

Sensores de Temperatura: RTD (PT-100) e Termopares (Tipos K e J)

Thalles Cotta Fontainha¹

¹ Matrícula: 2410091DIOAMA

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ

Programa de Pós-Graduação em Instrumentação e Óptica Aplicada (PPGIO)

Disciplina: Instrumentação em Processos Físicos e Biológicos

Professor: Jesse Costa

thalles.fontainha@aluno.cefet-rj.br

Resumo. Este trabalho aborda a instrumentação aplicada à medição de temperatura, um parâmetro físico essencial em Processos Físicos e Biológicos. O estudo apresenta os principais sensores elétricos empregados nessa finalidade: as Termoresistências (RTD), exemplificadas pelo modelo PT-100, e os Termopares dos tipos K e J. São discutidos os princípios de funcionamento, os conceitos físicos e matemáticos, os tipos, as aplicações e as vantagens e desvantagens de cada tecnologia. A análise considera também fontes digitais e materiais de referência sobre termometria e instrumentação industrial. Ao longo do semestre 2025-2, o conteúdo foi atualizado de forma contínua com base nas orientações e discussões em aula, resultando nesta versão final submetida para avaliação e lançamento de nota do presente trabalho entregue hoje.

1. Introdução

A instrumentação científica é o campo responsável pela medição e controle de parâmetros físicos fundamentais [Costa, 2011; Tsoulfanidis and Landsberger, 2015]. Entre esses parâmetros, a temperatura destaca-se por sua relevância em processos físicos, químicos e biológicos, podendo ser determinada por métodos de dilatação, dispositivos manométricos ou, como foco deste trabalho, por sensores elétricos [Costa, 2011; Tsoulfanidis and Landsberger, 2015].

Os sensores elétricos, como as Termoresistências (RTD) e os Termopares, são amplamente utilizados devido à sua confiabilidade, ampla faixa de operação e compatibilidade com sistemas de controle automático [Costa, 2011; Knoll, 2010].

Assim, este trabalho busca ser mais instrumental, conectando a teoria com o comportamento físico do material (no caso da RTD) e com exemplos práticos de uso de termopares em situações reais, inclusive discutindo a compensação da junção fria.

2. Fundamentação Teórica

Os sensores de temperatura convertem variações térmicas em sinais elétricos, podendo operar segundo dois princípios principais: a variação de resistência elétrica (RTDs e Termistores) e o efeito termoelétrico (Termopares) [Costa, 2011; Knoll, 2010].

2.1. RTD (Termoresistência): Princípios, Funcionamento e Fórmulas

As RTDs operam com base no princípio de que a resistência elétrica de um metal varia de forma previsível com a temperatura [Costa, 2011; Cordeiro, 2019]. O exemplo mais comum é o sensor PT-100, fabricado com platina, devido à sua estabilidade e linearidade em ampla faixa de temperatura. Outros metais empregados incluem níquel, cobre e molibdênio [Cordeiro, 2019].

Os diferentes metais empregados na fabricação de RTDs apresentam variações significativas quanto à faixa operacional e ao coeficiente de temperatura (*Alpha*), fatores que influenciam diretamente a precisão e a estabilidade do sensor. A Tabela 1 resume as principais características desses materiais, conforme dados de [Cordeiro, 2019].

Tabela 1. Propriedades térmicas dos principais metais usados em RTDs.

Metal	Símbolo	Faixa (°C)	Coef. α (°C $^{-1}$)
Cobre	Cu	-200 a 260	0,00427
Molibdênio	Mo	-200 a 200	0,003 – 0,00385
Níquel	Ni	-80 a 260	0,00672
Ferro–Níquel	Ni-Fe	-200 a 200	0,00518
Platina (PT-100)	Pt	-200 a 660	0,00385 – 0,00392

A relação entre resistência (R) e temperatura (T) pode ser descrita, de forma prática, por:

$$R = R_0(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2), \quad (1)$$

onde R_0 é a resistência a 0°C. Para o PT-100, $R_0 = 100 \Omega$ [Costa, 2011]. A equação é uma forma simplificada do polinômio de Callendar-Van Dusen, comumente utilizado para RTDs de platina [Cordeiro, 2019].

Do ponto de vista microscópico, a corrente elétrica em um metal depende da densidade de portadores de carga (n) e da mobilidade desses portadores (μ). A condutividade pode ser escrita de forma simplificada como $\sigma \propto n\mu$. Em metais, na faixa de temperatura de interesse em instrumentação, quase todos os elétrons de valência já se comportam como *elétrons livres*, de modo que n praticamente não varia com a temperatura ambiente. O que muda de forma marcante é a mobilidade μ : ao aumentar a temperatura, intensificam-se as vibrações da rede cristalina (fônons), aumentando o espalhamento dos elétrons e reduzindo sua mobilidade. Como a resistência elétrica é inversamente proporcional à condutividade ($R \propto 1/\sigma$), essa redução de μ leva ao **aumento da resistência** com a temperatura, caracterizando o coeficiente de temperatura positivo típico de RTDs metálicas de platina. É esse comportamento intrínseco do material que a equação de Callendar-Van Dusen está descrevendo de forma compacta.

Tipos construtivos:

- *RTD de fio enrolado (wire-wound)*: formado por uma bobina metálica em suporte cerâmico, oferecendo alta precisão, porém com custo mais elevado.
- *RTD de filme fino (thin-film)*: constituído por um filme metálico depositado sobre substrato isolante, sendo mais compacto, robusto e de menor custo [Cordeiro, 2019].

A medição da resistência é geralmente feita por meio de uma Ponte de Wheatstone. No equilíbrio, a relação $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_t$ permite determinar o valor de R_t , que é convertido em temperatura. Em sistemas de controle, o PT-100 é acoplado a transmissores padronizados (como sinais de 4–20 mA ou 0–10 V) [Costa, 2011].

Na implementação prática, o PT-100 costuma ser ligado em **três fios** à ponte de Wheatstone. Dois condutores ficam de um lado do sensor e o terceiro do outro; ao distribuir de forma simétrica a resistência dos cabos nos dois ramos da ponte, o desbalanceamento passa a depender principalmente da variação de R_t devida à temperatura, e não das variações nos fios. Essa solução simples e de baixo custo é amplamente utilizada em transmissores industriais 4–20 mA, pois melhora a exatidão sem exigir cabos especiais.

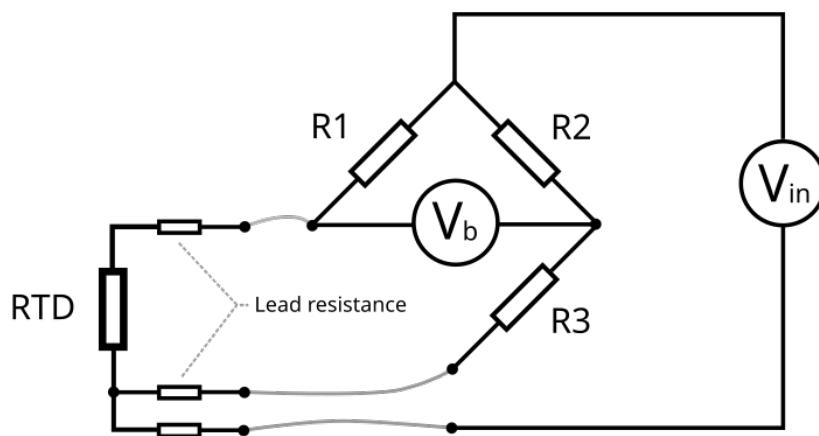


Figura 1. Configuração de RTD 3-fios em ponte de Wheatstone, evidenciando o efeito da resistência dos cabos (*lead resistance*).

2.1.1. Exemplo Numéricico de Medição com PT-100 em Ponte de Wheatstone

A medição da resistência (R_t) do PT-100 é tipicamente realizada em uma Ponte de Wheatstone, na configuração de 3 fios (Figura 1), para eliminar a influência da resistência dos cabos [Cordeiro, 2019].

Cenário (Valores Apurados):

- **Objetivo:** Medir a temperatura de 40°C.
- **Resistência Nominal (R_t):** Pela tabela do PT-100, 40°C corresponde a uma resistência de 116,31 Ω [Cordeiro, 2019].
- **Circuito em Equilíbrio:** Em um circuito de Ponte de Wheatstone com resistores de referência $R_1 = R_2 = 100 \Omega$, o equilíbrio ($V_b = 0$) é alcançado quando $R_3 = R_t$ ($R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_t$). Assim, se o resistor de ajuste R_3 for 116,31 Ω, a instrumentação determina a temperatura como 40°C.
- **Efeito dos Cabos:** Na configuração de 3 fios, se cada cabo tiver uma resistência L , essa resistência é somada simetricamente nos braços da ponte, anulando seu efeito na determinação de R_t . Isso garante que a leitura final de 116,31 Ω seja precisa, independentemente da resistência dos cabos que ligam o sensor ao instrumento, minimizando o erro de medição [Cordeiro, 2019].

2.2. Termopares: Princípios, Funcionamento e Fórmulas

Os Termopares convertem diferenças de temperatura em diferenças de potencial elétrico, baseando-se no *efeito Seebeck* [Costa, 2011]. São constituídos por dois condutores metálicos distintos unidos em uma extremidade (junção quente) e conectados a um ponto de referência (junção fria). A diferença de potencial (V_{ddp}) gerada é aproximadamente proporcional à diferença de temperatura (ΔT) entre as junções:

$$V_{ddp} = a + b\Delta T + c\Delta T^2 + \dots \quad (2)$$

Para a medição correta, a junção fria deve ser compensada, aplicando-se:

$$V(T_{jq}) = V_{\text{medida}} + V(T_{jf}), \quad (3)$$

onde T_{jq} é a temperatura da junção de medição (quente) e T_{jf} a de referência (fria). Os valores obtidos são convertidos em temperatura por meio de tabelas de calibração [Costa, 2011].

Tipos mais comuns:

- **Tipo J:** formado por Ferro e Constantan (Cu-Ni), adequado para temperaturas de até cerca de 750 °C.
- **Tipo K:** formado por Cromel (Ni-Cr) e Alumel (Ni-Al), podendo atingir temperaturas próximas a 1200 °C [Costa, 2011].

Considere um termopar tipo K medindo a temperatura de um forno. Suponha que o instrumento registre $V_{\text{medida}} = 4,096 \text{ mV}$ e que a temperatura ambiente na junção fria seja $T_{jf} = 25^\circ\text{C}$. Se o operador consultasse a tabela do termopar tomando diretamente 4,096 mV como referência, encontraria uma temperatura de aproximadamente 88°C, que é incorreta. Como as tabelas foram construídas para $T_{jf} = 0^\circ\text{C}$, é necessário primeiro obter a tensão equivalente a 25°C na tabela (cerca de 1 mV para o tipo K) e somá-la ao valor medido:

$$V(T_{jq}) = 4,096 \text{ mV} + 1,0 \text{ mV} \approx 5,096 \text{ mV}.$$

Ao consultar novamente a tabela usando 5,096 mV, obtém-se uma temperatura próxima de 124°C para o forno, que é o valor correto após a compensação da junção fria. Esse exemplo simples mostra que, sempre que se usa termopares em instrumentação, é preciso medir (ou estimar com precisão) a temperatura na junção fria, seja com um sensor adicional, seja por circuitos de compensação eletrônica.

Esse procedimento de soma da tensão equivalente à temperatura da junção fria representa o princípio fundamental da compensação da junção fria, atualmente implementado de forma automática nos instrumentos digitais por meio de sensores auxiliares de temperatura (RTD, termistores ou semicondutores), garantindo que a conversão tensão-temperatura reflita corretamente a temperatura real do processo, mesmo quando $T_{jf} \neq 0^\circ\text{C}$. Além disso, quando se utilizam cabos de extensão entre o termopar e o instrumento, é importante que esses cabos sejam feitos de materiais compatíveis com o tipo de termopar ou de ligas equivalentes. Se um trecho do circuito estiver em uma temperatura diferente da junção fria, e for construído com metais comuns (como cobre), podem surgir forças eletromotrices adicionais não previstas nas tabelas. Em outras palavras, o ponto onde termina o cabo de extensão e começa o condutor de cobre do instrumento pode, na

prática, se comportar como uma nova junção fria, exigindo cuidado no posicionamento e na escolha dos materiais para que a leitura seja confiável.

Na prática, os cabos de compensação permitem que a junção fria seja deslocada fisicamente para o interior do painel de instrumentação, onde a temperatura ambiente é mais estável e pode ser monitorada com maior precisão. Esses cabos são fabricados com ligas de propriedades termoelétricas semelhantes às do termopar (por exemplo, tipo K ou J), evitando a introdução de forças eletromotrices parasitas. Dessa forma, a compensação eletrônica é aplicada corretamente no bloco terminal do instrumento, enquanto os condutores de cobre passam a ser utilizados apenas a partir da região onde a temperatura é controlada.

2.2.1. Cabos de Compensação/Extensão e seus Efeitos

Função e Uso: Cabos de compensação (ou extensão) são utilizados para estender o ponto da junção fria do termopar até o painel de instrumentação, que está geralmente mais distante e em um ambiente com temperatura mais estável. Esses cabos são fabricados com ligas que possuem propriedades termoelétricas semelhantes aos materiais do termopar (Tipo J ou K) [Costa, 2011].

Efeito Produzido: O efeito é evitar a criação de uma nova junção fria indesejada em um ponto intermediário do circuito. Se fossem usados cabos comuns de cobre em um trecho onde a temperatura ambiente varia (como o cabeçote do sensor no processo industrial), essa variação geraria forças eletromotrices adicionais que introduziriam erros no sinal. Ao usar cabos de compensação, a junção fria é efetivamente “movida” para o bloco terminal do instrumento, onde a temperatura (T_{jf}) pode ser medida por um sensor auxiliar (RTD ou Termistor) e a compensação eletrônica (Eq. 3) é aplicada de forma correta [Costa, 2011].

2.3. Aplicações

RTDs e Termopares são amplamente empregados em medições térmicas industriais, laboratoriais e biológicas. RTDs (como o PT-100) são preferidos em aplicações que exigem alta precisão e estabilidade, como em incubadoras, sistemas de climatização e controle de processos químicos. Termopares (tipos K e J) são utilizados em medições de temperaturas elevadas, como em fornos, motores e trocadores de calor [Cordeiro, 2019].

Como exemplo de RTD, considere uma incubadora biológica usada para cultivo de células a 37°C. Um sensor PT-100 em configuração de 3 fios é instalado próximo ao volume de interesse e ligado a um transmissor 4–20 mA. A saída do transmissor é conectada ao CLP (Controlador Lógico Programável), que compara o valor de temperatura medido com o *setpoint* e aciona resistências de aquecimento ou um sistema de refrigeração. A estabilidade e a repetibilidade do PT-100 são fundamentais para evitar oscilações de temperatura que poderiam comprometer o crescimento celular.

Como exemplo de termopar, considere um forno de tratamento térmico operando em torno de 800°C. Um termopar tipo K é inserido na região de maior temperatura, e a leitura é feita por um controlador que dispõe de compensação automática da junção fria (via sensor de temperatura ambiente interno). A robustez do termopar permite sua

utilização em temperaturas muito superiores à faixa típica de RTDs, e a resposta rápida do sensor ajuda a detectar variações bruscas de temperatura durante o processo, garantindo que o ciclo térmico seja executado conforme especificado.

2.4. Vantagens e Desvantagens

RTDs: apresentam excelente precisão, estabilidade de longo prazo e boa linearidade na faixa de trabalho, porém possuem maior custo e tempo de resposta relativamente mais lento, além de exigirem cuidado com a resistência dos cabos de ligação [Costa, 2011; Cordeiro, 2019]. RTDs de fio enrolado são mais exatas, enquanto as de filme fino são mais resistentes e econômicas.

Termopares: são mais baratos, robustos e respondem rapidamente às variações térmicas, sendo adequados para temperaturas elevadas. Contudo, exigem compensação da junção fria, são mais suscetíveis a ruídos elétricos e dependem de tabelas ou equações de calibração apropriadas [Costa, 2011].

2.5. Inteligência Artificial Aplicadas à Análise de Sensores de Temperatura

O avanço das técnicas de Inteligência Artificial (IA) tem contribuído significativamente para a instrumentação moderna, especialmente na calibração, diagnóstico e otimização de sensores de temperatura. Modelos de aprendizado de máquina e redes neurais artificiais são empregados para identificar padrões complexos em sinais térmicos e compensar não linearidades inerentes a dispositivos como RTDs e Termopares [Samanta and Singh, 2021; Xu et al., 2022].

Na prática, técnicas de IA podem, por exemplo, aprender a relação entre a leitura bruta de um termopar (incluindo efeitos de ruído e de pequenas variações de junção fria) e a temperatura real medida por um padrão de referência. Uma vez treinado, o modelo consegue efetuar uma correção dinâmica das leituras, reduzindo erros sistemáticos e melhorando a estabilidade do sistema de medição ao longo do tempo. Em RTDs, algoritmos de regressão podem refinar os coeficientes da equação de Callendar–Van Dusen para um lote específico de sensores, elevando ainda mais a exatidão em aplicações de pesquisa.

3. Conclusão

RTDs e Termopares representam tecnologias essenciais para a medição de temperatura em sistemas industriais e científicos. As RTDs de platina, como o PT-100, baseiam-se na variação da resistência elétrica e são indicadas para aplicações que requerem alta precisão e estabilidade. Já os Termopares, que se fundamentam no efeito termoelétrico, são ideais para medições em altas temperaturas, apresentando boa robustez e baixo custo. A escolha entre as duas tecnologias deve considerar fatores como faixa de operação, tempo de resposta, custo e exatidão desejada.

Em síntese, o texto aborda os princípios de funcionamento, os tipos, as aplicações, as vantagens e desvantagens, incluindo de forma explícita: (i) discussão do comportamento intrínseco do material na RTD, relacionando temperatura, mobilidade e resistência; (ii) exemplo numérico de compensação da junção fria em termopares, incluindo o papel da temperatura ambiente e dos cabos; e (iii) descrição mais detalhada de aplicações reais em que a escolha entre RTD e termopar é decisiva. Esses elementos tornam o texto mais alinhado à prática de instrumentação em Processos Físicos e Biológicos.

Referências

- Cordeiro, M. S. (2019). Introdução a rtd's (termo-resistência). Maurício Cordeiro - Instrumentação Industrial. Disponível em: <https://mauriciosscordeiro.wixsite.com/instrumentacao/....> Acessado em: 08 nov. 2025.
- Costa, J. W. (2011). Instrumentação para processos físicos e biológicos: Medição de temperatura e conceitos gerais. Slides de aula.
- Knoll, G. F. (2010). *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons, New York, 4 edition.
- Samanta, T. and Singh, R. (2021). Machine learning techniques for intelligent temperature sensor calibration. *IEEE Sensors Journal*, 21(8):9876–9885.
- Tsoulfanidis, N. and Landsberger, S. (2015). *Measurement Detection of Radiation*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 4 edition.
- Xu, L., Zhang, P., and Chen, Y. (2022). Ai-based fault diagnosis for thermocouple sensor networks. *Measurement*, 196:111202.