

Nº 177312

Anemômetro a temperatura constante de baixo custo

Paulo José Saiz Jabardo

*Palestra apresentada no WORKSHOP
TRM TECNOLOGIAS REGULATÓRIAS E
METROLÓGICAS, 4., 2021., São Paulo. 5
slides*

A série “Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública.

ANEMÔMETRO A TEMPERATURA CONSTANTE DE BAIXO CUSTO

Paulo José Saiz Jabardo

IPT/CTMETRO/Laboratório de Vazão

pjabardo@ipt.br

Resumo. Um sistema de anemometria com múltiplos canais é descrito e analisado. Cada sensor consiste em um anemômetro a temperatura constante cujo elemento sensor é um termistor NTC. O critério de projeto é o baixo custo e disponibilidade dos componentes no Brasil. O sistema também inclui uma placa de aquisição de dados que permite a leitura simultânea de 32 canais a 12 bits e comunicação por WiFi ou Bluetooth.

Palavras-chave: termoanemômetro, termistor, fio quente, aquisição de dados, esp32, arduino

1. INTRODUÇÃO

A medição de velocidade de fluidos, em particular do ar, é de suma importância em diferentes áreas. Para tanto diferentes tipos de sensores com diferentes princípios de funcionamento são empregados na indústria e academia (Tavoularis, 2005). Um tipo de sensor com ampla aplicação são os termoanemômetros cujo princípio de funcionamento depende da transferência de calor de um elemento aquecido. As vantagens deste tipo de sensor é a ampla faixa de operação, dependendo apenas da calibração, a sensibilidade em baixas velocidades e a possibilidade de se medir altas frequências com o anemômetro de fio quente que ainda hoje é o instrumento básico na medição de flutuações turbulentas.

O que este artigo propõe não é nada novo do ponto de vista do sensor mas plataformas como Arduino (www.arduino.cc) permitem que redes com um grande número de sensores possam ser utilizados a baixo custo. Mas para tanto é necessário que uma eletrônica simples e acessível esteja disponível. É este o nicho que o trabalho deste artigo procura ocupar. Jabardo *et al.* (2018) propõe um sistema deste tipo utilizando o princípio de corrente constante mas diversos problemas foram detectados na eletrônica do sistema e no sistema de aquisição de dados.

Desenvolver sensores de baixo custo não é o suficiente se não forem desenvolvidos sistemas de aquisição de dados com desempenho suficiente e, *também*, baixo custo. Neste artigo é descrito um sistema de aquisição de dados com 32 canais utilizando o microcontrolador ESP32 e o conversor A/D MCP3208.

2. ANEMOMETRIA DE FIO QUENTE

Existem diversos princípios de funcionamento de termoanemômetros mas, em sua maioria, estes sistemas empregam um elemento aquecido por corrente elétrica cuja a resistência varia com a temperatura. Assim, uma corrente elétrica aquece este elemento e a convecção ocorrendo na superfície externa do elemento aquecido transfere este calor para o fluido. Esta transferência de calor depende da velocidade do fluido e uma calibração pode ser usada para se correlacionar a transferência de calor com a velocidade.

Duas técnicas são comuns:

- Corrente constante (CCA, *Constant Current Anemometer*)
- Temperatura constante (CTA, *Constant Current Anemometer*)

No sistema a corrente constante (CCA), uma corrente constante passa pelo elemento sensor aquecido e a sua temperatura (e portanto resistência) varia com a velocidade do fluido. Um dos sistemas sugeridos por Jabardo *et al.* (2018) usa este princípio. Lomas (1986) mostra que em geral o CCA tem desempenho inferior ao sistema com temperatura constante (CTA) principalmente em sistemas com largura de banda alta para medir turbulência.

2.1 Anemômetro a temperatura constante - CTA

No sistema de temperatura constante, um controlador tenta manter a temperatura constante mantendo a resistência constante. Assim, a partir da equação de transferência de calor por convecção (Incropera and De Witt, 2005),

$$Q = R_w \cdot I^2 = h \cdot A (T_w - T_\infty) \quad (1)$$

nesta equação, Q é o calor gerado pela dissipação de Joule no elemento sensor aquecido, $R_w = R_w(T_w)$ é a resistência do elemento sensor que é mantida constante (portanto a temperatura T_w também é mantida constante), h é o coeficiente de convecção que varia com a velocidade e propriedades do fluido, A é a área superficial externa do sensor, T_∞ é a temperatura ao longe.

A primeira dificuldade nesta equação é conhecer o coeficiente h . Usar correlações obtidas na literatura pode ser suficiente para projetar um sensor mas as incertezas são elevadas demais para que se possa usar como sistema de medição. A solução é calibrar o sistema.

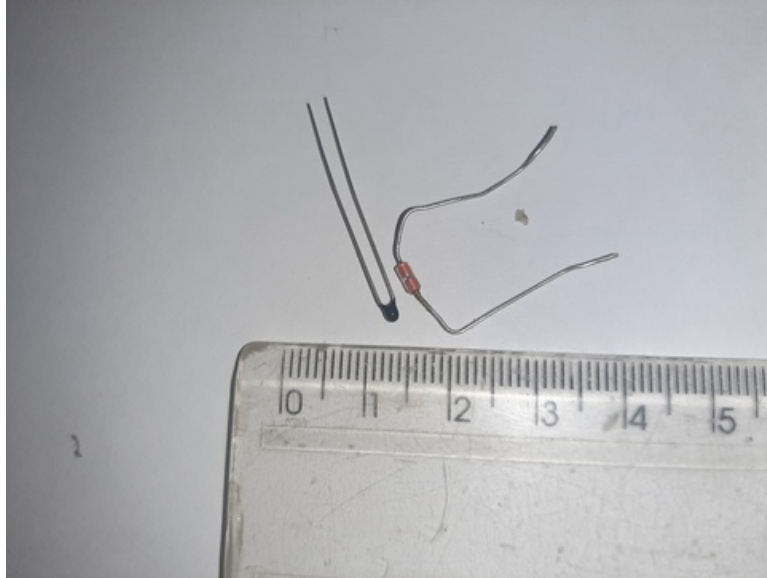


Figura 1. Exemplo de termistores facilmente encontrados na literatura. O termistor preto é da família MF52 e o vermelho da família MF58.

2.2 Efeito da temperatura ambiente

Um outro efeito que pode ter grande impacto é a temperatura ambiente T_{∞} . Variando a temperatura ambiente, muda-se a transferência de calor. A literatura propõe diversas técnicas para se compensar este efeito usando a própria eletrônica mas para manter o sistema simples e lembrando que o sistema utiliza microcontroladores e computadores, esta correção pode ser feita matematicamente como se descreve a seguir.

Se a saída eletrônica do anemômetro for a tensão no elemento sensor então,

$$E = R_w I \quad \longrightarrow \quad Q = R_w I^2 = \frac{E^2}{R_w}$$

Dada uma medição nas condições de operação (E e T_{∞}), as condições nas condições de calibração para uma mesma velocidade (E_0 e $T_{\infty,0}$), desprezando quaisquer variações no coeficiente de convecção h , podem ser obtidas usando a seguinte expressão:

$$E_0 = E \times \sqrt{\frac{T_w - T_{\infty,0}}{T_w - T_{\infty}}} \quad (2)$$

2.3 Elemento sensor - Termistor NTC

Até este momento, a única condição é imposta é que a resistência elétrica do elemento sensor varie com a temperatura. Em muitas aplicações, fios ou filmes metálicos são utilizados. Este tipo de sensor é frágil e sua manufatura é, no mínimo, complicada. Neste projeto, decidiu-se utilizar um termistor NTC.

O termistor NTC é um sensor feito com material semicondutor cuja resistência varia drasticamente com a temperatura. Nos termistores NTC (negative temperature coefficient), a resistência diminui drasticamente à medida que a temperatura aumenta (Sandborn, 1972):

$$R(T) = R_0 \exp \left[B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (3)$$

A figura 1 mostra dois exemplos de termistores utilizados n este projeto. O termistor preto é menor e sua capa protetora negra é um termoplástico que limita a temperatura a $120^{\circ}C$. O outro termistor tem uma proteção de vidro que permite operar a temperaturas superiores s $200^{\circ}C$. No entanto, as dimensões são maiores e a inércia térmica é maior.

Este termistores utilizados introduzem uma nova dificuldade não prevista na equação para transferência de calor (eq. 1): a capa protetora é um isolante térmico e a diferença de temperatura utilizada no cálculo da transferência de calor ($T_w - T_{\infty}$) não é correta pois a temperatura da superfície externa do termistor não é T_w mas sim T_s (esta é uma temperatura média externa). Modelando a condução de calor, a equação para convecção de calor 1 se torna

$$Q = R_w \cdot I^2 = h \cdot A (T_s - T_{\infty} - \beta \cdot Q) \quad (4)$$

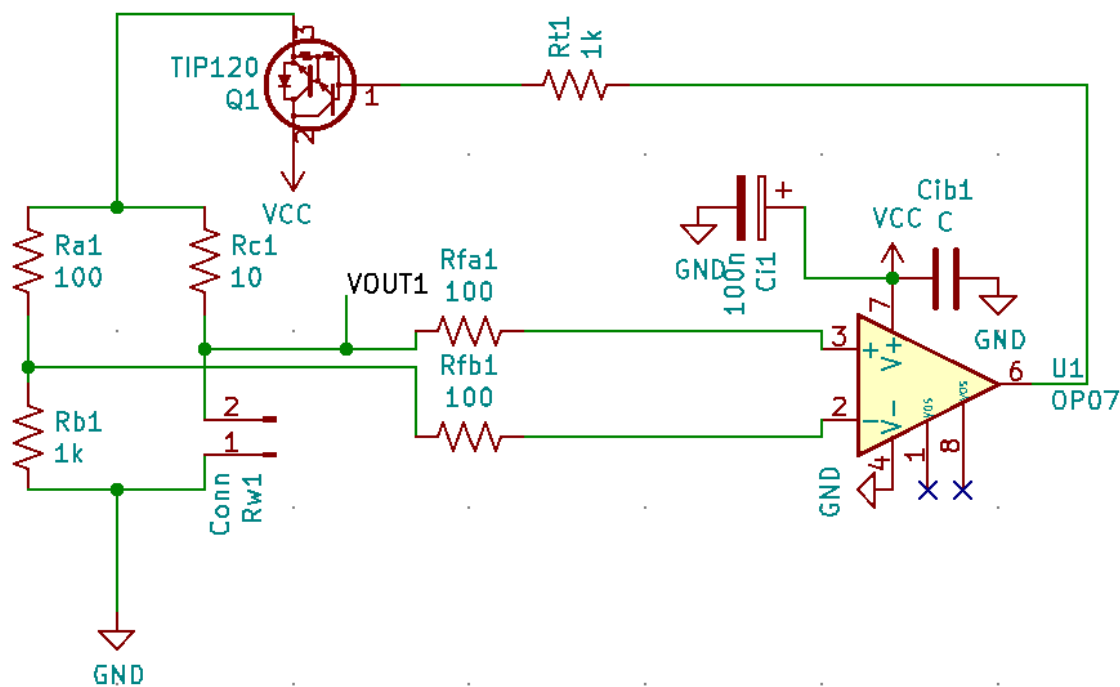


Figura 2. Circuito do anemômetro. A termistor é ligado no conector Rw1 da figura.

nesta equação, o parâmetro β leva em conta a geometria exata e o material da capa protetora do termistor. Este parâmetro pode ser estimado com simulações numéricas mas também pode ser estimado variando a temperatura do termistor T_w para uma mesma velocidade.

A hipótese básica para se obter a correção por temperatura é que na calibração e na operação, para uma mesma velocidade, o coeficiente de convecção h não varia. Felizmente, manipulando a expressão acima, a equação de correção por variação de temperatura ambiente (eq. 2) continua válida.

2.4 O circuito eletrônico

A ideia básica do circuito utilizado pelo anemômetro pode ser visto na figura 2. O termistor é posicionado em uma das pernas de uma ponte de Wheatstone. Lembrando que a resistência varia com a temperatura e que o objetivo deste circuito é manter a temperatura constante, as outras resistências são escolhidas de modo que a ponte esteja balanceada quando R_w está no valor desejado.

Qualquer diferença, vai desbalancear a ponte e neste caso existem duas possibilidades:

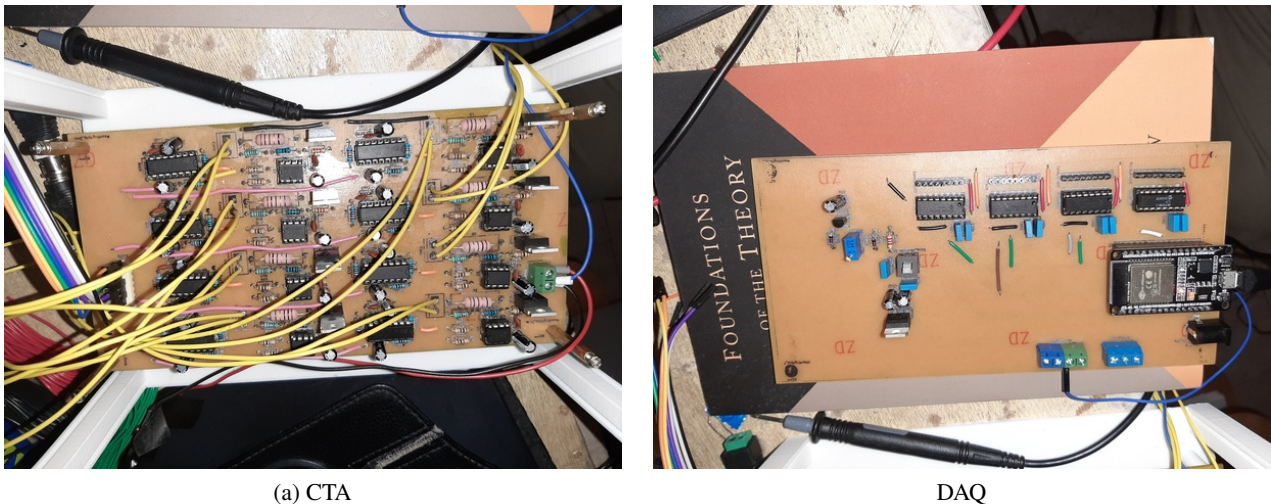
- A resistência está mais alta: o sensor está frio e o circuito deve aumentar a corrente.
- A resistência está mais baixa: o sensor está mais quente que o desejado e o circuito deve reduzir a corrente.

Observe que estas duas condições não são simétricas. Para reduzir a temperatura, o máximo que o sistema pode fazer é desligar a corrente e a própria convecção resfria o sensor. Já para aquecer o sensor, o limite é a potência elétrica disponível. Deste modo, para aumentar a temperatura, a resposta é mais rápida que ao reduzir a temperatura. Mas o problema é mais complexo ainda: o tempo de resposta ao resfriamento do sensor depende da velocidade. Velocidades mais altas têm resposta mais rápida, assim como sensores na água (muito mais eficiente na transmissão de calor).

Este assimetria na resposta do circuito tem consequências. Imagine um campo de velocidades variando no tempo. Quando a velocidade aumenta, o circuito pode responder rapidamente. Já, quando a velocidade diminui, a redução da temperatura ocorre mais lentamente.

Os termistores mostrados na figura 1 têm um isolante térmico (a capa protetora) e, portanto, esta assimetria é importante. Filtros passa baixa (numéricos ou analógicos) devem ser utilizados.

Os termistores com capa protetora termoplástica apresentam constante de tempo de aproximadamente 3 s. Os termistores com capa protetora de vidro são mais lento com constante de tempo chegando a 10 s.



(a) CTA DAQ
Figura 3. Placas com 8 anemômetros (a) e placa de aquisição de dados com 32 canais (b).

3. SISTEMA DESENVOLVIDO - CTA E AQUISIÇÃO DE DADOS

Os CTAs foram desenvolvidos de modo que fossem de baixo custo e os componentes fossem facilmente adquiridos no Brasil. O projeto é aberto e quem quiser utilizar, construir ou colaborar, pode encontrar todas as informações na página web <https://github.com/pjabardo/multianem>. Este site tem o projeto da eletrônica, incluindo as placas PCB dos anemômetros e sistema de aquisição. O software ainda está em desenvolvimento.

A figura 3(a) mostra a placa com 8 anemômetros. Já a figura 3(b) mostra a placa de aquisição. A tentação inicial é utilizar as entradas analógicas do microcontrolador. Mas experiência mostra que estas entradas analógicas em geral não são confiáveis, variam com a tensão de alimentação e no caso da ESP32, o comportamento é ruidoso e não linear.

O microcontrolador ESP32 foi utilizado pois possui alta capacidade de processamento, baixo custo (R\$ 60) e características interessantes como WiFi e Bluetooth embutidos.

Para se contornar esta dificuldade, foi utilizado o circuito integrado MCP3208 que tem 8 entradas pseudo-diferenciais de 12 bits. Foi desenvolvido um circuito para fornecer a tensão de referência do MCP3208 utilizando o CI LM336-2.5V. O MCP3208 utiliza o protocolo SPI para comunicação e mais de um pode ser utilizado no mesmo barramento. Neste caso 32 estão sendo utilizados. A taxa de amostragem possível com os 32 canais é superior 500 Hz, adequado para as medições com os termistores.

4. RESULTADOS

Uma placa com um único CTA foi testada durante mais de um mês onde diversas calibrações foram realizadas. A figura 4(a) sobrepõe todas as calibrações.

O circuito foi bastante repetitivo após 10 calibrações e 1 mês e meio de testes. A instalação utilizada para as calibrações enfatizaram facilidade ao invés de incerteza. O sistema de calibração não era o adequado para esta aplicação (sensor demasiado grande) e alguns aspectos não foram controlados e portanto a incerteza destas medições foi alta, compatível com os resultados observados na figura 4. Mas mais importante, não foi observado nenhum *drift* no sistema, mesmo operando durante quase 2 meses continuamente.

O sistema de aquisição não foi testado de maneira exaustiva ainda, apenas testes preliminares foram realizados por enquanto.

Um teste interessante realizado foram medições na água. Nenhum ensaio rigoroso foi realizado mas um sensor foi posicionado dentro da água com cuidado para que não houvesse contato elétrico entre o sensor e a água. Naturalmente, a temperatura deste sensor tinha que ficar abaixo de $100^{\circ}C$ para não haver ebulição e um termistor com resistência adequada foi utilizado. O sistema funcionou e era sensível à movimentação da água.

5. DISCUSSÃO

O sistema desenvolvido apresenta baixo custo. Uma placa com 8 CTAs custa ao redor de R\$ 80. Já o sistema de aquisição com 32 canais custa ao redor de R\$ 180. Assim, um sistema com 32 canais custa próximo de R\$ 500 (isso não inclui mão de obra).

O sistema desenvolvido é bem simples e flexível. Diferentes aplicações podem ser desenvolvidas. A eletrônica pode ser modificada e adaptada. Anemômetros individuais de baixo custo podem ser construídos. A flexibilidade permite desenvolver instrumentos diferentes. Usar dois sensores em paralelo com espaçamento fixo permite estimar a derivada do

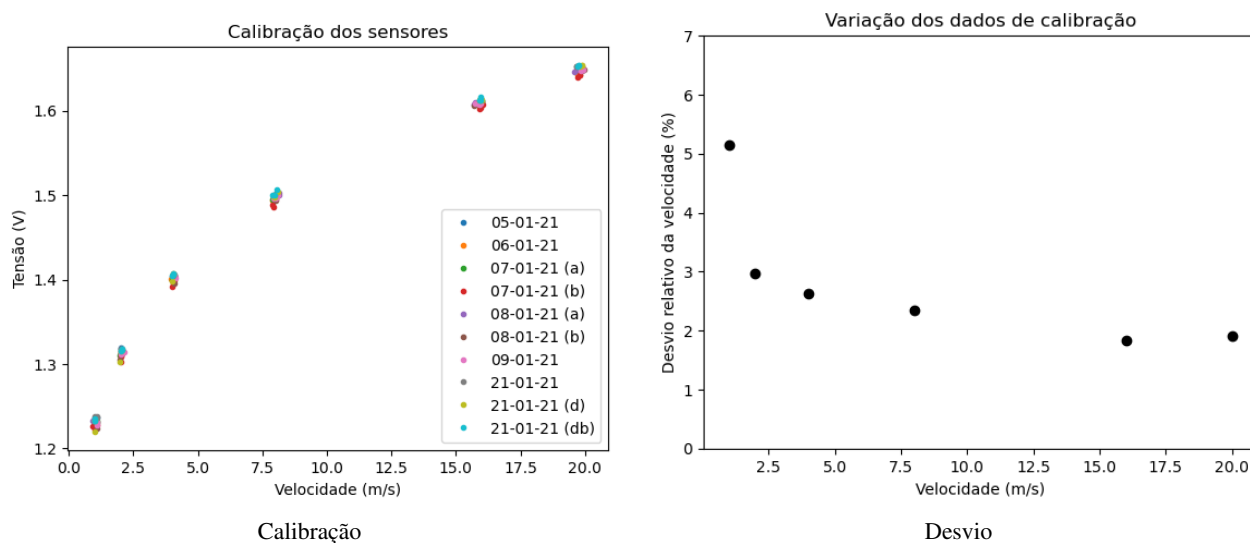


Figura 4. Resumo das calibrações realizadas. A parte (a) mostra todas as calibrações realizadas num mesmo gráfico, já a parte (b) mostra a variação relativa em cada ponto.

campo de velocidades, uma grandeza importante quando se analisa sistemas de ventilação ambiental.

O uso em água introduz mais possibilidades. Um aspecto interessante deste teste é que quando não havia água, o sensor tinha uma saída baixa. Assim, além de medir velocidade, o sensor pode ser utilizado para verificar a presença ou não de água. Uma possível aplicação é a medição de fração de vazio em escoamentos bifásicos.

O sistema ainda está em desenvolvimento e melhoras são esperadas. Utilizando componentes mais caros, pode-se ter um desempenho melhor em anemômetros individuais onde o custo da eletrônica não é tão importante e pode-se empregar termistores de dimensões reduzidas e mais frágeis mas com custo superior.

Outra possível aplicação é no desenvolvimento de medidores de vazão, seja no estilo tradicional como um mássico térmico de inserção ou um sistema para medir vazão em grelhas de ventilação onde uma rede de sensores permite medir a vazão de maneira precisa e com baixíssima perda de carga.

Mas o baixo custo, tanto do sistema, quanto dos sensores permite aplicações não imaginadas antes: instalação permanente ou em lugares onde pode haver perda ou roubo dos sensores.

Até este momento, os elementos sensores foram termistores. Pequenas modificações permitem que se desenvolvam sistemas para medir flutuação de velocidade e turbulência como mostrado por Itsweire and Helland (1983) e Osorio (2010). Esta é a próxima etapa do projeto. Isso permite desenvolver medidores de vazão rápidos como os usados em ventiladores pulmonares onde a vazão deve ser medida com uma amostragem de 200 Hz.

Sendo um projeto aberto, comentários, ideias mas principalmente a utilização e contribuições são bem vindas.

6. AGRADECIMENTOS

Este projeto foi desenvolvido na minha residência no meu tempo pessoal mas alguns testes foram realizados no IPT. Eu agradeço o meus colegas Gilder, Gabriel Nilson pela ajuda e incentivo.

7. REFERENCES

- Incropera, F.P. and De Witt, D.P., 2005. *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons, New York.
- Itsweire, E.C. and Helland, K.N., 1983. "A high-performance low-cost constant temperature hot-wire anemometer". *J. Phys. E: Sci. Instrum*, Vol. 16, pp. 549–553.
- Jabardo, P.J.S., Alves, L., Martins, G.B. and Nader, G., 2018. "Low cost anemometers for wind tunnel and ventilation applications". *Revista do IPT*, Vol. 2, No. 10, pp. 171–182.
- Lomas, C.G., 1986. *Fundamentals of hot wire anemometry*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Osorio, O.D., 2010. *Sensores de Tensão de Corte en Pared para Uso en Gases*. Ph.D. thesis, Instituto Balseiro, Universidade Nacional de Cuyo, Bariloche.
- Sandborn, V.A., 1972. *Resistance temperature transducers*. Metrology Press, Fort Collins.
- Tavoularis, S., 2005. *Measurement in Fluid Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge.