

SENSORES DE TEMPERATURA

Introdução

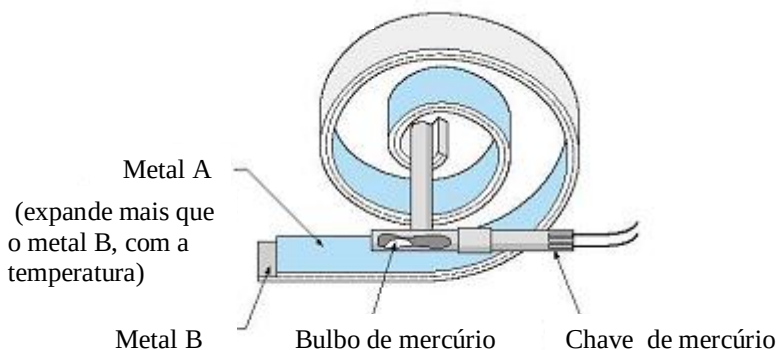
A temperatura exerce uma função vital em muitos processos industriais e sendo assim uma medição precisa é uma necessidade. Temperaturas imprecisas podem causar grandes prejuízos.

Os sensores de temperatura fornecem uma mudança de parâmetro físico, tal como a resistência ou a saída de tensão elétrica que corresponde a uma mudança de temperatura.

Na escolha de um sensor de temperatura para uma aplicação, existem diversos fatores que devem ser levados em conta.

Para as diversas aplicações possíveis, o técnico pode contar com variadas tecnologias. As mais comuns são denominadas RTD ou detectores de temperatura por variação de resistência elétrica, o termopar, o termistor.

Sensor de Temperatura bimetalício



Utilizados para controle ON-OFF. Possui seu fechamento de contato por meio de uma chave de mercúrio.

Termopar

Efeito Seebeck: uma voltagem proporcional à temperatura pode ser produzida por um circuito composto por dois metais distintos. Conforme se observa na figura abaixo, se tivermos uma junção entre dois metais diferentes, o aquecimento do ponto de junção faz com que apareça uma tensão elétrica entre as extremidades do sensor.

Exemplo: termopar de ferro-constantan, uma liga (alloy), fornece $0,35\mu V/^{\circ}C$.

Na prática: termopares conectados a cabos de cobre – três junções se formam.

Junções com os cabos de cobre devem ser mantidas à mesma temperatura (bloco isotérmico).

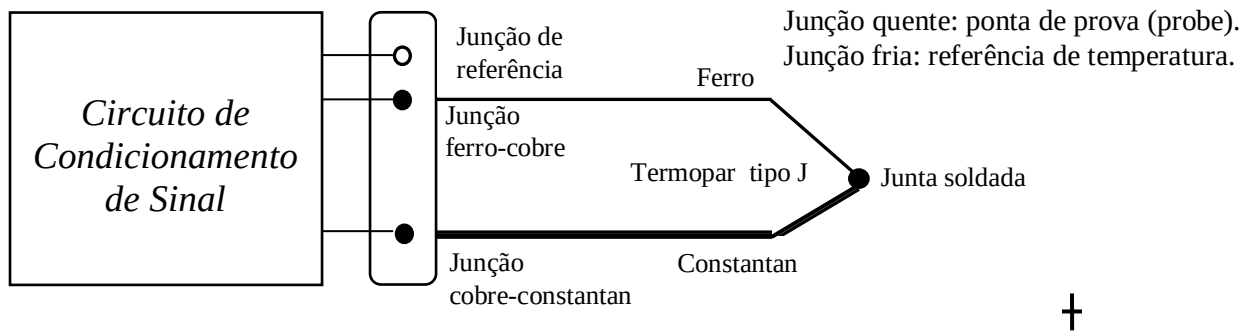
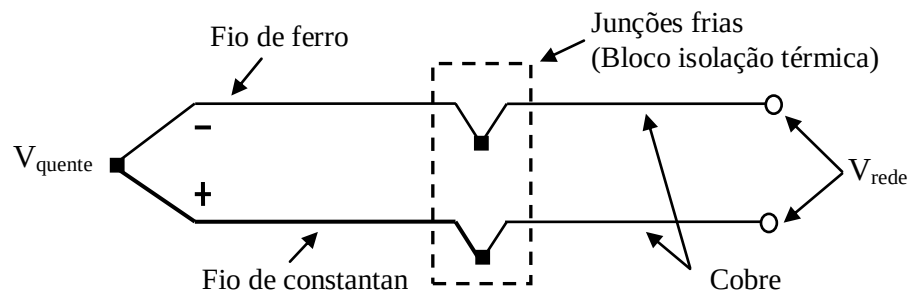
Também se utilizam cabos de compensação.

Necessita de circuitos amplificadores e também de se fazer uma compensação da junta fria. Originalmente a junção fria era imersa em um banho de gelo (ice-water bath).

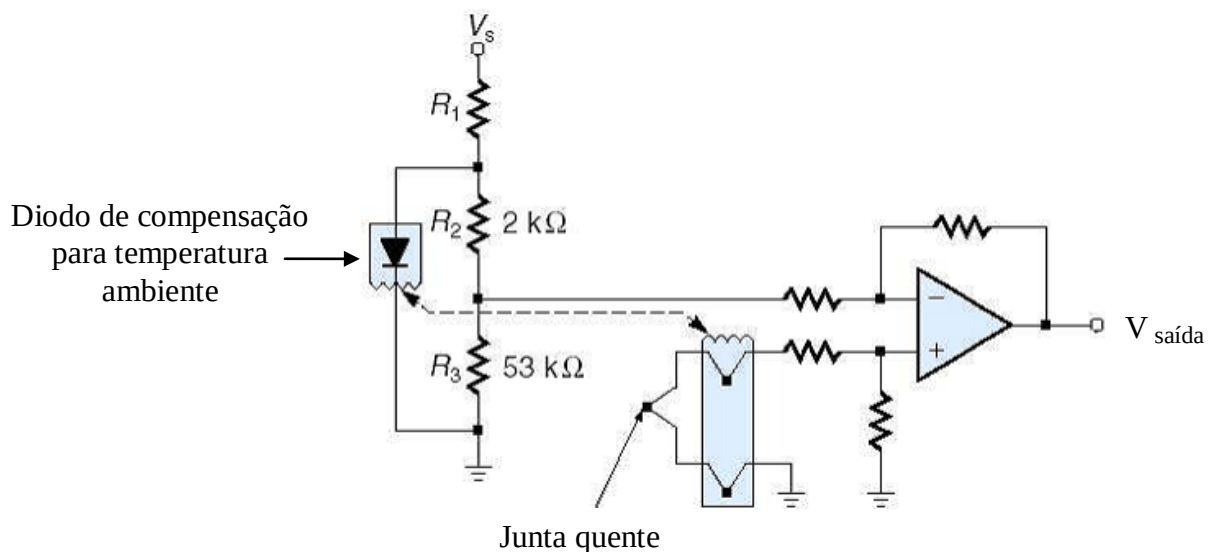
Modernamente não é mais necessário o banho de gelo, utilizam-se, por exemplo, um sistema de condicionamento de temperatura para a junção fria.

Pode-se compensar numericamente o efeito da temperatura da junção fria, consultando numa tabela a tensão correspondente V_{fria} à temperatura ambiente e somando a V_{rede} , obtendo-se diretamente V_{quente} .

$$V_{\text{rede}} = V_{\text{quente}} - V_{\text{fria}}$$



Pode-se também usar um diodo sensível à temperatura. Neste caso, a junção fria e o diodo são mantidos à mesma temperatura por um bloco isotérmico.



Existe uma tabela de tensão elétrica / graus centígrados para cada tipo de termopar.

IMPORTANTE: as tabelas de tensão (mv)/°C são sempre referenciadas a 0°C (zero grau), ou seja, a junta de referência ou junta fria (aquela ligada ao aparelho) deve estar a 0°C.

Na prática a junta de referência não fica a 0°C, então faz-se uma compensação da temperatura ambiente (o que é feito eletronicamente pelos instrumentos).

Como visto anteriormente, os aparelhos somam a tensão (em mv) que estão recebendo através dos fios à tensão (também em mv) da temperatura ambiente. Esta compensação geralmente é feita através de diodos colocados junto aos bornes dos instrumentos.

- ✓ Cabos de Extensão: são confeccionados com a mesma liga dos termopares a que se destinam. Por exemplo: para um termopar tipo J (Fe Co), o cabo de extensão correspondente também é do tipo J (Fe Co).
- ✓ Cabos de Compensação: são cabos confeccionados com ligas de materiais diferentes dos termopares, porém tem uma curva de mV/C°, igual a do termopar a que se destinam até uma certa faixa de temperatura.

Somente são utilizados cabos de compensação para os termopares chamados nobres: tipos S, R e B, que são confeccionados de platina e ficaria inviável economicamente utilizarmos um cabo feito desse material, tal fato somente ocorre se o ponto a ser medido estiver a longa distância do instrumento. Salientando-se que o cabo é mais barato que um termopar contínuo.

- ✓ É muito importante sempre fazermos as ligações com os cabos de extensão/compensação. Isto garante que haverá uma *perfeita* leitura da temperatura, pois se utilizarmos fios de cobre e houver diferença de temperatura entre a emenda e o instrumento, haverá um erro de leitura.
- ✓ Existem várias alternativas para isolação dos cabos, de acordo com as necessidades:

Isolação		Características	Isolação	Temp. Máx. de Isolação
<i>Interno</i>	<i>Externo</i>	<i>Abrasão</i>	<i>Umidade</i>	<i>Utilização</i>
PVC	PVC	Muito Boa	Excelente	105°C
Amianto	Amianto	Razoável	Razoável	260°C
Silicone	Amianto	Razoável	Muito Boa	250°C
Fibra	Fibra	Boa / 200°C	Boa até 200°C	540°C

Cores de Fios e Cabos de Compensação/Extensão normalizadas

Cabo ou Fio de Compensação	Tipo	Material dos Condutores		E.U.A Norma ANSI MC96.1	Alemã Norma DIN 43710.4
Ferro Constantan	J	+ Ferro (polo magnético)		Vermelho	Branco
		- Constantan		Azul	Vermelho
Cromel - Alumel ou Ni Cr Ni	K	+ Cromel		Vermelho	Amarelo
		- Alumel (polo magnético)		Verde	Vermelho
Cobre Constantan	T	+ Cobre		Vermelho	Azul
		- Constantan		Marrom	Vermelho
Cobre Cobre / Ni	S / R	+ Cobre		Vermelho	Preto
		- Cobre / Ni		Branco	Vermelho
Cobre Cobre	B	+ Cobre			Cinza
		- Cobre			Vermelho

Ruído em termopares

Ruído é todo e qualquer distúrbio ou falso sinal, que venha a comprometer o sinal de um instrumento sobrepondo-se ao sinal original.

Pode-se utilizar de três recursos para minimizar os problemas causados pelos ruídos. O primeiro recurso, é:

- ✓ 1- Para ruído Eletrostático: utilizar cabos blindados aterrados num só ponto;

O segundo e o terceiro recurso utilizados para minimizar os problemas causados pelos ruídos, são:

- ✓ 2- Para ruído Magnético: utilizar cabos torcidos e não paralelos;
- ✓ 3- Para ruído de Modo Comum: idem ao eletrostático, cabo blindado aterrado num só ponto.

Consideração Geral:

- ✓ Em todos os casos onde se deseje minorar os efeitos indesejáveis dos ruídos, deve-se utilizar junta quente isolada e os cabos de sinal devem estar dispostos em bandejas ou eletrodutos separados dos outros sinais de tensão elétrica.

Como especificar corretamente um termopar

Vários fatores devem ser considerados antes de especificarmos um termopar.

São fatores a serem considerados:

- ✓ a faixa de temperatura,
- ✓ a precisão,
- ✓ as condições de trabalho,

- ✓ a velocidade de resposta, e
- ✓ o custo.

Fator de especificação FAIXA DE TEMPERATURA:

- ✓ O ideal é escolhermos um tipo de termopar para trabalhar entre 50 a 75% da sua faixa de utilização.

Fator de especificação PRECISÃO:

- ✓ Escolher o termopar que melhor se adapte ao processo em função dos limites do erro.

Fator de especificação CONDIÇÕES DE TRABALHO:

- ✓ Identificar problemas que possam afetar o bom funcionamento do termopar, tais como corrosão, oxidação, gases, aspectos mecânicos, pressão, dentre outros. Adequar a proteção ao termopar (tubo ou poço, dentre outras). A escolha deve sempre ter como meta a maior vida útil do termopar.

Fator de especificação VELOCIDADE DE RESPOSTA:

- ✓ Precisa-se conhecer o processo. Com que velocidade o nosso controlador deve corrigir a temperatura a fim de se obter a melhor qualidade do produto final? Esta é a pergunta basilar que se deve fazer para a correta escolha do termopar.

Fator de especificação CUSTO:

- ✓ Deve-se escolher o termopar que atenda a todas as exigências técnicas requeridas e apresente o menor custo relativo.

Termopar e suas várias possibilidades construtivas

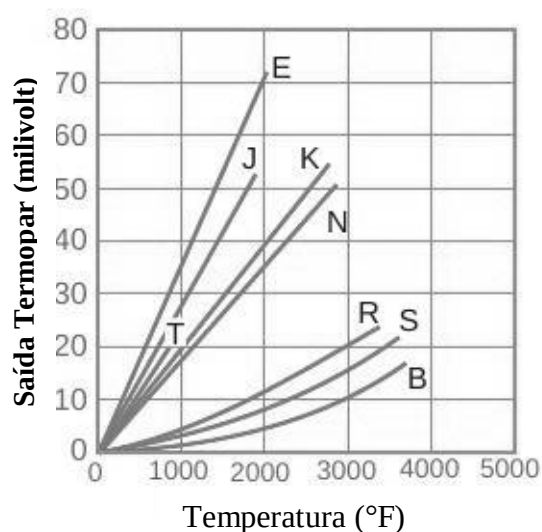
- ✓ Existem diversas construções de termopares, de acordo com a necessidade de cada processo. É comum os termopares serem fabricados sob encomenda. Os termopares sofrem grandes variações, desde diâmetros, comprimentos, ângulos, roscas para fixação, flanges, poços, etc.
- ✓ O recomendável é que cada indústria mantenha um estoque mínimo dos termopares mais utilizados em seus processos.
- ✓ Os termopares que os fabricantes costumam manter em estoque, para pronta entrega, são os utilizados nas indústrias de plásticos (extrusoras, injetoras, sopradoras, etc.), uma vez que existe um relativo padrão dos fabricantes para esta finalidade.
- ✓ Termopar convencional: são aqueles fabricados com fios e isoladores cerâmicos que podem ser utilizados com ou sem proteção (metálica, tubos cerâmicos, etc.)
- ✓ Termopar de isolamento mineral: é constituído por um ou dois pares termoelétricos, acondicionados em uma bainha metálica e isolados entre si e da bainha por um pó isolante de óxido de magnésio, altamente compactado. Possui excelentes qualidades de resistência mecânica, flexibilidade e isolamento e sua capa externa constitui proteção aos ataques químicos e solicitações mecânicas.
- ✓ Termopar de isolamento mineral são praticamente padronizados pelos fabricantes. São comumente encontrados com os diâmetros externos de, 1,5mm, 3,0mm, e 6,0mm e, sob encomenda outros.

Termopares comerciais são disponíveis para diversas faixas de temperatura e valores de sensibilidade.

Na **tabela** dada a seguir temos os diversos tipos de termopares de acordo com os materiais usados.

<i>Tipo</i>	<i>Metais Usados</i>	<i>Faixa de Temperatura</i>
E	Chromel, Constantan	- 200 to 900
J	Iron, Constantan	0 to 760
T	Copper, Constantan	- 200 to 371
K	Chromel, Alumel	- 200 to 1260
N	Nicrosil, Nisil	0 to 1260
S	Platinum (10% Rhodium), Platinum	0 to 1480
B	Platinum (30% Rhodium), Platinum (6% Rhodium)	0 to 1820
R	Platinum (13% Rhodium), Platinum	0 to 1480

O gráfico abaixo mostra as diferentes características destes termopares.



RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

- ✓ Faixa típica de temperatura: -270° C a 1800° C
- ✓ Sensibilidade: microvolts por °C
- ✓ Precisão típica: +/- 0,5%
- ✓ Linearidade: precisa de uma correção polinomial.
- ✓ Robustez: para a conexão deste tipo de sensor normalmente são usados fios grossos, o que os torna bastante robustos. Também contribuem para esta robustez os materiais isolantes que são utilizados.
- ✓ Tempo de resposta: menos de 1 segundo
- ✓ Excitação externa: não necessita de um circuito de excitação externa
- ✓ Sinal de saída: tensão elétrica

RTD

Os RTD (Resistance Temperature Detectors - detectores de temperatura por variação de resistência

elétrica), ou termorresistências, são dispositivos construídos de um fio enrolado sobre um substrato isolante. Os RTD funcionam segundo o princípio físico de que a resistência elétrica dos metais variam segundo a variação de temperatura a qual estão submetidos. São quase lineares sobre uma larga faixa de temperatura, e podem ter tempos de resposta de uma fração de segundo. Requerem uma corrente elétrica para produzir uma queda de tensão através do sensor.

O coeficiente de temperatura, chamado alfa (α), é diferente entre curvas de RTD. Embora vários fabricantes possam especificar alfa de modo diferente, alfa é mais comumente definido como a variação de resistência do RTD entre 0 e 100°C, dividida pela resistência a 0°C, dividida por 100°C, ou seja:

$$\alpha(\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}) = (R_{100} - R_0)/(R_0 \times 100^{\circ}\text{C}) \quad \text{Equação 1}$$

onde R_{100} é a resistência do RTD a 100°C, e R_0 é a resistência do RTD a 0°C.

Por exemplo, uma RTD de platina a 100 Ω , comumente denominada PT-100, com $\alpha = 0,003911$ medirá 139,11 Ω a 100°C. A Figura 1 mostra uma típica curva resistência-temperatura para um RTD de platina a 100 Ω .

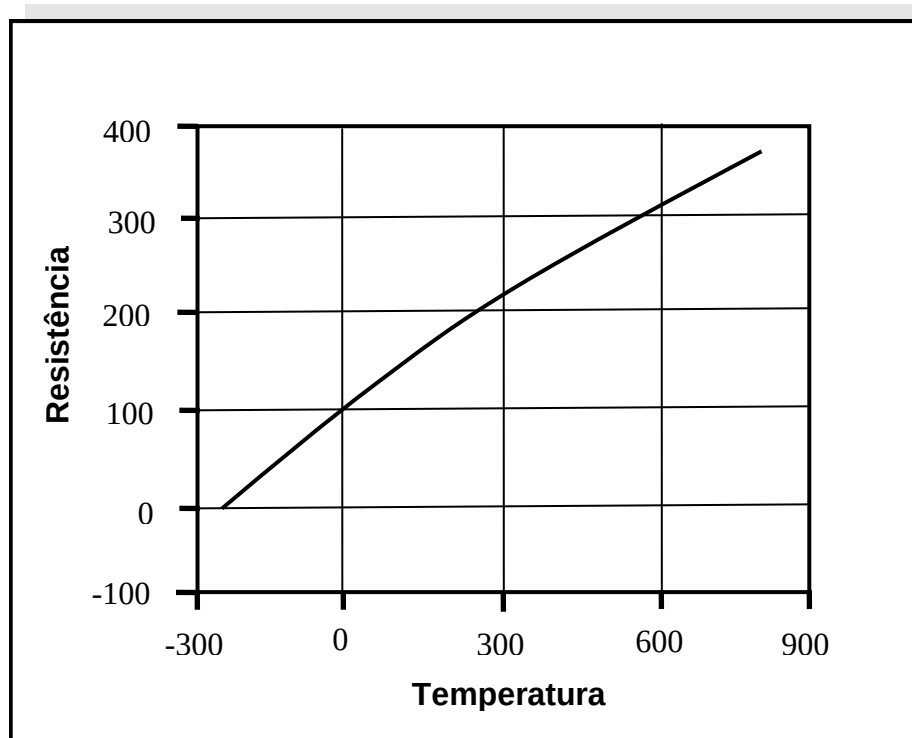


Figura 1. Curva Resistência-Temperatura para um PT-100, $\alpha = 0.00385$

Embora a curva da resistência-temperatura seja relativamente linear, a conversão exata da resistência medida para temperatura requer um ajuste de curva. A equação Callendar-Van Dusen é normalmente utilizada para aproximar a curva do RTD:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)]$$

Equação 2

onde R_t é a resistência do RTD a uma temperatura qualquer = t ; R_0 é a resistência do RTD a 0°C sendo que A, B e C são os coeficientes de Callendar-Van Dusen mostrados na Tabela 1; e t é a temperatura em °C.

Tabela 1. Coeficientes Callendar-Van Dusen Correspondentes aos RTDs comumente utilizados

Padrão	Coeficiente de Temperatura (α)	A	B	C*
DIN 43760	0,003850	$3,9080 \times 10^{-3}$	$-5,8019 \times 10^{-7}$	$-4,2735 \times 10^{-12}$
American	0,003911	$3,9692 \times 10^{-3}$	$-5,8495 \times 10^{-7}$	$-4,2325 \times 10^{-12}$
ITS-90	0,003926	$3,9848 \times 10^{-3}$	$-5,870 \times 10^{-7}$	$-4,0000 \times 10^{-12}$

* Somente para temperaturas acima de 0°C; onde temos que C = 0,0.

Este procedimento tem sido usado por Institutos Nacionais de Metrologia para interpolar entre os pontos fixos que definem a escala internacional de temperatura. Uma forma alternativa dessa equação é:

$$R = R_0 \left\{ 1 + \alpha \left[t - \delta X - \beta \left(\frac{t}{100} \right)^2 \right] X \right\}$$

Equação 3

$$X = \left(\frac{t}{100} \right) \left(\frac{t}{100} - 1 \right)$$

Equação 4

Onde, $\beta = 0$ para $t > 0^\circ\text{C}$.

Os valores nominais dos coeficientes encontram-se na Tabela 2

Tabela 2. Coeficientes da Equação Callendar-Van Dussen – Valores Nominais

PARÂMETRO	DIN 43760/IEC 751
R_0	100Ω
A	0,00390802
B	$-5,80195 \times 10^{-7}$
C	$-4,27350 \times 10^{-12}$
α	0,00385000
β	1,50700
δ	0,111

Para temperaturas acima de 0°C, o coeficiente C=0. Portanto para temperaturas acima de 0°C. Portanto, para temperatura acima de 0°C essa equação reduz-se a uma equação quadrática:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2] \quad \text{Equação 6}$$

Mudando-se a variável:

$$Z = R/R_0 - 1. \quad \text{Equação 7}$$

Assim temos que:

$$Z = At + Bt^2 \quad \text{Equação 8}$$

Conhecendo-se a corrente de excitação, I_{EX} , que atravessa o RTD e medindo-se a tensão de saída desenvolvida sobre o RTD, V_0 , a equação pode ser resolvida para t:

$$t = \frac{2(V_0 - I_{EX} R_0)}{I_{EX} R_0 \left[\sqrt{A^2 + 4B(V_0 - I_{EX} R_0)/I_{EX} R_0} \right]} \quad \text{Equação 9}$$

onde, V_0 é a medida da tensão elétrica no RTD e I_{EX} é a corrente de excitação do mesmo.

Muitas curvas de RTD de platina acompanham uma das três curvas padronizadas: o padrão DIN43760 ($\alpha = 0.00385$), o padrão Industrial dos Estados Unidos ou padrão Americano ($\alpha = 0.003911$), ou ainda a escala de Temperatura Internacional (ITS-90) ($\alpha = 0.003925$). Os coeficientes Callendar-Van Dusen para cada uma dessas curvas de RTD de platina foram listados na Tabela 1.

Circuitos Para Medição de RTD

Por causa do RTD ser um dispositivo resistivo, precisa-se fazer circular uma corrente através dele e monitorar a voltagem resultante. No entanto, qualquer resistência nos fios que conectam o sistema de medição para o RTD adicionará erro para as leituras.

For example, consider a two-wire RTD element connected to a measurement system that also supplies a constant current source, I_{EX} , to drive the RTD.

Por exemplo, considere o RTD na configuração a dois-fios conectado a um sistema de medição que fornece uma fonte de corrente para alimentar o RTD.

A Figura 2 mostra o RTD conectado, a dois-fios, ao sistema de medição. O sistema de medição também fornece uma fonte de corrente constante, I_{EX} , para alimentar o RTD. A queda de tensão através da resistência dos fios, R_L , adiciona uma voltagem ao valor medido.

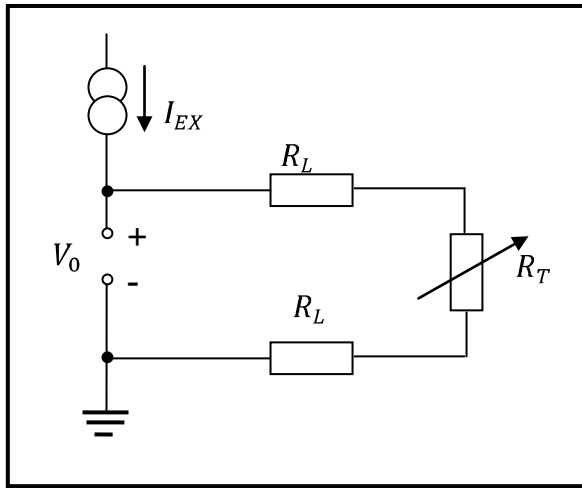


Figura 2. Medição do RTD a dois-fios.

Por exemplo, uma resistência de $0,3\Omega$ em cada fio, R_L , adiciona $0,6\Omega$ de erro para a medição da resistência. Para um RTD de platina com $\alpha = 0,00385$, a resistência adicional causará um erro de: $0,6\Omega / (0,385\Omega/^{\circ}\text{C}) = 1,6^{\circ}\text{C}$.

O método a quatro-fios é o preferido para medição de RTD. Um par de fios transporta a corrente através do RTD; o outro par é utilizado para medir a voltagem através do RTD. Por causa disso somente uma insignificante corrente flui através dos fios utilizados para medição da voltagem, e o erro das resistências R_{L2} e R_{L3} é desprezível. Essa configuração é ilustrada na Figura 3.

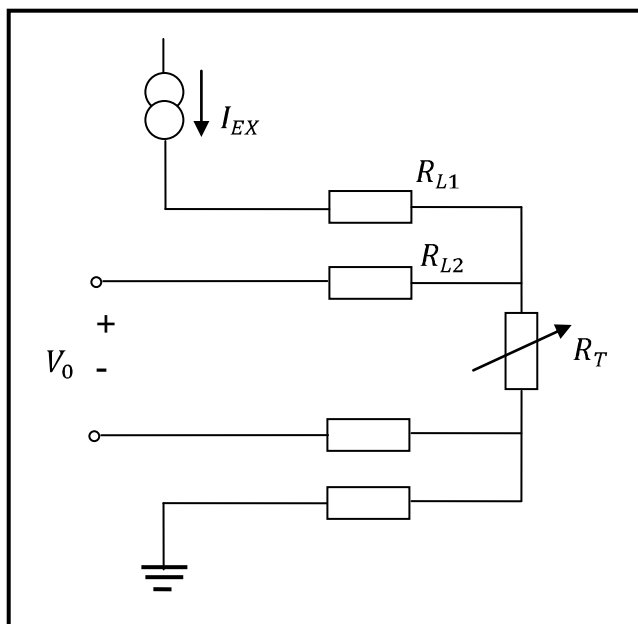


Figura 3. Medição do RTD à Quatro-Fios.

Para reduzir custos, utiliza-se a configuração RTD à três-fios. A configuração RTD a três-fios é, então, aplicada em uma ponte de Wheatstone com uma fonte de corrente. Tal arranjo causa a compensação das resistências dos fios utilizados para a medição do RTD, conforme é mostrado na Figura 4a. Note que, nessa configuração ponte de wheatstone, os efeitos de R_{L1} e R_{L3} cancelam um ao outro porque eles estão localizados em braços opostos da ponte. A resistência do fio, R_{L2} , não adiciona erro

significativo por conta da pequena corrente que flui através dele. Alternativamente pode-se utilizar uma fonte de corrente de excitação e conectar o RTD a três-fios como mostrado na Figura 4b. Nessa configuração, a resistência de somente um fio, R_{L1} , adiciona um erro à medição.

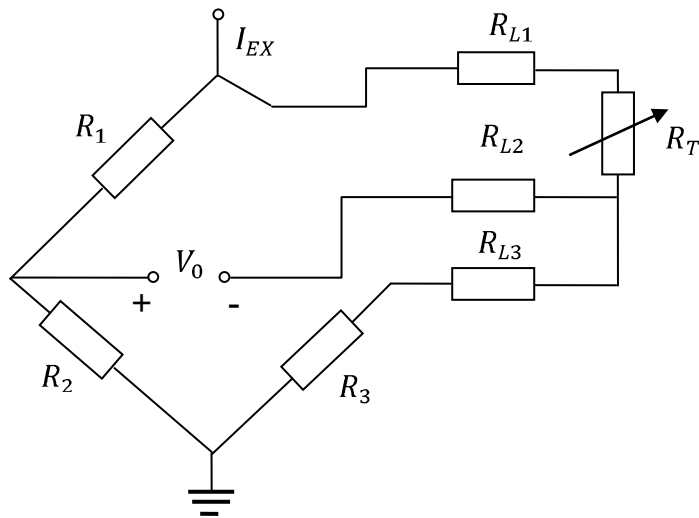


Figura 4a- Medição RTD à Três-Fios com Ponte de Wheatstone

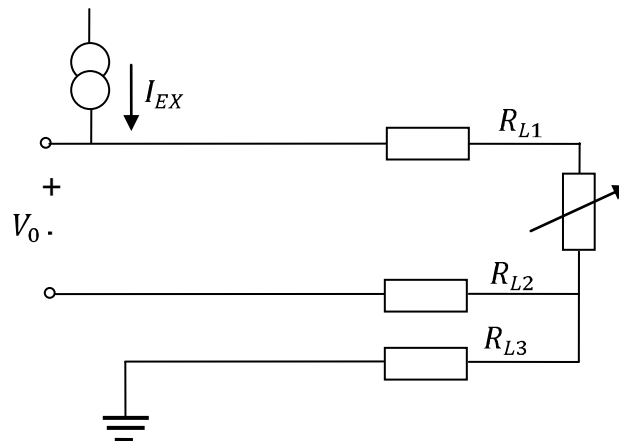
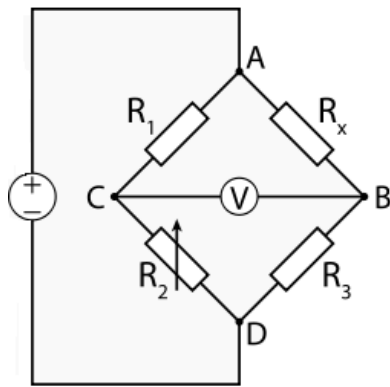


Figura 4b- RTD a três-fios com fonte de corrente para excitação.

Cálculo do Resistor Desconhecido da Ponte de Wheatstone

Para calcular o Valor da resistência elétrica (dado em OHMs) do resistor desconhecido (R_x) basta fazer a relação de proporcionalidade. Como os três resistores encontram-se associados em paralelo, pode-se fazer a relação: $R_1 \times R_3 = R_x \times R_2$.



Considerações Sobre a Ponte de Wheatstone

R_x é a resistência desconhecida a ser medida.

R_1 , R_2 e R_3 são resistores cujos valores são conhecidos.

Se a razão no ramo R_2/R_1 é igual a razão entre as resistências no outro ramo R_3/R_x , então a tensão elétrica entre os dois pontos centrais, B e C, será zero e nenhuma corrente fluirá entre estes pontos. Sendo assim, pode-se dizer que o circuito está balanceado.

Auto-Aquecimento

O auto-aquecimento é causado pela corrente que passa pela resistência oriundo do instrumento de leitura. Por efeito joule há uma geração de calor quando uma corrente elétrica atravessa uma resistência ($P = R \cdot I^2$).

Para uma medição de temperatura com RTD, esse aquecimento pode levar a erros que comprometem essa medição; então este aquecimento tem que ser limitado a pequenos valores para que possa ser desprezado. Para isso deve-se limitar a corrente de excitação, I_{EX} , do sensor.

Pela norma DIN-IEC 751/85, a potência máxima desenvolvida numa RTD não pode ser maior do que 1,0mW, o que na faixa de atuação do sensor dá uma corrente máxima de 3mA. Valores típicos recomendados são da ordem de 1,0 a 2,0 mA.

A elevação de temperatura equivalente ao aumento da dissipação de calor na termorresistência não deve exceder a 0,3°C.

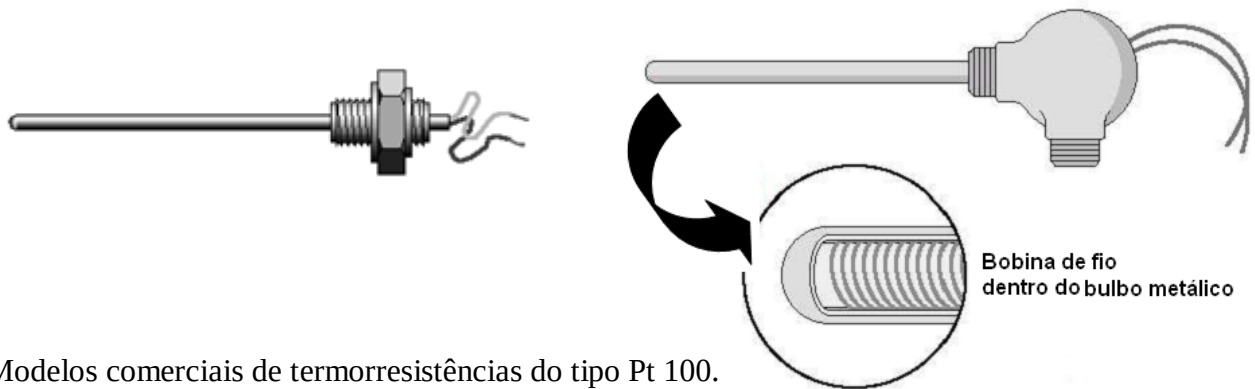
O metal mais utilizado na construção de termorresistências é a Platina, sendo encapsulados em bulbos cerâmicos ou de vidro. Os modelos mais utilizados atualmente são: Pt- 25,5 Ω , Pt-100 Ω , Pt-120 Ω , Pt-130 Ω e Pt-500 Ω , sendo que na indústria o mais conhecido e utilizado é o Pt-100 Ω (resistência elétrica de 0 Ω a temperatura de 0 °C). Uma liga composta de cobre e níquel também é utilizada na construção destes detectores de temperatura.

Os limites de erro da PT-100 são referentes às normas DIN-IEC-751/85 (DIN- organização alemã de normatização, *Deutsches Institut Normung* ; IEC- organização internacional de normatização para tecnologias elétricas, eletrônicas e relacionadas, *International Electrotechnical Commission*), que padroniza de -200 °C a 850 °C. Um valor típico para $R_{100^\circ C} = 138,50 \text{ ohm}$.

RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

- ✓ Faixa de temperatura: -200° C a 850° C
- ✓ Sensibilidade: $3,850 \cdot 10^{-3} \text{ ohm/ ohm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (para os tipos de platina)
- ✓ Precisão: +/- 0,01° C
- ✓ Linearidade: necessita de um circuito corretor polinomial, ou uma tabela para esta finalidade
- ✓ Robustez: estes sensores são sensíveis a vibrações.
- ✓ Tempo de resposta: este tempo depende da capacidade térmica do componente (determinada por seu invólucro) e está tipicamente na faixa de 1 a 10 segundos
- ✓ Excitação: precisam de uma fonte externa de corrente
- ✓ Sinal de saída: resistência (mas é usualmente alimentado por uma fonte externa de tensão e

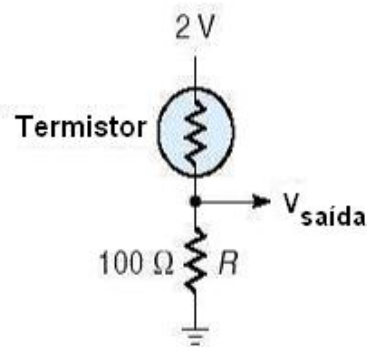
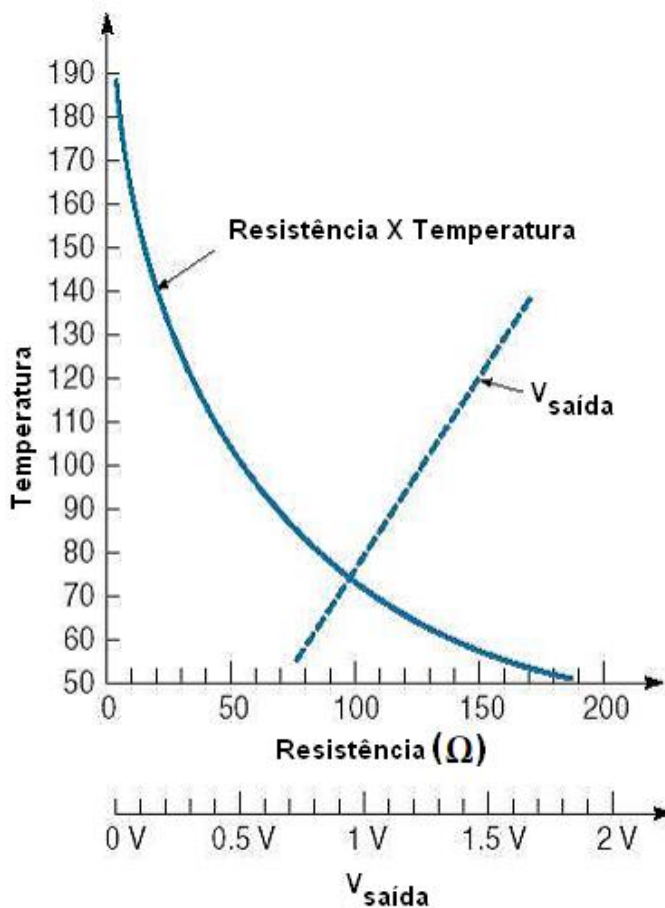
neste caso, o sinal de saída será em tensão)

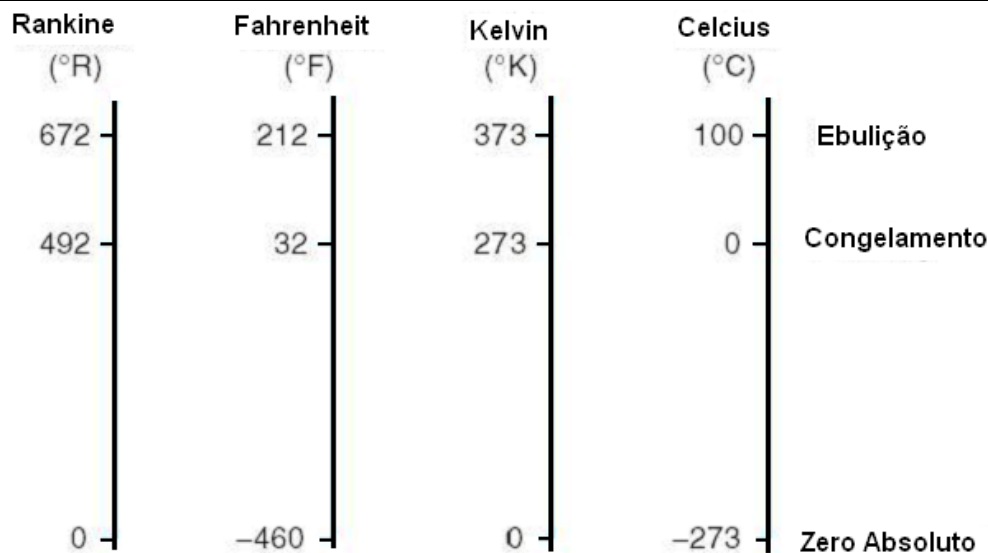


Modelos comerciais de termorresistências do tipo Pt 100.

Termistores

Dispositivos de dois terminais que variam a resistência com a temperatura. São resistores sensíveis à temperatura. Isto significa que o valor de sua resistência varia, de forma acentuada, com a temperatura. São dispositivos não lineares, constituídos de materiais semicondutores baseados em óxidos.





Possuem larga faixa de valores de resistência indo desde poucos Ohms até 1MΩ.

Os termistores com coeficiente de temperatura negativo (**NTC**) são aqueles que apresentam uma diminuição de sua resistência elétrica se submetidos a um aumento de temperatura. Já os termistores com coeficiente de Temperatura Positivo (**PTC**) apresentam um aumento em sua resistência elétrica quando acontece uma elevação da temperatura.

RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

- ✓ Faixa de temperatura: -100 a +450° C
- ✓ Sensibilidade: vários Ω por °C
- ✓ Precisão: +/- 0,1° C
- ✓ Linearidade: também precisam de uma correção polinomial, ou de uma tabela de correção
- ✓ Robustez: existem vários tipos de invólucros para os termistores, os quais influem muito na sua resistência a choques, vibrações e outros elementos. Os tipos com invólucros de vidro são os mais robustos, entretanto apresentam uma maior dificuldade no manuseio.
- ✓ Tempo de resposta: depende da capacidade térmica determinada pelo invólucro. Na faixa de 1 a 5 segundos.
- ✓ Excitação: necessita de uma fonte externa de tensão
- ✓ Sinal de saída: resistência (mas depois de alimentado por uma fonte externa de tensão o seu sinal de saída será em tensão).

Considerações gerais

Termopar: são usados no sensoriamento de temperaturas muito altas. Utilizados em controle de temperatura de fornos, motores de combustão, etc.

RTD: utilizados na compensação de junções frias e em processos de calibração e controle.

Termistor: usados na compensação de junções frias, calibração de pirômetros e anemômetros, dentre outros.