

desenvolvido, cuja velocidade é dado em função do raio r

$$u(r) = u_{max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (1)$$

As distâncias relativas aos três elementos são fundamentais para o bom desempenho do sensor, assim um software comercial baseado em elementos finitos é usado para avaliar a resposta dinâmica do sistema em função da potência do elemento aquecedor e das distâncias aos sensores.

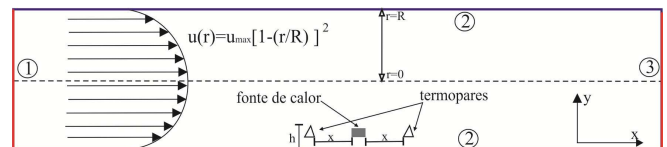


Fig. 1. Seção transversal do tubo com os elementos sensores e o aquecedor. O fluxo é laminar apresentando um perfil parabólico.

Os termopares estão equidistante x mm do elemento resistivo (fonte de calor), e ainda afastados de uma distância h mm da parede do tubo (ver Fig.1). A distância h é importante pelo fato de que se for posto os elementos junto a parede do tubo, o gradiente de velocidade na vizinhança da parede é muito pequeno ou nula ($u=0$) prejudicando a captação da temperatura pelos termopares (diminuição da difusão de calor), por outro lado se os elementos ficam muito distante da parede eles já interferem no escoamento. Assim é necessário encontrar valores adequados para os parâmetros x e h na montagem do sensor, e isso é feito através da simulação numérica com elementos finitos.

A curva característica da variação de temperatura em função da posição dos termopares é mostrada na Figura 2 [4], na qual as temperaturas do lado direito ou a jusante (T_j) são maiores que as temperaturas do lado esquerdo ou a montante (T_m) para uma velocidade no inlet diferente de zero.

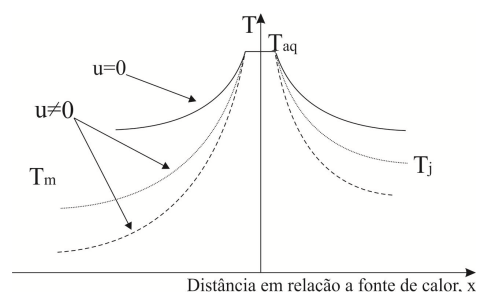


Fig. 2. Variação de temperatura a jusante e a montante do elemento aquecedor.

Com a diferença de temperatura é possível calibrar o sensor em função da vazão ou da velocidade média do fluxo. Do ponto de vista de simulação basta calcular a vazão de saída através da integral da velocidade no outlet,

$$Q = 2\pi \int_0^R \mathbf{u} r dr \quad (2)$$

Por outro lado, do ponto de vista experimental é necessário medir a massa transportada em função do tempo para que esta seja relacionada com a variação da temperatura, montando a curva característica variação de temperatura versus vazão ($\Delta T \times Q$).

2. PRINCÍPIO FÍSICO E MODELO NUMÉRICO

O princípio físico é regido por dois grupos de equações diferenciais parciais, a equação de Navier-Stokes para um fluido incompressível (3)-(4) representando o deslocamento da massa fluídica, e a equação de convecção-difusão (5) que corresponde ao movimento do calor sobre a massa fluídica.

$$\rho(\partial \mathbf{u} / \partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = \nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} + p g \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

onde $\mathbf{u} = i\mathbf{u}_x + j\mathbf{u}_y$ é o vetor velocidade do fluido, ρ a densidade em $[\text{kg}/\text{m}^3]$, η a viscosidade $[\text{Pa}\cdot\text{s}]$, p a pressão $[\text{Pa}]$ e g a aceleração da gravidade $[\text{m}/\text{s}^2]$.

$$\rho_s C_p (\partial T / \partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla T) = k \nabla^2 T \quad (5)$$

com C_p o calor específico do material $[\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}]$, k a condutividade térmica $[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$, ρ_s a densidade $[\text{kg}/\text{m}^3]$. A equação (5) possui duas partes, a primeira corresponde à difusão molecular (à direita da igualdade), e a segunda parte da equação que está relacionada com o campo de velocidade é chamada de convectivo.

O acoplamento entre as equação de Navier-Stokes com a equação de convecção-difusão é dado através do vetor velocidade \mathbf{u} , assim o campo de velocidade é calculado por (3)-(4) e inserido em (5) formando um sistema de equações diferenciais parciais acoplado.

2.1. Modelo Numérico

Para a simulação numérica é usado um modelo em duas dimensões (2-D) desenvolvido no Comsol Multiphysics [5]. As equações multifísicas usadas na modelagem são (2)-(3)-(4) solucionadas de forma acoplada em regime estacionário. O fluido considerado na simulação foi o ar ($\rho = 1,184 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\eta = 17,4 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ @ 298 K), e a fonte de calor é um elemento resistivo ($k = 0,026 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\rho_s = 1,184 \text{ kg}/\text{m}^3$, $C_p = 993 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) cuja temperatura é fixada em 373 K. A geometria é um tubo (ver Fig.1) com 5cm de comprimento e diâmetro interno de 3mm, o elemento resistivo tem 0,25mmx2,0mm.

As condições de contorno impostas para o tubo (Fig 1) são: inlet ("1") velocidade de entrada ($0,01 \leq v_{inlet} \leq 0,1$) m/s, outlet ("3") pressão nula 0Pa, e em "2" é definido como parede ($u_x = u_y = 0$). Referente a equação de convecção-difusão as condições de contorno impostas são: elemento aquecedor ($T_{aq} = 373\text{K}$), "1" temperatura do fluido ($T = 298\text{K}$), "2" isolamento térmica.

A malha foi gerada com 3645 elementos triangulares (ver Fig.3), o solver selecionado foi o solver PARDISO [5] e uma típica simulação usando o sistema operacional Windows 7-64bits com 4G de Ram e processador Dual-core 2,2GHz foi de 3 minutos.

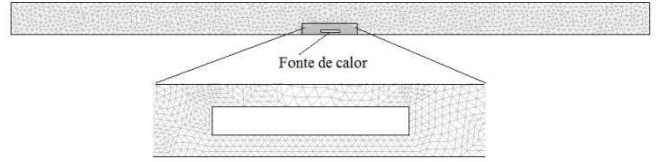


Fig. 3. Malha triangular com a fonte de calor.

2.1.1 Comportamento do Fluxo de Calor

Os resultados da simulação apresentados nesta secção são referentes às configurações apresentadas na secção 2 deste trabalho, cujo o objetivo é esclarecer ao leitor o procedimento adotado para determinar as curvas de vazão versus velocidade.

Os elementos sensores (termopares tipo J) não são modelado e os dados referentes ao valores de temperatura são obtidos diretamente da simulação numérica. A distribuição de temperatura ao longo do tubo para um $T_{aq} = 373\text{K}$ é da forma:

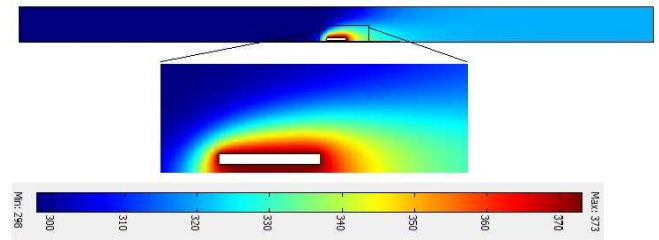


Fig. 4. Distribuição de temperatura no tubo para o elemento aquecedor em 100°C.

Tendo as respectivas curvas de variação temperatura (T_j , T_m) em função da distância dos sensores para cada valor de entrada de velocidade, é apresentada na Fig. 5.

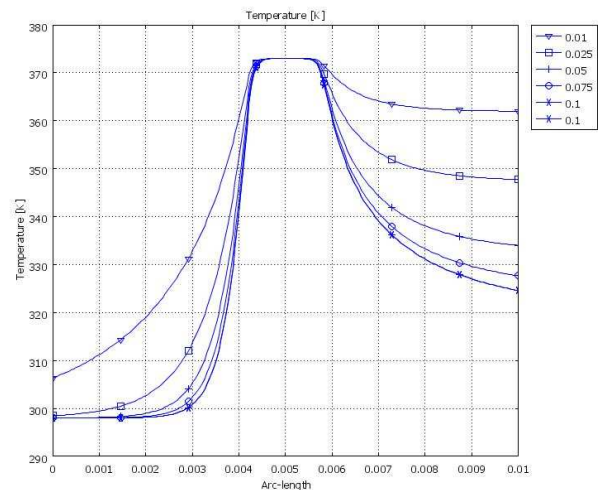


Fig. 5. Variação de temperatura em função da posição, com $T_{aq}=100^{\circ}\text{C}$.

Apartir da Fig.5 é calculada a curva de variação de temperatura (T_j-T_m) em função da velocidade (Fig.6). Observando esta figura é conclusivo que para um ponto de medição acima de 2mm não é capaz de calcular com precisão a velocidade do fluido, pois as medidas estão praticamente saturadas. Entretanto para um ponto de medição de 1mm a velocidade do fluido é calculada com uma boa precisão.

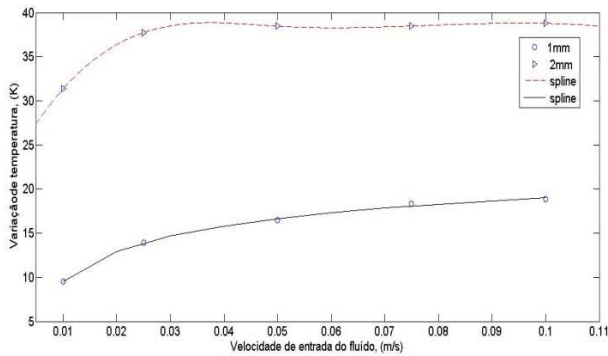


Fig. 6. Variação de temperatura em função da velocidade

Para colocar a Fig.6 em função da vazão basta usar a equação (2), que na prática implica que o eixo das abcissas será multiplicado por um fator de escala. Pela Fig. 6 fica claro que a curva tende a um valor de saturação, valor este que fica mais nítido quando a distância é menor considerando a fonte de calor na mesma potência.

A curva da Fig. 6 também pode ser expressa em termos de variação de temperatura versus a vazão,

$$Q = \frac{1}{r} \int_0^{2\pi} r \int_0^r u(y) dy dr = \frac{\pi r^2}{r} \int_0^r u(y) dy \quad (6)$$

ou

$$Q = \bar{v} \cdot A \quad (7)$$

Sendo \bar{v} a velocidade média e A a área da seção transversal do tubo.

4. SET-UP

O diagrama de bloco do set-up experimental (Fig.7) é composto por dois termopares tipo K (0,2mm de diâmetro), circuito de condicionamento para os termopares (AD595) e de potência para o elemento resistivo, unidade de aquisição de 16 bits e a interface (Fig.9). As temperaturas na entrada e na saída do fluxo são medidas através dos sensores S_1 e S_2 . Para cada sensor foi utilizado um termopar do tipo K. O sinal de cada termopar foi condicionado através do CI AD595 que amplifica o sinal e compensa a junção a frio, fornecendo na saída $10\text{mV}/^{\circ}$. O valor da diferença entre os sensores S_1 e S_2 é obtido com um subtrator implementado com o amplificador TLV2464. A comunicação entre a

Unidade de Aquisição e a interface será realizada através do barramento USB.

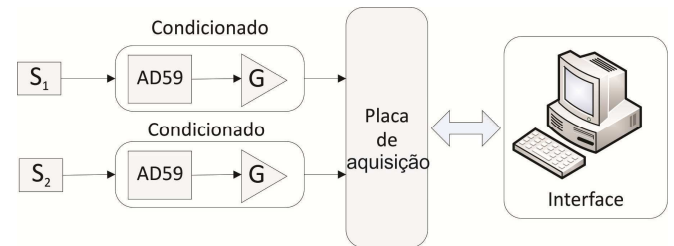


Fig. 7. Set-up Experimental para desenvolvimento do medidor de vazão.

Os elementos sensores são posicionados de forma equidistante da fonte de calor (resistor SMD) dentro de um tubo de silicone com 3,2mm de diâmetro interno. O resistor foi soldado em uma barra de pinos para garantir a estabilidade mecânica e as distâncias entre os sensores. As distâncias selecionadas ficaram em torno de $1\text{mm} \pm 10\%$.

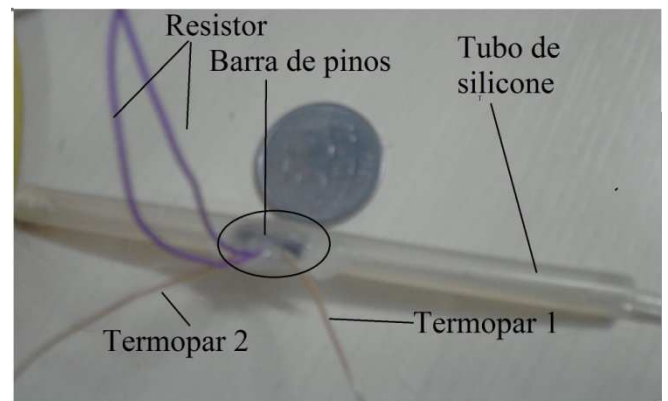


Fig. 8. Montagem dos elementos sensores + aquecedor no tubo de silicone.

O sistema de propulsão de fluxo usado foi uma bomba peristáltica de roletes com capacidade de (0,003 – 68) ml/min.

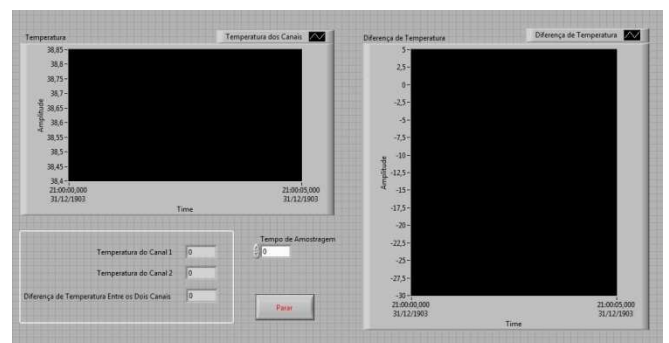


Fig. 9. Interface de aquisição de dados: Temperatura e Diferença de Temperatura.

4. RESULTADOS

O resistor SMD aqueceu até uma temperatura máxima de 50°C , quando então é ligada a bomba peristáltica fornecendo uma taxa de fluxo de ar variando de (0,2-1,6)ml/min. O ar

injetado pela bomba no sistema estava na temperatura ambiente ($\sim 22^{\circ}\text{C}$).

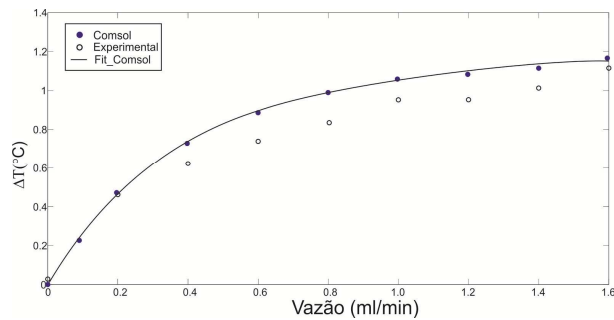


Fig. 10. Curva de resposta experimental e numérica para o Set-up.

Aplicando a metodologia apresentada na secção 2 deste trabalho, a curva de resposta obtida é apresentada na Fig. 10. Estas curvas contem o resultado experimental e o da simulação usando as técnicas de elementos finitos, observa-se uma discrepância entres os resultados (erro médio quadrático, $EMQ=0,014178$). Desta forma para uma dada variação de temperatura capturada pelos termopares, a partir da Fig.10 é calculado o valor da vazão correspondente, ou seja, é uma medição indireta para a vazão. O sensor apresenta um tempo de resposta rápida na estabilização da temperatura ($\sim 3\text{s}$), fornecendo o valor correto para o cálculo da vazão.

CONCLUSÃO

Os resultados apresentados demonstram a versatilidade da ferramenta computacional, que nos permitiu projetar um dispositivo de baixo custo para medição da vazão de forma indireta. A principal fonte de erro é sem dúvida a posição correta para os termopares (ponta sensível), primeiramente para garantir a equidistância entre os elementos, e em segundo o tamanho dos elementos em relação ao diâmetro do tubo, pois com uma alta taxa de fluxo forma-se vórtice ao redor dos elementos, provocando uma realimentação térmica. Por este método é possível criar uma família de curvas semelhantes a da Fig.10 (resposta do sistema), aumentando a temperatura do elemento aquecedor e automaticamente aumentando a faixa de variação da taxa de fluxo na entrada, ou seja, aumentando a sensibilidade do dispositivo para funcionar em uma ampla taxa de vazão.

REFERÊNCIAS

- [1] A.Rasmussen et al., *Simulation and optimization of a microfluidic flow sensor*, Sensors and Actuators A, vol. 88, pp 121-132, February, 2001.
- [2] N.T.Nguyen, *Micromachined flow-Review*, Flow Measurements, vol. 8, pp 7-16, 1997.
- [3] R. Ramesham, Fabrication of diamond microstructures for microeletromechanical systems (MEMS) by a surface micromachining process. Thin Solid Films, n. 340, pp 1-6, 1999.

- [4] R.J Rodrigues, R. Furlan, Design of microsensor for gases and liquids flow measurments, Microelectronics Journal, vol. 34, pp 709-711, 2003.

- [5] www.comsol.com.