

DESENVOLVIMENTO DE UM ANEMÔMETRO DE FIO QUENTE A TEMPERATURA CONSTANTE

Alex Gabriel Hein¹, Guilherme Bertoldo²

RESUMO: Anemômetros de fio quente têm como foco a medição precisa da velocidade de fluidos, utilizando princípios de transferência de calor. À medida que o fluido se move sobre um sensor aquecido por uma corrente elétrica, ele esfria, e a quantidade de calor removida é função da velocidade do fluido. O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um anemômetro de fio quente a temperatura constante de baixo custo, isto é, de custo muito inferior a dispositivos semelhantes disponíveis no mercado. Para isso, foi construído um circuito eletrônico analógico com realimentação, utilizando um amplificador operacional LM358P para balancear uma ponte de Wheatstone e manter a operação do anemômetro em temperatura constante. Um termistor PTC C995 foi utilizado como sensor de velocidade em um dos braços da ponte de Wheatstone. Adicionalmente, um sensor DS18B20 foi integrado ao sistema para monitorar a temperatura do ar nas proximidades do instrumento, permitindo correções na velocidade do ar conforme as variações de temperatura. A calibração do anemômetro foi realizada em um túnel de vento desenvolvido pelos autores e produzido em impressora 3D. A avaliação do instrumento foi conduzida dentro de um secador de bancada com controle de fluxo de ar e temperatura. Os resultados demonstraram que o anemômetro foi capaz de medir velocidades do ar entre 0,0 e 8,0 m/s em temperatura fixa de 29 °C e, mantendo-se a velocidade fixa em 6 m/s, em temperaturas variando de 30 a 70 °C, com precisão de 0,3 m/s. O anemômetro de fio quente de baixo custo desenvolvido neste trabalho mostrou-se uma opção para aplicações em estudos ambientais e industriais, fornecendo uma alternativa acessível aos anemômetros convencionais.

Palavras-chave: arduino; sensor PTC; velocidade do ar.

1 INTRODUÇÃO

Anemômetros de fio quente são instrumentos sensíveis usados para medir a velocidade de escoamentos líquidos ou gasosos, baseando-se na transferência de calor entre um sensor aquecido por corrente elétrica e um fluido em escoamento. Esse calor, gerado pelo efeito Joule, é função da velocidade do fluido, constituindo o princípio básico de funcionamento da anemometria de fio quente (Eguti, 2005).

Para detectar variações na resistência elétrica do sensor, utiliza-se frequentemente a ponte de Wheatstone, que consiste em quatro resistores dispostos em forma de um

¹ Discente de Engenharia Química. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. E-mail: alexhein@alunos.utfpr.edu.br.

² Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. E-mail: gbertoldo@utfpr.edu.br.

quadrilátero, com uma fonte de tensão aplicada entre dois vértices opostos. Em condições de equilíbrio, o produto das resistências de dois lados opostos é igual (Malvino; Bates, 2007).

Existem dois tipos principais de anemômetros de fio quente: o de corrente constante (CCA, *Constant Current Anemometer*) e o de temperatura constante (CTA, *Constant Temperature Anemometer*). No CCA, a corrente de alimentação do circuito é mantida constante. Já no CTA, a tensão de alimentação varia para manter a temperatura do filamento constante, ajustando automaticamente o sistema conforme as condições do fluido mudam. A variação na resistência do sensor, localizado em uma das pontas da ponte de Wheatstone, gera um desequilíbrio na tensão de saída, que é amplificada e realimentada através de um amplificador. Esse processo ajusta a temperatura do sensor, restabelecendo o equilíbrio de correntes na ponte de Wheatstone. Essa capacidade de compensar rapidamente a inércia térmica do anemômetro torna o CTA mais preciso e eficiente, sendo amplamente utilizado para estudos de escoamentos (Jabardo, 2021).

Um dos desafios na construção de anemômetros de fio quente é a fragilidade dos fios, que são delicados e quebradiços, e cuja ruptura interrompe o funcionamento do anemômetro. Dessa forma, existem alternativas como sensores de diferentes materiais, entre eles os resistores termicamente sensíveis, conhecidos como termistores. Esses dispositivos são fabricados a partir de material semicondutor cerâmico e possuem um coeficiente de temperatura relativamente elevado, que pode ser negativo (NTC, *Negative Temperature Coefficient*) ou positivo (PTC, *Positive Temperature Coefficient*), dependendo do tipo de material semicondutor utilizado na sua fabricação. No caso dos termistores PTC, a resistência aumenta com o aumento da temperatura, enquanto nos NTC, a resistência elétrica diminui com o aumento da temperatura (Assis, 2018).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um anemômetro de fio quente a temperatura constante de baixo custo, significativamente mais acessível do que dispositivos similares disponíveis no mercado.

2 METODOLOGIA

Nessa seção, são descritos os procedimentos adotados para o desenvolvimento e avaliação do anemômetro de fio quente a temperatura constante. Os experimentos foram realizados

no Laboratório de Fabricação (FabLab) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná de Francisco Beltrão.

A primeira etapa do desenvolvimento do anemômetro consistiu na seleção dos componentes para o circuito eletrônico, incluindo o sensor de velocidade, levando em consideração fatores como durabilidade e baixo custo. Também foram definidos os resistores para a ponte de Wheatstone, assim como os modelos dos demais componentes eletrônicos.

Posteriormente, desenvolveu-se o circuito eletrônico analógico (Figura 1), conectado a um microcontrolador Arduino. O circuito conta com uma ponte de Wheatstone com realimentação proporcionada por um amplificador operacional (LM358P) e um transistor (TIP122G). A ponte de Wheatstone é composta pelo sensor PTC-C995 e por três resistores (R1, R2 e R3). A alimentação elétrica é fornecida pelo próprio Arduino e por uma fonte externa de 12 V.

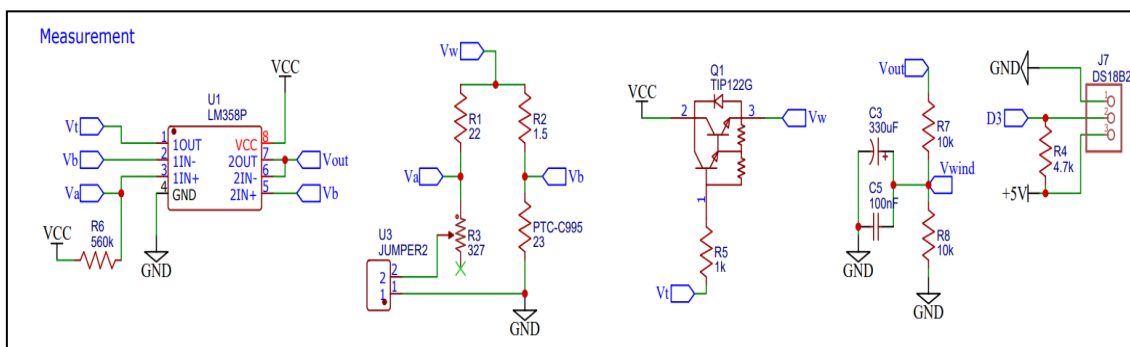


Figura 1: Circuito eletrônico analógico. Fonte: Autores (2024).

Quando o fluido troca calor com o termistor, sua resistência muda, provocando um desequilíbrio na ponte de Wheatstone. Esse desequilíbrio é detectado pelo amplificador operacional por meio das tensões de saída da ponte, V_a e V_b . O sinal de saída do amplificador (V_{out}) é lido pelo Arduino pela saída V_{wind} . Enquanto a realimentação da ponte ocorre por V_t , passando pelo transistor que irá amplificar o sinal através de V_w .

Um sensor DS18B20 foi integrado ao sistema para monitorar as variações de temperatura do ar e permitir compensações, conforme a equação descrita a seguir:

$$E_0 = E \cdot \sqrt{\frac{T_w - T_{\infty,0}}{T_w - T_{\infty}}}$$

Conforme Jabardo (2021), ao considerar uma condição de calibração específica de tensão e temperatura (E_0 e $T_{\infty,0}$), é possível determinar as grandezas em uma nova condição de operação (E e T_{∞}) para a mesma velocidade, desde que a variação no coeficiente de convecção seja desconsiderada. Nesse contexto, T_w representa a temperatura do sensor.

A calibração do anemômetro foi realizada em um túnel de vento desenvolvido pelos autores e fabricado em uma impressora 3D (Figura 2). As velocidades do ar foram registradas utilizando um anemômetro MINIPA-MDA-11A, em um intervalo de 0,0 a 8,0 m/s, com incrementos de 1,0 m/s, em condições de temperatura ambiente de 29 °C e temperatura do sensor de 120 °C.

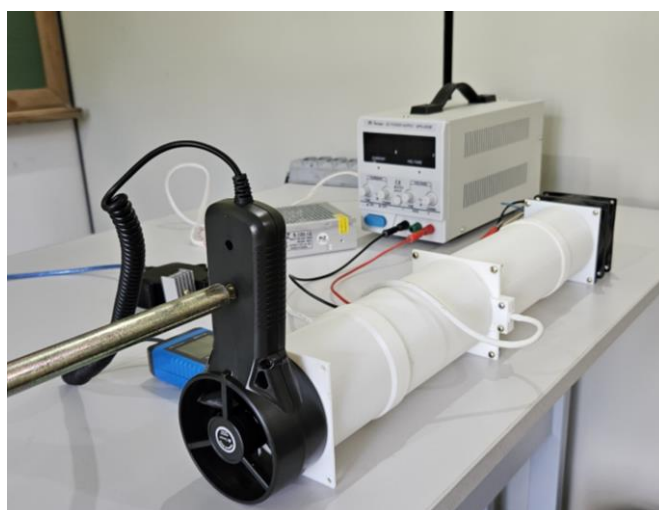


Figura 2: Túnel de vento fabricado em impressora 3D. Fonte: Autores (2024).

A avaliação do anemômetro foi realizada em um secador de bancada com controle de fluxo e temperatura, disponível no FabLab. O anemômetro foi exposto a uma velocidade constante de 6 m/s, em um intervalo de temperatura de 30 a 100 °C.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os valores analógicos (0-1023) registrados pelo Arduino a partir de V_{wind} , em função da velocidade medida pelo anemômetro de referência. Devido à natureza não linear dos dados, o microcontrolador realiza interpolações para associar os valores analógicos às respectivas velocidades.

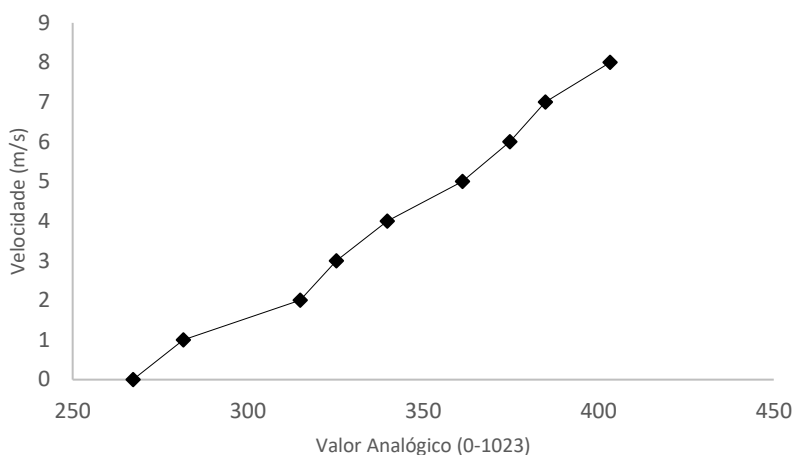


Figura 3: Calibração. Fonte: Autores (2024).

A Figura 4 permite avaliar o desempenho do anemômetro em realizar leituras corretas de velocidade (em preto) quando submetido a diferentes temperaturas (em vermelho), mantendo uma velocidade constante de 6 m/s dentro do secador. Utilizando a equação previamente descrita, o anemômetro demonstrou eficácia na compensação das variações térmicas, mantendo a velocidade estável em 6 m/s com precisão de 0,3 m/s, até aproximadamente 70 °C.

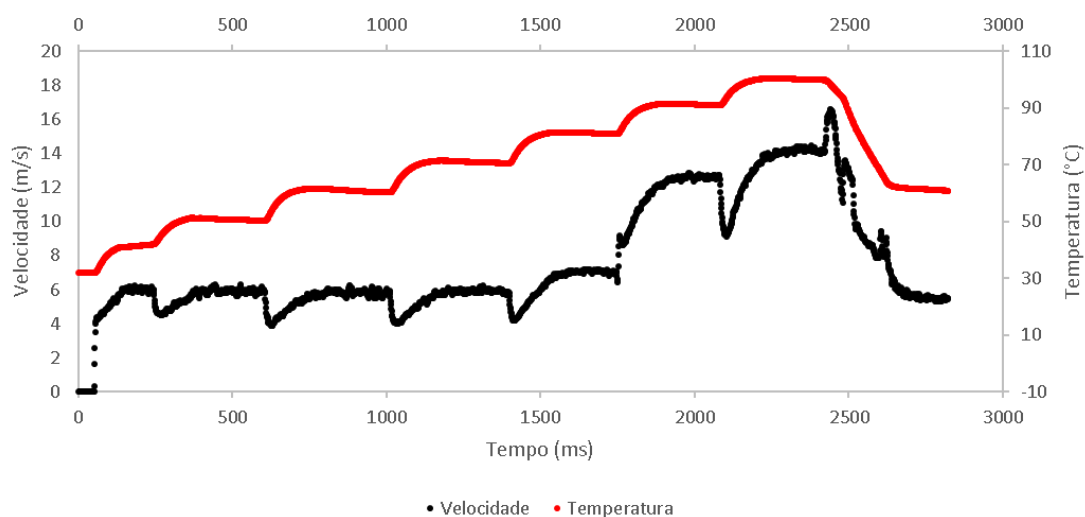


Figura 4: Avaliação. Fonte: Autores (2024).

Acima dessa temperatura, o comportamento do anemômetro torna-se imprevisível, impedindo que tanto o circuito quanto a equação se ajustem corretamente para medir a velocidade.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O anemômetro de fio quente a temperatura constante desenvolvido neste trabalho oferece uma solução de baixo custo, com um preço de fabricação em torno de R\$ 50,00. Apresenta-se como uma alternativa acessível aos anemômetros convencionais, sendo adequado para aplicações em estudos ambientais e industriais. O dispositivo demonstrou eficácia na medição de velocidades do ar entre 0,0 e 8,0 m/s em temperatura fixa de 29 °C e, mantendo-se a velocidade fixa em 6 m/s, em temperaturas variando de 30 a 70 °C, com precisão de 0,3 m/s.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UTFPR por disponibilizar o Laboratório de Fabricação (FabLab) para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- EGUTI, C. C. A. **Desenvolvimento de um circuito eletrônico experimental de anemômetro de fio quente**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, 2005.
- ASSIS, R. F. A. de. **Projeto de um anemômetro térmico baseado em termistor NTC com modelo linearizado por realimentação**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.
- JABARDO, P. J. S. **Anemômetro a temperatura constante de baixo custo**. In: Workshop TRM Tecnologias Regulatórias e Metrológicas. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 2021.
- MALVINO, A.; BATES, D. J. **Eletrônica**. v. 1. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2007. 672 p.