



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM ANEMÔMETRO DE BAIXO CUSTO A PARTIR DE UM VENTILADOR DE PROCESSADOR

Kaelaine Carvalho da Silva, kaelaine.s3106@ufob.edu.br¹

André Issao Sato, andre.sato@ufob.edu.br¹

Tony Silva Almeida, tony.almeida@ufob.edu.br¹

Yuri Macêdo Alves, yuri.a8196@ufob.edu.br¹

¹ Centro Multidisciplinar Universidade Federal do Oeste da Bahia, Av. Manoel Novaes, 1064, Centro, Bom Jesus da Lapa/BA, 47600-000.

Resumo. O anemômetro consiste em um instrumento de ampla utilização em aplicações de engenharia e seu funcionamento pode se dar por diversas relações entre variáveis físicas. Com isto, o projeto tem como objetivo construir um anemômetro de baixo custo baseado em ventilador de processador, um sensor Hall e a placa controladora Arduino®. Para o desenvolvimento do projeto foi criado um código base em linguagem C++, para coletar dados referentes a frequência de rotação do ventilador, temperatura e umidade do ar. Ademais, realizou-se a calibração por meio da comparação com um anemômetro comercial, ambos acoplados em uma base e no interior de um túnel de vento. Foram coletadas no anemômetro da Incoterm® e no anemômetro de baixo custo, 120 medidas, sendo uma a cada 60 s, com velocidades do escoamento de ar variando de 1 a 4 m/s, aproximadamente. O anemômetro de baixo custo apresentou desvio padrão menor que 0,1963 m/s em todas as amostras, com erro relativo médio de 6,15 % em comparação com o anemômetro de referência, além de 76,69 % dos resultados com margem de erro absoluto de 0,20 m/s.

Palavras-chave: Anemômetro. Arduino®. Calibração. Sensor de efeito Hall.

Abstract. The anemometer consists of an instrument widely used in engineering applications, and its operation can occur through various relationships between physical variables. With this in mind, the project aims to build a low-cost anemometer based on a processor fan, a Hall sensor, and the Arduino® control board. For the development of the project, a base code was created in C++ language to collect data regarding the fan's rotation frequency, air temperature, and humidity. Additionally, calibration was performed by comparison with a commercial anemometer, both mounted on a base inside a wind tunnel. 120 measurements were taken with the Incoterm® anemometer and the low-cost anemometer, one every 60 seconds, with airflow velocities ranging from 1 to 4 m/s. The low-cost anemometer showed a standard deviation of less than 0.1963 m/s in all samples, with a mean relative error of 6.15 % compared to the reference anemometer, and 76.69 % of the results with an absolute error margin of 0.20 m/s.

Keywords: Anemometer. Arduino®. Calibration. Hall effect sensor.

1. INTRODUÇÃO

Em estudos que envolvam a velocidade do vento, torna-se necessária a obtenção de informações precisas para tomadas de decisões, o que é comum nas áreas de meteorologia, turbinas eólicas e agricultura (Avallone *et al.*, 2019). Com isso, são vários os anemômetros existentes voltados para medir velocidade do vento, temperatura e até mesmo a direção dele. Um exemplo disso é a utilização para avaliar o potencial eólico de uma região, sendo fundamental um anemômetro preciso, além de equipamentos de qualidade para coleta de dados.

Deste modo, atualmente, os anemômetros de palhetas são normalmente usados para medir a velocidade do ar ou de substâncias gasosas à temperatura ambiente e determinar a vazão volumétrica em diversas aplicações, como sistemas de ventilação de mineração, sistemas de controle de ar ou gás em fábricas, sistemas agrícolas inteligentes e sistemas meteorológicos (Williams *et al.*, 2010; Choon *et al.*, 2012). Em virtude disso, adquirir um anemômetro preciso se torna muito custoso, o que justifica a sua aquisição apenas voltada para projetos de pesquisa que tenham altos custos envolvidos (Predolin *et al.*, 2017).

Nesse sentido, visando projetos com baixo investimento, é necessário que sejam equipamentos pequenos que demandem baixo custo. Deste modo, considerando a importância deste dispositivo em vários estudos, o presente projeto tem como finalidade desenvolver e avaliar um anemômetro de baixo custo baseado em um cooler de processador e um sensor Hall, que possa contabilizar a velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ambiente. Assim, o trabalho em questão tem como objetivo demonstrar o desenvolvimento do anemômetro de baixo custo a partir de um ventilador de processador e o processo de calibração do mesmo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do protótipo de baixo custo, são destacados a seguir os procedimentos empregados neste estudo. Sendo apresentado o código da programação utilizada no Arduino, para facilitar implementações e melhorias futuras.

2.1. Escolha dos materiais

Thepnurat *et. al.* (2018) realizaram a construção de um anemômetro de palhetas de baixo custo baseado na interface *LabVIEW* para Arduino, o mesmo utilizou um *cooler* de CPU com um sensor de velocidade instalado, obtendo bons resultados além de se mostrar eficiente. Com isso, seguindo esse princípio da utilização do *cooler*, visando o baixo custo e a utilização de sensores diferentes do sensor de velocidade, para o desenvolvimento do protótipo do anemômetro em questão, foi escolhido um ventilador de processador, Fig. 1a, com dimensões da carcaça de 80x80x25 mm.

Para medir a rotação do ventilador, foi instalado um ímã de neodímio de dimensões 3 mm x 2 mm, como em Avallone *et al.* (2019), e um sensor de efeito Hall, pois o mesmo detectava a presença do ímã em uma curta distância do mesmo. Outra possibilidade de sensor consistiria na chave magnética *reed-switch*, mas que possuía sensibilidade comparativamente maior da presença do ímã e as medições eram afetadas pelo fenômeno apresentado, da mesma forma que discutido em Araújo *et al.* (2017).

O ímã foi posicionado na parte interna do cubo do ventilador e o sensor de efeito Hall foi posicionado na placa de circuito impresso do próprio cooler, conforme Fig. 1b, para que o sensor ficasse a uma distância de 5 mm do ímã. Em seguida, para obter os dados sobre umidade e temperatura, foi escolhido o sensor DHT22, Fig. 1c, com faixa de umidade medida de 0 a 100% $\pm 2\%$ e faixa de temperatura de -40°C a $80^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (Ahmad, Y.A. *et. al.*, 2021).

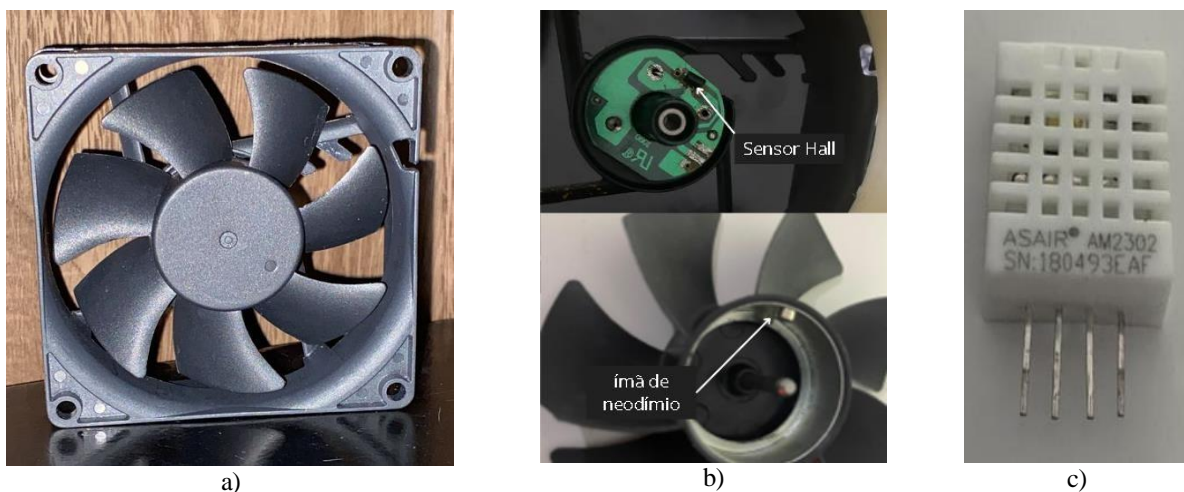


Figura 1. Instalação dos sensores: a) no ventilador, b) ímã no cubo do ventilador e sensor de efeito Hall na placa de circuito, c) DHT22 na parte externa (Autores, 2024)

Para a aplicação dos sensores foi utilizado o Arduino® UNO (Arduino, 2022) e as conexões dos mesmos na placa utilizando jumpers e uma placa de circuitos, com resistências de 10 k Ω cada, foram feitas conforme Fig. 2.

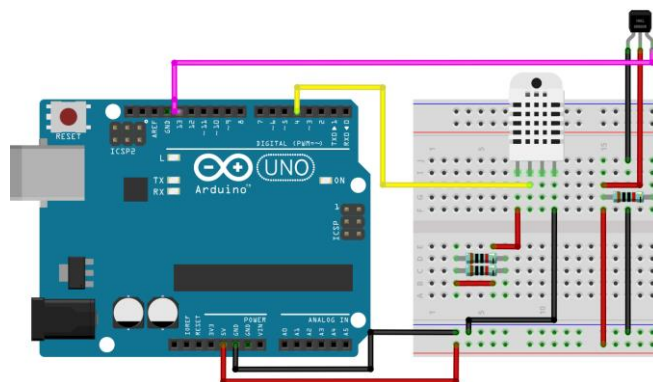


Figura 2. Esquema de conexões na protoboard (Autores, 2024)

2.2. Construção do código em C++

O código da programação utilizada na placa controladora é expresso na Fig. 3. A inicialização do algoritmo começou com a importação das bibliotecas necessárias para controlar os sensores (Arduino e DHT22). Em seguida, foram definidas a constante π e os pinos aos quais os sensores estavam conectados. Um objeto para o sensor DHT foi criado, e variáveis globais foram inicializadas para monitorar o estado dos sensores e a contagem de pulsos para facilitar o uso do mesmo. Para utilização posterior, foram definidos os valores iniciais para as variáveis globais e a condição de acionamento dos sensores.

```
#include <Arduino.h>
#include <DHT.h> #define
PI 3.14159265359
const int hallSensorPin = 13;
const int DHTPIN = 4;
const int DHTTYPE = DHT22;
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
unsigned long lastTime = 0;
int hallState = LOW;
int lastHallState = LOW;
int interval = 500;
unsigned long highCount = 0;
float frequency = 0.0;
void loop()
{
    hallState = digitalRead(hallSensorPin);

    if (hallState != lastHallState)
    {
        // O estado do sensor mudou
        if (hallState == HIGH)
        {
            highCount++;
        }
        lastHallState = hallState;
    }
    unsigned long currentTime = millis();
    if (currentTime - lastTime >= interval)
    {
        frequency = highCount / (interval / 1000.0);
        highCount = 0;
        lastTime = currentTime;
        float angularVelocit = (frequency * 2 * PI);
        // Leitura da umidade e temperatura
        float umidade = dht.readHumidity();
    }
}
```

Figura 3. Código da programação utilizada na placa controladora (Autores, 2024)

No processo de leitura do sensor de efeito Hall, o algoritmo monitorou continuamente o estado do sensor em um procedimento iterativo para verificação do estado do sensor de efeito Hall, LOW se não estivesse sobre o ímã, ou HIGH se estivesse sobre o ímã. Nota-se que a construção da programação diverge do estabelecido em Predolin *et al.* (2017), no qual foi utilizada a função *pulseIn()*, que permitia interromper o laço no *loop* até que o sensor detectasse o ímã e, como consequência desta alteração, erros de contagem em baixas velocidades foram observados no anemômetro construído.

Ademais, no código, Fig. 3, foi calculada a frequência de rotação do cubo do ventilador pela contagem de pulsos medidos pela passagem do ímã no sensor de efeito Hall, dividido pelo intervalo de tempo de amostragem (neste caso, de 500 milissegundos). No algoritmo foi inserida a contagem dos pulsos e a transformação em frequência em Hertz e, em seguida, obteve-se a velocidade angular (ω) de acordo com a eq. 1, sendo f , a frequência medida.

$$\omega = 2\pi f \quad (1)$$

Além da medição da velocidade angular, o algoritmo também realizou a leitura dos valores de umidade e temperatura fornecidos pelo sensor DHT22. Por fim, todos os dados obtidos – velocidade angular, umidade e temperatura – foram

apresentados no Serial Monitor, permitindo a análise em tempo real do desempenho do ventilador e das condições ambientais.

2.3. Calibração

Para a calibração, foi construído um suporte, conforme Fig. 4a, contendo um batente para o ventilador e um orifício para inserção de um anemômetro comercial do tipo turbina. A base foi impressa por meio de manufatura aditiva, com filamento ABS em uma impressora 3D, de marca Gtmax3d Core H4. O *cooler* foi fixado a base com parafusos e o anemômetro digital, marca Incoterm® TAN 050, foi fixado no orifício, conforme Fig. 4b.

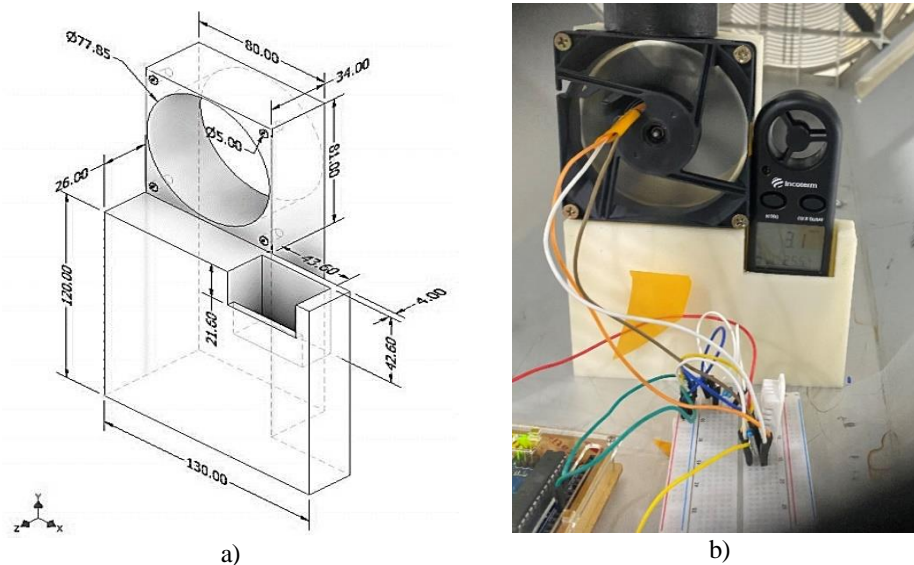


Figura 4. Base para calibração: a) Desenho técnico da base usando o Autodesk Inventor, b) Base impressa com a montagem final (Autores, 2024)

A base foi posicionada no interior do túnel de vento, Fig. 5, e em uma região de vento uniforme em ambos os medidores. Após posicionar a base, foram coletados os dados referentes a velocidade em ambos os anemômetros e os dados de temperatura e umidade.

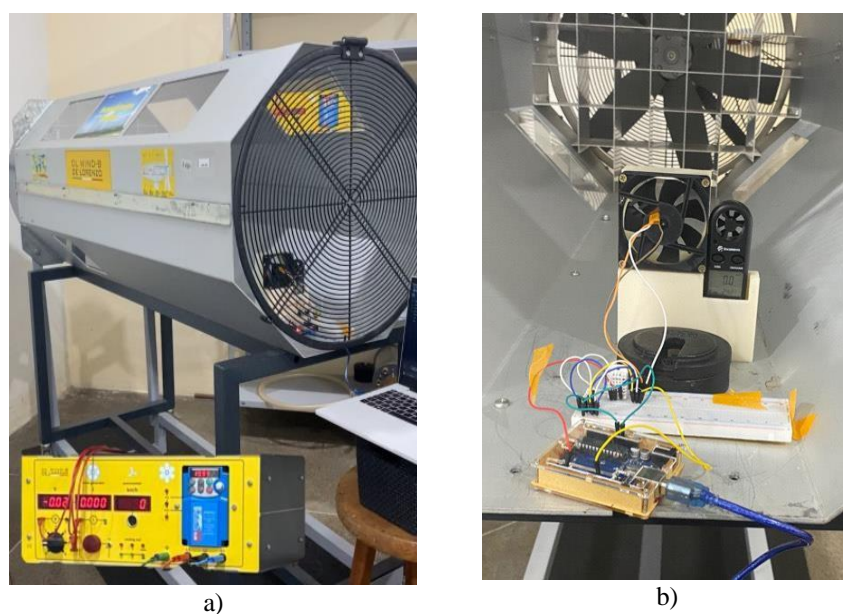


Figura 5. Posicionamento dos anemômetros para calibração e montagem do anemômetro no suporte: a) Visão exterior do túnel de vento, b) Interior do túnel de vento (Autores, 2024)

Buscou-se uma amostra significativa para o processo, conforme apontado por Avallone *et al.* (2019) e Predolin *et al.* (2017), assim, o número de medições compreendeu um total de 133, sendo fixado um valor de velocidade no túnel de vento, Fig. 5a, em seguida, foram feitas 10 medições espaçadas de 1 minuto cada; o procedimento foi repetido ao longo de um intervalo de 1,5 m/s a 4,1 m/s. Além disso, foi realizada uma coleta de dados seguindo o procedimento para um valor aleatório que compreendeu a medida de 2,1 m/s. Com base nestes valores, uma curva de calibração pôde ser construída e avaliada por meio da comparação com outros 13 valores aleatórios medidos no túnel de vento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com as medições obtidas e através de análises estatísticas, na Fig. 6 é apresentado o gráfico dos valores medidos e a curva de calibração gerada, eq. 2, para a velocidade do vento “ v ”, em m/s, função da velocidade angular “ ω ”, em rad/s. O parâmetro R^2 obtido foi de 0,9331 na relação entre a velocidade do anemômetro de referência (m/s) e a rotação do anemômetro de baixo custo (rad/s).

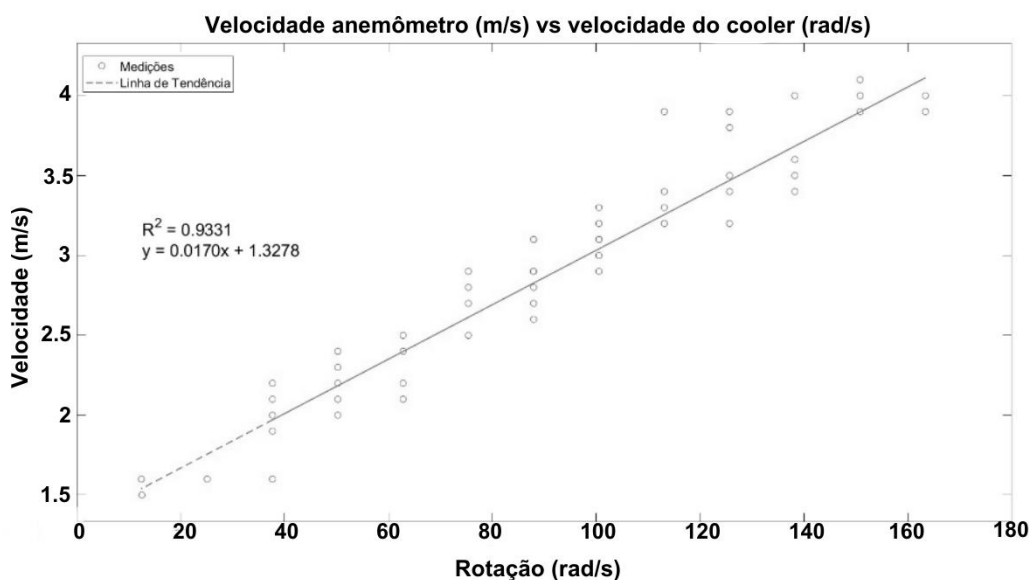


Figura 6. Curva de calibração utilizando a velocidade (m/s) do anemômetro de referência com a velocidade angular do anemômetro de baixo custo (rad/s) (Autores, 2024)

$$v = 0,0170\omega + 1,3278 \quad (2)$$

Ademais, o anemômetro de referência apresentou um maior desvio padrão de 0,2915 m/s referente as medições realizadas para velocidade média de 3,55 m/s, e o menor desvio de 0,0422 m/s para as medições correspondentes a velocidade média de 2,12 m/s. Em relação à velocidade do cooler, o maior desvio foi de 11,5489 rad/s correspondente as medições realizadas em 98,0170 rad/s e o menor desvio padrão de 3,9750 rad/s referente ao cooler contabilizando a velocidade de 136,9730 rad/s.

A partir da equação 2, aplicando a velocidade angular em x, obtém-se os respectivos em velocidade escalar média (m/s), com isso, ao comparar os resultados, Fig. 7, obtidos a partir da equação, em m/s, e os contabilizados pelo anemômetro de referência, resultou em um erro relativo médio de 6,15 %. Ademais, o erro absoluto médio foi de 0,1499 m/s, sendo que as velocidades contabilizadas pelo anemômetro de referência acima de 2 m/s apresentaram erro absoluto inferior a 0,20 m/s, exceto em 3,80 m/s e 3,90 m/s apresentando erros de 0,37 m/s a 0,65 m/s, Fig. 8. Além disso, as velocidades do cooler tiveram o maior desvio padrão de 0,1963 m/s.

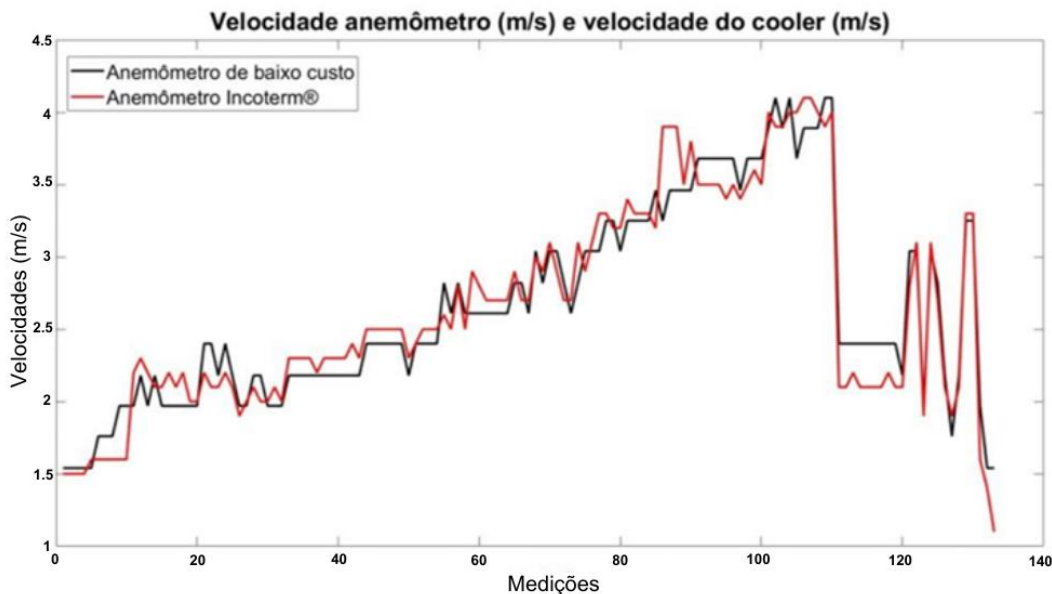


Figura 7. Curva de comparação de velocidades (m/s) entre o anemômetro de referência da Incoterm® e o de baixo custo (Autores, 2024)

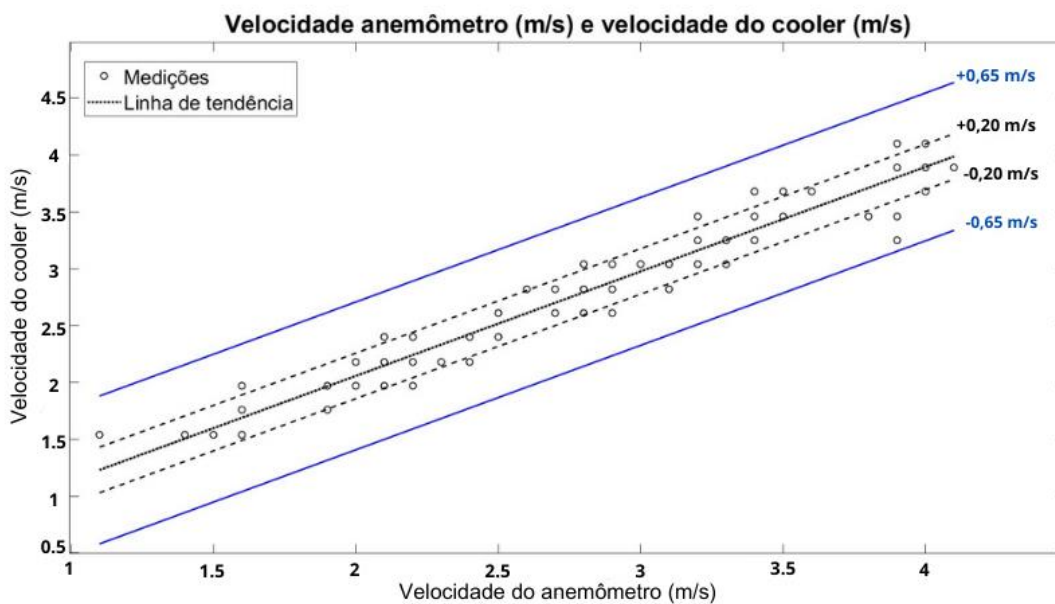


Figura 8. Relação das velocidades do anemômetro e do cooler com os valores na margem de erro absoluto de $\pm 0,65$ m/s e $\pm 0,20$ m/s (Autores, 2024)

As medições de temperatura e umidade ao longo dos experimentos indicaram uma temperatura mínima de $23,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ e máxima de $27,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Para a umidade do ar medida, foram obtidas mínima de $42,3 \pm 2,0\%$ e máxima de $52,9 \pm 2,0\%$ de umidade relativa.

4. CONCLUSÕES

O anemômetro de baixo custo, construído com R\$ 42,32, apresentou um erro relativo médio de 6,15 % (após calibração) e resultante de medições a baixas velocidades que apresentaram um desvio significativo de, aproximadamente 15,33%. Contudo, destaca-se que 68,42% das medições coletadas apresentaram valores de erros relativos abaixo de 4,50%. Ao se analisar o erro absoluto, 76,69% das medidas obtidas pelo anemômetro de baixo custo apresentaram erro absoluto abaixo de 0,2 m/s; ademais.

Por fim, medições de temperatura e umidade apresentaram variação de 4°C e 10%, respectivamente, ao longo dos

experimentos, sendo desprezados os efeitos sobre as medições obtidas. Análises preliminares apontaram que o mancal de escorregamento utilizado no anemômetro de baixo custo apresentou resistência ao movimento em baixas velocidades e sua substituição por rolamentos de esfera contribuiria para a redução dos erros de medição.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB) pelo apoio dado à realização da pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- AHMAD, Y. A.; SURYA GUNAWAN, T.; MANSOR, H.; HAMIDA, B. A.; FIKRI HISHAMUDIN, A.; ARIFIN, F. On the Evaluation of DHT22 Temperature Sensor for IoT Application. **Proceedings of the 8th International Conference on Computer and Communication Engineering, ICCCE 2021**, p. 131–134, 22 jun. 2021.
- ARAUJO, J. F. D. F.; COSTA, M. C.; LOURO, S. R. W.; BRUNO, A. C. A portable Hall magnetometer probe for characterization of magnetic iron oxide nanoparticles. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 426, p. 159–162, 15 mar. 2017.
- ARDUINO. Arduino - Open-Source Electronics Platform. Disponível em: <https://www.arduino.cc/>. Acesso em: 04 mar. 2024.
- AVALLONE, E.; MIORALLI, P.; NATIVIDADE, P.; PALOTA, P.; DA, C.; ANTONIO, J.; APARECIDO, V. An inexpensive anemometer using Arduino board. **Facta universitatis - series: Electronics and Energetics**, v. 32, n. 3, p. 359–368, 2019.
- CHOON, T. W.; PRAKASH, C.; AIK, L. E.; HIN, T. T. Development of Low Wind Speed Anemometer. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, v. 2, n. 3, p. 237–240, 2012.
- INCOTERM. TAN050 Manual. [S.l: s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.incoterm.com.br/media/2018/02/tan050-manual-site.pdf>. Acesso em: 04 de mar. 2024.
- PREDOLIN, R.E.; SCALON, V.L.; GARCIA, R.P.; Low-cost module for wind measurements Speed and direction. **International Journal of Engineering Research & Technology**, V.6. ed. 2. p 439-444.2017.
- THEPNURAT, M.; SAPHET, P.; TONG-ON, A. Low-Cost DIY Vane Anemometer based on LabVIEW interface for Arduino. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1144, n. 1, p. 012028, 1 dez. 2018.
- WILLIAMS, K.; MARCH, L.; WASSELL, S. R.; TAVERNOR, R.; SCHOFIELD, R.; PINTORE, A. The mathematical works of Leon Battista Alberti. **The Mathematical Works of Leon Battista Alberti**, p. 1–221, 2010

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.