

Um anemômetro de filme quente alternativo à corrente constante

Resumo

Neste estudo é apresentado o circuito de um anemômetro de filme quente, operado à corrente constante, constituído, basicamente, de uma ponte de Wheatstone e um amplificador diferencial de alto ganho. O elemento sensor, diferente do de filme quente normal, é um sensor de temperatura, do tipo resistivo, em filme de níquel depositado num substrato formando uma grade de 3,2 x 3,2 mm e 5 µm de espessura. A ponta de prova é barata e de fácil construção, mantendo, apesar disto, sensibilidade similar às pontas de prova dos anemômetros usuais. Diversas medidas de velocidade de escoamento de ar foram tomadas, na faixa de 2 a 12 m/s, e observada uma curva de calibração com desvio máximo de 10% em relação aos dados experimentais. A resposta dinâmica do instrumento também foi levantada.

Palavras-chaves: Anemômetro. Filme quente. Velocidade de escoamento.

Abstract

In this study it is presented a hot-film anemometer circuit, operated at constant current, constituted of a Wheatstone bridge and a high-gain differential amplifier. The sensor element, different from the usual hot film, is a temperature gauge of thermo-resistive conception, in which a nickel film is deposited above a substrate forming a 3,2 x 3,2 mm grid and 5 µm thick. The probe, being cheap and easy to construct, has a sensitivity of the regular anemometers. Several measurements of velocity were made of an air flow, in the range of 2 – 12 m/s. The calibration curve showed the maximum deviation of 10% from the experimental data. It was also investigated the dynamic response of the instrument, the fluid flow velocity.

Keywords: Anemometer. Hot film. Fluid flow velocity.

Lutero Carmo de Lima
lutero@uece.br

Marcus Antonio Viana Duarte
mvduarte@mecanica.ufu.br

João Bosco Leal Verçosa Junior
jblealjr@uece.br

Vinicius Milanez Couto
Vimc_zero@hotmail.com

1 Introdução

A anemometria de fio e filme quente é uma das técnicas mais usadas para o estudo de escoamento de fluido (SANYAL *et al.*, 2006). Existem duas maneiras de se operar um anemômetro de fio/filme quente: a temperatura constante e a corrente constante. Embora o sistema de operação à temperatura constante seja o de maior preferência pelos pesquisadores, pelo fato de apresentar saída facilmente linearizável e uma melhor resposta em frequência do que a corrente constante, neste estudo optou-se pelo método de corrente constante, principalmente pela simplicidade de concepção eletrônica e o não envolvimento inicial com realimentação negativa.

O maior problema para se manufaturar um anemômetro de fio/filme quente é o sensor ou ponta de prova que, para o caso do fio, são fios de platina ou tungstênio, com diâmetros da ordem de 5 µm, extremamente frágeis e quebradiços os quais, uma vez interrompidos, colocam fora de operação o anemômetro do qual faz parte. A ponta de prova à base de filme de platina, tungstênio ou níquel depositado em um substrato apresenta uma maior resistência mecânica do que a de fio, embora a resposta em frequência seja relativamente inferior à dos anemômetros de fio quente. Sherif (1997) estudou a propagação de erros aleatórios em anemometria à temperatura constante para escoamentos não isotérmicos. Ele observou que a incerteza na resposta linearizada dos anemômetros à temperatura constante aumenta significativamente com as medidas de velocidade em escoamentos não isotérmicos. Logo a seguir, Sherif and Pletcher (1999) apresentaram um método de predição da resposta de um anemômetro de fio ou filme quente à temperatura constante. Mailly *et al.* (2001) e Giani *et al.* (2002) apresentaram o projeto, estágios da manufatura, caracterização e modelagem térmica de um anemômetro de filme quente de platina para uso em escoamento de gás. O referido anemômetro apresentou alta sensibilidade, baixo consumo de energia elétrica devido ao bom isolamento térmico do sensor resultando em um alto coeficiente de transferência de calor e conseqüente baixo tempo de resposta (da ordem de 6 ms).

Loomans and Schijndel (2002) apresentaram a simulação e medidas das características estacionária e transiente de um anemômetro de esfera de filme quente de níquel. Para o uso em condições de regime estacionário, o anemômetro apresentou algumas restrições, sendo necessárias, conforme os autores, correções.

Para a situação transiente, o fator de amortecimento do anemômetro limita relativamente a resposta em frequência do referido anemômetro. Therdthai *et al.* (2004) desenvolveram um anemômetro baseado nos princípios da anemometria de fio quente, visando monitoração contínua de forno de padaria industrial. Eles também estabeleceram um modelo matemático descrevendo a relação entre a diferença de temperatura no sensor do anemômetro e a velocidade do fluido dentro do forno. Laghrouche *et al.* (2005) construíram um sensor de silício de fio quente em miniatura para as medidas automáticas da velocidade do vento. O sensor foi testado em um túnel de vento para a faixa de velocidade de 0 a 35 m/s e os resultados se apresentaram confiáveis. Sanyal *et al.* (2006) propuseram um circuito condicionador de sinal não linear para anemômetros de temperatura constante. Conforme os autores, resultados razoavelmente bons foram obtidos. Al-Garni (2007) descreve um sistema de calibração de anemômetros de fio quente para a situação de baixas velocidades do escoamento. A técnica de calibração é baseada em uma ponta de prova de fio quente que se move a uma velocidade determinada em um ambiente onde o ar permanece estagnado.

Neste estudo, é apresentado o circuito eletrônico de um anemômetro de filme quente, operado à corrente constante, constituído basicamente de uma ponte de Wheatstone e amplificador diferencial de alto ganho auxiliado por fonte de alimentação externa. A ponta de prova usada é similar a uma de filme quente exceto que o sensor é constituído de um sensor de temperatura de resistência elétrica depositado em grade em um substrato. O sensor de resistência, em película de níquel, é o ETG-50B, option E, com 50Ω , em grade de $3,2 \times 3,2 \text{ mm}$ e $5 \mu\text{m}$ de espessura fabricado pela Micro-Measurement, Romulus, Michigan, E.U.A. Foram investigadas as respostas estáticas e dinâmicas do instrumento proposto e os resultados se mostraram interessantes.

2 Circuito eletrônico

O circuito eletrônico usado para a operação do anemômetro de filme quente à corrente constante é apresentado na Figura 1. Convém observar que neste circuito está prevista a compensação pelo efeito da temperatura ambiente no instrumento, caracterizada pela introdução de um outro sensor de temperatura ETG-50B, em paralelo na ponte de Wheatstone. Através do *trimpot* de $2 \text{ k}\Omega$, foi permitida a passagem da corrente de $9,5 \text{ mA}$ através de sensor que acusou a relação de sobreaquecimento de 1,05.

Conforme circuito, no amplificador diferencial de voltagem, usou-se apenas um circuito integrado de instrumentação, com ganho efetivo de 682. A ação do divisor de tensão nos resistores de $2,2 \text{ k}\Omega$ e $15 \text{ k}\Omega$ é retornar somente uma fração de sinal de saída para a entrada, enquanto mantém a realimentação operacional. O circuito integrado usado, conforme manual de aplicação do fabricante (Fairchild Linear Integrated Circuits) permite melhor controle de zero de voltagem e redução de custo pela utilização de somente um circuito integrado.

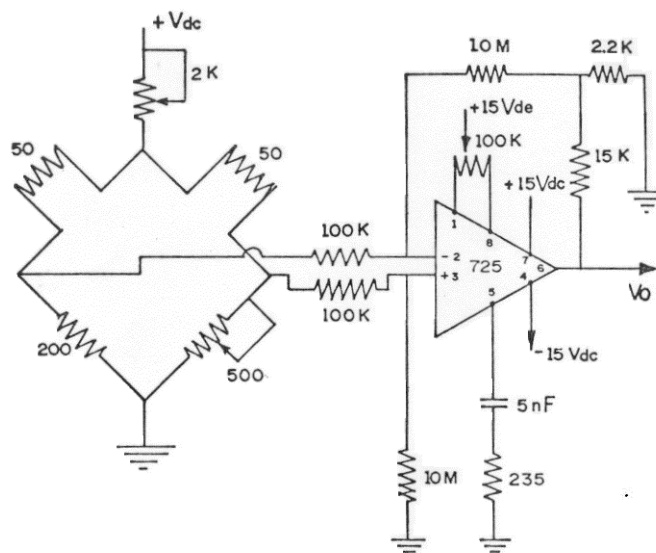


Figura 1: Circuito elétrico do anemômetro.

3 Detalhes experimentais

A calibração de um anemômetro normalmente consiste de medidas simultâneas da velocidade U e da saída em voltagem do anemômetro V e a partir da relação voltagem-velocidade determinam-se as constantes de calibração.

A resposta do instrumento foi investigada como uma função da velocidade usando uma bancada previamente disponível, consistindo de um soprador, anteparos em malhas para filtragem e regularização do escoamento, em um tubo de PVC de diâmetro nominal 100, com aproximadamente 1,5 m de comprimento seguido de um Venturi cuidadosamente manufaturado no sentido de se manter uniforme os perfis de velocidade. O elemento sensor foi alinhado perpendicularmente à direção do fluxo no centro da tubulação seguinte ao Venturi. Foram investigados fluxos de baixa velocidade, na faixa de 2 a 12 m/s. Para esta faixa de velocidade o ar pode ser considerado incompressível e a queda de pressão ΔP no Venturi expressa pela equação de Bernoulli. A diferença de pressão no Venturi foi lida em um manômetro cuja graduação apresentava resolução de 1 mm, resultando na incerteza de 0,80 m/s na velocidade do escoamento. Foram anotados pares de queda de pressão no Venturi e voltagem diferencial na saída do instrumento. As medidas de voltagem foram realizadas com incerteza de 3% de fundo de escala do multímetro utilizado.

Diversas técnicas são propostas na literatura (WIN and PRAHL, 1986) para a calibração de sensores de anemômetros de fio/filme quente em escoamento de fluidos à temperatura constante, entretanto a mais bem-sucedida delas todas é a baseada na Lei de King, a qual modela o resfriamento de um fio aquecido eletricamente, convectando com o campo de fluido que lhe passa normal, pela seguinte relação:

$$E^2 = A + BU^n \quad (1)$$

onde E é a queda de tensão no elemento sensor (neste estudo, a saída do instrumento), A e B , coeficientes levantados pelas observações experimentais e n o expoente o qual geralmente é atribuído o valor 0,5.

Para a determinação da resposta em frequência do anemômetro sob análise, foi utilizada a montagem experimental da Figura 2.

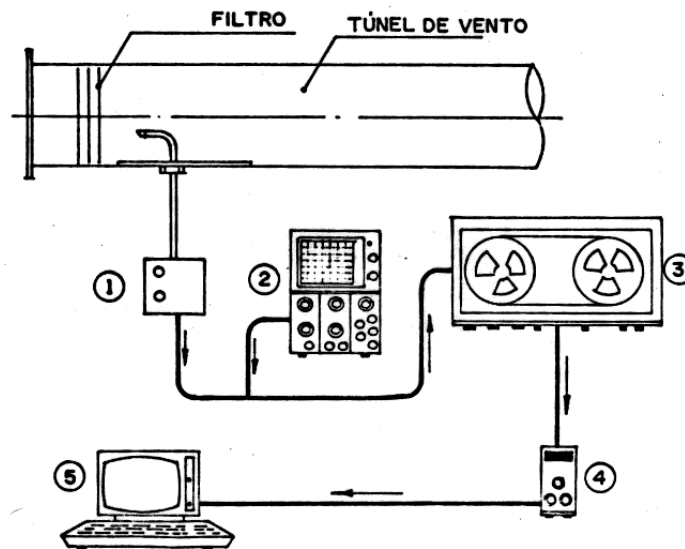


Figura 2: Montagem para a determinação da resposta em frequência

Ao ligar o soprador, a ponta de prova do anemômetro (1) era coberta com um copo. Quando o sinal proporcional à velocidade, monitorado pelo osciloscópio, estabilizava, o copo era retirado rapidamente expondo o sensor ao fluxo de ar. O sinal gerado pelo instrumento era armazenado em um gravador FM, posteriormente reproduzido, digitalizado e processado em um microcomputador. O procedimento foi repetido cinco vezes para cada um dos três pontos de operação do soprador, totalizando quinze experimentos.

Na digitalização dos sinais gerados pelo anemômetro, foram utilizados 2048 pontos e uma taxa de amostragem de 100 Hz. A taxa de amostragem relativamente baixa é justificada pelas constantes de tempo observadas nos sinais. Uma vez que as constantes de vento eram altas, os transientes ocorridos durante a retirada do copo foram desprezados (nas baixas frequências) e a excitação modelada como do tipo degrau unitário. Assumida esta hipótese, as respostas em frequência da excitação foram obtidas pelo uso de um algoritmo de FFT (Fast Fourier Transform) e as funções de transferência obtidas pela expressão $H(w) = G_{xy}/(G_{xx} \cdot G_{yy})$. A falta de um algoritmo de "Zoom" não permitiu que a frequência de corte (-3 dB) do sistema fosse determinada com precisão, mas

pode-se garantir que ela é menor que 0,1 Hz para os sinais analisados. Outro fato observado foi que o módulo da função de transferência decresce de 20 dB/década.

4 Resultados e análises

A Figura 3 apresenta as medidas do anemômetro contra as velocidades correspondentes. O ajuste de uma curva, pela Lei de King, demonstra desvio máximo dos valores experimentais na ordem de 10% nas velocidades menores que 2 m/s, resultante da imprecisão na determinação das velocidades nesta faixa. Esta característica também foi observada por Al- Garni (2007) que afirma que, quando a velocidade torna-se menor do que 2 m/s, fica muito difícil de se obter precisão nas medidas, principalmente quando o instrumento de referencia usado se baseia em diferença de pressão do fluido a jusante e montante. Os tubos de Pitot, Placas de Orifício e os Venturi são instrumentos típicos desta natureza. A curva linearizada ajustada pelos mínimos quadrados é da forma:

$$E^2 = 19,68 + 9,75 \times U^{0.5} \quad (2)$$

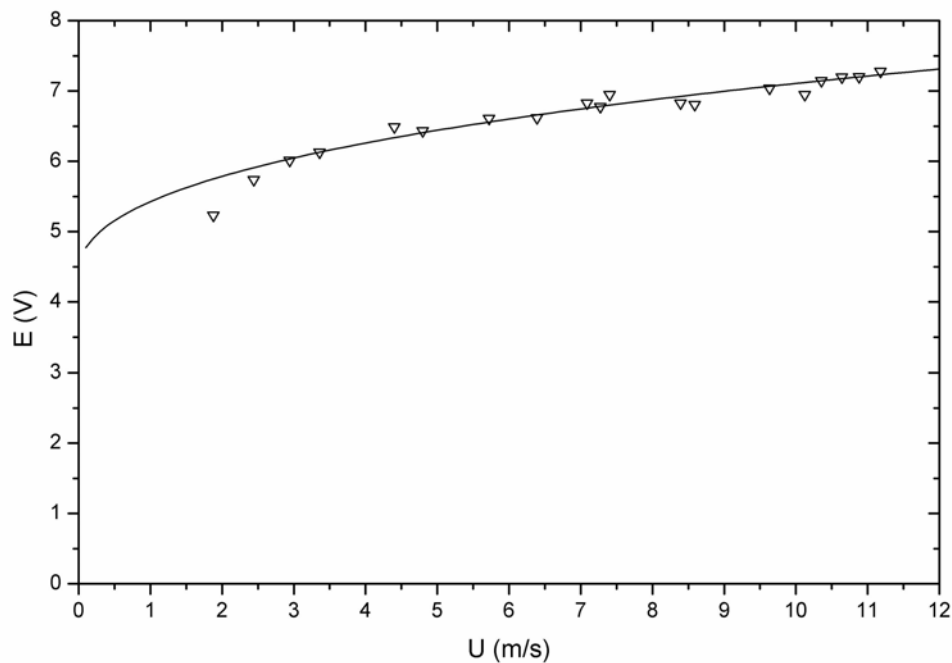


Figura 3: Curva de ajuste com a Lei de King

A Figura 4 apresenta a sensibilidade do anemômetro levantada pela diferenciação da expressão (2). Observa-se, como esperado, que para velocidades menores que 3 m/s a sensibilidade aumenta significativamente.

Em relação à resposta dinâmica, Kidron (1966), fazendo uma análise em frequência de um transdutor cilíndrico com filme quente, apresenta a seguinte expressão para a constante de tempo:

$$\tau = \frac{\rho c_p r}{2h} \quad (3)$$

sendo r (m) o raio do sensor (neste caso, é o comprimento do sensor), h ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) é o coeficiente global de transferência de calor, ρ (Kg/m^3) é a densidade do substrato e c_p ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$) é o calor específico do substrato do sensor.

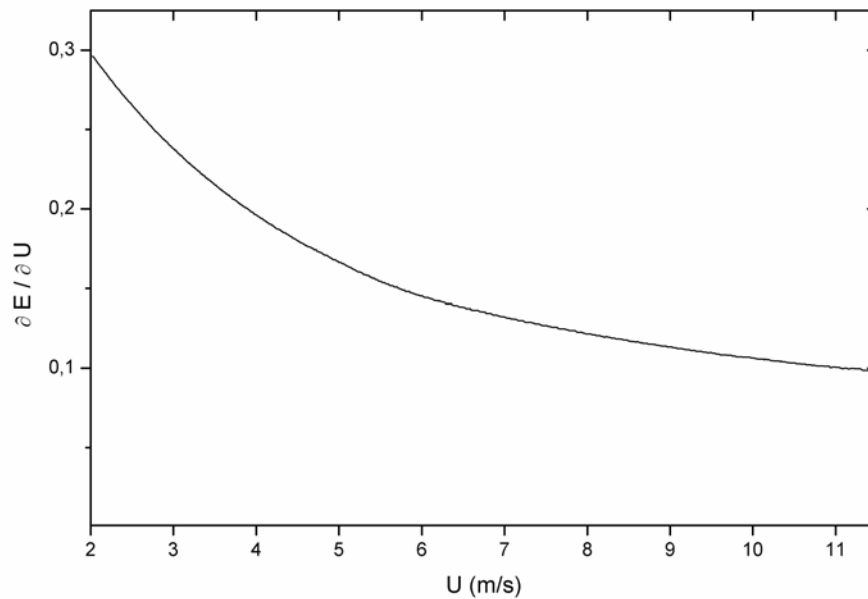


Figura 4: Sensibilidade de velocidade

A Tabela 1 apresenta as constantes de tempo média (63%) dos sinais obtidos em função da velocidade e \bar{h} sendo determinado pela expressão $\bar{h} = 88 + 279 \times (U^2)^{0,25}$ de MAC HATTIE (1979).

Tabela 1: Medidas experimentais e calculadas das constantes de tempo

\bar{U} (m/s)	\bar{h} (W/m ² . °C)	$\bar{\tau}$ med. (s)	$\bar{\tau}$ calc. (s)	Δ %
1,89	472	8,29	8,49	2,41
3,06	579	7,10	6,92	-2,53
4,00	645	6,98	6,22	-10,88

Observa-se pela Tabela 1 que a expressão de Kidron se adapta muito bem para o presente estudo, portanto podemos servir de critério qualitativo para a caracterização da resposta em frequência desta modalidade de anemômetro. Destaca-se também que a inércia térmica do substrato é o principal responsável pela resposta em frequência limitada do transdutor analisado, sendo que o mesmo só pode ser utilizado para a medição de fluxos em regime estacionário.

5 Conclusões

A partir da proposição, da manufatura e avaliação de um anemômetro de filme quente alternativo, pode-se concluir que:

1. O referido instrumento é de concepção simples;
2. Os resultados da avaliação se mostraram encorajadores;
3. Deve-se contar com a possibilidade de torná-lo um anemômetro à temperatura constante, visando melhoria na resposta em frequência.

Referências

- AL-GARNI, A. M. Low speed calibration of hot-wire anemometers. *Flow Measurement and Instrumentation*, London, v. 18, n. 2, p. 95-98, 2007.
- GIANI, A. et al. Thermal model of thin film anemometer. *Microelectronics Journal*, v. 33, n. 8, p. 619-625, 2002.

- KIDRON, I. Measurement of the transfer function of hot-wire and hot-film turbulence transducers. *IEEE Transactions Instrumentation and Measurement*, London, v. 15, n. 3, p. 76-81, 1966.
- LAGHROUCHE, M. et al. A miniature silicon hot wire sensor for automatic wind speed measurements. *Renewable Energy*, London, v. 30, n. 12, p. 1881-1896, 2005.
- MAC HATTIE, L. E. The transistor as an anemometer. *Journal of Physical E: Scientific Instruments*, Argonne, v. 12, n. 8, p. 754 -760, 1979.
- MAILLY, F. et al. Anemometer with hot platinum thin film. *Sensors and Actuators A Physical*, London, v. 94, n. 1, p. 32-38, 2001.
- SANYAL, N.; BHATTACHARYYA, B.; MUNSHI, S. An analog non-linear signal conditioning circuit for constant temperature anemometer. *Measurement*, London, v. 39, n. 4, p. 308-311, 2006.
- SHERIF, S. A. On the propagation of random errors of constant-temperature anemometers in nonisothermal flows. *Measurement*, London, v. 22, n. 3, p. 75-86, 1997.
- SHERIF, S. A.; PLETCHER, R. H. An analytical procedure for predicting the response of constant-temperature hot-wire and film anemometers. *Measurement*, London, v. 25, n. 3, p. 193-201, 1999.
- THERDTHAI, N.; ZHOU, W.; ADAMCZAK, T. The development of an anemometer for industrial bread baking. *Journal of Food Engineering*, London, v. 63, n. 3, p. 329-334, 2004.
- WIN, H.; PRAHL, J. M. Calibration of constant: temperature hot-film anemometers at low velocities in water of uniform temperature. *International Communication in Heat Mass Transfer*, New York, v. 13, n. 5, p. 567-575, 1986.

SOBRE OS AUTORES

Lutero Carmo de Lima

Graduou-se em Física no ano de 1974 pela Universidade de Santo Amaro, mestrado e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1979) e Universidade de São Paulo (1986), respectivamente e pós-doutorado na Universidade de Miami, no Clean Energy Research Institute (1991). Atualmente ocupa o cargo de professor junto ao Curso de Física da Universidade Estadual do Ceará, onde atua em nível de graduação e pós-graduação, trabalhando também com problemas fundamentais das ciências térmicas, instrumentação e energias alternativas. Publicou dezenas de artigos em revistas e congressos nestes assuntos.

Marcus Duarte Viana Duarte

possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia (1982) , mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1985) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (1994) . Atualmente é Docente da Universidade Federal de Uberlândia. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica , com ênfase em Mecânica dos Sólidos. Atuando principalmente nos seguintes temas: acústica, Motores Elétricos, Ventiladores Tesla.

Vinicius Milanez Couto

Graduando em Licenciatura em Física pela Universidade Estadual do Ceará e colabora com o Grupo de Física da Atmosfera da UECE.

João Bosco Verçosa Leal Junior

possui graduação em Bacharelado em Física Geral e Fundamental pela Universidade Federal do Ceará (1994), Mestrado em Física pela Universidade Federal do Ceará (1998) e Doutorado em Física pela Universidade Federal do Ceará (2003). Atualmente é Professor Adjunto da Universidade Estadual do Ceará (UECE). Tem experiência nas áreas de Física e Geociências, com ênfase em meteorologia física, atuando principalmente nos seguintes temas: microfísica de nuvens, modelagem numérica da atmosfera, análise estatística de dados e dinâmica molecular.