

---

LabAuto — Laboratório de Automação Inteligente

# Instrumentação Industrial

Sensores, Calibração, Incerteza de Medição e Sistemas DAQ

---

CDSA/UFCG · Sumé-PB · 2025 · Eng. de Biosistemas e Biotecnologia

# Sumário

---

## Capítulo 1 — Fundamentos de Medição

- 1.1 Grandezas e unidades (SI)
- 1.2 Características estáticas dos instrumentos
- 1.3 Características dinâmicas
- 1.4 Erros de medição
- 1.5 Sinais de saída de instrumentos

## Capítulo 2 — Sensores de Temperatura

- 2.1 Termopares
- 2.2 RTDs (PT100, PT1000)
- 2.3 Termistores NTC e PTC
- 2.4 Sensores integrados
- 2.5 Pirômetros de radiação
- 2.6 Tabela comparativa

## Capítulo 3 — Sensores de Pressão, Nível e Vazão

- 3.1 Pressão: absoluta, relativa e diferencial
- 3.2 Transmissores de pressão
- 3.3 Medição de nível
- 3.4 Medição de vazão
- 3.5 Exemplos de aplicação
- 3.6 Curvas de calibração

## Capítulo 4 — Calibração e Incerteza de Medição

- 4.1 Conceitos fundamentais
- 4.2 Processo de calibração
- 4.3 Erros sistemáticos e aleatórios
- 4.4 Incerteza de medição segundo GUM
- 4.5 Cálculo de incerteza combinada e expandida
- 4.6 Curvas de calibração
- 4.7 Derivação de incerteza

## Capítulo 5 — Sistemas DAQ e Condicionamento de Sinal

- 5.1 Condicionamento de sinal
- 5.2 Conversão A/D
- 5.3 Sistemas DAQ
- 5.4 Circuito de leitura PT100 com Arduino
- 5.5 Protocolo Modbus

## Capítulo 6 — Aplicações no Semiárido

- 6.1 Instrumentação de baixo custo

6.2 Monitoramento de microclima

6.3 Instrumentação de aviários

6.4 Sistema de controle de irrigação

Exercícios Resolvidos

Roteiro de Laboratório — Lab 01

Referências

# Capítulo 1 — Fundamentos de Medição

## 1.1 Grandezas e Unidades: Sistema Internacional (SI)

A metrologia industrial é a ciência das medições aplicada aos processos produtivos. O Sistema Internacional de Unidades (SI), estabelecido pela Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), define sete grandezas de base que constituem o alicerce de toda cadeia metrológica: comprimento (metro, m), massa (quilograma, kg), tempo (segundo, s), corrente elétrica (ampère, A), temperatura termodinâmica (kelvin, K), quantidade de matéria (mol, mol) e intensidade luminosa (candela, cd).

Grandezas derivadas são obtidas por combinação das grandezas de base. Na instrumentação industrial, destacam-se: pressão (pascal, Pa = N/m<sup>2</sup>), vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/s), energia (joule, J = N·m), potência (watt, W = J/s) e frequência (hertz, Hz = s<sup>-1</sup>).

Prefixos SI: Os prefixos multiplicadores permitem representar valores muito grandes ou pequenos de forma compacta. Exemplos: mega (M, 10<sup>6</sup>), kilo (k, 10<sup>3</sup>), mili (m, 10<sup>-3</sup>), micro (μ, 10<sup>-6</sup>), nano (n, 10<sup>-9</sup>). Em instrumentação, o sinal de 4–20 mA utiliza miliampères, enquanto sensores de pressão podem operar em kPa ou MPa.

Conversões comuns: 1 atm = 101,325 kPa = 14,696 psi; 0 °C = 273,15 K; 1 bar = 100 kPa; 1 polegada de coluna d'água ≈ 249,09 Pa. A conversão adequada de unidades é fundamental para evitar erros graves na configuração de transmissores e controladores.

## 1.2 Características Estáticas dos Instrumentos

As características estáticas descrevem o comportamento do instrumento em regime permanente, ou seja, quando a grandeza medida é constante ou varia muito lentamente. São parâmetros essenciais para a seleção e especificação de instrumentos.

Característica	Definição	Exemplo
Faixa (Range)	Intervalo entre o valor mínimo e máximo de medição	PT100: -200 °C a +850 °C
Span	Diferença entre o valor máximo e mínimo da faixa	850 - (-200) = 1050 °C
Sensibilidade	Varição da saída por unidade de variação da entrada	PT100: 0,385 Ω/°C (α)
Resolução	Menor variação da entrada que produz mudança detectável na saída	ADC 12 bits com fundo de escala 5 V: 1,22 mV
Exatidão	Proximidade do valor medido ao valor verdadeiro convencional	±0,1% do fundo de escala
Precisão	Grau de concordância entre medições repetidas nas mesmas condições	Desvio padrão de 0,05 °C

Característica	Definição	Exemplo
Repetibilidade	Precisão sob mesmas condições de medição, mesmo operador, curto prazo	$\pm 0,02$ °C
Histerese	Diferença entre leituras obtidas em sentidos crescente e decrescente	0,1% FS em transmissores de pressão

Tabela 1.1 — Características estáticas de instrumentos de medição.

### 1.3 Características Dinâmicas

As características dinâmicas descrevem o comportamento do instrumento quando a grandeza de entrada varia com o tempo. São essenciais para aplicações de controle em tempo real.

- Tempo de resposta ( $t_r$ ): Tempo necessário para a saída atingir uma fração especificada (geralmente 90% ou 95%) do valor final após uma mudança em degrau na entrada. Termopares tipo K expostos têm  $t_r \approx 0,5$  s; PT100 com poço: 5–30 s.
- Tempo de subida: Tempo para a saída passar de 10% a 90% do valor final. Importante em processos rápidos como combustão e processos químicos exotérmicos.
- Frequência natural ( $\omega_n$ ): Frequência de oscilação livre do elemento sensor. Transmissores de pressão piezorresistivos podem ter  $\omega_n > 100$  kHz.
- Amortecimento ( $\zeta$ ): Fator que determina a rapidez com que oscilações se dissipam. Valores típicos:  $\zeta = 0,6$ – $0,8$  para resposta rápida sem oscilação excessiva. Um sistema criticamente amortecido ( $\zeta = 1$ ) retorna ao equilíbrio sem sobrepassagem.

### 1.4 Erros de Medição

Todo resultado de medição está sujeito a erros. A compreensão das fontes de erro é fundamental para a estimativa da incerteza de medição (tratada em detalhes no Capítulo 4).

Erros sistemáticos: Desvios consistentes e reproduzíveis que afetam todas as medições na mesma direção. Podem ser causados por calibração inadequada, desgaste do sensor, gradientes térmicos no instrumento ou efeitos de instalação (ex.: auto-aquecimento em RTDs). São passíveis de correção após identificação.

Erros aleatórios: Variações imprevisíveis que seguem distribuição estatística (tipicamente normal/gaussiana). Fontes incluem ruído elétrico, vibrações mecânicas, flutuações ambientais e resolução finita do conversor A/D. São tratados estatisticamente (média, desvio padrão).

Fontes comuns de erro em instrumentação industrial:

- Efeito de carga: a conexão do instrumento modifica a grandeza medida
- Interferência eletromagnética (EMI/RFI) em cabos de sinal analógico
- Deriva térmica (offset e ganho variam com a temperatura ambiente)
- Não-linearidade inerente do elemento sensor (ex.: termistores NTC)
- Erros de quantização no conversor A/D
- Efeitos de instalação: comprimento de cabo, impedância de entrada, aterramento

### 1.5 Sinais de Saída de Instrumentos

A comunicação entre sensores, transmissores e controladores em ambiente industrial utiliza diferentes tipos de sinais:

Tipo de Sinal	Faixa	Características	Aplicação Típica
Corrente analógica	4–20 mA	Imune a resistência de cabo; 4 mA = live zero (detecção de falha)	Transmissores de pressão, temperatura, nível
Tensão analógica	0–10 V ou 0–5 V	Simples, mas suscetível a queda de tensão em cabos longos	Sistemas DAQ locais, laboratoriais
HART	Digital sobreposto a 4–20 mA	Protocolo digital bidirecional; diagnóstico remoto; compatível com infraestrutura analógica	Modernização de plantas existentes
Foundation Fieldbus	Digital, barramento	Múltiplos dispositivos no mesmo par de fios; controle distribuído	Plantas de processo complexas
PROFIBUS PA	Digital, barramento	Baseado em IEC 61158; alimentação pelo barramento	Indústrias química e petroquímica

Tabela 1.2 — Sinais de saída comuns em instrumentação industrial.

Conversão de sinal 4–20 mA para unidade de engenharia: A relação entre a corrente  $I$  (mA) e a grandeza de engenharia  $V$  é linear:  $V = V_{\min} + (V_{\max} - V_{\min}) \times (I - 4) / 16$ . Exemplo: transmissor de pressão 0–10 bar com saída 12 mA  $\rightarrow P = 0 + (10 - 0) \times (12 - 4)/16 = 5,0$  bar.

## Capítulo 2 — Sensores de Temperatura

A temperatura é a grandeza mais frequentemente medida em processos industriais. Sua medição adequada é essencial para controle de qualidade, segurança operacional e eficiência energética. Este capítulo aborda os principais tipos de sensores, seus princípios de funcionamento, circuitos de medição e aplicações.

### 2.1 Termopares

**Princípio — Efeito Seebeck:** Quando dois metais diferentes são unidos em suas extremidades e existe uma diferença de temperatura entre as junções, surge uma força eletromotriz (fem) proporcional à diferença de temperatura. A junção de medição é colocada no processo; a junção de referência é mantida a uma temperatura conhecida (compensação de junta fria, normalmente feita eletronicamente).

A relação entre fem e temperatura não é perfeitamente linear, sendo descrita por polinômios padronizados na norma IEC 60584. Para o tipo K, a sensibilidade média é de aproximadamente 41  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  na faixa de 0 a 1000  $^\circ\text{C}$ .

Tipo	Materiais	Faixa ( $^\circ\text{C}$ )	Sensib. ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )	Tolerância (Classe 1)	Aplicação típica
J	Fe / Cu-Ni	-40 a +750	~52	$\pm 1,5$ $^\circ\text{C}$ ou $\pm 0,4\%$	Fornos industriais (atm. redutora)
K	Ni-Cr / Ni-Al	-200 a +1260	~41	$\pm 1,5$ $^\circ\text{C}$ ou $\pm 0,4\%$	Uso geral, mais popular
T	Cu / Cu-Ni	-200 a +350	~43	$\pm 0,5$ $^\circ\text{C}$ ou $\pm 0,4\%$	Criogenia, laboratório
E	Ni-Cr / Cu-Ni	-200 a +900	~68	$\pm 1,5$ $^\circ\text{C}$ ou $\pm 0,4\%$	Maior sensibilidade, baixas T
N	Ni-Cr-Si / Ni-Si	-200 a +1260	~39	$\pm 1,5$ $^\circ\text{C}$ ou $\pm 0,4\%$	Substituto do K em altas T
R	Pt-13%Rh / Pt	0 a +1600	~10	$\pm 1,0$ $^\circ\text{C}$ ou $\pm 0,25\%$	Indústria siderúrgica
S	Pt-10%Rh / Pt	0 a +1600	~10	$\pm 1,0$ $^\circ\text{C}$ ou $\pm 0,25\%$	Padrão de calibração

Tabela 2.1 — Termopares padronizados (IEC 60584).

### 2.2 RTDs (PT100, PT1000)

**Princípio resistivo:** A resistência elétrica de um metal puro varia de forma previsível e repetível com a temperatura. O elemento sensor mais utilizado é a platina, por sua estabilidade química, ampla faixa e excelente reprodutibilidade. O PT100 possui resistência de 100,00  $\Omega$  a 0  $^\circ\text{C}$ ; o PT1000, 1000,00  $\Omega$  a 0  $^\circ\text{C}$  (maior sensibilidade em  $\Omega/^\circ\text{C}$ , ideal para longas distâncias).

Equação de Callendar-Van Dusen: Para temperaturas acima de 0 °C:  $R(t) = R_0(1 + At + Bt^2)$ , onde  $R_0 = 100 \Omega$ ,  $A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$  (IEC 60751). Para temperaturas abaixo de 0 °C, adiciona-se um termo cúbico com coeficiente C.

Circuitos de medição — efeito da resistência dos fios:

- 2 fios: A resistência dos cabos ( $R_{\text{cabo}}$ ) soma-se à  $R_{\text{sensor}}$ , causando erro positivo. Aceitável apenas para distâncias curtas (< 2 m) ou PT1000.
- 3 fios: Configuração mais comum em indústria. Um terceiro fio compensa a resistência do cabo por subtração na ponte de Wheatstone. Precisa que os três fios tenham resistências iguais.
- 4 fios (Kelvin): Dois fios conduzem a corrente de excitação, dois fios medem a tensão no sensor. Elimina completamente o efeito dos cabos. Usado em calibração e medições de precisão.

Classes de tolerância (IEC 60751): Classe A:  $\pm(0,15 + 0,002|t|) \text{ } ^\circ\text{C}$ ; Classe B:  $\pm(0,30 + 0,005|t|) \text{ } ^\circ\text{C}$ ; Classe AA (1/3 DIN):  $\pm(0,10 + 0,0017|t|) \text{ } ^\circ\text{C}$ . Para um PT100 Classe A a 100 °C: tolerância =  $\pm 0,35 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

### 2.3 Termistores NTC e PTC

NTC (Negative Temperature Coefficient): Semicondutores cuja resistência diminui exponencialmente com o aumento da temperatura. Modelo simplificado:  $R(T) = R_{25} \times \exp[B \times (1/T - 1/298,15)]$ , onde B é a constante do material (tipicamente 3000–5000 K). Vantagens: alta sensibilidade (até -4%/°C), custo muito baixo, tamanho reduzido. Desvantagem: faixa limitada (-40 a +125 °C), alta não-linearidade, necessidade de linearização.

PTC (Positive Temperature Coefficient): Sensores baseados em cerâmicas de titanato de bário. Apresentam aumento abrupto de resistência ao atingir a temperatura de Curie (tipicamente 60–180 °C). Usados principalmente como proteção térmica de motores e transformadores (sensor tipo on/off), não para medição contínua.

### 2.4 Sensores Integrados: DS18B20, LM35, DHT22

Sensores de temperatura com eletrônica integrada oferecem saída digital ou analógica linearizada, facilitando a interface com microcontroladores. São amplamente utilizados em sistemas embarcados e IoT.

Sensor	Saída	Faixa	Resolução	Exatidão	Interface
DS18B20	Digital	-55 a +125 °C	Configurável: 9 a 12 bits (0,5 a 0,0625 °C)	$\pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ (-10 a +85 °C)	1-Wire (um único pino de dados)
LM35	Analógica (10 mV/°C)	-55 a +150 °C	Depende do ADC	$\pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ (a 25 °C)	Tensão proporcional à temperatura
DHT22 (AM2302)	Digital (T + UR)	-40 a +80 °C	0,1 °C	$\pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	Protocolo proprietário 1 fio

Tabela 2.2 — Sensores de temperatura integrados para sistemas embarcados.

DS18B20: Protocolo 1-Wire da Dallas/Maxim permite conectar múltiplos sensores em um único barramento (cada dispositivo possui endereço ROM de 64 bits). Modo parasita: alimentação pelo próprio pino de dados. Muito utilizado em monitoramento ambiental distribuído e agricultura de precisão.

## 2.5 Pirômetros de Radiação

Pirômetros medem temperatura sem contato físico com o objeto, captando a radiação infravermelha emitida. Baseiam-se na lei de Stefan-Boltzmann: a potência radiada é proporcional a  $T^4$ . Parâmetro crítico: a emissividade ( $\epsilon$ ) do material, que varia de 0 a 1 (aço oxidado:  $\epsilon \approx 0,85$ ; alumínio polido:  $\epsilon \approx 0,05$ ; pele humana:  $\epsilon \approx 0,98$ ).

Tipos: Pirômetros de banda larga (8–14  $\mu\text{m}$ ), de banda estreita, de razão (bicolor — compensam variação de emissividade). Faixa:  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  a  $> 3000\text{ }^\circ\text{C}$ , dependendo do detector (termopar, bolômetro, InGaAs, MCT). Aplicações: siderurgia, fornos de vidro, processos onde o contato é impossível (peças em movimento, materiais reativos).

## 2.6 Tabela Comparativa: PT100 vs. Termopar K vs. DS18B20

Parâmetro	PT100 (Classe A)	Termopar K	DS18B20
Faixa	-200 a +850 $^\circ\text{C}$	-200 a +1260 $^\circ\text{C}$	-55 a +125 $^\circ\text{C}$
Exatidão típica	$\pm 0,15 + 0,002 t $ $^\circ\text{C}$	$\pm 1,5\text{ }^\circ\text{C}$ ou $\pm 0,4\%$	$\pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$
Sensibilidade	0,385 $\Omega/^\circ\text{C}$	41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0,0625 $^\circ\text{C}$ (12 bits)
Linearidade	Excelente (quase linear)	Boa (tabela IEC)	Excelente (digital)
Custo unitário	R\$ 30–120	R\$ 15–60	R\$ 8–20
Necessidade de cabos	3 ou 4 fios	2 fios (compensação)	1 pino de dados
Condicionamento	Ponte de Wheatstone	Amplificador + CJC	Nenhum (digital)
Velocidade de resposta	Lenta (com poço: 5–30 s)	Rápida (0,5–5 s)	Moderada (~750 ms)
Aplicação principal	Controle de processo	Alta temperatura	IoT / embarcados

Tabela 2.3 — Comparação entre PT100, Termopar K e DS18B20.

## Capítulo 3 — Sensores de Pressão, Nível e Vazão

### 3.1 Pressão: Absoluta, Relativa e Diferencial

A pressão é definida como força por unidade de área ( $P = F/A$ ). Na instrumentação industrial, distinguem-se três referências de medição:

- Pressão absoluta (Pabs): Referenciada ao vácuo perfeito. Exemplo: pressão barométrica  $\approx 101,325$  kPa abs.
- Pressão relativa/manométrica (Pman): Referenciada à pressão atmosférica local.  $P_{man} = P_{abs} - P_{atm}$ . Exemplo: pressão de um pneu = 32 psi (relativa).
- Pressão diferencial ( $\Delta P$ ): Diferença entre duas pressões. Utilizada em medição de vazão por placa de orifício e monitoramento de filtros (obstrução aumenta  $\Delta P$ ).

Tecnologias de sensoriamento:

- Piezorresistivos: Strain gauges de silício em membrana. Excelente sensibilidade, boa linearidade. Faixa: 0–1 kPa até 0–100 MPa. Dependência térmica requer compensação.
- Capacitivos: Membrana metálica entre duas placas capacitivas. Variação de capacitância proporcional à deflexão. Alta estabilidade a longo prazo. Tecnologia preferida em transmissores industriais de alta precisão (Rosemount, E+H).
- Strain gauge metálico: Extensômetros colados em membrana ou diafragma. Princípio: variação de resistência proporcional à deformação ( $\Delta R/R = GF \times \epsilon$ ). Utilizados em células de carga e transdutores de pressão robustos.

### 3.2 Transmissores de Pressão Industriais

Transmissores de pressão convertem a grandeza mecânica em sinal elétrico padronizado (4–20 mA + HART). Integram o elemento sensor, condicionamento de sinal, compensação de temperatura e comunicação digital.

Especificação	Rosemount 3051S	Endress+Hauser Cerabar PMP71
Tecnologia	Capacitivo (Coplanar)	Piezorresistivo cerâmico
Faixa	0,025 kPa a 68,9 MPa	0,4 kPa a 40 MPa
Exatidão	$\pm 0,025\%$ do span	$\pm 0,05\%$ do span
Estabilidade	$\pm 0,125\%$ do URL em 15 anos	$\pm 0,1\%$ do URL em 5 anos
Saída	4–20 mA + HART 7 / Foundation Fieldbus	4–20 mA + HART / PROFIBUS PA
Temp. do processo	-40 a +120 °C (padrão)	-40 a +125 °C
Classificação	SIL 2/3, zona Ex	SIL 2/3, ATEX/IECEx

Tabela 3.1 — Especificações de transmissores de pressão industriais.

### 3.3 Medição de Nível

A medição de nível é crítica em reservatórios, tanques, silos e processos em batelada. A escolha da tecnologia depende do fluido, condições do processo e requisitos de precisão.

Tecnologia	Princípio	Faixa Típica	Exatidão	Limitações
Ultrassônico	Tempo de voo de pulso acústico (~40 kHz)	0,25–15 m	±2–3 mm	Espuma, vapor denso, turbulência
Radar (FMCW)	Tempo de voo de micro-ondas (~26 GHz)	0,1–80 m	±1–2 mm	Custo elevado; excelente em condições severas
Pressão diferencial	$\Delta P = \rho gh$ entre fundo e topo	Depende de $\rho$ e $h$	±0,1% span	Necessita conhecer a densidade do fluido
Capacitivo	Variação de capacitância com nível do dielétrico	0,1–20 m	±1% span	Depende da constante dielétrica
Boia (float)	Posição de flutuador com transmissão magnética	0,1–6 m	±5 mm	Partes móveis, manutenção mecânica

Tabela 3.2 — Tecnologias de medição de nível.

### 3.4 Medição de Vazão

A medição de vazão quantifica o volume ou massa de fluido que passa por uma seção por unidade de tempo. A seleção do medidor depende do tipo de fluido, faixa de vazão, pressão, temperatura e requisitos de perda de carga.

Medidor	Princípio	Exatidão	Perda de Carga	Aplicação
Placa de orifício	$\Delta P$ proporcional a $Q^2$ (Bernoulli)	±1–2%	Alta	Vapor, gás — baixo custo
Tubo de Pitot	Diferença entre pressão total e estática	±3–5%	Muito baixa	Dutos de ar, chaminés
Rotâmetro	Área variável — flutuador em tubo cônico	±1–2%	Média	Laboratório, gases
Coriolis	Força de Coriolis sobre tubos vibrantes	±0,1%	Média	Massa direta — petróleo, alimentício

Medidor	Princípio	Exatidão	Perda de Carga	Aplicação
Eletromagnético	Lei de Faraday (fem induzida por fluido condutor)	$\pm 0,2-0,5$ %	Nenhuma	Água, polpas — sem obstrução

Tabela 3.3 — Medidores de vazão industriais.

### 3.5 Exemplo de Aplicação: Medição de Nível de Reservatório em Sistema de Irrigação

Em sistemas de irrigação no Semiárido, é necessário monitorar o nível de reservatórios de água para gestão eficiente do recurso hídrico. Solução típica com sensor ultrassônico HC-SR04 (baixo custo) ou JSN-SR04T (à prova d'água):

- Sensor instalado no topo do reservatório, apontado para a superfície da água
- Distância  $d$  medida pelo tempo de eco:  $d = (t \times v_{\text{som}}) / 2$ , onde  $v_{\text{som}} \approx 343$  m/s a 20 °C
- Nível  $h = H_{\text{total}} - d$ , onde  $H_{\text{total}}$  é a altura do sensor ao fundo
- Microcontrolador ESP32 processa o sinal e transmite via Wi-Fi/LoRa para dashboard de monitoramento
- Volume estimado pela geometria do tanque:  $V = A_{\text{base}} \times h$  (tanque cilíndrico)

### 3.6 Curvas de Calibração: Linearização, Offset e Ganho

A curva de calibração relaciona o valor da saída do instrumento ( $S$ ) ao valor de referência da grandeza medida ( $M$ ). O ajuste de offset corrige o deslocamento vertical da curva, enquanto o ajuste de ganho corrige a inclinação.

Para linearização, aplica-se regressão linear:  $S = a \times M + b$ , onde  $a$  é o ganho e  $b$  é o offset. O coeficiente de determinação  $R^2$  indica a qualidade do ajuste ( $R^2 \geq 0,999$  é desejável). Para sensores com resposta não-linear (ex.: termistores NTC), utiliza-se a equação de Steinhart-Hart ou polinômios de grau superior.

# Capítulo 4 — Calibração e Incerteza de Medição

## 4.1 Conceitos Fundamentais

Calibração é a operação que, sob condições especificadas, relaciona os valores indicados por um instrumento de medição aos valores correspondentes de um padrão de referência. A calibração permite determinar os erros sistemáticos e estimar a incerteza da medição.

Rastreabilidade metrológica: Propriedade de um resultado de medição pela qual ele pode ser relacionado a uma referência por meio de uma cadeia ininterrupta de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza. A cadeia típica: SI → padrão primário (BIPM/NIST/INMETRO) → padrão secundário (laboratório acreditado) → padrão de trabalho (planta industrial) → instrumento de processo.

- Padrão primário: Realiza a definição da unidade SI (ex.: ponto triplo da água = 273,16 K)
- Padrão secundário: Calibrado contra o primário com incerteza conhecida
- Padrão de trabalho: Usado no dia a dia da calibração; menor custo, maior incerteza

## 4.2 Processo de Calibração

Um procedimento de calibração típico envolve:

- Seleção de pontos de calibração distribuídos na faixa de uso (mínimo 5 pontos uniformemente espaçados)
- Estabilização do padrão em cada ponto (tempo de espera adequado)
- Registro das leituras do instrumento sob calibração (IBC) em ciclos ascendente e descendente
- Cálculo dos erros em cada ponto:  $\text{Erro} = \text{Leitura}_{\text{IBC}} - \text{Valor}_{\text{padrão}}$
- Verificação da tolerância: todos os erros devem estar dentro da especificação do fabricante
- Emissão do certificado de calibração com: data, padrão utilizado, condições ambientais, resultados e incerteza expandida

## 4.3 Erros Sistemáticos e Aleatórios: Identificação e Correção

Na calibração, os erros sistemáticos são identificados como a média dos desvios em cada ponto. A correção (C) é o negativo do erro:  $C = -E$ . Após aplicação da correção, o resíduo é tratado como componente aleatório.

A repetibilidade é avaliada realizando-se múltiplas medições ( $n \geq 10$ ) no mesmo ponto e calculando o desvio padrão experimental. A histerese é detectada comparando leituras no ciclo ascendente vs. descendente.

## 4.4 Incerteza de Medição segundo GUM (ISO/IEC Guide 98-3)

O GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) é o documento de referência internacional para avaliação e expressão da incerteza de medição. Define dois tipos de avaliação:

- Tipo A — Avaliação estatística: Baseia-se na análise estatística de observações repetidas. A incerteza padrão tipo A é o desvio padrão da média:  $u_A = s / \sqrt{n}$ , onde  $s$  é o desvio padrão

experimental e n o número de medições.

- Tipo B — Outras formas: Baseia-se em informação não estatística: certificados de calibração, especificações do fabricante, dados de manuais, experiência do operador. Para distribuição retangular (equiprovável entre a- e a+):  $u_B = a / \sqrt{3}$ . Para distribuição normal (nível de confiança do certificado):  $u_B = U / k$ .

## 4.5 Cálculo de Incerteza Combinada e Expandida: Exemplo com PT100

Exemplo numérico: Calibração de um PT100 no ponto de 100,0 °C. Fontes de incerteza identificadas:

Fonte de Incerteza	Valor	Distribuição	Divisor	$u_i$ (°C)
Repetibilidade (10 leituras)	$s = 0,08$ °C	Normal (Tipo A)	$\sqrt{10} = 3,162$	0,0253
Resolução do indicador	0,1 °C	Retangular (Tipo B)	$2\sqrt{3} = 3,464$	0,0289
Incerteza do padrão (certif.)	$U = 0,05$ °C (k=2)	Normal (Tipo B)	2	0,0250
Estabilidade do banho térmico	$\pm 0,03$ °C	Retangular (Tipo B)	$\sqrt{3} = 1,732$	0,0173
Deriva do PT100 (anual)	$\pm 0,05$ °C	Retangular (Tipo B)	$\sqrt{3} = 1,732$	0,0289

Tabela 4.1 — Balanço de incerteza para calibração de PT100 a 100 °C.

Incerteza combinada:  $u_c = \sqrt{(0,0253^2 + 0,0289^2 + 0,0250^2 + 0,0173^2 + 0,0289^2)} = \sqrt{(6,40 \times 10^{-4} + 8,35 \times 10^{-4} + 6,25 \times 10^{-4} + 2,99 \times 10^{-4} + 8,35 \times 10^{-4})} = \sqrt{(32,34 \times 10^{-4})} \approx 0,057$  °C

Incerteza expandida (k = 2, 95,45% de confiança):  $U = k \times u_c = 2 \times 0,057 = 0,11$  °C

Resultado da calibração:  $T = (100,00 \pm 0,11)$  °C, com fator de abrangência k = 2 (aproximadamente 95% de confiança).

## 4.6 Curvas de Calibração: Regressão Linear e $R^2$

Quando um conjunto de pontos de calibração é obtido, ajusta-se uma curva (geralmente linear) para obter a função de transferência do sensor. O método dos mínimos quadrados ordinários (OLS) minimiza a soma dos quadrados dos resíduos.

Para n pontos  $(x_i, y_i)$ :  $\hat{y} = a + b \cdot x$ , onde  $b = [n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i] / [n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2]$  e  $a = \bar{y} - b \cdot \bar{x}$ .

O coeficiente de determinação  $R^2$  mede a proporção da variância dos dados explicada pelo modelo linear:  $R^2 = 1 - SS_{res} / SS_{tot}$ . Valores de  $R^2 \geq 0,9999$  são esperados para sensores de boa qualidade como RTDs.

## 4.7 Derivação de Incerteza da Curva de Calibração

A incerteza associada à curva de calibração inclui: a incerteza dos coeficientes do modelo (a e b), o desvio padrão dos resíduos ( $s_{\text{res}}$ ) e a propagação para previsões futuras. Para um valor previsto  $\hat{y}_0$  correspondente a  $x_0$ , a incerteza padrão é:

$$u(\hat{y}_0) = s_{\text{res}} \times \sqrt{1/n + (x_0 - \bar{x})^2 / \sum(x_i - \bar{x})^2}$$

Esta incerteza é menor no centro da faixa de calibração e aumenta nas extremidades, o que reforça a importância de calibrar em uma faixa que abranja toda a região de uso.

# Capítulo 5 — Sistemas DAQ e Condicionamento de Sinal

## 5.1 Condicionamento de Sinal

O condicionamento de sinal é o conjunto de operações realizadas sobre o sinal bruto do sensor para torná-lo adequado à conversão analógico-digital (A/D). Inclui:

- **Amplificação:** O sinal de um termopar ( $\mu\text{V}$ ) ou ponte de Wheatstone ( $\text{mV}$ ) precisa ser amplificado para a faixa de entrada do conversor A/D (tipicamente 0–5 V ou 0–3,3 V). Amplificadores de instrumentação (INA128, INA219, AD620) oferecem alto CMRR ( $> 100 \text{ dB}$ ), alta impedância de entrada e ganho ajustável por resistor externo.
- **Filtragem:** Filtros passa-baixa (RC, Butterworth, Bessel) eliminam ruído de alta frequência e interferência da rede (50/60 Hz). Frequência de corte típica:  $10\times$  menor que a taxa de amostragem (critério de Nyquist).
- **Isolamento galvânico:** Optoacopladores e transformadores de isolamento protegem o sistema DAQ contra diferenças de potencial terra-terra e transientes em ambiente industrial. Tensão de isolamento típica:  $1500\text{--}5000 \text{ V}_{\text{rms}}$ .
- **Proteção contra sobretensão:** Diodos TVS, varistores e resistores limitadores protegem as entradas analógicas contra descargas eletrostáticas (ESD) e surtos indutivos.

## 5.2 Conversão Analógico-Digital (A/D)

O conversor A/D transforma o sinal analógico contínuo em uma representação digital discreta. Parâmetros fundamentais:

- **Resolução (n bits):** Determina o número de níveis de quantização:  $2^n$ . Um ADC de 12 bits com fundo de escala de 5 V tem resolução =  $5 / 4096 \approx 1,22 \text{ mV/LSB}$ . Para PT100 com sensibilidade de  $0,385 \Omega/^\circ\text{C}$  em ponte alimentada a 1 mA, isso equivale a aproximadamente  $3,2 \text{ }^\circ\text{C/LSB}$  — insuficiente sem amplificação.
- **Taxa de amostragem ( $f_s$ ):** Número de conversões por segundo (samples/s ou SPS). Pelo teorema de Nyquist:  $f_s \geq 2 \times f_{\text{máx\_sinal}}$ . Para temperatura (variação lenta): 1–10 SPS é suficiente. Para vibração:  $\geq 10 \text{ kSPS}$ .
- **Quantização:** O erro de quantização máximo é  $\pm 0,5 \text{ LSB}$ . Contribui como componente de incerteza tipo B com distribuição retangular.
- **Fundo de escala (FSR — Full Scale Range):** Tensão máxima de entrada. Deve ser compatível com o sinal condicionado para maximizar a resolução efetiva.

Plataforma	ADC interno	Resolução	Taxa máx.	Observações
Arduino Uno (ATmega328P)	SAR 10 bits	$\sim 4,88 \text{ mV}$ (5 V ref)	$\sim 9,6 \text{ kSPS}$	6 canais; referência interna 1,1 V disponível
ESP32	SAR 12 bits	$\sim 0,81 \text{ mV}$ (3,3 V)	$\sim 83 \text{ kSPS}$	18 canais; alta não-linearidade; ADC externo recomendado

Plataforma	ADC interno	Resolução	Taxa máx.	Observações
Raspberry Pi Pico (RP2040)	SAR 12 bits	~0,81 mV	500 kSPS	3 canais ADC
ADS1115 (externo I2C)	Sigma-Delta a 16 bits	~0,0076 mV (PGA=1)	860 SPS	4 canais diferenciais; PGA integrado; ideal para PT100
NI myDAQ	Multifunção	16 bits	200 kSPS	2 canais AI; integrado com LabVIEW

Tabela 5.1 — Comparação de conversores A/D em plataformas comuns.

### 5.3 Sistemas DAQ: NI, Arduino, ESP32, Raspberry Pi

National Instruments (NI): Plataformas profissionais para aquisição de dados. O myDAQ é uma ferramenta didática com 2 entradas analógicas (16 bits, 200 kS/s), 2 saídas analógicas, 8 DIO, multímetro e osciloscópio integrados, programada via LabVIEW. O cDAQ é um sistema modular para aplicações industriais.

Arduino: Plataforma open-source de baixo custo. Ideal para prototipagem rápida e ensino. Limitações: ADC de 10 bits, sem isolamento, sem condicionamento integrado. Soluções: ADC externo (ADS1115), shields de condicionamento, bibliotecas como OneWire e DallasTemperature.

ESP32: Microcontrolador com Wi-Fi e Bluetooth integrados, ideal para IoT. ADC de 12 bits com não-linearidade conhecida; recomenda-se calibração ou uso de ADC externo para medições de precisão. Programação via Arduino IDE, MicroPython ou ESP-IDF.

Raspberry Pi: Computador single-board com Linux. Não possui ADC interno — necessita interface externa (MCP3008 SPI, ADS1115 I2C). Excelente para processamento local, dashboards (Grafana), e comunicação com bancos de dados.

### 5.4 Circuito de Leitura PT100 com Arduino

Configuração: Ponte de Wheatstone + Amplificador de Instrumentação INA128 + Arduino.

Ponte de Wheatstone: Três resistores fixos de 100  $\Omega$  (precisão  $\leq 0,1\%$ ) e o PT100 formam a ponte. Alimentação: 1,0 V (limitar corrente a  $\leq 1$  mA para evitar auto-aquecimento). A tensão diferencial na diagonal de medição é:  $\Delta V \approx V_{exc} \times \Delta R / (4 \times R_0)$ , onde  $\Delta R = R_{PT100} - 100 \Omega$ .

INA128: Amplificador de instrumentação de precisão da Texas Instruments. Ganho:  $G = 1 + 50 \text{ k}\Omega / R_G$ . Para  $G = 100$ :  $R_G = 505 \Omega$ . Saída conectada à entrada analógica do Arduino (A0).

```
// Leitura de PT100 via ponte + INA128
const int PIN_ADC = A0;
const float V_REF = 5.0;
const float GAIN = 100.0;
const float V_BRIDGE = 1.0;
const float R0 = 100.0;
const float ALPHA = 0.00385; // coef. temperatura PT100

void setup() { Serial.begin(9600); }

void loop() {
  int adc = analogRead(PIN_ADC);
  float v_out = (adc / 1023.0) * V_REF;
  float dv = v_out / GAIN;
  float dR = (4.0 * R0 * dv) / V_BRIDGE;
  float temp = dR / (R0 * ALPHA);
  Serial.print("Temperatura: ");
  Serial.print(temp, 2);
  Serial.println(" C");
  delay(1000);
}
```

Código 5.1 — Leitura simplificada de PT100 com Arduino (aproximação linear).

## 5.5 Protocolo Modbus para Transmissão de Dados de Sensores Industriais

O Modbus é um protocolo de comunicação serial desenvolvido pela Modicon (1979), amplamente utilizado em automação industrial. Variantes: Modbus RTU (serial RS-485), Modbus ASCII e Modbus TCP/IP (Ethernet).

- Arquitetura mestre-escravo: Um mestre (PLC/SCADA) inicia as requisições; escravos (transmissores, CLPs) respondem. Até 247 escravos em um barramento RS-485.
- Registradores: Coils (1 bit, R/W), Discrete Inputs (1 bit, R), Input Registers (16 bits, R), Holding Registers (16 bits, R/W).
- Funções principais: 01 (Read Coils), 02 (Read Discrete Inputs), 03 (Read Holding Registers), 04 (Read Input Registers), 06 (Write Single Register), 16 (Write Multiple Registers).
- Exemplo: Transmissor de temperatura com endereço Modbus 01, temperatura no Holding Register 40001. O mestre envia: [01][03][00][00][00][01][CRC]. O escravo responde com 2 bytes de dados = valor de temperatura × 10.

## Capítulo 6 — Aplicações no Semiárido

O Semiárido brasileiro, com suas particularidades climáticas (baixa pluviosidade, alta irradiação solar, amplitudes térmicas significativas), demanda soluções de instrumentação adaptadas à realidade local. O LabAuto, sediado no CDSA/UFCG em Sumé-PB, desenvolve projetos de pesquisa e extensão voltados à aplicação de tecnologias de sensoriamento e automação de baixo custo para a agricultura familiar e o monitoramento ambiental da Caatinga.

### 6.1 Instrumentação de Baixo Custo para Agricultura Familiar

Desafios: A agricultura familiar no Semiárido enfrenta restrições severas de recursos financeiros e técnicos. Sistemas de instrumentação industriais tradicionais são inacessíveis (custo e complexidade). A energia elétrica pode ser intermitente ou ausente. A conectividade internet é limitada em áreas rurais.

Soluções do LabAuto:

- Estações meteorológicas baseadas em ESP32 com sensores de baixo custo (DHT22, BMP280, anemômetro reed switch) — custo total < R\$ 200
- Alimentação por painel solar (5 W) + bateria de lítio (18650) com regulador de carga TP4056
- Transmissão de dados via LoRa (SX1276/SX1278) para gateway central — alcance até 10 km em linha de visada
- Dashboard web com Grafana + InfluxDB em Raspberry Pi concentrador
- Caixa de proteção IP65 fabricada com tubo PVC — resistente a chuva e poeira

### 6.2 Monitoramento de Microclima em Caatinga

O bioma Caatinga apresenta microclimas complexos influenciados pela vegetação, topografia e uso do solo. O LabAuto opera uma rede de sensores distribuídos para monitoramento contínuo:

- Variáveis monitoradas: temperatura do ar (DS18B20), umidade relativa (DHT22), radiação solar (fotodiodo BPW34 + circuito transimpedância), temperatura do solo (DS18B20 em sonda enterrada a 10 cm), umidade do solo (sensor capacitivo v2.0)
- Amostragem: Leituras a cada 5 minutos, média horária armazenada em cartão microSD
- Rede: 8 nós sensores distribuídos em transecto de 2 km (Caatinga preservada → área agrícola → solo exposto)
- Comunicação: LoRa ponto-a-ponto para gateway com acesso à internet (GPRS/4G)
- Resultados parciais: Diferenças de até 4 °C na temperatura máxima entre área sombreada pela vegetação nativa e solo exposto ao meio-dia; umidade relativa 15% maior sob dossel da Caatinga

### 6.3 Instrumentação de Aviários de Frango de Corte

A avicultura é uma das principais atividades pecuárias do Semiárido. O conforto térmico das aves impacta diretamente na conversão alimentar, ganho de peso e mortalidade. O LabAuto desenvolveu um sistema de monitoramento multiparamétrico para aviários:

- Temperatura: Rede de DS18B20 (mínimo 6 pontos: 2 alturas × 3 posições longitudinais) — zona de conforto de frangos de corte: 18–26 °C (dependendo da idade)

- Umidade relativa: DHT22 — faixa ideal: 50–70% UR
- CO<sub>2</sub>: Sensor MH-Z19B (NDIR) — limite: 3000 ppm (acima causa problemas respiratórios)
- NH<sub>3</sub> (amônia): Sensor MQ-137 (eletroquímico, requer calibração) — limite: 20 ppm
- Velocidade do ar: Anemômetro de fio quente para verificar eficiência dos exaustores — ideal: 1,5–3,0 m/s ao nível das aves
- Atuação: Acionamento automático de exaustores, nebulizadores e aquecedores via relés controlados pelo ESP32, com lógica de controle PID para temperatura

## 6.4 Sistema de Controle de Irrigação

Sistema desenvolvido para hortas comunitárias no município de Sumé-PB, integrando instrumentação e controle:

- Sensor de umidade do solo: Sensor capacitivo (Decagon/METER EC-5 ou alternativa de baixo custo) instalado na zona radicular (10–20 cm de profundidade). Leitura de umidade volumétrica ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) via ADC externo ADS1115.
- Válvula motorizada: Válvula solenoide 12 V (normalmente fechada) acionada por relé via GPIO do ESP32.
- Lógica de controle: Controle on-off com histerese: liga irrigação quando  $\theta < \theta_{\min}$  (ex.: 0,20  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ); desliga quando  $\theta > \theta_{\max}$  (ex.: 0,30  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ).
- Economia de água: Redução de 30–40% no consumo de água comparado à irrigação manual por aspersão, baseado em dados coletados durante 2 ciclos de cultivo de alface e coentro.
- Monitoramento remoto: Dashboard acessível via smartphone (Blynk ou Telegram Bot) permite ao agricultor acompanhar a umidade do solo e o status da irrigação em tempo real.

## Exercícios Resolvidos

### Exercício 1 — Conversão de Sinal 4–20 mA

Enunciado: Um transmissor de temperatura está configurado para a faixa 0–200 °C com saída 4–20 mA. Qual é a temperatura correspondente a uma leitura de 14,4 mA?

Resolução: Usando a fórmula de conversão linear:

$$T = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \times (I - 4) / (20 - 4)$$

$$T = 0 + (200 - 0) \times (14,4 - 4) / 16 = 200 \times 10,4 / 16 = 200 \times 0,65 = 130,0 \text{ °C}$$

### Exercício 2 — Cálculo de Incerteza Tipo A

Enunciado: Dez medições consecutivas de temperatura com um PT100 em banho estabilizado a 50 °C resultaram: 49,92; 50,05; 49,98; 50,03; 50,01; 49,97; 50,06; 49,99; 50,02; 50,00 °C. Calcule a média, o desvio padrão e a incerteza padrão tipo A.

Resolução:

$$\text{Média: } \bar{x} = (49,92 + 50,05 + \dots + 50,00) / 10 = 500,03 / 10 = 50,003 \text{ °C}$$

$$\text{Desvio padrão: } s = \sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2 / (n-1)]} = \sqrt{(0,01477/9)} \approx 0,0405 \text{ °C}$$

$$\text{Incerteza padrão tipo A: } u_A = s / \sqrt{n} = 0,0405 / \sqrt{10} = 0,0405 / 3,162 \approx 0,0128 \text{ °C}$$

### Exercício 3 — Leitura de PT100 (Valor de Resistência para Temperatura)

Enunciado: Um PT100 apresenta resistência de 119,40 Ω. Usando a aproximação linear  $R(t) = 100(1 + 0,00385 \cdot t)$ , determine a temperatura.

Resolução:

$$119,40 = 100 \times (1 + 0,00385 \times t)$$

$$1,194 = 1 + 0,00385 \times t$$

$$0,194 = 0,00385 \times t$$

$$t = 0,194 / 0,00385 = 50,39 \text{ °C}$$

### Exercício 4 — Calibração: Erro e Correção

Enunciado: Na calibração de um transmissor de pressão (faixa 0–10 bar, saída 4–20 mA), a leitura em 5,00 bar (padrão) foi de 12,08 mA. A leitura esperada é 12,00 mA. Calcule o erro e a correção.

Resolução:

$$\text{Valor esperado a 5,00 bar: } I = 4 + (20-4) \times 5/10 = 4 + 8 = 12,00 \text{ mA}$$

$$\text{Erro} = \text{Leitura} - \text{Esperado} = 12,08 - 12,00 = +0,08 \text{ mA}$$

$$\text{Em unidade de engenharia: } \Delta P = (0,08/16) \times 10 = +0,05 \text{ bar}$$

$$\text{Correção: } C = -\text{Erro} = -0,05 \text{ bar (subtrair do valor indicado)}$$

## Exercício 5 — Erro Relativo

Enunciado: Um sensor de nível ultrassônico indica 3,47 m. O valor real (padrão) é 3,50 m. Calcule o erro absoluto e o erro relativo percentual.

Resolução:

Erro absoluto:  $E = 3,47 - 3,50 = -0,03 \text{ m}$

Erro relativo:  $ER = |E| / V_{\text{ref}} \times 100\% = 0,03 / 3,50 \times 100\% = 0,86\%$

# Roteiro de Laboratório — Lab 01

## Calibração de Sensor de Temperatura PT100 com Arduino

### Objetivo

Realizar a calibração de um sensor de temperatura PT100 utilizando um banho térmico como padrão de referência, adquirir dados com plataforma Arduino e construir a curva de calibração com análise de incerteza.

### Materiais e Equipamentos

- 1x Multímetro digital (resolução 0,01  $\Omega$ ) — para verificação da resistência do PT100
- 1x Sensor PT100 (3 fios, classe B)
- 1x Banho térmico com agitação (faixa: ambiente a 100 °C, estabilidade  $\pm 0,05$  °C)
- 1x Termômetro de referência (calibrado, com certificado RBC) — resolução 0,01 °C
- 1x Arduino Uno R3 + cabo USB
- 1x Módulo ADC externo ADS1115 (16 bits, I2C)
- 1x Placa de circuito com ponte de Wheatstone (3 resistores de 100  $\Omega \pm 0,1\%$ )
- 1x Amplificador de instrumentação INA128 (ganho ajustado para  $G = 100$ )
- Protoboard, jumpers, fonte de alimentação regulada 5 V
- Computador com Arduino IDE e planilha eletrônica (LibreOffice Calc ou Excel)

### Procedimento

Etapa 1 — Montagem do circuito (30 min)

- Montar a ponte de Wheatstone na protoboard com os 3 resistores fixos e o PT100
- Conectar a saída diferencial da ponte ao INA128
- Conectar a saída do INA128 ao canal A0 do ADS1115
- Conectar o ADS1115 ao Arduino via I2C (SDA → A4, SCL → A5)
- Alimentar o circuito e verificar tensões com multímetro

Etapa 2 — Configuração do software (15 min)

- Carregar o sketch de leitura do ADS1115 (biblioteca Adafruit\_ADS1X15)
- Configurar taxa de amostragem: 16 SPS (modo de alta resolução)
- Configurar serial monitor a 9600 baud; verificar leituras em repouso (temperatura ambiente)

Etapa 3 — Coleta de dados (90 min)

- Inserir o PT100 e o termômetro de referência no banho térmico
- Definir 7 pontos de calibração: 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 °C
- Para cada ponto: (a) ajustar o setpoint do banho; (b) aguardar estabilização (15 min); (c) registrar 10 leituras consecutivas do Arduino e o valor do termômetro de referência
- Repetir no ciclo descendente (85 → 25 °C) para avaliação de histerese

Etapa 4 — Análise de dados (45 min)

- Calcular média e desvio padrão das 10 leituras em cada ponto

- Construir gráfico:  $T_{\text{referência}}$  (eixo x) vs. Leitura Arduino em mV (eixo y)
- Ajustar regressão linear:  $V = a \cdot T + b$ ; calcular  $R^2$
- Avaliar histerese: diferença entre ciclos ascendente e descendente
- Calcular incerteza expandida ( $k = 2$ ) em pelo menos 3 pontos
- Elaborar certificado de calibração simplificado com os resultados

### **Relatório (entrega em 7 dias)**

- Introdução com fundamentação teórica (PT100, ponte de Wheatstone, incerteza)
- Descrição do procedimento experimental e fotos da montagem
- Tabela de dados brutos (todos os pontos, ciclos ascendente e descendente)
- Gráfico de calibração com curva ajustada e barras de incerteza
- Cálculo detalhado de incerteza (balanço completo) para o ponto de 55 °C
- Conclusões e sugestões de melhoria

## Referências

---

- [1] BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. Instrumentação e Fundamentos de Medidas. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. 2 v.
- [2] BOLTON, W. Instrumentação e Controle. Tradução de Luiz Roberto de Godoi Vidal. São Paulo: Hemus, 2005.
- [3] DOEBELIN, E. O.; MANIK, D. N. Measurement Systems: Application and Design. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2019.
- [4] FIALHO, A. B. Instrumentação Industrial: Conceitos, Aplicações e Análises. 7. ed. São Paulo: Érica, 2010.
- [5] INMETRO. Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM). 1. ed. luso-brasileira. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012.
- [6] JCGM 100:2008 — Evaluation of Measurement Data — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. Disponível em: [https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf).
- [7] IEC 60751:2022 — Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors. International Electrotechnical Commission, 2022.
- [8] IEC 60584-1:2013 — Thermocouples — Part 1: EMF specifications and tolerances. International Electrotechnical Commission, 2013.
- [9] LIPTÁK, B. G. (Ed.). Instrument Engineers' Handbook: Process Measurement and Analysis. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2003. v. 1.
- [10] THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações. 9. ed. São Paulo: Érica, 2020.