

## Calibração de sensores tipo PT100 com fornos tipo bloco seco<sup>1</sup>

### *Calibration of PT100 sensors using dry-block furnace*

William Fagundes De Farias<sup>2</sup>Vinicius da Rosa Pepe<sup>3</sup>Andres Eberhard Friedl Ackermann<sup>4</sup>

#### Resumo

O presente artigo aborda a calibração de sensores de temperatura PT100 usando fornos com bloco seco. A exploração das contribuições individuais das incertezas de medição no processo de calibração é importante fonte na avaliação do processo de calibração e na estimativa dos erros e incertezas associadas aos sensores termorresistivos. O detalhamento do método e a utilização de um meio térmico estável corroboram para uma adequada calibração de sensores PT100 aplicando fornos com bloco seco. Os resultados demonstram uma precisa e exata correlação entre as grandezas envolvidas no método de calibração, bem como destacam as variáveis operacionais críticas ao processo.

**Palavras-chave:** Calibração; Metrologia térmica; PT100.

#### Abstract

*This article explores the calibration of PT100 temperature sensors using dry-block furnaces. Investigating the individual contributions of measurement uncertainties in the calibration process is an important source for evaluating and estimating the errors and uncertainties associated with thermoresistive flow sensors. The detailing of the method applied and the use of a stable thermal medium corroborates for an adequate calibration of PT100 sensors using dry-block furnaces. The results demonstrate a precise and accurate correlation between the quantities involved in the calibration method and highlight the critical operational variables of the process.*

**Keywords:** Calibration; Thermal metrology; PT100.

- 
- 1 Este artigo é resumo do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica apresentado no Centro Universitário Ritter dos Reis (UNIRITTER), Canoas, RS, Brasil, em 07/07/2024, sob orientação do Prof. Dr. Vinicius da Rosa Pepe.
  - 2 Bacharel em Engenharia Mecânica pelo Centro Universitário Ritter dos Reis (UNIRITTER), Canoas, RS. <https://orcid.org/0009-0007-6592-9995> E-mail: williamfagundesf@hotmail.com
  - 3 Doutor em Engenharia Mecânica pela UFRGS. Professor do Centro Universitário Ritter dos Reis (UNIRITTER). Pesquisador no *Complex Flow Systems Lab* do *Institute of Earth Sciences*. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6198-6801>. E-mail: vinicius.pepe@ulife.com.br
  - 4 Doutor em Engenharia de Produção pela UNISINOS. Professor do Centro Universitário Ritter dos Reis (UNIRITTER). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7882-071X>. E-mail: andres.ackermann@ulife.com.br

## Introdução

Chamamos de calibração a operação que estabelece, sob condições especificadas, uma relação entre os valores medidos, as incertezas de medição fornecidas por instrumentos padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas com intuito de estabelecer uma relação para a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação (Beckert; Andrade, 2014). Seguindo este pensamento, todos os instrumentos de medição apresentam erros; logo, todos os resultados indicados têm erros e incertezas associados a essas medições (Lauer *et al.*, 2023).

Os erros de medição estão presentes no cotidiano das pessoas e, na maioria das vezes, são pequenos e imperceptíveis, entretanto alguns podem causar impactos indesejados, trazendo prejuízos significativos de ordem econômica ou social (Soratto; Brito, 2023). Seguindo esse pensamento, um pequeno erro na medição da temperatura do processo de pasteurização, por exemplo, pode comprometer a eficácia do tratamento térmico em tornar um alimento microbiologicamente seguro (Egito, Pinheiro e Figueiredo, 1989). No contexto do beneficiamento e conservação de alimentos, resulta em produtos de qualidade inferior, redução do tempo de prateleira, rejeição de lotes, perda financeira por descarte e, em casos extremos, riscos à saúde da população (Andrade *et al.*, 2008).

No cotidiano, geralmente a medição de temperatura é realizada por meio de termômetros digitais ou termômetros de coluna de líquido para medição de temperatura corporal ou então para medição da temperatura ambiental, porém a medição da temperatura é fundamental para diversas aplicações tanto domésticas como industriais (Garcia *et al.*, 2021). No ambiente industrial, por exemplo, na fundição de peças metálicas, a medição correta, ou mais aproximada do valor real, favorecerá não só a qualidade do produto, como também contribuirá para a economia de energia e tempo operacional. Isso se repete em processos das indústrias petroquímicas, farmacêuticas, alimentícias, entre outras (National Physical Laboratory, 2016).

Os termômetros de resistência de platina são instrumentos amplamente utilizados na indústria (Zashchepkina; Svyta, 2022). Estes possuem várias formas e operam na faixa de -260 a 960 °C, com um erro que pode chegar à faixa de 0,4 °C. Seu amplo espectro de aplicação torna esses sensores comuns; podem ser utilizados em amplas faixas de temperatura e ainda assim fornecer um resultado com precisão e exatidão próximas do valor real. Uma ampla variedade de termômetros de platina está disponível, desde termômetros-padrão muito precisos de acordo com o ITS-90, até termômetros industriais robustos, que podem ter precisão de décimos de grau (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014).

Os termômetros de coluna de líquido foram uns dos primeiros tipos de termômetro desenvolvidos. Dado que a sua utilização dominou a termometria durante pelo menos 200 anos, tiveram um efeito grandioso no desenvolvimento da prática e da teoria da termometria. Esses instrumentos possuem aplicações até os dias atuais (Pires; Afonso; Chaves, 2006). Os termopares são os mais amplamente utilizados de todos os sensores de temperatura. Funcionam utilizando a força eletromotriz, sua simplicidade e confiabilidade oferecem uma ampla utilização para muitas aplicações industriais; no entanto, quando se necessita de uma medição precisa e estável, os termopares são insuficientes, vista a sua faixa de erro na faixa de 2,0 °C. Sendo assim, faz-se necessária a adoção e utilização de sensores termorresistivos (Nicholas; White, 2001).

Existem os termômetros de resistência de platina-padrão (SPRTs), que são sensores de temperatura precisos, porém estes são comumente utilizados em laboratórios de metrologia que exigem uma incerteza menor que 0,15 °C. Nas aplicações industriais, os sensores mais utilizados

são os termômetros de resistência de platina robustos, mais conhecidos como PT100, que oferecem ótima precisão e repetibilidade se comparados aos sensores termopares de metais básicos ou termômetros de coluna de líquido (Prakosa; Purwowibowo; Larassati, 2021). Estes funcionam com a variação da resistência elétrica que é proporcional à temperatura do meio térmico. Os sensores são geralmente confeccionados com fios ou filmes de resistência de 100 Ohms a 0 °C (Zashchepkina; Svyta, 2022).

A experiência de realizar medições utilizando distintos métodos ou instrumentos, obtendo-se resultados divergentes, é comum, pois poucos instrumentos são precisos quando se trata da medição de temperatura. Em um laboratório de calibração, é comum calibrar instrumentos com defeito ou fora das especificações de seu fabricante, e essa taxa de falha tende a aumentar com o aumento da capacidade dos instrumentos (Pires; Afonso; Chaves, 2006).

A norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017 – Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017), aplica-se a todos os laboratórios de calibração e testes acreditados no Brasil. A norma possui diversos requisitos: os gerais, como imparcialidade e confidencialidade; os de estrutura; os de recursos, como pessoal, equipamentos, condições ambientais e rastreabilidade metrológicas; os de processo, como validações de métodos e garantia dos resultados, e os do sistema de gestão, como documentação, controle de documentos, controle de registros, controle de acesso, ações para abordar riscos e oportunidades de melhoria, ações corretivas, entre outros.

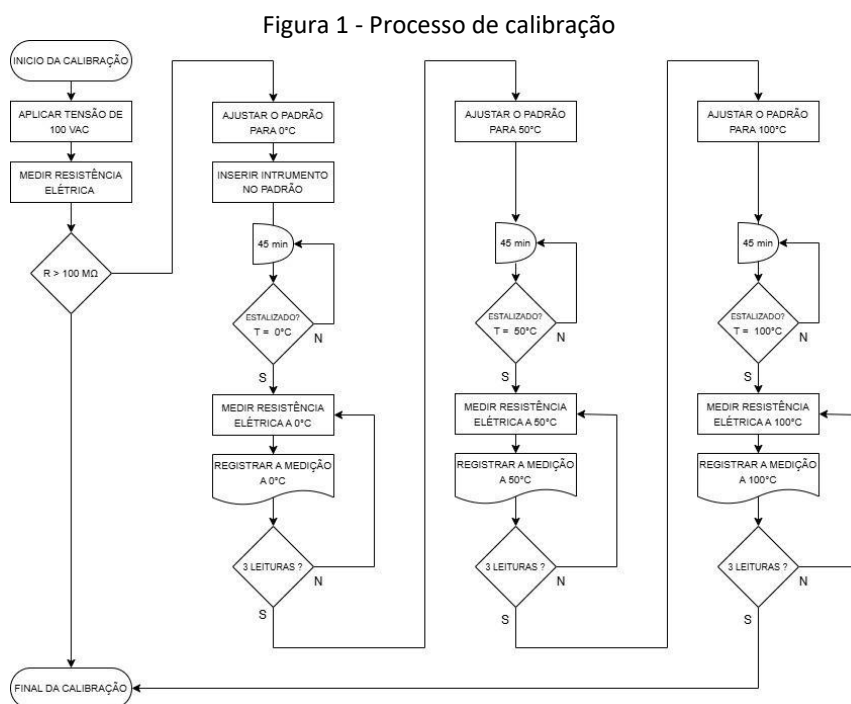
A importância deste estudo se justifica pela necessidade de garantir resultados de medições precisos, exatos e confiáveis, sendo imprescindível em diversas aplicações industriais, comerciais e de pesquisa. Os resultados obtidos contribuirão para o avanço e melhoria da metrologia térmica, buscando auxiliar em futuros estudos e pesquisas na área, propondo boas práticas de calibração. Sendo assim, esta pesquisa busca responder à seguinte pergunta: Quais as necessidades, os procedimentos e as boas práticas para calibração de um sensor PT100 usando calibradores com bloco seco? Este trabalho tem como objetivo geral avaliar métodos e procedimentos necessários para a calibração de um sensor PT100 utilizando um calibrador com bloco seco. Além disso, este estudo pretende atender à lacuna de pesquisa de avaliar os efeitos das variáveis de calibração na contribuição para erros e incertezas encontrados na calibração.

## 1 Procedimentos metodológicos

Este estudo é uma pesquisa descritiva, de natureza aplicada e de objetivo exploratório (Gil, 2022). A calibração de sensores PT100 foi realizada usando calibradores com bloco seco e comparada a um termômetro padrão de referência, devidamente acreditado e rastreado conforme RBC (Rede Brasileira de Calibração). Os instrumentos específicos, como o forno de bloco seco de baixa temperatura com faixa de operação de -50 °C a 140 °C, termômetro-padrão com resolução de 0,01 °C, fonte estabilizada de 0 a 200 V, ohmímetro com faixa de operação 0 a 500 Ω e resolução de 0,01 Ω e sistema de aquisição de dados, foram escolhidos e selecionados para garantir precisão e confiabilidade do processo de calibração seguindo a técnica e diretrizes da norma ABNT NBR 13772 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008).

A calibração envolveu expor os sensores a temperaturas controladas em um forno de bloco seco, registrando leituras e comparando-as com o padrão de referência. Foram adotadas condições ambientais de  $23 \pm 5$  °C e umidade de  $57,5 \pm 12,5$  %. A figura 01 representa a síntese do processo de calibração de um sensor PT100.

Antes do procedimento de calibração, o instrumento foi testado quanto à resistência de isolamento elétrico e verificação da resposta da resistência para uma temperatura de 0 °C para a determinação da histerese. O instrumento a ser calibrado foi excitado com uma tensão de 100 V e obteve uma resposta de resistência elétrica entre a termorresistência e o corpo do instrumento superior a 100 MΩ, comprovando assim a sua integridade quanto ao quesito de isolamento elétrico e habilitando o instrumento para a calibração. A resposta da resistência à temperatura de 0 °C do instrumento a ser calibrado foi  $R(0)_{inicial} = 99,76 \Omega$  e  $R(0)_{final} = 99,80 \Omega$ , determinando assim uma histerese de 0,04 Ω do instrumento.



Fonte: Os autores (2024).

Os sensores a serem calibrados e o instrumento-padrão foram inseridos nos orifícios do bloco seco. Foram selecionados os pontos de interesse de calibração e as temperaturas de 0 °C, 50 °C e 100 °C, com um tempo de estabilização de 45 minutos. Três séries de medições foram realizadas para cada ponto de interesse.

O forno com bloco seco utilizado tem faixa operacional de -50 °C a 140 °C e resolução de 0,01 °C. Suas características metrológicas, estabilidade térmica (ET), uniformidade radial (UR) e uniformidade axial (UA) são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros metrológicos do meio térmico

Ponto (°C)	ET (°C)	UR (°C)	UA (°C)	V <sub>eff</sub>
0	0,05	0,15	0,05	∞
50	0,05	0,14	0,07	∞
100	0,05	0,12	0,10	∞

Fonte: Os autores (2024).

Sensores PT100 e um leitor de grandezas elétricas foram usados para medir e registrar as temperaturas. O sensor padrão PT100 tem faixa de -30 °C a 156 °C, e o leitor de resistência elétrica com faixa de 0 a 500 Ω e resolução de 0,01 Ω. Suas características metrológicas são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros metrológicos dos instrumentos

	Faixa calibrada	Maior incerteza	Maior erro	Deriva
Sensor-padrão	-25 a 140 °C	0,10 °C	0,15 °C	0,05 °C*
Leitor de resistência elétrica	50 a 250 Ω	0,18 Ω	0,25 Ω	0,10 Ω

\*Determinada a 0 °C

Fonte: Os autores (2024).

Os erros sistemáticos, incertezas e desvios foram analisados, incluindo estabilidade térmica, uniformidade do forno e incertezas dos instrumentos. Os desvios significativos foram registrados para avaliar a precisão da calibração, visando à avaliação da incerteza e erros.

Para que o instrumento calibrado seja comparado ao sensor padrão, é necessário converter a resistência elétrica em temperatura, utilizando um modelo matemático que associa a resposta da resistência elétrica em temperatura quando o ponto calibrado é maior ou igual a 0 °C.

$$T = \frac{\sqrt{A^2 - 4B \left(1 - \frac{R_t}{R_0}\right)} - A}{2B} \tag{1}$$

$$CS = \frac{1}{R_0 \sqrt{A^2 - 4B \left(1 - \frac{R_t}{R_0}\right)}} \tag{2}$$

onde T é a temperatura,  $R_t$  é a resistência média,  $R_0$  é a resistência elétrica a 0°C. A e B são constantes e foram adotados valores  $0,0039083 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  e  $-0,00005775 \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$  respectivamente e CS é o coeficiente de sensibilidade da associação da resistência elétrica com a temperatura.

Para realizar a leitura do padrão e do instrumento calibrado, é necessário utilizar o fator de correção do sensor padrão e do leitor de grandezas elétricas utilizados na calibração. Dessa forma, adotou-se o maior erro encontrado nos instrumentos utilizados como padrão.

$$X_c = X - E_{pad} \tag{3}$$

onde X é o valor indicado no instrumento,  $X_c$  é o valor corrigido e  $E_{pad}$  o maior erro encontrado nos instrumentos padrão.

Definindo o desvio-padrão tipo A das leituras, tanto do sensor padrão, quanto do instrumento calibrado:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\sum (X_c - X_{med})^2}{n - 1}} \tag{4}$$

onde  $\sigma_A$  é o desvio padrão tipo A,  $X_{med}$  é a média das leituras e n é o número de leituras.

A incerteza combinada é determinada como a soma quadrática das incertezas individuais do processo, enquanto a incerteza expandida leva em consideração o fator de abrangência determinado através da distribuição de t-Student.

$$u_c = \sqrt{u_{pad}^2 + u_{LR}^2 + u_{MT}^2 + u_{cal}^2} \tag{5}$$

$$U = u_c \cdot k \tag{6}$$

onde  $u_c$  é a incerteza combinada,  $u_{pad}$  a incerteza do sensor padrão,  $u_{LR}$  a incerteza do leitor de resistência elétrica,  $u_{MT}$  a incerteza do meio térmico,  $u_{cal}$  a incerteza da calibração,  $U$  é a incerteza expandida e  $k$  é o fator de abrangência adotado igual a 2.

$$V_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_1^n \frac{u_i^4}{v_i}} \tag{7}$$

onde  $V_{eff}$  são os graus de liberdade efetivos,  $u_i$  são os valores de incerteza das contribuições consideradas e  $v_i$  os graus de liberdade efetivos das contribuições consideradas na calibração.

As contribuições individuais das incertezas são determinadas

$$u_{contribuição} = \frac{x \cdot CS}{divisor} \tag{8}$$

onde  $x$  é o valor indicado na tabela 5 para cada critério avaliado.

## 2 Resultados e discussões

Os resultados obtidos no desenvolvimento dos ciclos do processo de calibração são apresentados levando em consideração os ciclos de calibração nos pontos de interesse especificados na metodologia, conforme a tabela 3.

Tabela 3 - Dados coletados em cada ponto de calibração

Ponto (°C)	Profundidade de imersão (mm)	Instrumento (Ω)			Padrão (°C)		
		Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3
0	157	99,96	99,96	99,97	0,02	0,02	0,02
50	157	119,25	119,24	119,23	50,05	50,05	50,04
100	157	138,38	138,36	138,36	100,07	100,07	100,06

Fonte: Os autores (2024).

Realizada a correção com o maior erro dos instrumentos utilizados na leitura das medidas através da equação (3) e calculando o desvio-padrão conforme a equação (4), os resultados para cada ponto de interesse adotado na estratégia de calibração são apresentados nas tabelas 4, para o instrumento a ser calibrado e o instrumento-padrão utilizado como referência metrológica.

Tabela 4 - Resultados após correção da leitura com o padrão de resistência

Instrumento	Ponto de interesse	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Média	Desvio padrão
A ser calibrado	0 °C	99,71 Ω	99,71 Ω	99,72 Ω	99,71 Ω	0,0058 Ω
	50 °C	119,00 Ω	118,99 Ω	118,98 Ω	118,99 Ω	0,0100 Ω
	100 °C	138,13 Ω	138,11 Ω	138,11 Ω	138,12 Ω	0,0115 Ω
Padrão	0 °C	-0,13 °C	-0,13 °C	-0,13 °C	-0,13 °C	0,0000 °C
	50 °C	49,90 °C	49,90 °C	49,89 °C	49,90 °C	0,0058 °C
	100 °C	99,92 °C	99,92 °C	99,91 °C	99,92 °C	0,0058 °C

Fonte: Os autores (2024).

O coeficiente de sensibilidade, que apresenta a resposta da resistência à temperatura, é calculado conforme a equação (2) e é igual a 2,5962 °C/Ω, adotando o ponto central no intervalo de interesse de calibração. As contribuições para incerteza de medição são apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 - Contribuições para a incerteza de medição

	Fonte de incerteza	x	Divisor	CS	V <sub>eff</sub>
Instrumento Padrão	Maior incerteza do padrão	0,10 °C	k = 2	1	∞
	Resolução do padrão	0,01 °C	√6	1	∞
	Desvio-padrão do tipo A	0,0058 °C	√3	1	2
Instrumento a ser calibrado	Deriva do padrão	0,05 °C	√3	1	∞
	Desvio-padrão do tipo A	0,01 Ω	√3	2,5962 °C/Ω	2
	Histerese do instrumento	0,04 Ω	k = 2	2,5962 °C/Ω	∞
Meio Térmico	Estabilidade térmica	0,05 °C	√3	1	∞
	Uniformidade radial	0,15 °C	√3	1	∞
	Uniformidade axial	0,10 °C	√3	1	∞
Leitor de Resistência	Maior incerteza do leitor	0,18	k = 2	1	∞
	Resolução do leitor	0,01	√6	1	∞
	Deriva do leitor	0,10	√3	1	∞
Incerteza de medição combinada	U calibração	0,02 °C	1	1	∞
	U padrão	0,06 °C	1	1	∞
	U meio térmico	0,11 °C	1	1	∞
	U leitor de resistência	0,11 °C	1	2,5962 °C/Ω	∞

Fonte: Os autores (2024).

A determinação da incerteza combinada através das equações de (5) a (8) resulta nas parcelas  $u_{pad} = 0,06$  °C,  $u_{LR} = 0,11$  Ω,  $u_{MT} = 0,11$  °C,  $u_{cal} = 0,02$  °C e, por fim, a incerteza combinada final da calibração  $u_c = \pm 0,30$  °C.

Considerando o fator de abrangência  $k = 2,00$  e os graus de liberdade efetivos considerados como infinitos, determina-se a incerteza expandida de  $U = \pm 0,60$  °C no ponto de médio do intervalo de interesse de calibração.

Com o desenvolvimento do processo de calibração realizado, verificou-se um desvio médio de -0,95 °C em relação aos valores dos padrões de referência. Esta diferença indica uma disparidade entre as medições do sensor e o valor real esperado. A incerteza expandida calculada de  $\pm 0,60$  °C reflete a precisão das medições realizadas e devem ser levados em consideração ao interpretar as medições realizadas pelo instrumento de medição, destacando a importância de calibrações periódicas e da compreensão das incertezas associadas às medições termométricas.

Quanto aos resultados associados à repetitividade, observou-se que os valores indicados pelo instrumento calibrado estavam consistentemente dentro de uma faixa de  $\pm 1$  °C em relação aos valores de referência encontrados dentro da faixa de interesse de medição.

As indicações de medições repetidas indicam uma alta correlação entre si, bem como uma variabilidade mínima entre as diferentes etapas de execuções dos experimentos em cada ponto de interesse. Tal tendência sugere uma boa repetitividade dos resultados do sensor, indicando que as medições foram confiáveis ao longo do tempo.

Na avaliação quanto ao tempo de estabilização sobre a exatidão dos resultados, foi cuidadosamente analisada durante o processo de calibração do instrumento. Durante o desenvolvimento prático, observou-se que o tempo mínimo necessário para que o sensor atingisse a estabilidade térmica antes de cada medição teve um impacto significativo na exatidão dos resultados, destacando a importância de respeitar os limites operacionais indicados pelo fabricante do meio térmico utilizado.

O período de estabilização também é fundamental em diferentes faixas de temperatura, sendo necessária uma análise crítica do período de estabilização em temperaturas extremas, pois as propriedades térmicas dos materiais apresentam comportamento distinto, afetando o tempo necessário para que o sistema alcance a estabilização térmica. O período de estabilização de 45 minutos foi utilizado neste estudo considerando a faixa de utilização do forno calibrador com base na indicação do manual do fabricante do meio térmico.

Destacamos que não é comum estudos que busquem um aprofundamento nas condições experimentais, como exemplo do tempo de estabilização térmica, que é um fator crítico para a precisão das medições. A falta de uma análise detalhada sobre o impacto do tempo de estabilização pode resultar em uma compreensão mais superficial da variabilidade dos resultados ou impacto de outras fontes de erros, visto que está focada na apresentação direta de resultados e foco apenas no tratamento estatístico dos erros observados em diferentes pontos de calibração (Zeymer; Silva; Schneider, 2021).

Considerando uma abordagem com tempos reduzidos, ocorre uma maior variabilidade dos valores indicados, por consequência uma maior incerteza de medição. Por outro lado, uma abordagem com longo tempo de estabilização corrobora para resultados mais precisos e confiáveis. No entanto, é importante balancear essa consideração com a eficiência do processo e a praticidade das condições experimentais (Nunes; Oliveira; Silveira, 2021).

A seleção do intervalo de calibração com os pontos determinados neste estudo como 0 °C, 50 °C e 100 °C são relevantes e frequentemente utilizados em muitas aplicações industriais e laboratoriais. Os pontos indicados abrangem uma faixa relativamente pequena da capacidade total dos sensores PT100, que podem operar em uma faixa muito mais ampla de temperaturas, geralmente de -200 °C a +850 °C.

A seleção desses pontos possibilitou uma análise precisa dentro dessa faixa, mas não ofereceu uma visão abrangente do desempenho dos sensores em suas extremidades. É importante considerar que, em aplicações onde os sensores PT100 são utilizados em temperaturas mais extremas, os resultados de calibração nesses pontos podem não ser totalmente representativos. Portanto, para garantir a confiabilidade das medições em toda a faixa operacional, é recomendável realizar calibrações adicionais em temperaturas extremas de aplicação.

A análise de calibração de sensores de temperatura, como PT100 e termopares, apresenta variações importantes conforme a metodologia e as condições experimentais adotadas. Na abordagem com métodos comparativos, ou seja, os que utilizam um meio térmico estável e conhecido, conforme o aplicado neste estudo, a exatidão das calibrações depende diretamente de parâmetros ligados ao meio térmico utilizado. Assim, os resultados concordam



com Romio, Lorscheiter e Silva (2012), pois se buscou investigar as características e influências do meio térmico utilizando a abordagem da norma ABNT NBR 13772 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008). Uma outra ênfase comum está na abordagem para a validação da precisão dos sensores e na análise das incertezas associadas às medições, a abordagem e a estruturação das ações que concordam com Moreira (2021).

Devido à faixa calibrada ser reduzida, qualquer comportamento não linear ou variações significativas que possam ocorrer fora dessa faixa não foram registrados ou analisados. Sensores PT100 podem apresentar diferentes características de resposta em temperaturas extremas, que podem não ter sido significativas nos pontos de calibração escolhidos. Portanto, enquanto os resultados obtidos demonstram uma alta precisão e confiabilidade dentro da faixa testada, é necessária cautela ao extrapolar esses resultados para temperaturas fora da faixa calibrada.

Nas contribuições para a estimativa da incerteza consideradas durante o processo de calibração do sensor PT100, diferentes fontes de incerteza foram identificadas e avaliadas. A incerteza de medição expandida foi calculada considerando as contribuições individuais de diferentes fontes. Uma análise detalhada revelou que as contribuições mais significativas para a estimativa da incerteza foram atribuídas principalmente a três fatores-chave, o leitor de resistência, o meio térmico e o padrão de referência utilizado.

O leitor de resistência foi determinante na estimativa da incerteza de medição. As características metrológicas desse instrumento influenciaram diretamente os resultados das medições de resistência do sensor PT100. Qualquer imprecisão ou instabilidade no leitor de resistência resulta em erros significativos nas leituras dos sensores durante o processo de calibração. Portanto, a contribuição dessa fonte para a incerteza de medição foi identificada como a mais significativa, representando aproximadamente 59,9% do total.

O meio térmico utilizado durante a calibração também contribuiu significativamente para a incerteza de medição. A estabilidade térmica e a uniformidade da temperatura dentro do bloco seco foram fatores-chave que influenciaram a precisão das medições de temperatura durante o processo de calibração. As condições térmicas no bloco seco ou variações na condutividade térmica do meio poderiam introduzir erros nas medições. Portanto, a contribuição do meio térmico para a incerteza de medição foi identificada como 22,7% do total.

O padrão de referência utilizado durante a calibração do sensor PT100 também teve um impacto na incerteza de medição. As características metrológicas desse padrão foram essenciais para garantir a confiabilidade das medições realizadas durante o processo de calibração. Qualquer imprecisão ou desvio no padrão de referência poderia levar a erros sistemáticos nas medições dos sensores. Portanto, a contribuição do padrão de referência para a incerteza de medição foi identificada como aproximadamente 12,5% do total.

## Conclusões

O estudo conclui que os sensores de temperatura calibrados apresentaram um desvio médio máximo de  $-1^{\circ}\text{C}$  em relação aos padrões de referência. Esse desvio fornece base fundamentada da precisão alcançada pelo procedimento de calibração utilizado. A análise desses desvios permite não apenas validar a eficácia da técnica de calibração utilizada, mas também identificar aspectos que possivelmente necessitam de aperfeiçoamentos, como a abordagem da investigação dos erros associados ao meio térmico.

Além do desvio médio, o estudo também abordou a precisão e a repetitividade das medições realizadas com os sensores calibrados. A precisão indica a proximidade dos resultados

das medições em relação ao valor verdadeiro, enquanto a repetitividade avalia a consistência dos resultados quando as medições são repetidas sob as mesmas condições.

Um aspecto destacado foi a influência do tempo necessário para que os sensores atinjam a estabilidade térmica antes da realização das medições. Esse tempo de estabilização é crítico para minimizar os erros associados a variações na temperatura do sensor durante a calibração. Uma análise estruturada dessas condições de estabilização é essencial para garantir resultados confiáveis e consistentes, visto que impactos do tempo de estabilidade térmica podem ser superiores à uniformidade radial ou axial, caso não seja feita uma abordagem prática quanto ao procedimento de calibração.

O estudo é fundamental para a metrologia térmica, seja em processos industriais, seja em científicos, onde a precisão da medição de temperatura é crucial para o controle de processos ou para a validade dos resultados experimentais.

O estudo também contribui para o avanço, desenvolvimento e aplicação de normas e padrões de qualidade na metrologia térmica, promovendo a qualidade de calibração e a comparação de dados entre diferentes laboratórios e instituições.

## Referências

ANDRADE, P. V. D. *et al.* Características microbiológicas e físico-químicas do leite de cabra submetido à pasteurização lenta pós-enchimento e ao congelamento. **Ciência Rural**, v. 38, n. 5, p. 1424-1430, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000500036.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12550**: termometria: terminologia. 2. ed. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13772**: termorresistência: calibração por comparação com termorresistência de referência. 2. ed. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 17025**: requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. 3. ed. Rio de Janeiro, 2017.

BECKERT, S. F.; ANDRADE, G. A. M. Capacidade de medição e calibração: uma ferramenta para seleção de serviços de calibração. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE METROLOGIA MECÂNICA, 3., 2014, Gramado. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Metrologia, 2014.

EGITO, A. S.; PINHEIRO, R. R.; FIGUEIREDO, E. A. P. **Avaliação da pasteurização lenta do leite de cabra no controle de coliformes totais**. Sobral: EMBRAPA CNPC, 1989. 15 p. (Boletim de Pesquisa, 12).

GARCIA, R. L. *et al.* Experimento didático de baixo custo para determinação do perfil de temperatura de uma aleta exposta ao ar ambiente. **Revista Liberato**, v. 22, n. 38, p. 121-224, 2021. DOI: 10.31514/rliberato.v22n38.p189.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022.

LAUER, J. R. *et al.* Análise de emendas em cabos condutores para instalações elétricas de baixa tensão. **Revista Liberato**, v. 24, n. 42, p. 105-208, 2023. DOI: 10.31514/rliberato.2023v24n42.p191.

MOREIRA, M. O. **Metodologia para medição de temperatura durante o fresamento de metais utilizando termografia direcional espectral**. 2021. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. **Good practice guide nº 125**: introduction to temperature measurement. Teddington: Queen's Printer and Controller of HMSO, 2016.

NICHOLAS, J. V.; WHITE, D. R. **Traceable temperatures**: an introduction to temperature measurement and calibration. 2<sup>th</sup> ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

NUNES, V. K.; OLIVEIRA, M. J.; SILVEIRA, L. N. Implantação de uma rede de aferição de equipamentos geodésicos e topográficos. **Revista Liberato**, v. 22, n. 38, p. 121-224, 2021. DOI: 10.31514/rliberato.v22n38.p201.

PIRES, D. P. L.; AFONSO, J. C.; CHAVES, F. A. B. Do termoscópio ao termômetro digital: quatro séculos de termometria. **Química Nova**, v. 29, p. 1393-1400, 2006. DOI: 10.1590/S0100-40422006000600041.

PRAKOSA, J. A.; PURWOWIBOWO; LARASSATI, D. Development of simple method for quality testing of pt100 sensors due to temperature coefficient of resistance measurement. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONICS AND SMART DEVICES, 2021, Bandung. New York: IEEE, 2021.

ROMIO, C.; LORSCHETER, T. A.; SILVA, I. N. L. Calibração de um termopar tipo k para ser utilizado em um sistema de aquisição de dados com o arduino. **Periódico Tchê Química**, v. 9, n. 17, p. 60-66, 2012. DOI: 10.52571/PTQ.v9.n17.2011.60\_Periodico17\_pgs\_60\_66.pdf.

SORATTO, A.; BRITO, M. A. O. Pequenos erros, grandes prejuízos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA, 12., 2023, Petrópolis. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Metrologia, 2023.

ZASHCHEPKINA, N. M.; SVYTA, M. P. Gas temperature meter. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 111, n. 1, p. 33-41, 2022. DOI: 10.5604/01.3001.0015.9095.

ZEYMER, J. S.; SILVA, C. H. O.; SCHNEIDER, M. G. Comparação entre a exatidão de sensores analógicos e digitais utilizados em sistemas de termometria para armazenagem de grãos. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 4, n. 1, p. 813-819, 2021. DOI: 10.34188/bjaerv4n1-067.