

Campus São Mateus
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

APRESENTAÇÃO DE *FRAMEWORK* PARA CALIBRAÇÃO DE Sensores de Temperatura

PRESENTATION OF A FRAMEWORK FOR CALIBRATING TEMPERATURE SENSORS

PRESENTACIÓN DE UN FRAMEWORK PARA CALIBRAR Sensores de Temperatura

Flávio Fraga Vilela¹ & Isadora Bernardo Rezende²

^{1,2} Universidade Federal de Lavras (UFLA)

¹ flaviofvilela@ufla.br ² isadora.rezende@estudante.ufla.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 16.12.2024

Aprovado: 18.04.2025

Disponibilizado: 09.05.2025

PALAVRAS-CHAVE: Metrologia; Calibração; Sensores de temperatura.

KEYWORDS: Metrology; Calibration; Temperature sensors.

PALAVRAS-CLAVE: Metrología; Calibración; Sensores de temperatura.

*Autor Correspondente: Vilela, F. F.

RESUMO

A metrologia desempenha um papel crucial na padronização das unidades de medida, sempre considerando uma incerteza nos seus resultados, o que é importante em todos os níveis de comparação. O presente estudo buscou apresentar e implementar um framework para a calibração de sensores de temperatura, através da construção de dois protótipos com dois sensores de temperatura, e um termohigrômetro de referência. O método de pesquisa foi executado em quatro fases: seleção dos materiais (Fase I), montagem e validação dos protótipos (Fases II e III), análise dos dados coletados e proposta de framework (Fase IV). Para este estudo sessenta 60 amostras foram coletadas em intervalos de 1 minuto para comparação com o termohigrômetro. Os resultados demonstraram que ambos os sensores apresentaram diferenças em relação ao termohigrômetro, com médias de 1,7383°C para o DHT11 e 0,8253°C para o GY-906 BCC. O processo de calibração foi conduzido por meio de cálculos de ajustes a fim de alinhar as medições dos sensores aos valores de referência. Após implementar esses ajustes, os protótipos calibrados foram capazes de realizar medições mais precisas e consistentes. Portanto, a calibração dos sensores supracitados por meio do framework proposto reduziu a incerteza das medições de temperatura.

ABSTRACT

Metrology plays a crucial role in standardizing units of measurement, always considering an uncertainty in their results, which is important at all levels of comparison. This study sought to present and implement a framework for calibrating temperature sensors by building two prototypes with two temperature sensors and a reference thermohygrometer. The research method was carried out in four phases: selecting the materials (Phase I), assembling and validating the prototypes (Phases II and III), analyzing the data collected and proposing a framework (Phase IV). For this study, sixty samples were collected at 1-minute intervals for comparison with the thermohygrometer. The results showed that both sensors differed from the thermohygrometer, with averages of 1.7383°C for the DHT11 and 0.8253°C for the GY-906. The calibration process was carried out using adjustment calculations to bring the sensor measurements into line with the reference values. After implementing these adjustments, the calibrated prototypes were able to take more accurate and consistent measurements. Therefore, the calibration of the afore mentioned sensors using the proposed framework reduced the uncertainty of the temperature measurements.

RESUMEN

La metrología desempeña un papel crucial en la normalización de las unidades de medida, teniendo siempre en cuenta la incertidumbre de sus resultados, lo cual es importante en todos los niveles de comparación. Este estudio pretendía presentar y aplicar un marco para calibrar sensores de temperatura mediante la construcción de dos prototipos con dos sensores de temperatura y un termohigrómetro de referencia. El método de investigación se llevó a cabo en cuatro fases: selección de los materiales (Fase I), montaje y validación de los prototipos (Fases II y III), análisis de los datos recogidos y propuesta de un marco (Fase IV). Para este estudio, se recogieron sesenta muestras a intervalos de 1 minuto para compararlas con el termohigrómetro. Los resultados mostraron que ambos sensores diferían del termohigrómetro, con medias de 1,7383°C para el DHT11 y 0,8253°C para el GY-906. El proceso de calibración se llevó a cabo mediante cálculos de ajuste para ajustar las mediciones de los sensores a los valores de referencia. Tras aplicar estos ajustes, los prototipos calibrados pudieron realizar mediciones más precisas y coherentes. Por tanto, la calibración de los sensores mencionados mediante el marco propuesto redujo la incertidumbre de las mediciones de temperatura.

INTRODUÇÃO

A metrologia é a ciência que abrange o estudo teórico e prático das medições e suas aplicações, desempenhando um papel essencial na promoção da competitividade e inovação. Suas avaliações incluem aspectos como a precisão e a qualidade das medições, elementos fundamentais para a confiabilidade de qualquer sistema de medição (CONMETRO, 2017).

A precisão de uma medida é um aspecto qualitativo essencial na metrologia, uma vez que medições precisas garantem resultados confiáveis, auxiliam na tomada de decisões e possibilitam o monitoramento, controle e análise de processos ou equipamentos (Fernando et al., 2018). Dessa forma, “medir” é o processo de determinar características de um fenômeno, corpo ou substância por meio de instrumentos calibrados, com base em uma unidade de medida específica, e realizado por alguém capacitado para interpretar os resultados (Mendes, 2019).

Neste contexto, a calibração é um processo indispensável na metrologia, fundamental para garantir a precisão, confiabilidade e consistência dos sistemas de medição. Como destacado por (Gonçalves Junior & Sousa, 2017), a calibração estabelece uma relação entre os valores de referência de um padrão e as indicações de um sistema de medição, permitindo ajustes necessários para assegurar a exatidão das medições. Esse processo vai além dos sistemas de medição, aplicando-se também a materiais de referência e suas incertezas, garantindo a qualidade das medições mesmo em condições adversas, como variações de temperatura e radiação (Kobayoshi, 2012).

De acordo com a Confederação Nacional da Indústria (2016), a utilização cada vez mais crescente de tecnologias em diversos setores, principalmente no setor industrial, resultou no desenvolvimento da quarta revolução industrial, mais conhecida como Indústria 4.0. A Indústria 4.0 possibilita a implementação de novas tecnologias, tornando os sensores de temperatura amplamente utilizados em diversas áreas, como indústria, saúde e pesquisa científica. No entanto, muitos desses sensores apresentam variações significativas nas medições devido a fatores como desgaste dos componentes, diferenças na fabricação e influência das condições ambientais. Tais inconsistências podem comprometer a confiabilidade dos dados coletados, impactando diretamente a tomada de decisões em processos críticos.

Ademais, a calibração de instrumentos, especialmente sensores de temperatura, é um exemplo claro de sua importância, pois assegura que os dispositivos estejam ajustados a padrões estabelecidos, promovendo a confiabilidade e a consistência das medições, além de permitir uma vantagem competitiva para as empresas (Gonçalves Junior & Sousa, 2017).

Por conseguinte, a metrologia desempenha não apenas uma padronização das unidades de medida, mas também a aplicação prática da medição precisa e confiável em diversas áreas. No Brasil, essa padronização é assegurada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), que garante a rastreabilidade das medições, assegurando que os instrumentos utilizados atendam aos padrões internacionais (Mendes, 2019).

Além disso, ao implementar um *framework* para calibração de sensores de temperatura, ele se torna importante para garantir eficiência, confiabilidade e reprodutibilidade do processo.

Ele padroniza procedimentos, reduz a incerteza das medições e melhora a precisão dos sensores. Além disso, facilita a implementação, melhora a confiabilidade dos dados e otimiza custos ao minimizar erros e desperdícios. Dessa forma, assegura que os sensores operem dentro de padrões estabelecidos, garantindo qualidade e precisão nas medições (Marcolan, 2022).

Sendo assim, o objetivo do presente artigo é apresentar e implementar um *framework* para a calibração de sensores de temperatura, visando otimizar a precisão, confiabilidade e reprodutibilidade das medições. O método de pesquisa foi executado em quatro fases sendo o *framework* proposto constituinte da Fase IV. O microcontrolador Arduino Uno foi usado na construção de dois protótipos juntamente com dois sensores distintos de temperatura, e um termohigrômetro de referência.

REFERENCIAL TEÓRICO

ORGANIZAÇÃO METROLÓGICA DA QUALIDADE

A metrologia desempenha um papel crucial na padronização das unidades de medida, visando estabelecer um acordo universal sobre os valores utilizados. De acordo com Mendes (2019), para que essa padronização seja eficaz, é essencial que haja uma estrutura metrológica tanto internacional quanto nacional. Isso garante que os instrumentos de medição sejam mantidos adequadamente e aplicados de forma precisa nas operações diárias e nas transações comerciais, o que é de grande relevância para a competitividade das empresas e países.

Como destaca o Governo Federal (2024), no Brasil, a estrutura metrológica que se encontra é o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), uma autarquia federal vinculada à Secretaria Especial de Produtividade, Emprego e Competitividade, do Ministério da Economia.

Sendo assim, a função da metrologia é assegurar um controle de qualidade rigoroso nas linhas de produção, resultando em melhor desempenho para as empresas. Por isso, em um circuito de equipamentos industriais, se espera que os resultados sejam precisos e confiáveis (Augusto, 2024). Medir e mensurar significa, na prática, conhecer e, com base nesses dados, tomar decisões estratégicas. A metrologia também pode ser aplicada para diagnóstico e prevenção, estando integrada às rotinas de manutenção industrial. Ela pode ser usada em produtos, máquinas, equipamentos e processos, sendo essencial para a identificação e solução de problemas (Fernando, 2018).

Mendes (2020) também destaca que a medição está presente em diversas situações do nosso cotidiano. Por exemplo, ao observarmos o mostrador de um relógio, estamos medindo o tempo (hora, minuto e segundo); ao pesarmos um produto em uma balança, medimos sua massa (quilograma, grama); ao abastecermos o carro, medimos o volume de combustível (litro); e ao recebermos a conta de energia elétrica, podemos verificar o consumo (kWh).

A medição considera uma incerteza nos seus resultados, sendo importante em todos os níveis de comparação, desde a comparação inicial com o padrão primário até a medida reproduzida diretamente no produto. O Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (ISO GUM) define a incerteza de medição como um “parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos a um mensurando”.

No que diz respeito à precisão de medição, o Vocabulário Internacional de Metrologia (2012) a define como o grau de concordância entre as indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos semelhantes, sob condições específicas. A precisão de medição pode ser expressa numericamente por características como desvio-padrão, variância ou coeficiente de variação, considerando as condições de medição definidas.

Embora as definições de precisão e exatidão possam ser confundidas, elas se referem a conceitos distintos. A precisão está relacionada à consistência entre as medições realizadas, ou seja, à dispersão dos valores, enquanto a exatidão refere-se à proximidade dos valores medidos em relação à média ou ao valor verdadeiro. Assim, a precisão significa ter pouca variação entre as medições, enquanto a exatidão indica que a medição está próxima do valor real ou do valor alvo (Fernando, 2018).

De acordo com Filho (2021), sua pesquisa propõe uma abordagem inovadora para avaliar as diferenças máximas permissíveis nas medições durante a transferência de custódia de GLP (gás liquefeito de petróleo), utilizando testes de hipóteses baseados na incerteza de medição. Essa metodologia difere das normas e regulamentos técnicos existentes, que estipulam um valor único de incerteza para todas as medições, sem considerar as diferenças entre os sistemas de medição usados.

SISTEMAS DE CALIBRAÇÃO

A calibração é uma operação fundamental na metrologia, definida como um conjunto de operações que estabelece, sob condições específicas, a relação entre os valores indicados por um instrumento ou sistema de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas pelos padrões (INMETRO, 2012). Gonçalves Junior e Sousa (2017) explica que a calibração se divide em duas etapas: na primeira, estabelece-se uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes às incertezas associadas; na segunda etapa, essa informação é utilizada para obter o resultado de medição a partir da indicação. A calibração, quando otimizada, gera um retorno financeiro significativo, aumentando a confiabilidade, credibilidade e competitividade das empresas, sendo motivada principalmente pela manutenção da confiabilidade metrológica nos sistemas de medição.

A calibração não se limita a sistemas de medição, sendo também utilizada para caracterizar medidas materializadas e materiais de referência, além de suas incertezas. Padrões de alta precisão, como o quilograma-padrão, resistores-padrão e padrões de frequência ou corrente elétrica, fornecem os valores de referência para calibração. Esses padrões definem ou reproduzem unidades de grandezas com excelência em incerteza (Santos, 2022).

Além disso, a calibração permite determinar valores mensurados, aplicar correções e avaliar propriedades metrológicas sob condições adversas, como temperaturas extremas ou alta radiação, com resultados registrados em certificados ou relatórios que detalham os procedimentos e condições do sistema avaliado (Kobayoshi, 2012).

A calibração deve estar vinculada a padrões de referência com rastreabilidade. A norma ISO 8402 define rastreabilidade como a capacidade de seguir o histórico, a aplicação ou a localização de um item por meio de informações previamente registradas. Essa rastreabilidade é essencial para garantir que a grandeza medida ou controlada esteja em conformidade com a cadeia de rastreabilidade, assegurando que a medição esteja alinhada com um valor de referência conhecido ou com o valor verdadeiro.

Segundo Lumley (2011), existem diferentes métodos de calibração dependendo do tipo de padrão e da maneira de empregar o sistema calibrado. A calibração direta aplica um padrão composto por medidas materializadas, comparando seu valor verdadeiro convencional (VVC) com a indicação do sistema (ISMC). Quando não há medidas materializadas ou quando não é prático usá-las, emprega-se a calibração indireta. Nesse método, a grandeza a ser medida é gerada por um dispositivo auxiliar, cujos valores não precisam ser predefinidos, mas devem ser estáveis. A medição é feita simultaneamente pelo sistema a calibrar (SMC) e por um sistema de medição-padrão (SMP), com suas indicações comparadas. As incertezas do SMP devem ser muito menores que as do SMC, para que as diferenças possam ser atribuídas aos erros do sistema calibrado.

Já o método indireto exige um investimento considerável, pois sistemas de medição-padrão são caros e necessitam de calibrações periódicas, mas permite tanto calibrações estáticas quanto dinâmicas, dependendo das características do sistema e da infraestrutura. A qualidade dos resultados depende mais das características do padrão e do procedimento utilizado do que do método de calibração em si (Costa, 2024).

Por fim, a calibração em laboratório ocorre em condições controladas e normalizadas. Contudo, quando as condições de uso diferem significativamente das condições laboratoriais, os resultados podem ser inválidos. Para resolver esse problema, é possível reproduzir em laboratório as condições de uso, como na calibração de sistemas para satélites, que exige ambientes de baixa pressão e temperaturas variáveis. Embora a calibração *in loco* seja um serviço especial e não rotineiro, quando realizada adequadamente, ela proporciona resultados confiáveis (Kobayoshi, 2012).

METODOLOGIA

Este estudo enquadra-se, de acordo com Turrioni e Mello (2012), como uma pesquisa de natureza aplicada, uma vez que os resultados visam solucionar problemas reais relacionados ao monitoramento da temperatura ambiente. É importante destacar que esse contexto abrange diversas situações cruciais de monitoramento e controle em ambientes computacionais críticos, como *datacenters* (Da Silva et al., 2023). Dessa forma, a metodologia foi conduzida em quatro fases, sendo a primeira delas a Fase I, de seleção dos materiais utilizados na montagem dos protótipos para obtenção das medições de temperatura. O primeiro material selecionado foi o microcontrolador Arduino Uno, escolhido devido ao seu baixo custo, simplicidade de programação e ampla versatilidade em aplicações de prototipagem, características que o tornam ideal para experimentos iniciais em sistemas embarcados, sendo amplamente usados em projetos interfaceados com sensores de temperatura (Pereira & Ramos, 2022).

O segundo material foi o sensor DHT11, amplamente utilizado em projetos de monitoramento de temperatura por sua eficiência na medição de temperatura e umidade, além de seu custo acessível. Outro componente essencial foi o sensor GY-906 BCC, também conhecido como MLX90614, que se destaca por ser um sensor infravermelho sem contato, capaz de medir a temperatura de objetos à distância por meio de radiação térmica. Esse sensor apresenta alta precisão, resposta rápida e ampla faixa de medição, que varia de -70°C a 380°C , dependendo do modelo. Ademais, para exibir os valores das medições de forma clara e acessível, foi utilizado um display OLED 128x64 de 0,96 polegadas com comunicação via I2C. Além desses componentes principais, conectores *jumpers* e *protoboards* foram empregados para as conexões elétricas e a montagem do circuito de forma modular e funcional.

Já na Fase II, a montagem de dois protótipos foi executada, cada um destinado à construção de um dispositivo de medição de temperatura utilizando como base a mesma placa microcontroladora Arduino Uno. Sendo assim, ambos os protótipos foram projetados para captar dados de temperatura e exibi-los em um display OLED, mas empregaram-se sensores diferentes para cada um dos protótipos (Figura 1). Para o protótipo I, os materiais utilizados incluíram a placa Arduino Uno, protoboard, sensor DHT11, cabos conectores e o display OLED 128x64. Já a Tabela 1 apresenta o *pinout* utilizado para montagem desse protótipo I.

Figura 1. Framework proposto pelos autores para calibração de sensores de temperatura

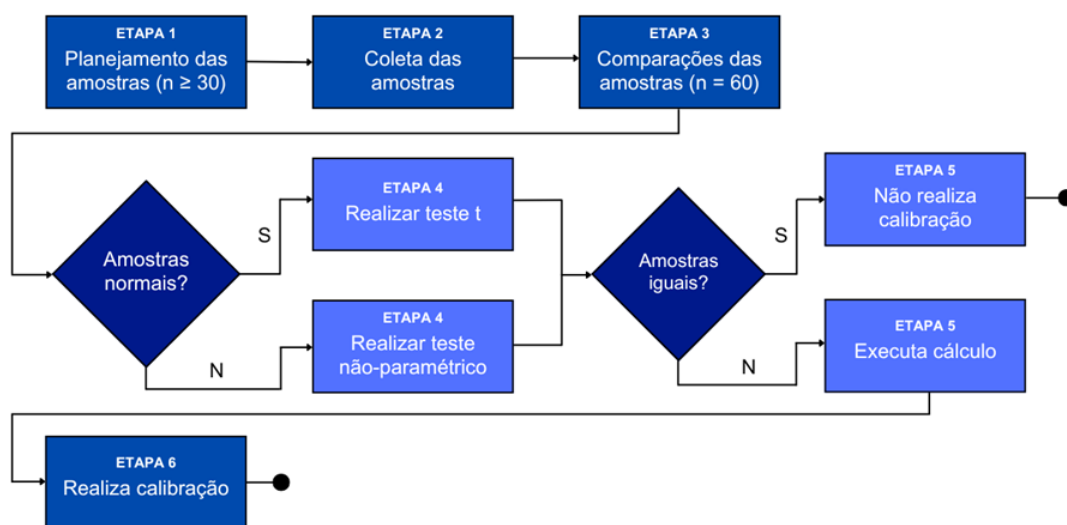


Tabela 1. Conexões para Arduino UNO, DHT11 e display OLED

Componente	Pino no Componente	Pino no Arduino Uno
DHT11	VCC	5V
	DATA	2
	GND	GND
Display OLED	SDA	SDA
	SCL	SCL
	VCC	3V
	GND	GND

Fonte: Autores (2024).

Para o protótipo II, o processo de montagem foi similar, mas com a substituição do sensor DHT11 pelo sensor infravermelho GY-906 BCC (MLX90614). Dessa forma, a Tabela 2 apresenta o *pinout* utilizado para montagem desse protótipo II.

Tabela 2. Conexões para Arduino UNO, GY-906 BCC e display OLED

Componente	Pino no Componente	Pino no Arduino Uno
GY-906 BCC	VIN	5V
	GND	GND
	SCL	A5
	SDA	A4
Display OLED	GND	GND
	VCC	3V
	SCL	SCL
	SDA	SDA

Fonte: Autores (2024).

Vale ressaltar que em ambas as configurações, a alimentação foi fornecida por meio da conexão USB do Arduino ao computador, e a utilização da *protoboard* foi essencial para organizar as conexões, evitando a necessidade de soldagem e permitindo alterações rápidas quando necessário. Durante a montagem, foi necessário verificar cuidadosamente as conexões elétricas para evitar falhas ou leituras erradas. Além disso, a programação foi feita utilizando a IDE do Arduino, incorporando bibliotecas específicas para os sensores e para o display OLED.

Na Fase III, o código foi transmitido ao Arduino Uno e submetido a testes de validação dos protótipos desenvolvidos. Para elaborar o código utilizado, foram empregadas cinco bibliotecas essenciais. A biblioteca padrão do Arduino, “Wire.h”, foi utilizada para estabelecer a comunicação I2C, enquanto a “Adafruit_MLX90614.h” simplificou a leitura dos dados do sensor infravermelho MLX90614, capaz de medir a temperatura de objetos e do ambiente sem contato. Para a criação da *interface* gráfica no display OLED, recorreu-se às bibliotecas “Adafruit_GFX.h” e “Adafruit_SSD1306.h”, que permitiram desenhar formas, textos e gráficos, além de gerenciar a comunicação com o *driver* do *display*. A biblioteca “DHT.h” também foi empregada para facilitar a leitura dos valores de temperatura captados pelo sensor DHT11.

Cada protótipo foi testado individualmente com o objetivo de verificar a precisão e funcionalidade dos sensores, assim como avaliar a clareza e a estabilidade das leituras exibidas no display OLED. Durante os testes, ajustes contínuos foram realizados tanto no código quanto na estrutura física dos protótipos, visando aprimorar sua praticidade e funcionalidade na coleta de dados. Por fim, a Fase IV fez a utilização da Figura 2, que apresenta o *framework* proposto pelos autores do presente artigo para calibração de sensores de temperatura.

Figura 2. Protótipos desenvolvidos com dois sensores distintos e o termohigrômetro

Fonte: Autores (2024).

Na Etapa 3, os dados coletados foram organizados e analisados, sendo calculadas as diferenças entre os valores medidos pelos protótipos e os valores de referência fornecidos pelo termohigrômetro. Esses resultados foram apresentados em forma de tabela, como mostra a Tabela 3.

Sendo assim, com os protótipos finalizados e validados, iniciou-se a Etapa 1, que se refere ao planejamento das amostras. A escolha de uma amostra de sessenta ($n=60$) unidades, em intervalos de 1 minuto, foi fundamentada em dois principais fatores. Primeiro, a disponibilidade de tempo para a coleta de amostras foi limitada, o que exigiu um tamanho de amostra viável dentro desse período. Em segundo lugar, por se tratar do primeiro estudo, a amostra de 60 amostras foi considerada adequada para fornecer uma base inicial sólida para a análise, permitindo observações preliminares. Esse tamanho de amostra é suficiente para garantir representatividade sem comprometer a praticidade e os recursos disponíveis, além de ser comum em estudos exploratórios de pequena escala.

Na Etapa 2, os dados foram coletados dos protótipos I e II e do termohigrômetro, que foi usado como equipamento referência. De acordo com as especificações fornecidas pelo fabricante, o termohigrômetro apresenta uma precisão de $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ para medições realizadas no intervalo de temperaturas entre $0,0^{\circ}\text{C}$ e $45,0^{\circ}\text{C}$, e essa característica garante que as variações nas leituras estão dentro dessa margem de erro, o que o torna adequado para aplicações que demandam medições confiáveis de temperatura em condições ambientes comuns.

Por padrão os dois protótipos e o termohigrômetro foram posicionados lado a lado, de modo que pudessem registrar os valores de temperatura simultaneamente (Figura 2).

Na Etapa 3, os dados coletados foram organizados e analisados, sendo calculadas as diferenças entre os valores medidos pelos protótipos e os valores de referência fornecidos pelo termo-higrômetro (Tabela 3).

Tabela 3. Dados coletados

Amostra (n)	DHT	GY	TH	DHT-TH	GY-TH
n_i	x_1	x_2	x_3	x_5	x_6

Fonte: Autores (2024).

Sendo:

- DHT o sensor DHT-11;
- GY o sensor GY-906 BCC; e
- TH o equipamento termohigrômetro.

Para seguir para a próxima etapa, verificou-se se os dados apresentavam ou não uma distribuição normal. Na Etapa 4, então, caso a distribuição seja normal, será realizado o “Teste t de Student”, sendo este teste um método estatístico utilizado para determinar se a diferença observada entre as médias de duas amostras pode ser atribuída a uma causa sistemática ou se resulta de flutuações aleatórias (D’Hainaut, 1990).

Se os dados não apresentarem distribuição normal, será realizado também na Etapa 4 um teste não paramétrico. Estes testes são métodos estatísticos que não assumem uma distribuição específica dos dados, como a normal. Eles são usados quando os pressupostos de

normalidade ou homogeneidade de variâncias não são atendidos ou quando os dados são ordinais ou categóricos. Eles avaliam diferenças ou associações em amostras sem depender de parâmetros populacionais, sendo úteis em situações com pequenos tamanhos amostrais ou dados com distribuição desconhecida (Montgomery, 2021).

Antes da próxima etapa, independentemente da normalidade das amostras, será verificado se as amostras são iguais. Logo, na Etapa 5, caso as amostras sejam iguais, conclui-se que não há necessidade de calibração dos sensores, uma vez que a equivalência entre as medições indica que os sensores já estavam ajustados e apresentavam precisão suficiente. Caso contrário, na mesma Etapa 5, alguns cálculos devem ser executados, sendo o primeiro deles a média amostral (Equação 1).

$$\underline{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

Outro cálculo deve ser empregado por meio da Equação 2, que será baseado na obtenção do valor médio das diferenças.

$$A_c = \frac{\sum_{i=1}^n (|R_i - S_i|)}{n} \quad (2)$$

Sendo:

- R_i o padrão adotado como referencial na amostra i , nesse caso, o termohigrômetro;
- S_i o sensor utilizado na amostra i ;
- A_c o ajuste da calibração; e
- n número da amostra.

Após realizar os cálculos para cada observação da amostra, os valores médios obtidos para termohigrômetro (R) e os sensores são comparados para determinar o ajuste necessário no processo de calibração (Inequação 3).

$$\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} > \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (3)$$

Se a média de R for maior que a média de S , significa que os valores medidos pelo termohigrômetro estão superestimados em relação aos valores medidos pelos sensores. Nesse caso a Etapa 6 inicia-se, e no código desenvolvido em C++ na plataforma Arduino IDE, será somado o “ A_c ” de ajuste para o procedimento de calibração.

Caso contrário, se a média de R for menor que a média dos sensores, indica que o termohigrômetro está subestimando os valores em relação aos sensores. Assim, o ajuste no código será realizado subtraindo o A_c (ajuste de calibração). Essa abordagem permite corrigir as discrepâncias negativas, garantindo que os dados calibrados reflitam com precisão as condições reais, assegurando a confiabilidade do sistema de monitoramento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Fases I, II e III, foram executadas conforme apresentado na seção anterior. Na Fase IV, foi planejada a coleta de 60 amostras na Etapa I, com o objetivo de garantir que, conforme o Teorema Central do Limite, uma amostra maior que 30 seguiria uma distribuição normal.

Já na Etapa II, para a coleta dos dados, foram utilizados os dois protótipos desenvolvidos e o termohigrômetro. Esses equipamentos foram posicionados lado a lado, com os protótipos conectados a um computador para garantir uma coleta contínua e sincronizada. A cada minuto, foi registrada a temperatura de cada um dos três dispositivos. Os valores de temperatura coletados durante o estudo em graus Celsius, juntamente com as diferenças observadas entre os equipamentos utilizados estão apresentados no Anexo I. No decurso da Etapa 3, essa comparação é fundamental para avaliar a precisão e a consistência das medições realizadas por cada dispositivo, permitindo uma análise detalhada do desempenho e da calibração dos sensores. Os cálculos das médias de temperatura registradas pelos protótipos I e II, foram executados (Equações 4, 5 e 6).

$$S_{DHT11} = \frac{27,4 + 27,6 + 27,5 \dots}{60} = 28,1633^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

$$S_{GY-906} = \frac{26,05 + 26,11 + 26,09 \dots}{60} = 27,2503^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

$$R = \frac{25,6 + 25,6 + 25,6 \dots}{60} = 26,425^{\circ}\text{C} \quad (6)$$

As diferenças médias em relação ao termohigrômetro foram calculadas como 1,7383°C para o DHT11 e 0,8253°C para o GY-906. Esses valores indicam que, embora ambos os sensores apresentem variações em relação ao termohigrômetro, o GY-906 demonstrou maior proximidade com os valores de referência, evidenciando à priori uma maior precisão.

Antes da Etapa 4, para avaliar a distribuição estatística dos dados coletados pelos três equipamentos, foi realizado o teste de normalidade Anderson-Darling utilizando o *software* Minitab®. Os resultados do teste de normalidade indicaram que, para todos os equipamentos analisados, o *p-value* obtido foi inferior a 0,05 (Tabela 4). Portanto, esses valores evidenciam que os dados não seguem uma distribuição normal, conforme os critérios estabelecidos pelo teste (Montgomery, 2021).

Tabela 4. Resultados do Teste de Normalidade

Equipamento	Teste de normalidade	P-valor	Conclusão
Protótipo DHT11	Anderson-Darling	< 0,05	Não segue distribuição normal
Protótipo GY-906 BCC	Anderson-Darling	< 0,05	Não segue distribuição normal
Termohigrômetro	Anderson-Darling	< 0,05	Não segue distribuição normal

Fonte: Autores (2024).

Ademais, os gráficos de probabilidade normal (anexados) mostram que os pontos não se alinham de forma consistente à linha de referência, corroborando a rejeição da hipótese nula de normalidade. Esses resultados são relevantes, pois apontam para a necessidade de aplicar métodos estatísticos não paramétricos ou realizar transformações nos dados para garantir a validade das análises subsequentes.

Logo, para avaliar a diferença entre os três equipamentos na Etapa 4, foi aplicado o teste não paramétrico “*Kruskal-Wallis Rank Sum Test*”, que é apropriado para comparar grupos independentes (Guo, 2013). Os resultados indicaram que o valor do qui-quadrado de Kruskal-Wallis foi de 56,476 com 2 graus de liberdade, e o *p-value* foi de 5,451 (Tabela 5). Esse resultado demonstra que as distribuições estatísticas de temperatura entre os equipamentos são significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Tabela 5. Resultado do Teste de *Kruskal-Wallis*

Teste aplicado	Valor do qui-quadrado	Graus de liberdade	P-valor	Conclusão
<i>Kruskal-Wallis Rank Sum Test</i>	56,476	2	5,451e-03 ($\approx 0,005$)	Diferenças estatisticamente significativas entre os equipamentos

Fonte: Autores (2024).

A significância estatística identificada aponta então para a necessidade de calibração dos equipamentos, visto que as diferenças nas distribuições podem comprometer a precisão e a confiabilidade das medições. Essa discrepância entre os sensores reforça a importância de ajustes técnicos e padronizações antes de sua aplicação em contextos nos quais medições exatas são essenciais.

Seguindo a metodologia estabelecida, na Etapa 5 foi realizado o cálculo de ajuste por meio da Equação 2 para a calibração dos equipamentos. Este processo é essencial para corrigir as discrepâncias identificadas entre os sensores, garantindo maior precisão nas medições e alinhamento com os valores de referência. (Equações 7 e 8).

$$A_{c(DHT11)} = \frac{\sum_{i=1}^n (|25,6-27,4|)+(|25,6-27,6|)+(|25,6-27,5|) \dots}{60} = 1,7383^{\circ} \quad (7)$$

$$A_{c(GY-906)} = \frac{\sum_{i=1}^n (|25,6-26,05|)+(|25,6-26,11|)+(|25,6-26,09|) \dots}{60} = 0,8253^{\circ}C \quad (8)$$

Após a definição dos ajustes necessários, na Etapa 6, os valores calculados foram implementados no Arduino Uno, por meio de um código em C++. A integração dos ajustes diretamente no código permite que as medições sejam automaticamente corrigidas durante a operação, eliminando a necessidade de intervenções manuais e garantindo maior precisão e confiabilidade dos resultados em tempo real.

No contexto da calibração, os sensores apresentaram as seguintes médias de temperatura (Tabela 6).

Tabela 6. Médias de temperatura de cada equipamento

Sensor	Média de temperatura (°C)	Equação
DHT11	28,1633	4
GY-906 BCC	27,2503	5
Thermohigrômetro	26,425	6

Fonte: Autores (2024).

Para a calibração, foi necessário subtrair o valor de ajuste de calibração (A_c), uma vez que o termohigrômetro estava apresentando leituras mais baixas em comparação com os sensores. O processo de calibração para cada sensor foi realizado então conforme o seguinte código consoante à biblioteca utilizada:

- DHT11:
`float temperature = dht.readTemperature();`
`temperature -= 1.7383; // Ajuste de calibração`
- GY-906:
`float ambientTemp = mlx.readAmbientTempC(); // Leitura da temperatura ambiente`
`ambientTemp -= 0.8253; // Ajuste de calibração`

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo propôs e implementou um *framework* para calibração de sensores de temperatura, utilizando protótipos desenvolvidos com o Arduino Uno e os sensores DHT11 e o GY-906 BCC. A metodologia empregada foi estruturada em quatro fases principais, envolvendo a seleção dos materiais, montagem dos protótipos, testes e validações, além da aplicação desse *framework* para análise e calibração dos dispositivos dentro da Fase IV.

Os resultados obtidos demonstraram que ambos os sensores apresentaram diferenças em relação ao termohigrômetro utilizado como referência, com médias de 1,7383°C para o DHT11 e 0,8253°C para o GY-906. Sendo que esse último apresentou maior proximidade com os valores de referência, evidenciando maior precisão nas medições *à priori*. Além disso, a análise estatística revelou que os dados coletados pelos equipamentos não seguiram uma distribuição normal, o que reforçou a necessidade de utilizar métodos estatísticos não paramétricos, como o teste de *Kruskal-Wallis*, para identificar discrepâncias significativas entre as medições dos protótipos I e II.

O processo de calibração foi conduzido de forma sistemática, utilizando a Equação 2 para calcular os ajustes necessários a fim de alinhar as medições dos sensores aos valores de referência. Após implementar esses ajustes nos códigos de controle em C++, os protótipos calibrados foram capazes de realizar medições mais precisas e consistentes.

Embora a abordagem tenha se mostrado eficiente, algumas limitações foram identificadas. Primeiramente, o número reduzido de sensores testados (apenas dois modelos) restringe a generalização dos resultados para outros dispositivos disponíveis no mercado. Além disso, as condições controladas de teste podem não refletir o desempenho dos sensores em ambientes mais complexos ou extremos, como em alta umidade ou temperaturas extremas. Outro ponto a considerar é a ausência de testes prolongados, o que impossibilita avaliar a estabilidade e a confiabilidade dos sensores ao longo do tempo. A escolha de uma amostra de 60 unidades, embora viável dentro das limitações de tempo e recursos disponíveis, também pode ser vista como uma limitação, já que uma amostra maior poderia oferecer resultados mais robustos e representativos, ampliando a confiança nas conclusões tiradas.

Com base nas limitações identificadas, pesquisas futuras podem explorar várias direções. Primeiramente, seria interessante ampliar o número de sensores testados, incluindo diferentes modelos e tecnologias, para proporcionar uma comparação mais robusta e uma melhor generalização dos resultados. Além disso, realizar experimentos em condições ambientais variadas, como altas umidades e temperaturas extremas, ajudaria a avaliar o comportamento dos sensores em cenários mais realistas e adversos. Outra possibilidade seria conduzir testes prolongados, com o objetivo de avaliar a estabilidade, durabilidade e confiabilidade dos sensores ao longo do tempo, verificando possíveis falhas ou degradações em situações reais de uso. Aumentar o número de amostras também seria uma boa estratégia, pois uma amostra maior aumentaria a representatividade dos resultados e garantiria uma análise estatística mais precisa, oferecendo maior confiança nas conclusões obtidas.

REFERÊNCIAS

- Augusto, F. (2024). Análise da confiabilidade de equipamentos de medição autônoma de tubos de aço sem costura em linhas produtivas de uma indústria siderúrgica: enfoque em manutenção centrada na confiabilidade e redução de custos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 10(4), 01-25. <https://doi.org/10.47456/bjpe.v10i4.45066>
- Confederação nacional da indústria. 2016. Desafios para a indústria 4.0 no Brasil.
- CONMETRO. (2017). Diretrizes estratégicas para a metrologia brasileira 2018-2022.
- Costa, D. A. M. D. (2024). Calibração e Verificação de Sensores para Estimativa de Evapotranspiração de Referência.
- Silva Donizetti, G. da, Costa Rodrigues, L. F. da, Almeida, E. S. de, & Santana, M. A. (2023). Uso da iot para monitoramento de temperatura, umidade e presença em data centers. *Revista Eletrônica de Iniciação Científica em Computação*, 21(1).
- Fernando, P. H. L., Fabricio, D. A. K., & Trevisan, L. et al. (2018). Metrologia. Grupo A. Recuperado de <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788595025295>
- Gonçalves Jr., A. A. & Sousa, A. R. de. (2017). *Fundamentos de metrologia científica e industrial*. Manole.
- Guo, S., Zhong, S., & Zhang, A. (2013). Privacy-preserving kruskal-wallis test. *Computer methods and programs in biomedicine*, 112(1), 135-145.
- INMETRO. (2012). *Sistema internacional de unidades* (1ª ed. brasileira da 8ª ed. do BIPM) [Livro eletrônico]. Rio de Janeiro.
- Kobayoshi, M. (2018). *Calibração de instrumentos de medição*. SESI SENAI Editora.
- Lumley, T. (2011). *Complex Surveys: A Guide to Analysis Using R*. *Wiley Series in Survey Methodology*. Wiley.
- Marcolan, J., Vidoto, E. L. G., Martins, M. J., Pizetta, D. C., Louzada, H., & Tannús, A. (2022). Calibração e metodologia de medidas aplicadas ao espectrômetro de ressonância magnética digital (DMRS) do CIERMag. *Anais eletrônicos*.
- Mello, C. H. P. & Turrioni, J. B. (2012). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção: Estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas. *Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção*, 1, 191.
- Mendes, A. (2019). Metrologia e Incerteza de Medição - Conceitos e Aplicações. Grupo GEN. Recuperado de <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788521636878>
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2021). *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros* (7th ed.). Grupo GEN. Recuperado de <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788521637448>
- Participa + Brasil - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. (2022). Participa + Brasil. Recuperado de <https://www.gov.br/participamaisbrasil/instituto-nacional-de-metrologia-qualidade-e-tecnologia->
- Pereira, P. F., & Ramos, N. M. M. (2022). Low-cost Arduino-based temperature, relative humidity and CO2 sensors - An assessment of their suitability for indoor built environments. *Journal of Building Engineering*, 60, 105151. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105151>
- Santos, G. R., Paulino, G. S., Borges, G. P., Santiago, A. F., & Silva, G. A. D. (2022). Avanços Analíticos Baseados em Modelos de Calibração de Primeira Ordem e Espectroscopia Uv-Vis para Avaliação da Qualidade da Água: Uma Revisão-Parte 1. *Química Nova*, 45, 314-323.
- Target Engenharia e Consultoria Ltda. (2024). *Target Normas: ABNT NBR ISO 8402 NBRISO8402 Gestão da qualidade*. Normas.com.br. Recuperado de <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/12/abnt-nbriso8402-gestao-da-qualidade-e-garantia-da-qualidade-terminologia>