



INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL APLICADA À INDÚSTRIA DE PETRÓLEO



Professor Valner Brusamarello -
UFRGS

Encontro III



Ministério de
Minas e Energia



Efeitos Mecânicos

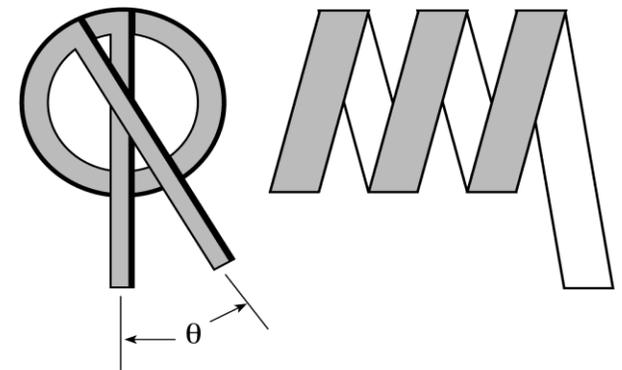
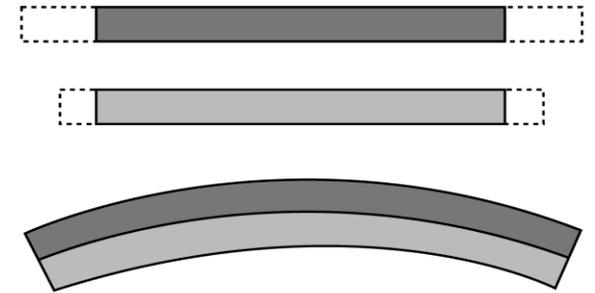
Termômetros de expansão de líquidos em bulbos de vidro

- Termômetro de mercúrio ou álcool
- Baseia-se no coeficiente de dilatação térmica.
- Com o aumento da temperatura, o líquido que está dentro de um bulbo, começa a expandir e é obrigado a passar por um capilar feito geralmente num vidro devidamente graduado
- A expansão observada na escala é a diferença entre a dilatação do líquido e do bulbo de vidro
- Podem ser de imersão total ou parcial
- a utilização apropriada deste tipo de termômetro pode alcançar medidas de $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$



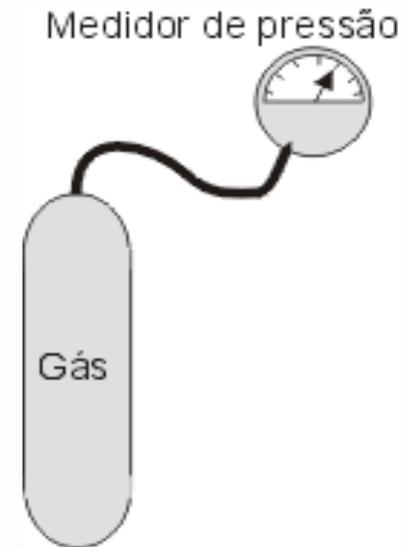
Efeitos Mecânicos Termômetros bimetálicos

- constituem-se de duas tiras fixadas de metais, com coeficientes de dilatação térmica diferentes.
- Quando uma temperatura é aplicada, as duas tiras de metal começam a expandir, entretanto uma delas vai expandir mais que a outra resultando formação de um raio que geralmente é utilizado para "chavear um circuito" ou para indicar uma temperatura sobre uma determinada escala calibrada.

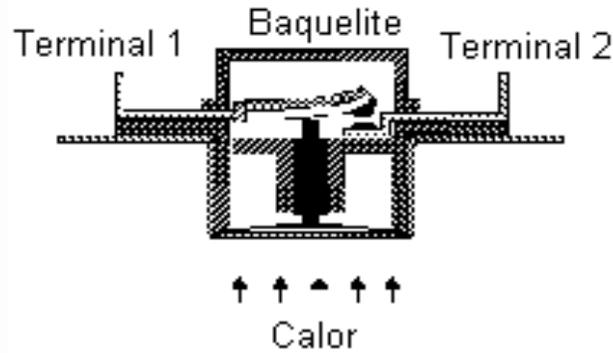
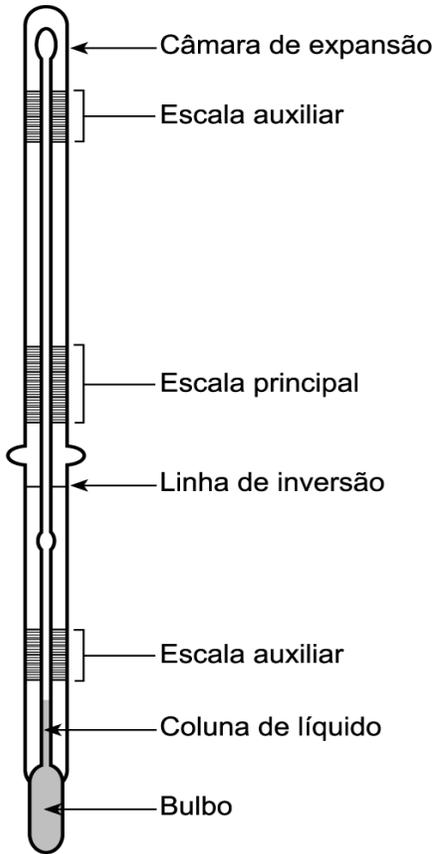


Efeitos Mecânicos Termômetros Manométricos

- utilizam a variação de pressão obtida pela expansão de algum gás ou vapor como meio físico para relacionar com temperatura.
- Mede-se a variação de pressão.



Exemplos de termômetros de efeitos mecânicos



Transdutores Termoresistivos

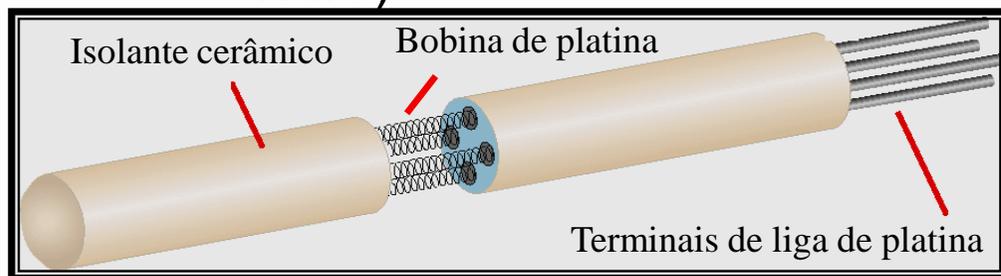
- RTD – *Resistance Temperature Detector*
 - Características principais
 - Condutor metálico, sendo a platina o material mais utilizado
 - Praticamente lineares com Sensibilidade Baixa e Positiva
 - Dependendo do metal são muito estáveis
 - Faixa de Operação (-200 a +850 °C)
 - Baixíssima tolerância de fabricação (0,06% a 0,15%)
 - considerados sensores de alta precisão e ótima repetitividade de leitura
 - O Coeficiente de Temperatura depende da pureza do metal. Para a platina 99,999% → (padrão IEC)

$$\alpha_{100} = TCR = 0,00395 \frac{\Omega}{\Omega / ^\circ C}$$

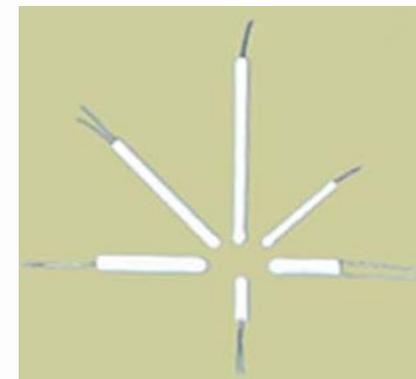


Transdutores Termoresistivos

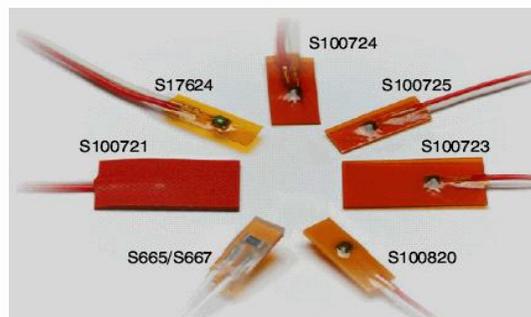
- RTD – *Resistance Temperature Detector*
 - Bobina bifilar metálica (em geral platina) enrolada sobre um substrato (cerâmica) e encapsulado (cerâmica, polímero ou vidro)



$\phi = 2$ a 3 mm, comp. $\cong 10$ mm



- * Filme Metálico depositado sobre substrato cerâmico encapsulado (polímero ou vidro)



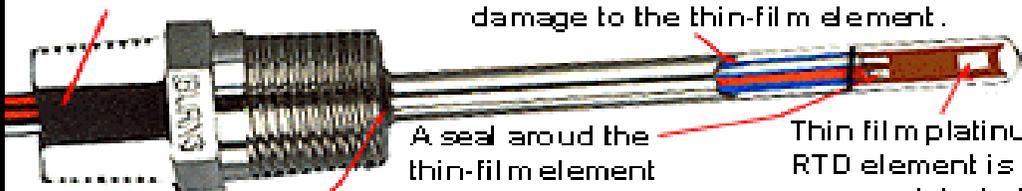
Tamanho Menor
⇒
Inércia Térmica Menor
0,4 a 1,8 s

Transdutores Termoresistivos

- RTD – Acondicionamento

A second seal is used to prevent moisture and other contaminants from entering the sheath.

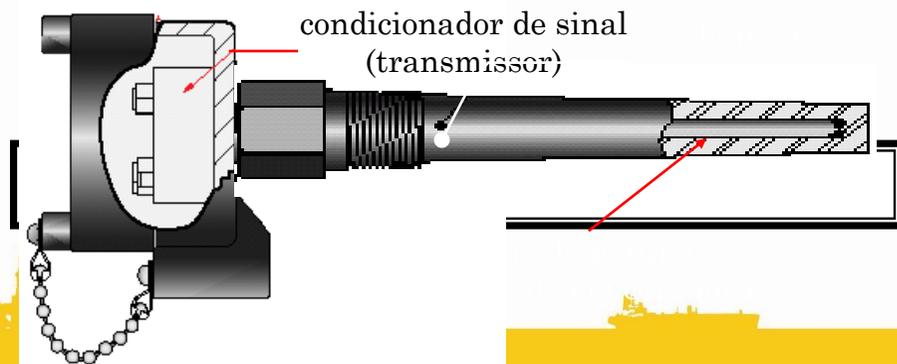
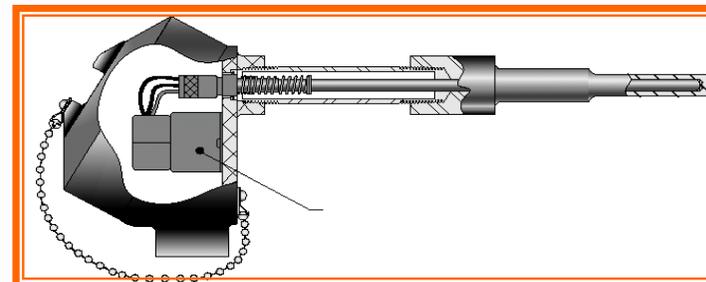
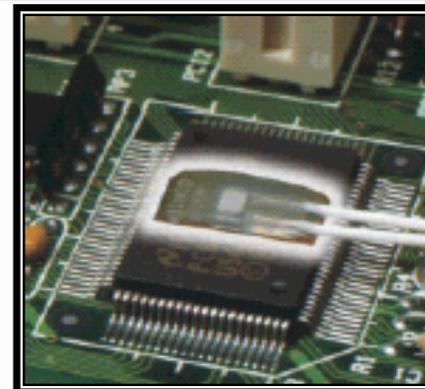
Lead wires are supported with a high purity ceramic powder to eliminate any movement that could cause damage to the thin-film element.



A seal around the thin-film element and the lead wire junctions completely seals out moisture and adds mechanical protection to the lead wire element connections.

Thin film platinum RTD element is encapsulated with a special potting material for protection from shock, vibration, moisture and lead wire breakage.

Type 316L stainless steel sheath and threaded fitting are TIG welded to resist corrosion.



Transdutores Termoresistivos

- RTD – Acondicionamento



RTDs - nomenclatura

- As termoresistências de Platina mais usuais são: PT-25,5 Ω , PT-100 Ω , PT-120 Ω , PT-130 Ω , PT-500 Ω , sendo que o mais conhecido e usado industrialmente é o PT-100 Ω . Estas siglas significam o metal (PT - Platina) e a resistência a temperatura de 0 $^{\circ}$ C.
- Um sensor de filme de platina para aplicação industrial pode atuar na faixa de -50 a 260 $^{\circ}$ C.
- Sensores de enrolamentos de fio de platina atuam entre -200 e 648 $^{\circ}$ C
- Os sensores de platina também são bastante conhecidos por serem estáveis e manter suas características por um longo período de tempo. Apesar de não ser o sensor mais sensível, esta é a razão pela qual a platina é mais utilizada que o níquel.



Transdutores Termoresistivos

RTD – Função de Transferência

R_T – resistência do sensor

R_0 – resistência a 0°C

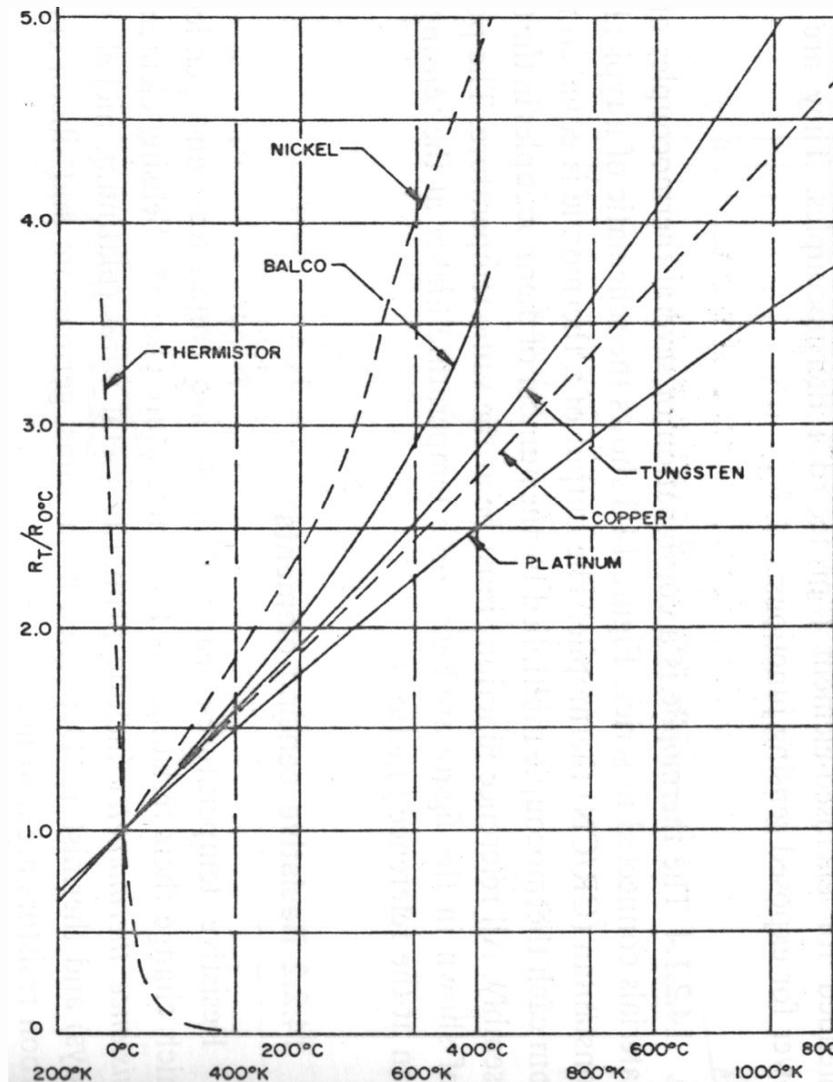
$$R_T = R_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

α - coeficiente térmico do resistor (TCR) – **por definição é dado de 0 a 100 °C:**

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 (T - T_0)}$$

$$TCR = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0}$$

- RTD – Material, α (0 a 100 °C) ou TCR
 - Cobre- 0,0043 Ω/Ω oC
 - Níquel - 0,00681 Ω/Ω oC (DIN47760)
 - Platina - 0,00392 Ω/Ω oC (MIL T 24388) **padrão Americano**
0,00385 Ω/Ω oC (IEC751) **(PTR) padrão europeu - universal**
 - Tungstênio - 0,0046 Ω/Ω oC



Sensibilidade

- Deriva-se a resistência em função da temperatura

$$S_{RTD} = \frac{\Omega}{^{\circ}\text{C}} \quad S_{RTD} = \frac{dR}{dT} = \frac{d\left[R_0(1 + \alpha(T - T_0))\right]}{dT} = \alpha R_0$$

Exemplo: um dado RTD apresenta uma resistência de 100Ω e $\alpha = 0,00389 \left(\frac{\Omega}{\Omega}\right)/K$ a 0°C . Calcular sua sensibilidade e seu coeficiente de temperatura a 70°C .

A sensibilidade pode ser dada por: $S = \alpha_0 \cdot R_0 = \alpha_{70} \cdot R_{70}$ e para este sensor:

$$S = 0,00389 \times 100 = 0,389 \frac{\Omega}{K}$$

Em 70°C :

$$\alpha_{70} = \frac{\alpha_0 \cdot R_0}{R_{70}} = \frac{\alpha_0 \cdot R_0}{R_0 \cdot [1 + \alpha_0 \cdot (70^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C})]} = \frac{\alpha_0}{1 + \alpha_0 \times 70} = \frac{0,00389}{1 + 0,00389 \times 70} = 0,00305 \frac{\Omega}{\Omega/K}$$

Transdutores Termoresistivos

- Existem diferentes especificações para o coeficiente de temperatura para RTDs de Platina:
- A ITS90 (*International Temperature Scale*) especifica um coeficiente de temperatura de 0.003925 para RTDs padrão de platina (padrão americano).
- As normas IEC751 e ASTM 1137 padronizaram o coeficiente de 0.0038500 $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ para platina (padrão europeu e adotado de forma geral como universal).
- Quando o elemento é comercializado, o seu coeficiente é impresso junto à embalagem.
- Como visto existem diferentes construções de RTDs de platina para uso industrial: fio de platina enrolado em sentido radial, fio é enrolado e suspenso, de modo que o mesmo se encaixe em pequenos furos interiores ao corpo do sensor, filmes depositados sobre um substrato cerâmico.
- Normalmente, o bulbo de resistência é montado em uma bainha de aço inox, totalmente preenchida com óxido de magnésio, de tal maneira que exista uma ótima condução térmica e proteção do bulbo com relação a choques mecânicos



RTDs - Calibração

- O **método de ponto fixo** é utilizado para calibrações de alta precisão ($0,0001^{\circ}\text{C}$) e consiste na utilização de temperaturas de fusão ou solidificação de substâncias como água, zinco e argônio para gerar os pontos fixos e repetitivos de temperatura. Este processo é geralmente lento e caro. Um método de calibração por ponto fixo comumente utilizado em ambiente industrial é o banho de gelo uma vez que o equipamento necessário é barato e pode acomodar vários sensores de uma só vez e precisões de até 0.005°C podem ser obtidas.
- O **método de comparação** utiliza um banho isotérmico estabilizado e aquecido eletricamente, onde são colocados os sensores a calibrar e um sensor padrão que servirá de referência.



RTDs - Calibração

- A fim de executar uma calibração em condições onde erros muito pequenos são exigidos. Métodos complexos e equipamentos caros como descritos anteriormente são justificados.
- Para situações onde uma incerteza maior ou igual a $0,1^{\circ}\text{C}$ é suficiente utilizar técnicas mais simples de interpolação. Trata-se de polinômios de diferentes ordens, facilmente implementadas por controladores programáveis.



Transdutores Termoresistivos

- RTD - Platina (PTR) – Função de Transferência
 - Equação de **Callendar - VanDusen** (-183 °C a 630°C)

$$R_T = R_0 \left\{ 1 + \alpha \left[T - \delta(0,01T - 1)(0,01T) - \beta(0,01T - 1)(0,01T)^3 \right] \right\}$$

R_T = resistência do sensor $\delta=1,49$

R_0 = resistência a 0°C $\beta= 0,11$ se $t < 0$

$\alpha = 0,003925 \Omega/\Omega \text{ } ^\circ\text{C}$ $\beta= 0$ se $t > 0$

$\text{TCR} = 0,003925 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

※ Padrão IEC 751 (-200 °C a 850°C) - UNIVERSAL

$$R_T = R_0 \left[1 + AT + BT^2 + C(T - 100^\circ\text{C})T^3 \right] \quad (-200 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ a } 0^\circ\text{C})$$

$$R_T = R_0 (1 + AT + BT^2) \quad (0 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ a } 850^\circ\text{C})$$

R_T = resistência do sensor $B=5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$

R_0 = resistência a 0°C $C=4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$

$A= 0,003083 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$\text{TCR}=0,00385055 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Transdutores Termoresistivos

Coefficient for TCR = 3850 PPM/°C (IEC751 Standard)

Temperature	a	b	c
$T < 0^{\circ}\text{C}$	3.90830×10^{-3}	5.7750×10^{-7}	4.1830×10^{-12}
$T \geq 0^{\circ}\text{C}$	3.90830×10^{-3}	5.7750×10^{-7}	0

$$R_T = R_0 [1 + aT - bT^2 - cT^3 (T - 100)]$$

where

R_T resistance at a certain temperature T

R_0 resistance at 0°C

a, b, c coefficient (refer to the following tables)

Coefficient for TCR = 3750 PPM/°C

Temperature	a	b	c
$T < 0^{\circ}\text{C}$	3.81019×10^{-3}	6.01875×10^{-7}	6.14500×10^{-12}
$T \geq 0^{\circ}\text{C}$	3.81019×10^{-3}	6.01875×10^{-7}	0

Resistance at 0°C (Ω)	100	500	1000	
TCR (PPM/°C)	3850	3850	3850	3750
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Resistance (Ω)			
-50	80.31	401.53	803.06	807.87
0	100.00	500.00	1000.00	1000.00
50	119.40	596.99	1193.97	1189.00
100	138.51	692.53	1385.06	1375.00
150	157.33	786.63	1573.25	1557.99
200	175.86	879.28	1758.56	1737.96
250	194.10	970.49	1940.98	1914.93
300	212.05	1060.26	2120.52	2088.89
350	229.72	1148.58	2297.16	2259.84
400	247.09	1235.46	2470.92	2427.78
450	264.18	1320.90	2641.79	2592.71
500	280.98	1404.89	2809.78	2754.63
550	297.49	1487.44	2974.87	2913.54
600	313.71	1568.54	3137.08	3069.44
650	329.64	1648.20	3296.40	3222.33

Complete table of increment 1°C or 1°F is available on request

Transdutores Termoresistivos

Temperature Coefficient of Resistance (TCR)

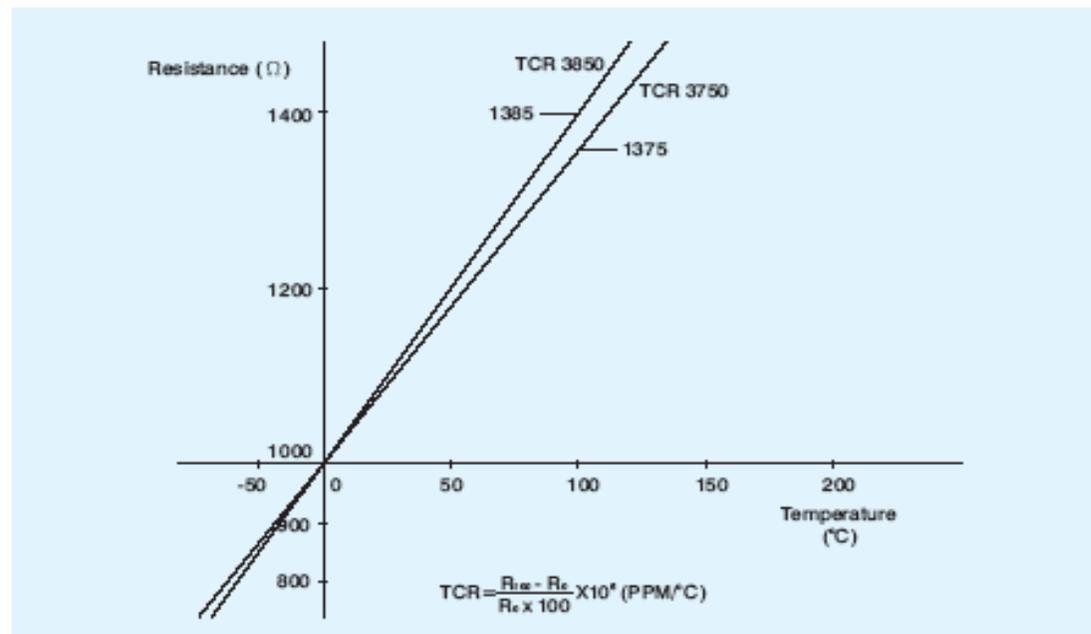
TCR indicates average resistance change rate per degree between 0°C and 100°C. TCR is defined as the following formula. We offer Pt-RTD with TCR both of 3850 PPM/°C and 3750 PPM/°C, where 3850 PPM/°C conforms to both IEC751 and DIN43760 standards.

$$TCR = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \times 100} \times 10^6 \text{ (PPM/}^\circ\text{C)}$$

where

R_0 resistance at 0°C
 R_{100} resistance at 100°C

Temperature - Resistance Diagram



Resistance Tolerance and Temperature Deviation

Pt-RTD can be categorized as class A or B, according to its resistance tolerance and temperature deviation. Resistance tolerance and temperature deviation in accordance with DIN43760 and IEC751 are listed in the following table.

Class	Resistance Tolerance(%) at 0°C	Temperature Deviation(°C)
A	±0.06	±(0.15 + 0.002 T)
B	±0.12	±(0.30 + 0.005 T)

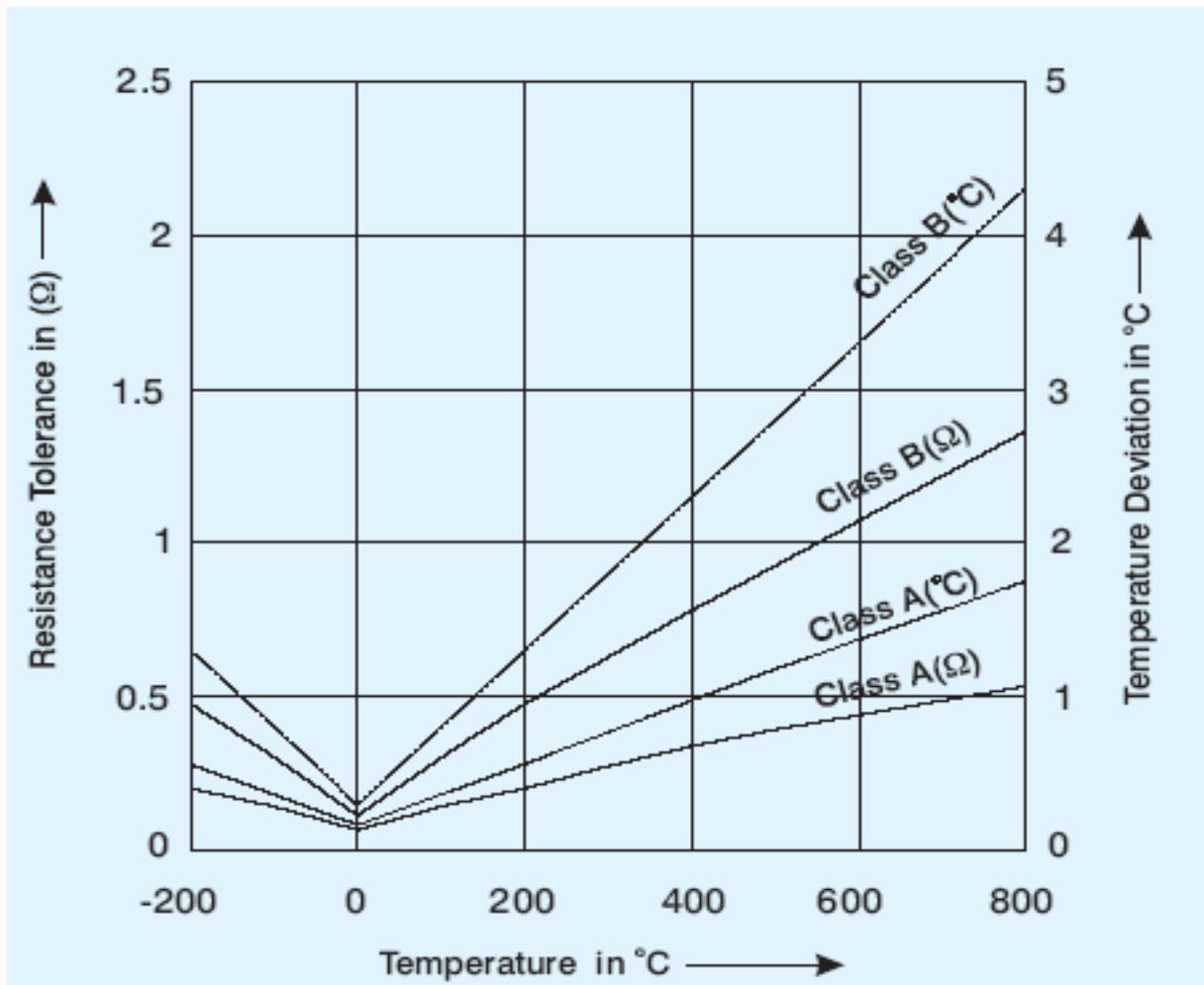
Resistance Tolerance and Temperature Deviation Table of Pt-100

Temperature (°C)	Nominal Resistance (Ω)	class A		class B	
		Resistance Tolerance(Ω)	Temperature Deviation(°C)	Resistance Tolerance(Ω)	Temperature Deviation(°C)
-50	80.31	±0.10	±0.25	±0.22	±0.55
0	100.00	±0.06	±0.15	±0.12	±0.30
100	138.51	±0.13	±0.35	±0.30	±0.80
200	175.86	±0.20	±0.55	±0.48	±1.30
300	212.05	±0.27	±0.75	±0.64	±1.80
400	247.09	±0.33	±0.95	±0.79	±2.30
500	280.98	±0.38	±1.15	±0.93	±2.80
600	313.71	±0.43	±1.35	±1.06	±3.30



Transdutores Termoresistivos

Resistance Tolerance and Temperature Deviation Table of Pt-100



Self-Heating Effect

Heat energy is generated while applying electric current through Pt-RTD. The self-heating effect might result in errors in temperature measuring. Self-heating effect is characterized as dissipation constant δ :

$$\delta = \frac{S (P_2 - P_1)}{(R_2 - R_1)} \text{ (mW/}^\circ\text{C)}$$

Where

δ Dissipation Constant (mW/°C)

R_1 resistance at lower power dissipation (Ω)

R_2 resistance at higher power dissipation (Ω)

S thermometer sensitivity (dR/dT) at the respective temperature ($\Omega/^\circ\text{C}$)

P_1 lower power dissipation (mW)

P_2 higher power dissipation (mW)

Measurement errors due to self-heating (ΔT) can be calculated by the following formula:

$$\Delta T = \frac{P}{\delta} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

where

ΔT = Self-heating in $^\circ\text{C}$

P = Electrical power dissipation in the resistance in mW

δ = Dissipation constant in mW/°C

Thermal Response Time

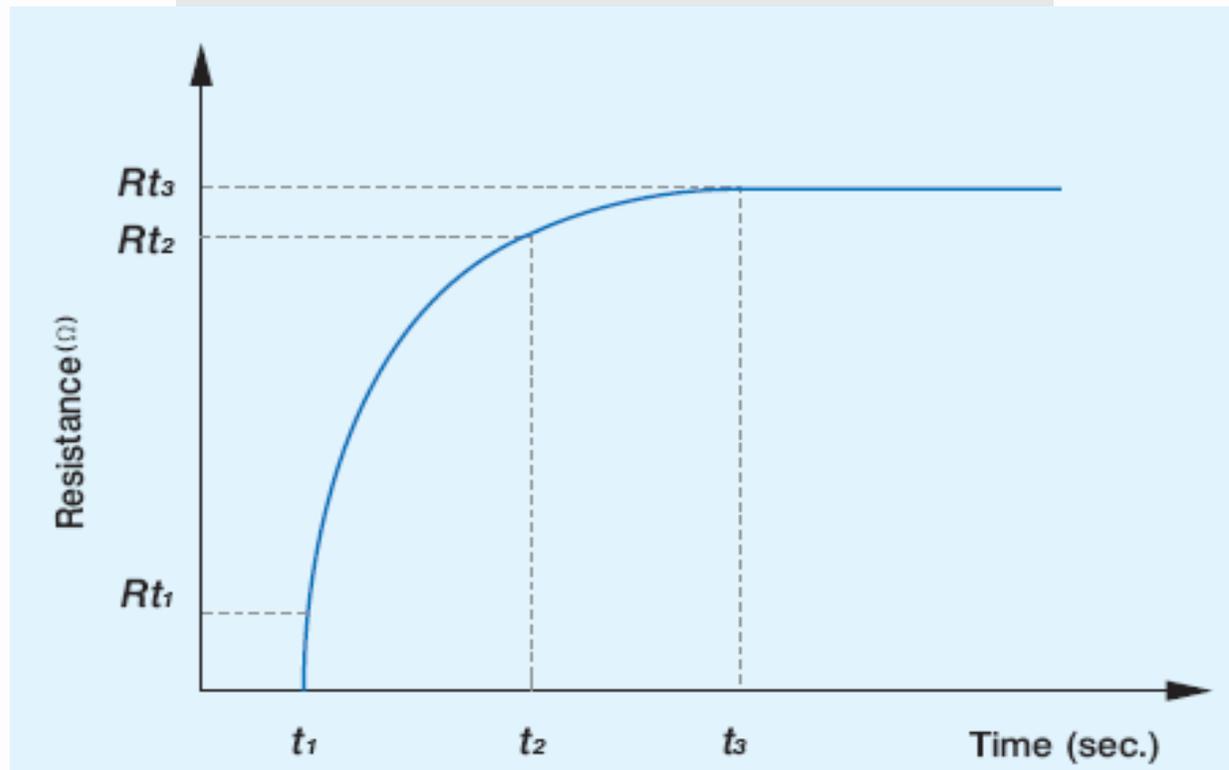
The thermal response time (t_{90}) is the time interval that Pt-RTD needs to respond 90% of temperature change. The response time is the time period, $t_2 - t_1$, where the following formula holds true:

$$t_{90} = t_2 - t_1 = \text{thermal response time (sec.)}$$

$$Rt_2 = Rt_1 + 0.9 (Rt_3 - Rt_1)$$

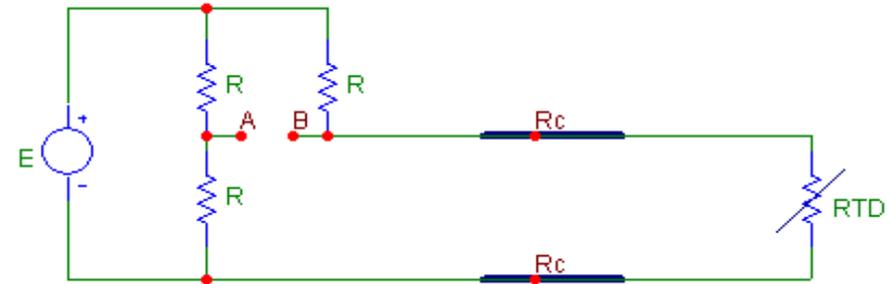
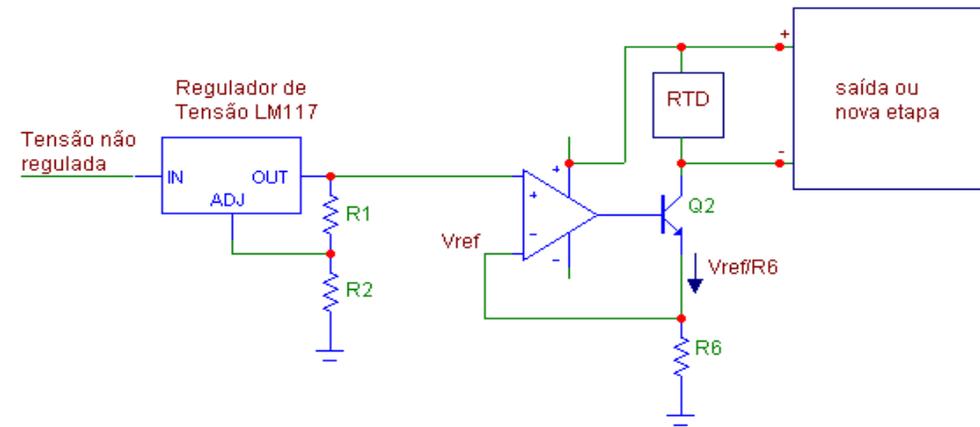
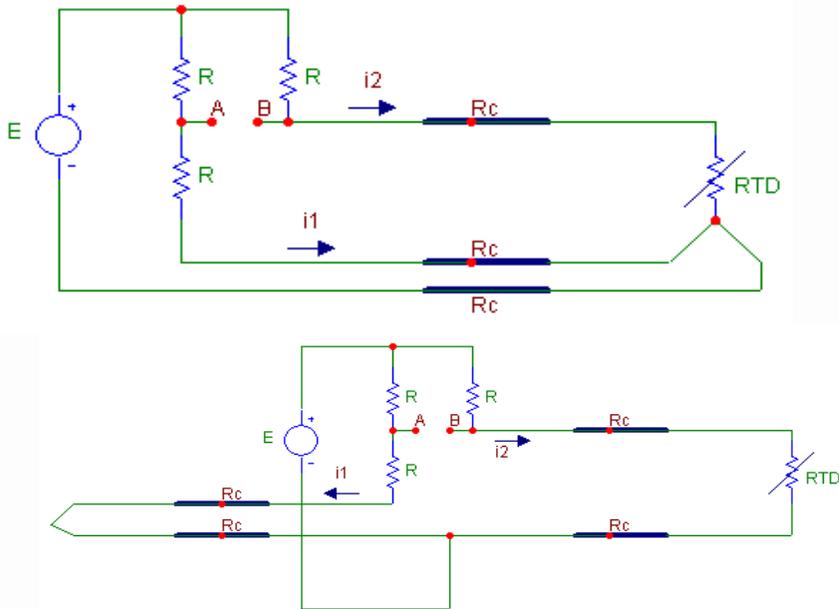
where

Rt_i resistance at time t_i ($i = 1, 2, 3$)



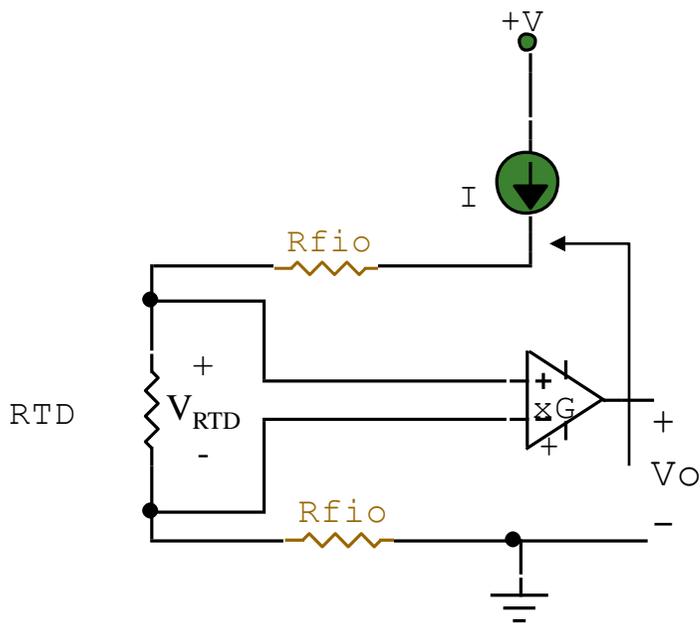
Princípio de configurações

- Fonte de corrente
- Circuitos em ponte: 2 fios, 3 fios, 4 fios.
- As baixas resistências dos RTDs, podem ser um problema, pois a variação de resistência devido aos cabos metálicos podem influenciar nos resultados



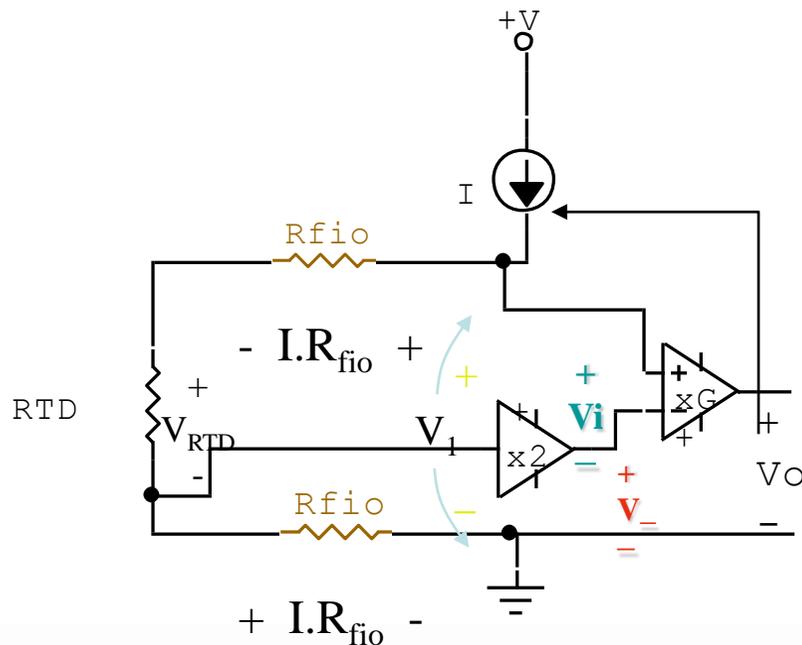
Transdutores Termoresistivos

- RTD - Condicionamento
 - Ohmímetro
 - Deve desconsiderar a resistência dos cabos



$$V_0 = G \cdot I \cdot R_{TD}$$

Ligação a Quatro Fios



$$V_0 = G \cdot V_{RTD} = G \cdot I \cdot R_{TD}$$

Ligação a Três Fios

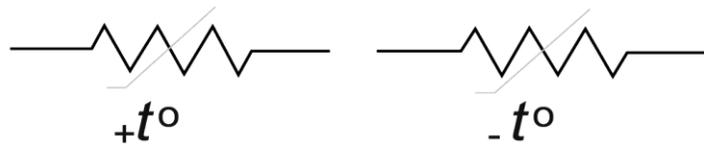
Termistores

- Os termistores são semicondutores cerâmicos que também tem sua resistência alterada como efeito direto da temperatura, mas que geralmente possui um coeficiente de variação maior que os RTDs.
- A palavra termistor vem de *thermally sensitive resistor*.
- Estes dispositivos são formados pela mistura de óxidos metálicos prensados e sinterizados em diversas formas ou em filmes finos, podendo ser encapsulados em vidro (hermético para maior estabilidade) ou epoxi.
- São designados como NTC (*negative temperature coefficient*) quando apresentam um coeficiente de temperatura negativo e como PTC (*positive temperature coefficient*) quando apresentam um coeficiente de temperatura positivo.

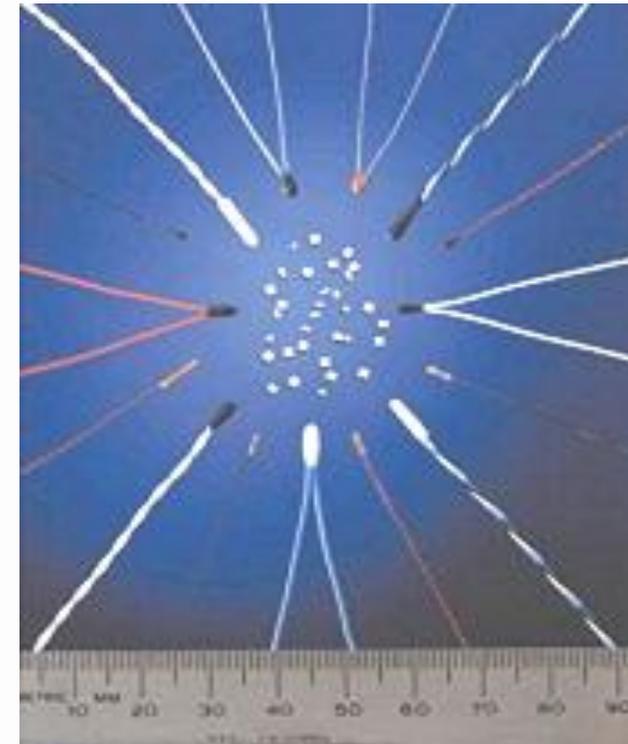


Termistores

- Estes dispositivos não são lineares e apresentam uma sensibilidade elevada (típica 3% a 5% por °C) com faixa de operação típica de -100°C a +300°C. (danos ao dispositivo por sobre/sub temperatura)
- Os termistores são disponibilizados em tamanhos e formas variadas. A sua faixa de tolerância de fabricação também varia (tipicamente de 5 a 20%).
- Tamanhos e formas bastante variados (0,005" a 0,05" de diâmetro)



Termistores

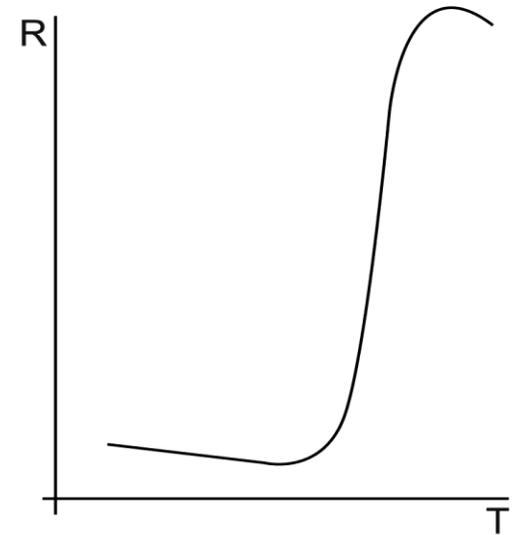


Termistores



Termistores

- PTCs – Coeficiente de temperatura positivo
 - Os PTCs aumentam a sua resistência com o aumento da temperatura. Podem ser construídos de silício, e conseqüentemente suas características dependem deste semicondutor dopado.
 - Outros termistores com coeficiente positivo são construídos com Titanatos de Bário, Chumbo e Estrôncio. Em temperaturas muito baixas (abaixo de 0°C) o valor de resistência é baixo e a curva da resistência x temperatura exibe uma pequena faixa de coeficiente negativo de temperatura. Com o aumento da temperatura este coeficiente torna-se positivo e a resistência começa a aumentar e só pára de aumentar quando chega em seu limite, onde novamente ocorre uma inversão do coeficiente de temperatura, tornando-se negativo.



Termistores

- Alguns termistores PTC baseados na dopagem por silício mostram um declive baixo com a temperatura e são chamados de Tempsistores ou Silistores e na faixa de temperatura de -60°C a $+150^{\circ}\text{C}$, podem ser descritos por:

$$R_T = R_{25} \cdot \left(\frac{273,15\text{K} + T}{298,15\text{K}} \right)^{2,3}$$

- Apesar de existirem muitas aplicações com PTCs, os termistores com coeficiente negativo de temperatura (NTCs) são mais populares.
- **NTCs – Coeficiente de temperatura negativo**
 - Os termistores do tipo NTC consistem de óxidos metálicos tais como Cromo, Níquel, Cobre, Ferro, Manganês e Titânio. Estes componentes diminuem a sua resistência elétrica com o aumento da temperatura.
 - Nestes componentes, o logaritmo da resistência tem uma variação aproximadamente linear com o inverso da temperatura absoluta. Para pequenas faixas de temperatura, e ainda desconsiderando efeitos como o auto-aquecimento pode-se escrever a seguinte relação:

$$\ln(R_T) \cong A + \frac{\beta}{T}$$



Termistores

- β é a constante do termistor dependente do material
- T é a temperatura absoluta em $^{\circ}\text{K}$
- A é uma constante
- ou considerando que a uma temperatura de referência (em $^{\circ}\text{K}$) tem-se uma resistência conhecida R_0 , pode-se fazer:

$$R_T \cong R_0 \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

- Para um termistor típico, o modelo de dois parâmetros fornece bons resultados. O modelo de três parâmetros reduz os erros pois descreve melhor o comportamento do sensor:

$$R_T = e^{\left(A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^3} \right)}$$



Termistores

- Outras funções de transferência:

$$R_T = e^{\left(A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2} + \frac{A_3}{T^3} \right)} \quad (1)$$

$$\frac{1}{T} = e^{\left(a_0 + a_1 \ln(R_T) + a_2 [\ln(R_T)]^2 + a_3 [\ln(R_T)]^3 \right)} \quad (2)$$

R_T = resistência do sensor na temperatura absoluta T (K), sob potência nula

A_0 , A_1 , A_2 e A_3 são constantes da equação (1)

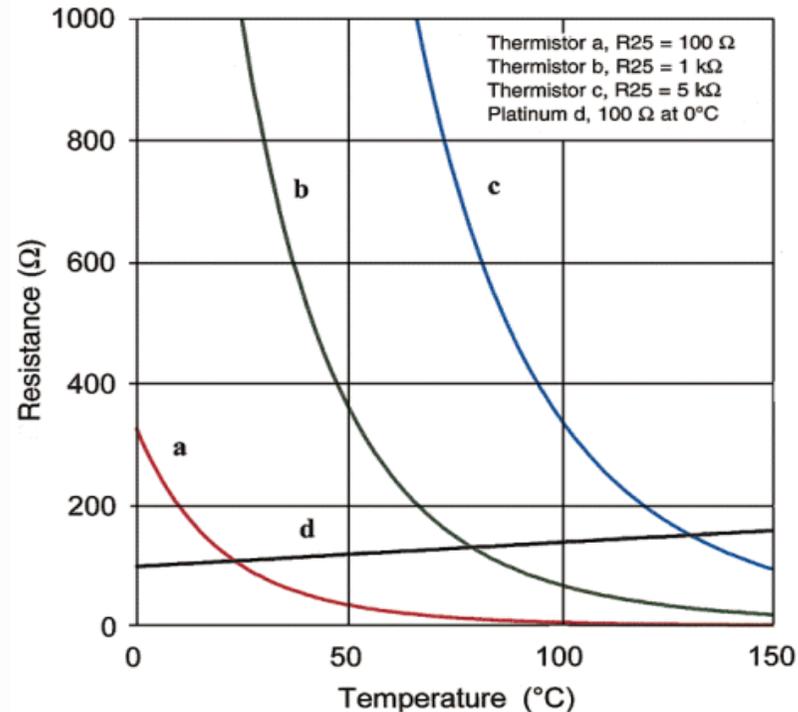
a_0 , a_1 , a_2 e a_3 são constantes da equação (2)



Termistores

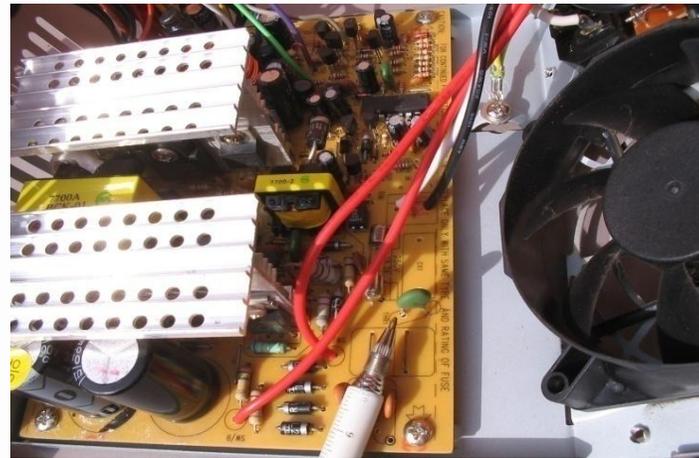
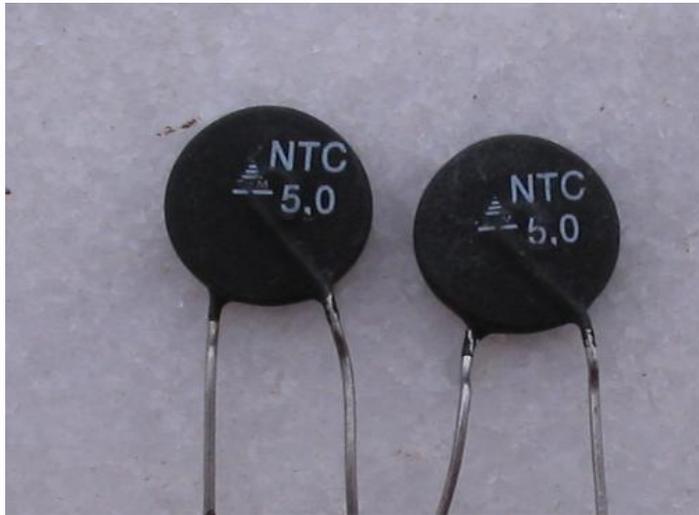
- O termistor é especificado por sua resistência R_{T0} , T_0 e pela tolerância de R_{T0} em T_0 (Ex.: $1500 \Omega \pm 2\% @ 25^\circ\text{C}$). A tolerância torna-se maior para temperaturas diferentes de T_0 .

Comparative Resistance Graph
Thermistor vs. RTD



Termistores

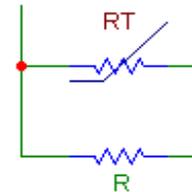
- As limitações dos termistores para a medição da temperatura e outras quantidades físicas são similares aos RTDs.
- Os termistores são menos estáveis do que os RTDs.
- Os termistores apresentam alta sensibilidade.
- Sua alta resistividade permite massa pequena com rápida resposta e cabos de conexão longos.



Termistores - Linearização

- Para analisar um termistor NTC em um circuito, pode-se considerar a resistência equivalente de Thevenin vista entre os terminais nos quais o termistor NTC está conectado. Considerando o circuito da Figura, a resistência equivalente de Thevenin é a combinação paralela de ambos os resistores:

$$R_p = \frac{R \times R_T}{R + R_T}$$



- E a sensibilidade com a temperatura pode ser calculada:

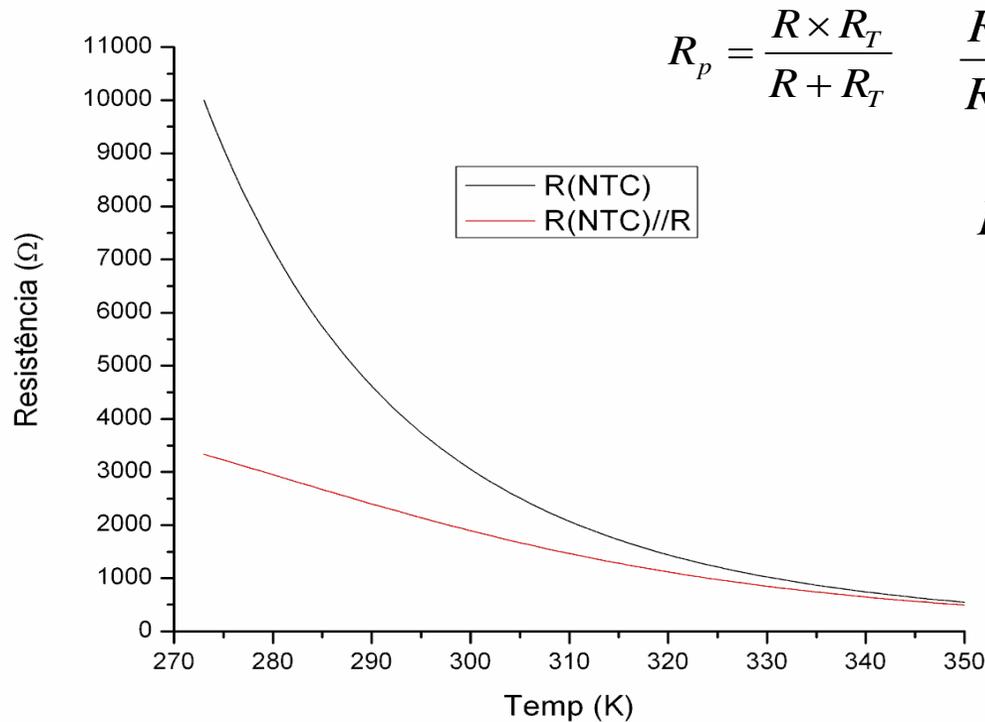
$$\frac{dR_p}{dT} = \frac{R^2}{(R_T + R)^2} \cdot \frac{dR_T}{dT}$$

- A melhora da linearidade é ganha com um custo, ou seja, com a diminuição da sensibilidade. A Figura a seguir apresenta o resultado para o caso específico:

$$R = 5000\Omega \quad R_0 = 10k\Omega \quad \beta = 3600K$$

Termistores

- Um método analítico para calcular o resistor R é forçando três pontos equidistantes na curva resistência-temperatura para coincidir com uma linha tracejada. Se $R_{p1} - R_{p2} = R_{p2} - R_{p3}$ a condição é:



$$R_p = \frac{R \times R_T}{R + R_T}$$

$$\frac{R \times R_{T1}}{R + R_{T1}} - \frac{R \times R_{T2}}{R + R_{T2}} = \frac{R \times R_{T2}}{R + R_{T2}} - \frac{R \times R_{T3}}{R + R_{T3}}$$

$$R = \frac{R_{T2} \cdot (R_{T1} + R_{T3}) - 2 \cdot R_{T1} \cdot R_{T3}}{R_{T1} + R_{T3} - 2 \cdot R_{T2}}$$

Este método pode ser aplicado para termistores PTC e outros sensores resistivos não lineares.

Termistores

- Outro método analítico consiste em forçar a curva resistência-temperatura ter um ponto de inflexão no centro da faixa de medição T_c .
- é necessário a derivada (novamente) em relação a temperatura

- $\frac{dR_p}{dT} = \frac{R^2}{(R_T + R)^2} \cdot \frac{dR_T}{dT}$ e igualar o resultado a zero. Isto fornece para o valor de:

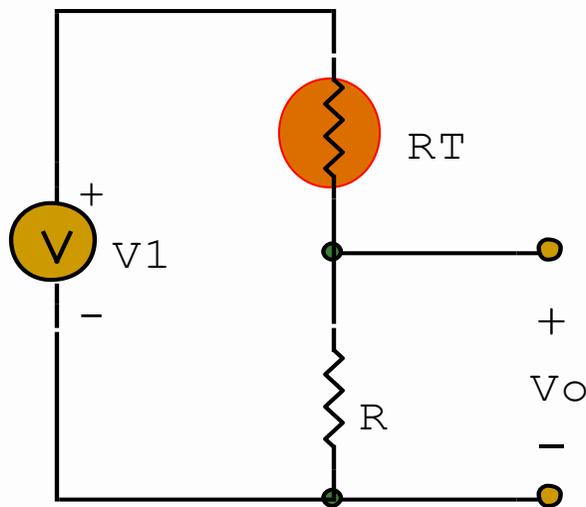
$$R = R_{T_c} \cdot \frac{\beta - 2.T_c}{\beta + 2.T_c}$$

» Esse R representa a resistência para a máxima sensibilidade na temperatura T.

Termistores

- Termistores - Condicionamento
 - Linearizador + Ohmímetro
 - Excitação em Tensão

$$V_o = V_1 \frac{R}{R + R_T} = V_1 \frac{1}{1 + \frac{R_T}{R}}$$



Como $R_T(T)$ possui um comportamento aproximado do tipo $k \cdot (1/T)$, pode-se conseguir uma linearização aproximada de V_o em relação a T com este divisor de tensão.

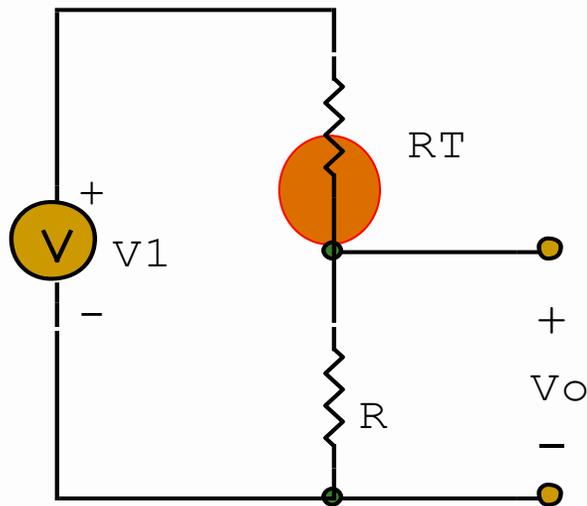
$$V_o \cong V_1 \frac{1}{1 + k/RT} = V_1 \frac{1}{1 + k/RT}$$

$$V_o \cong V_1 \frac{RT}{k} \quad \text{Se } k/RT \gg 1$$

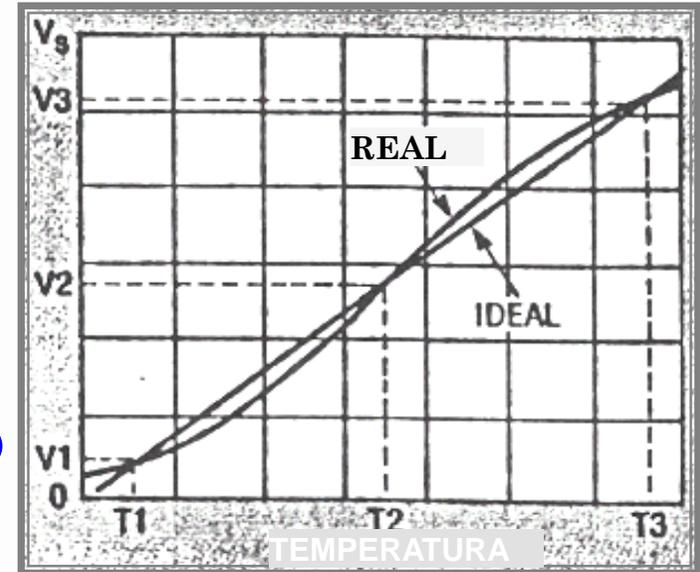
Termistores - condicionamento

– Melhor Linearização

- Excitação em tensão



$$V_o = V_1 \frac{1}{1 + \frac{R_T}{R}}$$



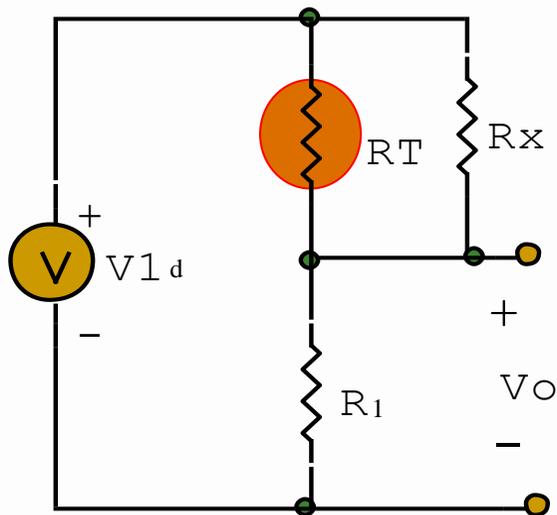
- T₁ e T₃ estabelecem a faixa de operação
- T₂ ponto intermediário
- R_{T1}, R_{T2} e R_{T3}: resistência do termistor em T₁, T₂ e T₃

$$R = \frac{R_{T1}R_{T2} + R_{T2}R_{T3} - 2R_{T1}R_{T3}}{R_{T1} + R_{T3} - 2R_{T2}}$$

Por meio de V1 ajusta-se a sensibilidade

Termistores - Condicionamento

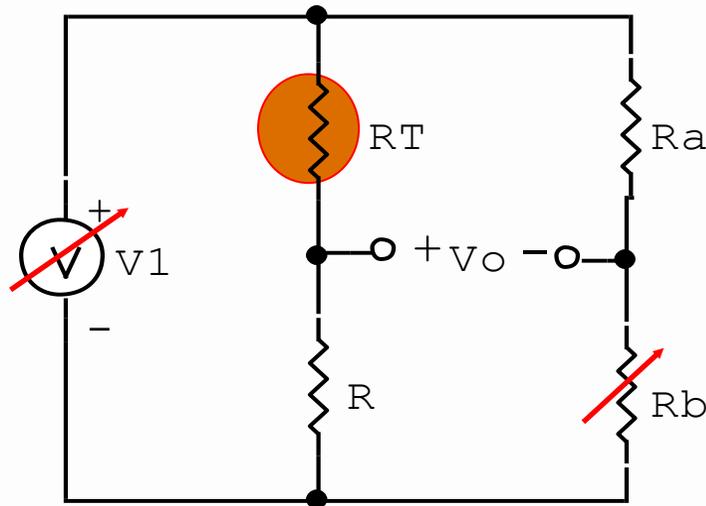
- Melhor Linearização
 - Acertos no circuito



- Alterando V_1 sem alterar a Sensibilidade
 - ✓ Com R_x em paralelo com R_T
 - Escolha V_{1d} (V_1 desejado)
 - $R_1 = R V_{1d} / V_1$
 - $R_x = R R_T / (R_1 - R)$

Termistores - Condicionamento

– Ajuste de Zero e Ganho



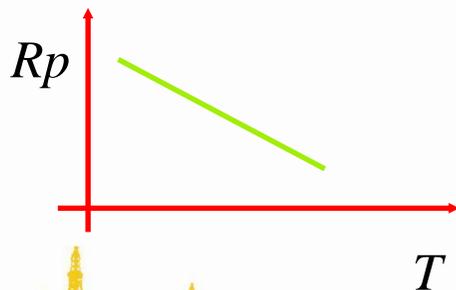
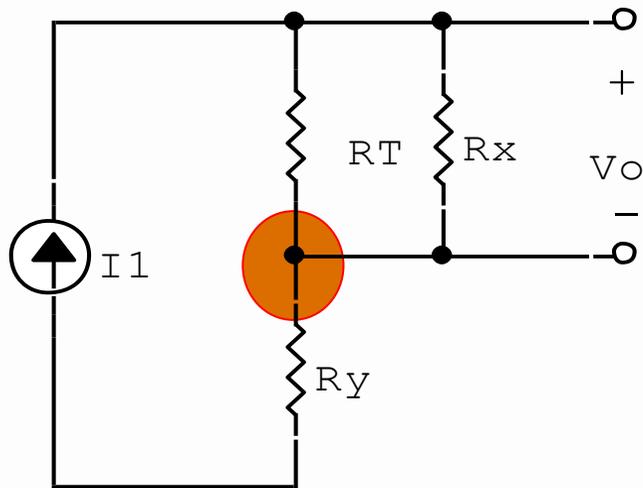
$$V_o = V_1 \left(\frac{1}{1 + \frac{R_T}{R}} - \frac{1}{1 + \frac{R_a}{R_b}} \right)$$

- Por meio de V_1 ajusta-se a sensibilidade
- Por meio de R_a e R_b ajusta-se o ponto de zero ($R_a/R_b = R_T/R \Rightarrow V_o = 0$)

Termistores - Condicionamento

– Melhor Linearização

- Excitação em corrente



$$R_p = R_T \parallel R_x = \frac{R_x}{1 + R_x / R_T}$$

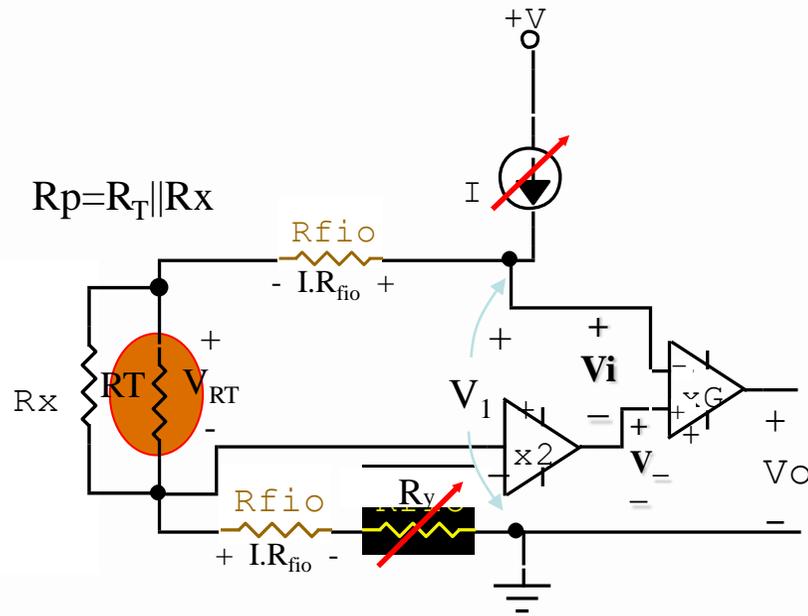
$$R_p = R_x \left(1 - \frac{1}{1 + R_T / R_x} \right)$$

$$R_x = \frac{R_{T1}R_{T2} + R_{T2}R_{T3} - 2R_{T1}R_{T3}}{R_{T1} + R_{T3} - 2R_{T2}}$$

Termistores - Condicionamento

Ohmímetro

- Ajuste de Zero e Ganho (Exemplo - Ligação a três fios)



$$V_1 = IR_{fio} + V_{RT} + IR_{fio} + IR_y$$

$$V_- = 2IR_{fio} + 2IR_y$$

$$V_i = V_1 - V_-$$

$$V_i = \cancel{IR_{fio}} + V_{RT} + \cancel{IR_{fio}} + IR_y - \cancel{2IR_{fio}} - \cancel{2IR_y}$$

$$V_i = V_{RT} - IR_y = I(R_p - R_y)$$

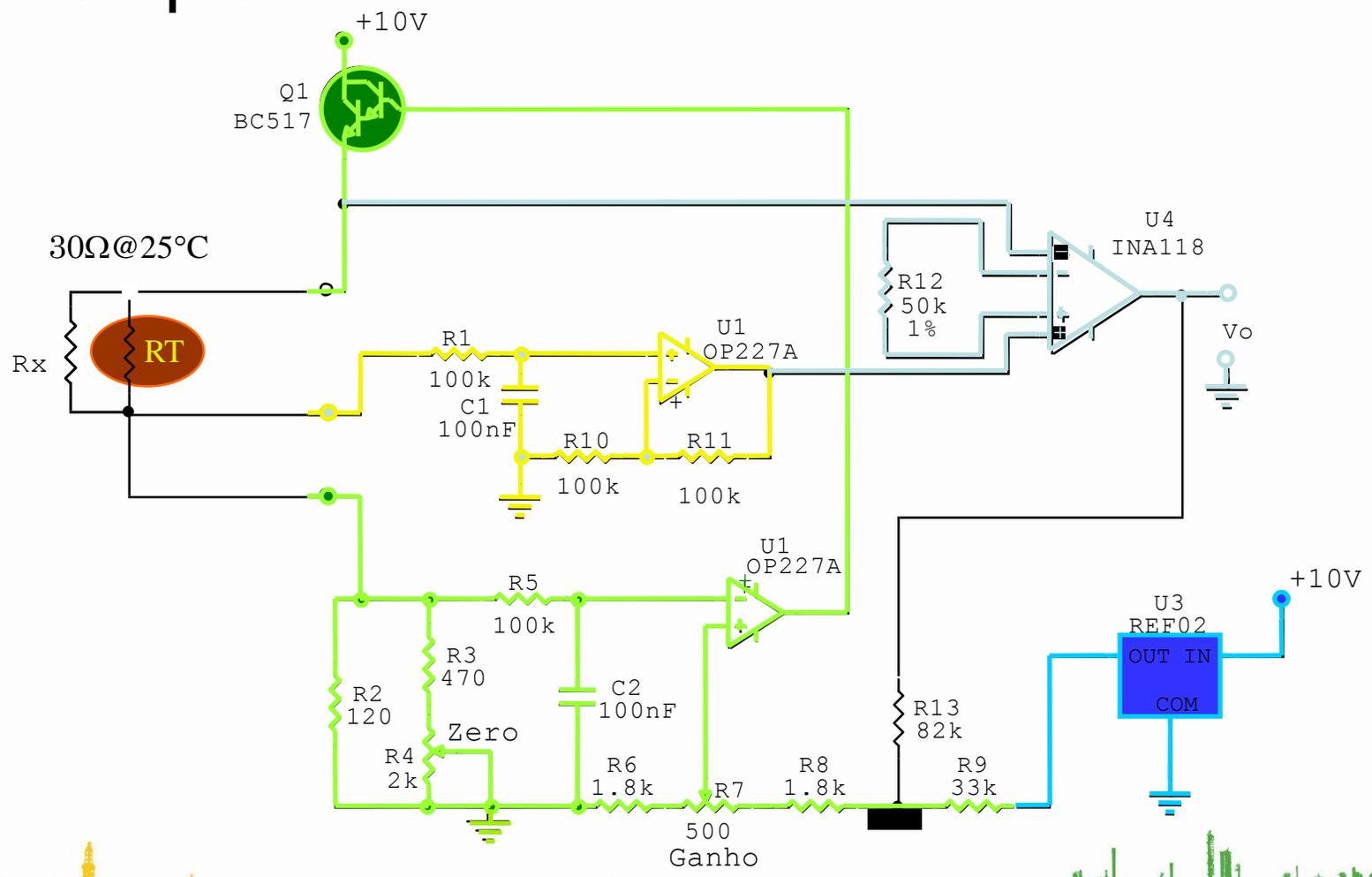
$$V_0 = \underbrace{-G}_{\text{Ganho}} I (R_p - R_y) \underbrace{\quad}_{\text{Zero}}$$

Ganho

Zero

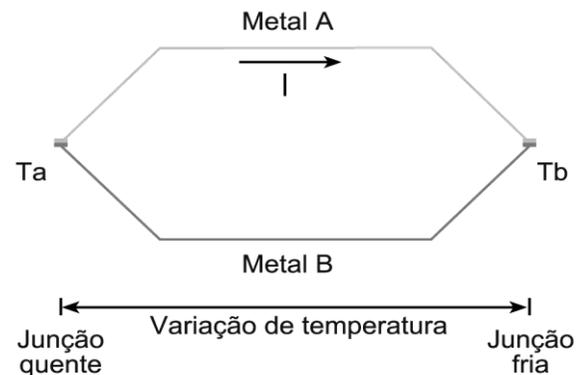
Termistores - Condicionamento

Exemplo



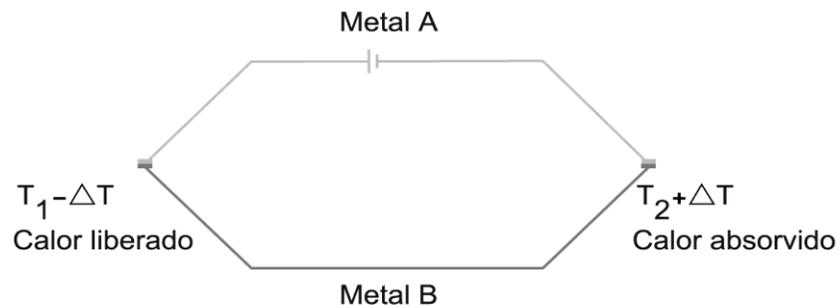
Termopares

- Sensores *Self-Generating* ou sensores ativos, por exemplo, os piezoelétricos, os termopares, os piroelétricos, os fotovoltaicos, os eletroquímicos, etc, geram um sinal elétrico a partir de um mensurando sem necessitar de alimentação.
- Entre 1821 e 1822, Thomas J. Seebeck observou a existência dos circuitos termoelétricos quando estudava o efeito eletromagnético em metais. Observou que um circuito fechado, formado por 2 metais diferentes, é percorrido por uma corrente elétrica quando as junções estão expostas a uma diferença de temperatura – Efeito de Seebeck .
- Se o circuito é aberto, uma força eletromotriz termoelétrica (f.e.m.) aparece e depende somente dos metais e das temperaturas das junções do termopar.



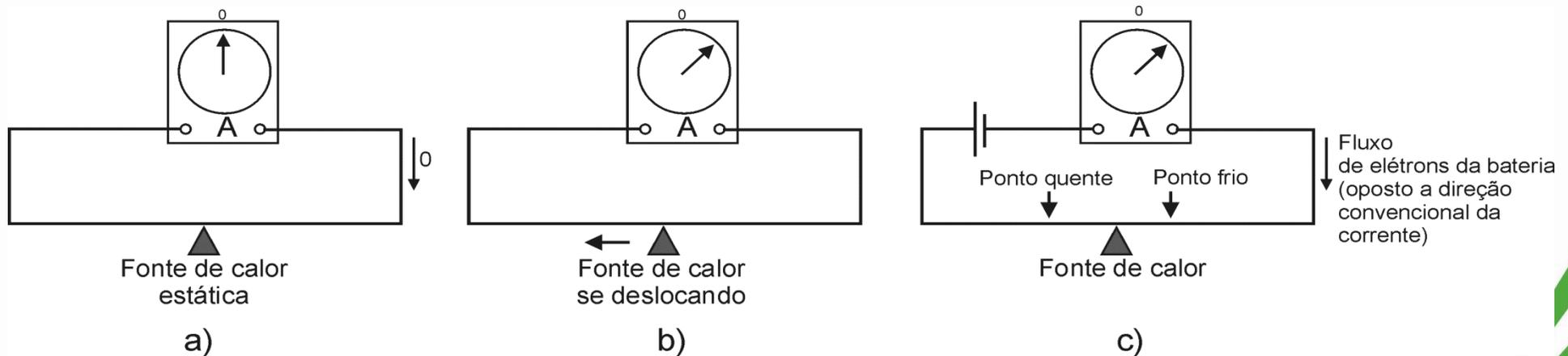
Termopares

- Em 1834, Jean C. A. Peltier descobriu que na existência de um fluxo de corrente na junção de dois metais diferentes, calor é liberado ou absorvido. Este fenômeno é conhecido como Efeito de Peltier e pode ser definido como a mudança no conteúdo de calor quando uma quantidade de carga (1 Coulomb) atravessa a junção (este efeito é à base do estudo termoelétrico). Cabe observar que este efeito é reversível e não depende da forma ou dimensões dos condutores. Portanto, depende apenas da composição das junções e temperatura.



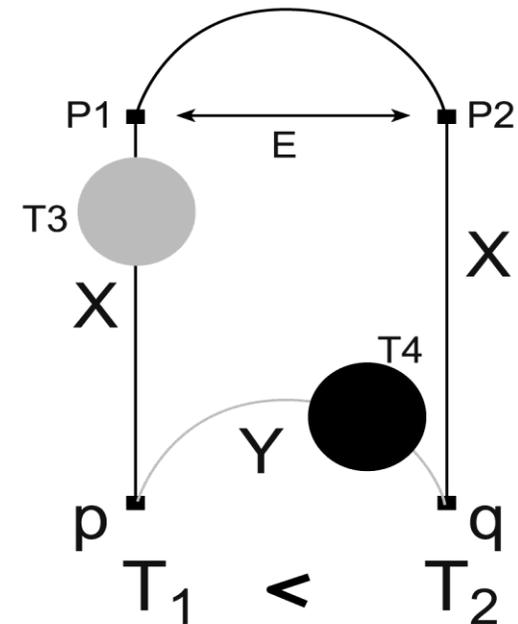
Termopares

- Lord Kelvin (Sir William Thomson Kelvin) em 1851 verificou que um gradiente de temperatura em um condutor metálico é acompanhado por um pequeno gradiente de tensão cuja magnitude e direção depende do tipo de metal. Cabe observar que o fluxo de corrente em um circuito depende da resistência do condutor, mas a f.e.m. não depende da resistividade, das secções dos condutores ou da distribuição de temperatura ou gradiente. A f.e.m. depende somente das temperaturas entre as junções e dos metais que formam o termopar.



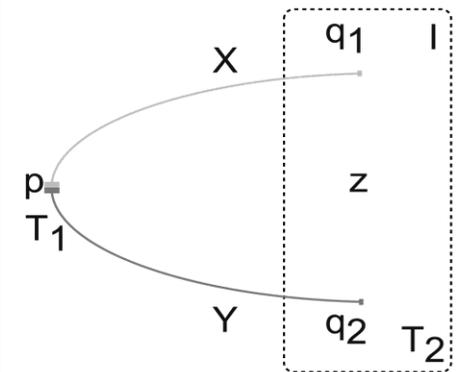
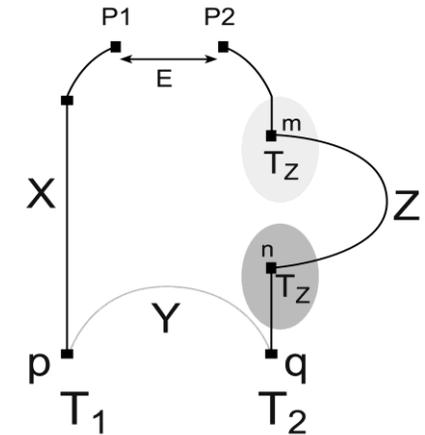
Termopares

- O Circuito de Seebeck é denominado de par termoelétrico ou comumente de termopar e é uma fonte de força eletromotriz (tensão elétrica). Portanto, o termopar pode ser utilizado como um sensor de temperatura ou como uma fonte de energia elétrica (conversor de energia termelétrica), porém, na maioria das aplicações, é somente utilizado como sensor de temperatura, pois os termopares metálicos apresentam baixíssimo rendimento.
- A polaridades e magnitude da tensão (denominada de tensão de Seebeck) dependem da temperatura das junções e do tipo de material que constitui o elemento termopar



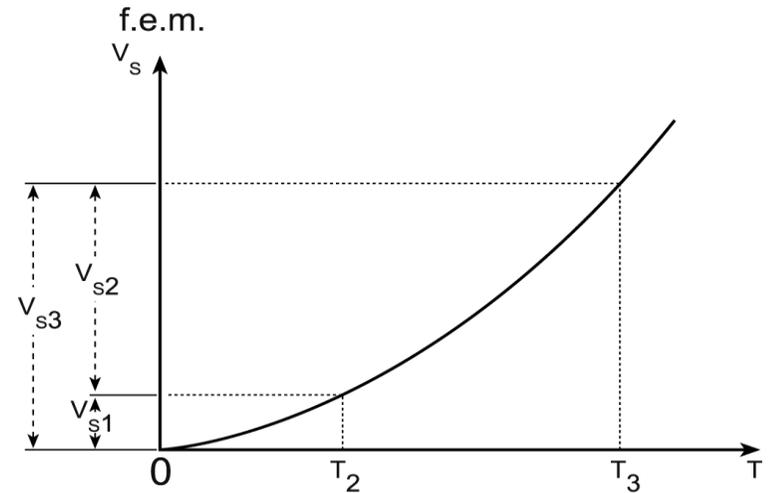
Termopares

- A principal aplicação relacionada à tensão de Seebeck e sua dependência é que se a junção q , por exemplo, é mantida a uma temperatura fixa, a tensão de Seebeck é unicamente função da junção p .
- Medindo-se a tensão de Seebeck pode-se determinar a temperatura, desde que, se tenha levantado experimentalmente a função relativa à temperatura de referência. Esta breve descrição demonstra o uso do termopar como sensor de temperatura.
- A Lei dos Metais Intermediários é uma importante regra prática: Determina que se em qualquer ponto do termopar for inserido um metal genérico, desde que, as novas junções, criadas pela inserção do metal genérico, sejam mantidas a temperaturas iguais, a tensão de Seebeck não é alterada.



Termopares

- Lei das Temperaturas Sucessivas: descreve a relação entre f.e.m. obtida para diferentes temperaturas de referência ou de junção fria. Esta lei permite compensar ou prever dispositivos que compensem mudanças de temperatura da junta de referência.
- A relação pode ser obtida graficamente (curva denominada de Calibração) para um termopar com a junta de referência em 0°C .



Termopares

- Com a Curva de Calibração ou com a Função de Calibração de um determinado termopar pode-se determinar qualquer outra curva relativa à junta de referência a uma dada temperatura.
- As Curvas de Calibração dos termopares geralmente não são lineares, mas para a maioria dos termopares usuais pode-se considerá-la linear dependendo da faixa de temperatura utilizada e da sensibilidade do medidor de f.e.m. A inclinação da curva em um ponto qualquer é denominada de **Potência Termoelétrica** que geralmente é pequena e varia com a natureza do termopar. Por exemplo:
 - Para a platina rhodio-platina → dezenas de $\mu\text{V}/\text{grau}$;
 - Para chromel-alumel → quatro dezenas de $\mu\text{V}/\text{grau}$;
 - Para ferro-constantã → cinco dezenas de $\mu\text{V}/\text{grau}$.
- A Potência Termoelétrica pode ser aproximada por funções do tipo:

$$V_s = a + b.T + c.T^2 + \dots + \dots$$

- Onde a, b, c são constantes determinadas experimentalmente (cabe observar que se a junção de referência está a 0°C a=0).



Termopares

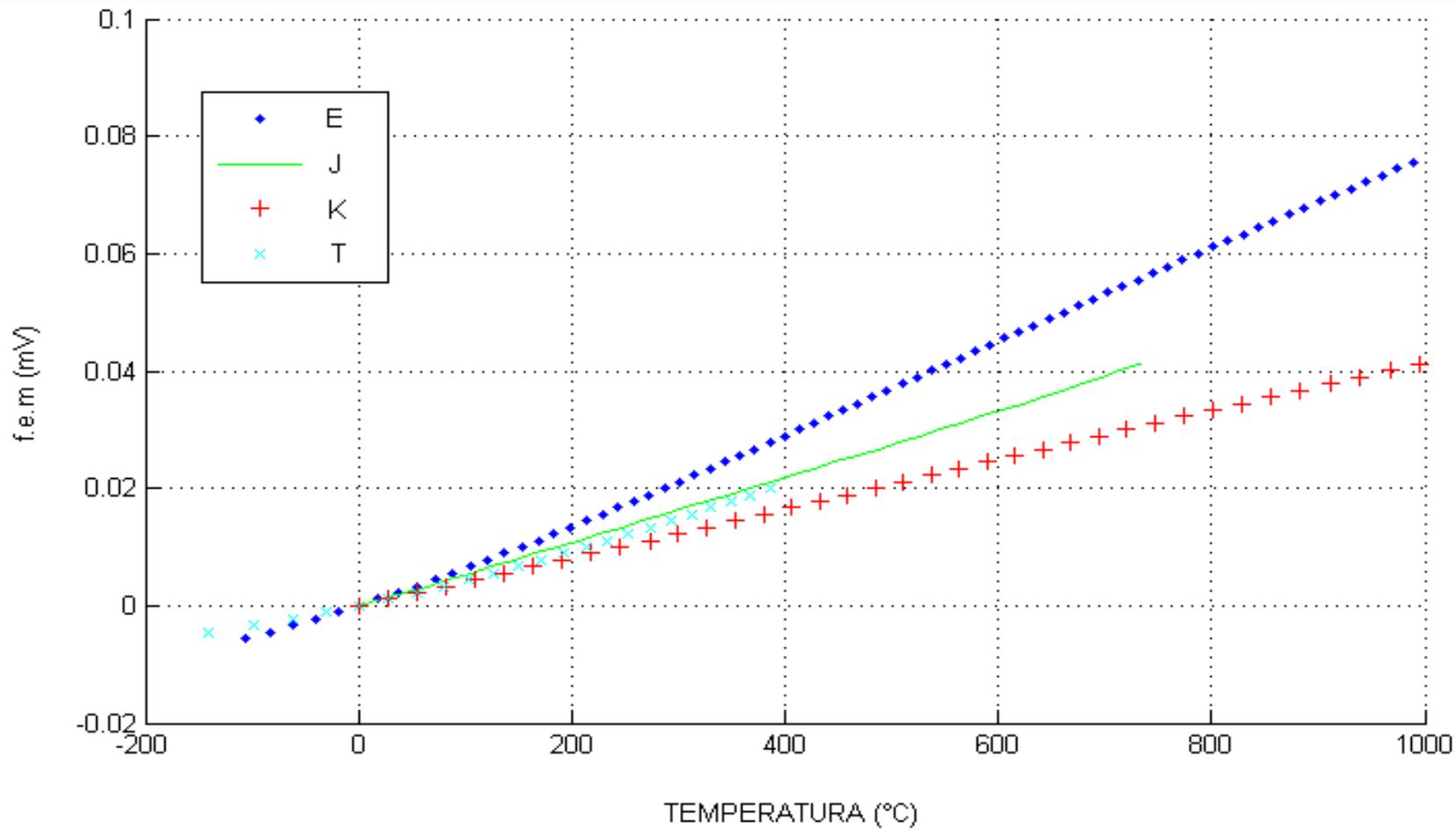
- É importante observar que a potência termoelétrica representa a sensibilidade de resposta do termopar com a variação de temperatura .
- Pode-se simplificadamente citar os requerimentos gerais e simultâneos desejados na escolha dos metais para formação de um par termoelétrico:
 - Resistência à oxidação e a corrosão conseqüentes do meio e das altas temperaturas;
 - Linearidade dentro do possível;
 - Ponto de fusão maior do que a maior temperatura na qual o termopar é usado;
 - Sua f.e.m. deve ser suficiente para ser medida com precisão razoável;
 - Sua f.e.m. deve aumentar continuamente com o aumento da temperatura (evidentemente dentro da faixa de utilização do termoelemento);
 - Os metais devem ser homogêneos;
 - Suas resistências elétricas não devem apresentar valores que limitem seu uso;
 - Sua f.e.m. deve ser estável durante a calibração e uso dentro de limites aceitáveis;
 - Sua f.e.m. não deve ser alterada consideravelmente por mudanças químicas, físicas ou pela contaminação do ambiente;
 - Deve ser facilmente soldado pelo usuário.



Termopares - Alguns termopares comerciais e características básicas (padrão ANSI).

Tipo (ANSI)	Range (°C)	Saída (fundo de escala - mV)	Incerteza (°C)
B	38 a 1800	13,6	-
C	0 a 2300	37,0	-
E	0 a 982	75,0	±1,0
J	184 a 760	43,0	±2,2
K	-184 a 1260	56,0	±2,2
N	-270 a 1300	51,8	-
R	0 a 1593	18,7	±1,5
S	0 a 1538	16,0	±1,5
T	-184 a 400	26,0	±1,0

Termopares



Termopares

As sensibilidades aproximadas são:

Tipo E → $70 \mu V / ^\circ C$

Tipo J → $55 \mu V / ^\circ C$

Tipo T → $50 \mu V / ^\circ C$

Tipo K → $40 \mu V / ^\circ C$

Para boas medições são necessárias tabelas padrões ou representações polinomiais destas características (em sistemas microprocessados é facilmente empregada a aproximação polinomial). A expressão geral, conforme já salientado, apresenta a forma:

$$T = a_0 + a_1.V + a_2.V^2 + a_3.V^3 + \dots + a_n.V^n$$

onde V é a f.e.m. observada em volts (mV), T é a temperatura da junção ($^\circ C$) e os coeficientes apropriados para os tipos particulares de termopares são dados na Tabela



Termopares - Coeficientes para os termopares E, J, K e T.

	Tipo E	Tipo J	Tipo K	Tipo T
	-100 a 1000°C	0 a 760°C	0 a 1370°C	-160 a 400°C
a0	0,104967248	-0,048868252	0,226584602	0,100860910
a1	17189,45282	19873,14503	24152,10900	25727,94369
a2	-282639,0850	-218614,5353	67233,4248	-767345,8295
a3	12695339,5	11569199,78	2210340,682	78025595,81
a4	-448703084,6	-264917531,4	-860963914,9	-9247486589
a5	$1,10866 \times 10^{10}$	2018441314	$4,83506 \times 10^{10}$	$6,97688 \times 10^{11}$
a6	$-1,76807 \times 10^{11}$		$-1,18452 \times 10^{12}$	$-2,66192 \times 10^{13}$
a7	$1,71842 \times 10^{12}$		$1,38690 \times 10^{13}$	$3,94078 \times 10^{14}$
a8	$-9,19278 \times 10^{12}$		$-6,33708 \times 10^{13}$	
a9	$2,06132 \times 10^{13}$			

Por exemplo, suponha que um termopar do tipo J, apresenta uma saída de 10,0mV relativa a junção de referência a 0°C. Então pela equação:

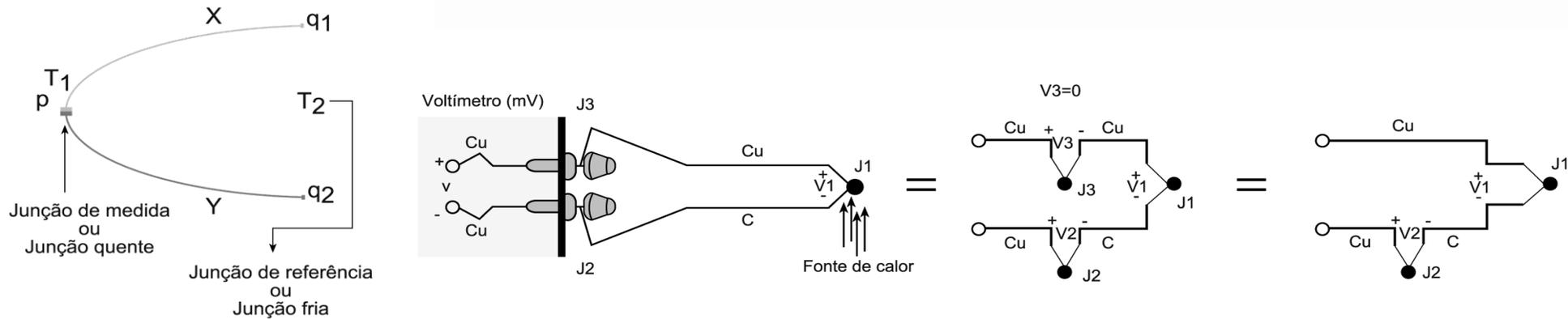
$$T = a_0 + a_1.V + a_2.V^2 + a_3.V^3 + \dots + a_n.V^n$$

e pelos coeficientes fornecidos na Tabela, a temperatura indicada por este termopar é de aproximadamente .

$$T \approx 186^\circ\text{C}$$



Termopares



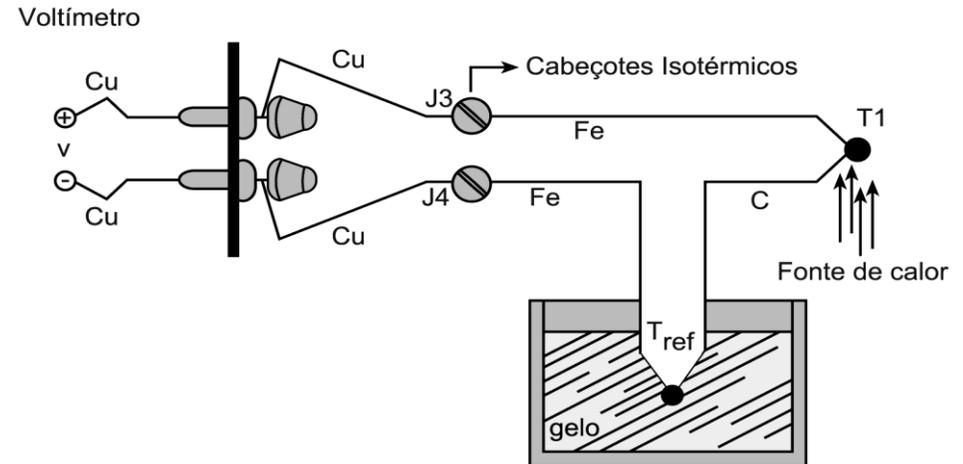
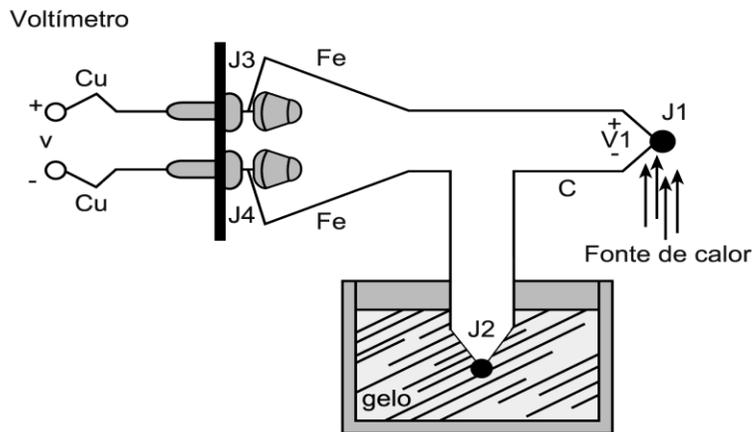
- Pode-se observar experimentalmente que a diferença de potencial (d.d.p.) que surge nos terminais de um termopar não depende do ponto escolhido para se abrir o circuito. Porém, normalmente o ponto de medição corresponde a uma das junções que recebem os seguintes nomes: junta quente, junta de medida;
- Pode-se medir a tensão de Seebeck diretamente conectando-se, por exemplo, um voltímetro ao termopar (se as junções da conexão do voltímetro ao termopar estiverem à mesma temperatura, o voltímetro é considerado um metal intermediário, ou seja, não interferirá na tensão de Seebeck).

Termopares - Compensação da junta fria

- Na maioria das aplicações o instrumento de medida e o termopar estão afastados. Desta forma, os terminais do termopar poderão ser conectados a uma espécie de cabeçote e, a partir deste cabeçote são adaptados **fios de compensação** (praticamente com as mesmas características dos fios do termopar, porém mais baratos) até o instrumento.
- Para minimizar o efeito da junta fria, uma junção precisa permanecer a temperatura fixa (temperatura de referência) para poder aplicar corretamente o Efeito de Seebeck na medição de temperatura. A seguir serão apresentados alguns métodos para compensação da junta.
- **Banho de Gelo:** uma das soluções trabalhosas é a colocação da junção de referência em um banho de gelo. Facilmente é obtida uma boa precisão, porém necessita de manutenção freqüente do banho acarretando alto custo e em algumas situações práticas torna-se inviável.



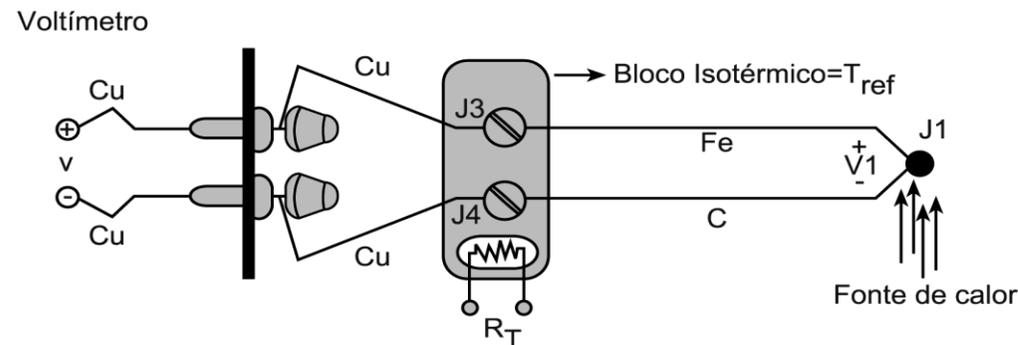
Termopares - Compensação da junta fria



- Como as junções junto aos bornes do voltímetro são ambas de Cu e estão a mesma temperatura, a medição realizada pelo voltímetro é proporcional à diferença de temperatura entre as junções J1 e J2 (de referência – no caso a 0 graus Celsius).
- Deve-se observar que este método empregado com um termopar, cria outras junções na ligação do voltímetro ao termopar, pois são metais diferentes.
- Para evitar erros na medição de temperatura através da junção J1, deve-se garantir que os bornes do voltímetro (portanto seus contatos internos) estejam à mesma temperatura (Lei dos Metais Intermediários). Para medições mais precisas o voltímetro deve ser ligado a um **cabeçote isotérmico**.
- Um bom **cabeçote isotérmico** deve ser isolante elétrico, mas um bom condutor de calor deve garantir que as junções J4 e J3 estejam à mesma temperatura.

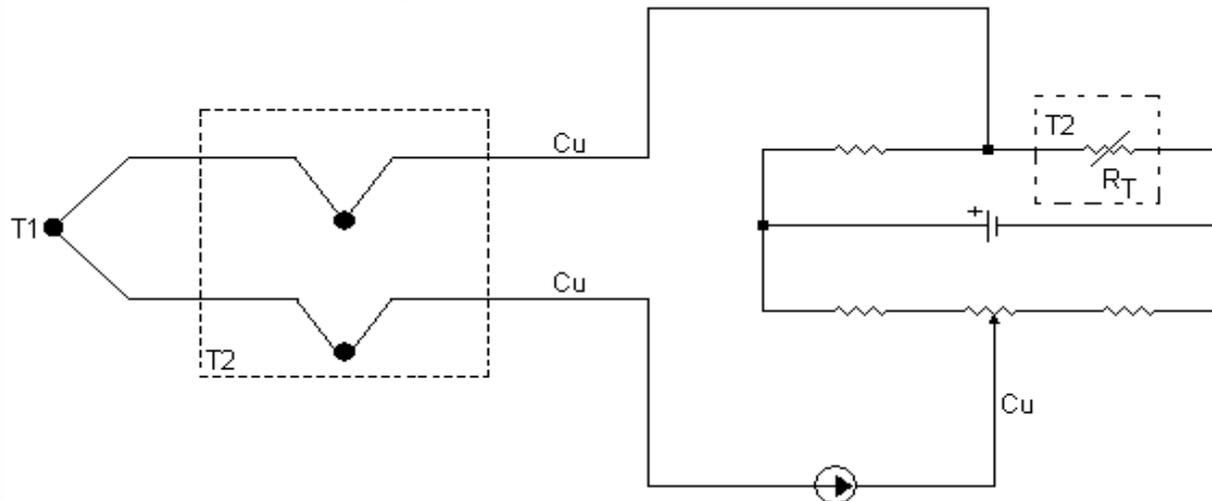
Termopares – Compensação JF

- Um método largamente empregado é a utilização do **bloco isotérmico** no lugar do banho de gelo. Porém é necessário medir a temperatura do bloco isotérmico (como junção de referência) e utilizar esta medida para determinar a temperatura desconhecida (da junção de medida). Um termistor pode ser utilizado para medir a temperatura da junção de referência e com um circuito adequado:
- Medir a resistência do termistor para encontrar a temperatura de referência e converter a equivalente tensão de referência ;
- Medir a tensão do termopar e adicionar o equivalente em tensão da temperatura de referência e finalmente converter para a temperatura da junta quente ou de medida.
- A Figura apresenta o esboço deste método, normalmente chamado de Compensação por Software, pois normalmente a temperatura medida pelo termistor é compensada automaticamente pelo instrumento de medida adequado a este método.



Termopares

- Outra possibilidade é deixar a junção de referência à temperatura ambiente (sujeita evidentemente as flutuações), mas ao mesmo tempo medir com outro sensor de temperatura posicionado próximo a junção de referência. Então uma tensão igual à gerada na junção fria é subtraída de uma tensão produzida pelo circuito.
- Existem circuitos que medem a temperatura ambiente e fornecem a compensação de tensão para alguns termopares específicos. Por exemplo, o LT1025 (*National Semiconductors*) trabalha com os tipos E, J, K, R, S e T. O AD594/AD595 da *Analog Devices* é um amplificador de instrumentação e compensador de junta fria. O AD596/AD597 são controladores que incluem o amplificador e compensação de junta fria para os termopares J e K.



Termopares

- Cabe observar que os termopares estão sujeitos a gradientes de temperatura e tais erros podem ser minimizados pela especificação de sensores longos e de pequeno diâmetro e pelo uso de bainhas ou coberturas com baixa condutividade térmica e que possibilitam alta transferência de calor por convecção entre o fluido e o termopar.
- Observa-se, porém, que a escolha do termopar depende da aplicação.
- A Tabela a seguir fornece algumas características de algumas coberturas normalmente utilizadas em termopares de alta temperatura. Os metais que formam o termopar precisam ser isolados (tradicionalmente a cerâmica é utilizada como isolante dos metais diferentes).



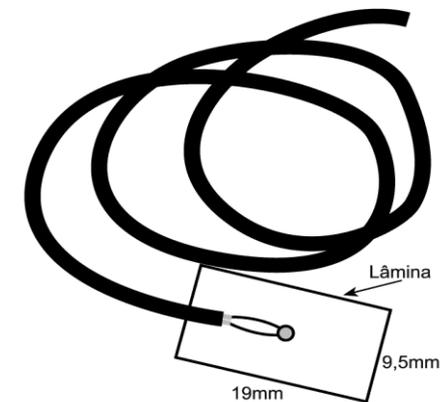
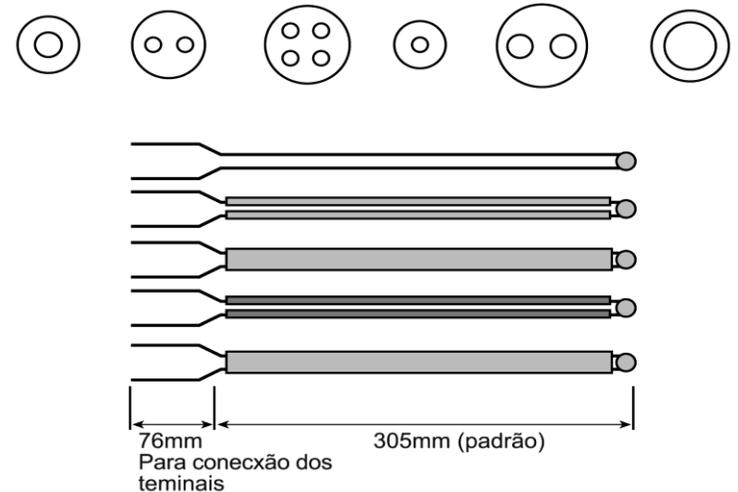
Termopares

Material	Máxima temperatura e operação	Ambiente de trabalho	Características gerais
Molibdênio	2205°C	Inerte, vácuo, redutor	Sensível a oxidação acima de 500°C, resiste a muitos metais líquidos.
Tântalo	2582°C	Inerte, vácuo	Resiste a muitos ácidos e meios alcalinos; muito sensível à oxidação acima de 300°C.
Inconel 600	1149°C	Oxidante, inerte, vácuo	Excelente resistência à oxidação e a altas temperaturas.



Termopares

- Isolantes dos fios do termopar: (a) faixa de tamanhos (da esquerda para a direita): 3,2; 2,4; 2,0; 1,6; 1,2; 0,8 e 0,4mm de diâmetro; (b) Aplicação dos isolantes em várias configurações de termopares.
- Os termopares denominados de cimentados , nos últimos anos, têm aumentado o uso. Normalmente são laminados com plásticos para cimentar diretamente no equipamento



Termopares

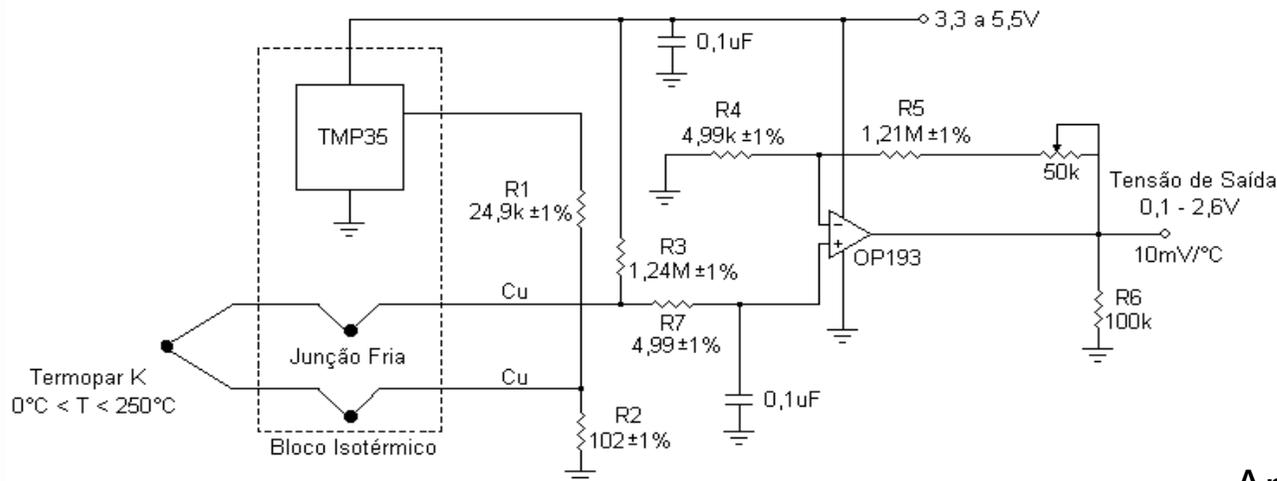
mV x T(°C) - junção de referência a 0°C

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
Tensão termoeétrica (mV)												
-270	-6.458											-270
-260	-6.411	-6.444	-6.446	-6.448	-6.450	-6.452	-6.453	-6.455	-6.456	-6.457	-6.458	-260
-250	-6.404	-6.408	-6.413	-6.417	-6.421	-6.425	-6.429	-6.432	-6.435	-6.438	-6.441	-250
-240	-6.344	-6.351	-6.358	-6.364	-6.370	-6.377	-6.382	-6.388	-6.393	-6.399	-6.404	-240
-230	-6.262	-6.271	-6.280	-6.289	-6.297	-6.306	-6.314	-6.322	-6.329	-6.337	-6.344	-230
-220	-6.158	-6.170	-6.181	-6.192	-6.202	-6.213	-6.223	-6.233	-6.243	-6.252	-6.262	-220
-210	-6.035	-6.048	-6.061	-6.074	-6.087	-6.099	-6.111	-6.123	-6.135	-6.147	-6.158	-210
-200	-5.891	-5.907	-5.922	-5.936	-5.951	-5.965	-5.980	-5.994	-6.007	-6.021	-6.035	-200
-190	-5.730	-5.747	-5.763	-5.780	-5.797	-5.813	-5.829	-5.845	-5.861	-5.876	-5.891	-190
-180	-5.550	-5.569	-5.588	-5.606	-5.624	-5.642	-5.660	-5.678	-5.695	-5.713	-5.730	-180
-170	-5.354	-5.374	-5.395	-5.415	-5.435	-5.454	-5.474	-5.493	-5.512	-5.531	-5.550	-170
-160	-5.141	-5.163	-5.185	-5.207	-5.228	-5.250	-5.271	-5.292	-5.313	-5.333	-5.354	-160
-150	-4.913	-4.936	-4.960	-4.983	-5.006	-5.029	-5.052	-5.074	-5.097	-5.119	-5.141	-150
-140	-4.669	-4.694	-4.719	-4.744	-4.768	-4.793	-4.817	-4.841	-4.865	-4.889	-4.913	-140
-130	-4.411	-4.437	-4.463	-4.490	-4.516	-4.542	-4.567	-4.593	-4.618	-4.644	-4.669	-130
-120	-4.138	-4.166	-4.194	-4.221	-4.249	-4.276	-4.303	-4.330	-4.357	-4.384	-4.411	-120
-110	-3.852	-3.882	-3.911	-3.939	-3.968	-3.997	-4.025	-4.054	-4.082	-4.110	-4.138	-110
-100	-3.554	-3.584	-3.614	-3.645	-3.675	-3.705	-3.734	-3.764	-3.794	-3.823	-3.852	-100
-90	-3.243	-3.274	-3.306	-3.337	-3.368	-3.400	-3.431	-3.462	-3.492	-3.523	-3.554	-90
-80	-2.920	-2.953	-2.986	-3.018	-3.050	-3.083	-3.115	-3.147	-3.179	-3.211	-3.243	-80
-70	-2.587	-2.620	-2.654	-2.688	-2.721	-2.755	-2.788	-2.821	-2.854	-2.887	-2.920	-70
-60	-2.243	-2.278	-2.312	-2.347	-2.382	-2.416	-2.450	-2.485	-2.519	-2.553	-2.587	-60
-50	-1.889	-1.925	-1.961	-1.996	-2.032	-2.067	-2.103	-2.138	-2.173	-2.208	-2.243	-50
-40	-1.527	-1.564	-1.600	-1.637	-1.673	-1.709	-1.745	-1.782	-1.818	-1.854	-1.889	-40
-30	-1.156	-1.194	-1.231	-1.268	-1.305	-1.343	-1.380	-1.417	-1.453	-1.490	-1.527	-30
-20	-0.778	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.006	-1.043	-1.081	-1.119	-1.156	-20
-10	-0.392	-0.431	-0.470	-0.508	-0.547	-0.586	-0.624	-0.663	-0.701	-0.739	-0.778	-10
0	0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353	-0.392	0
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397	0
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798	10
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203	20
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612	30
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023	40
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436	50
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851	60
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267	70
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682	80
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096	90
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509	100
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920	110
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328	120
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735	130
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138	140
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540	150
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941	160
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340	170
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739	180
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138	190
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C

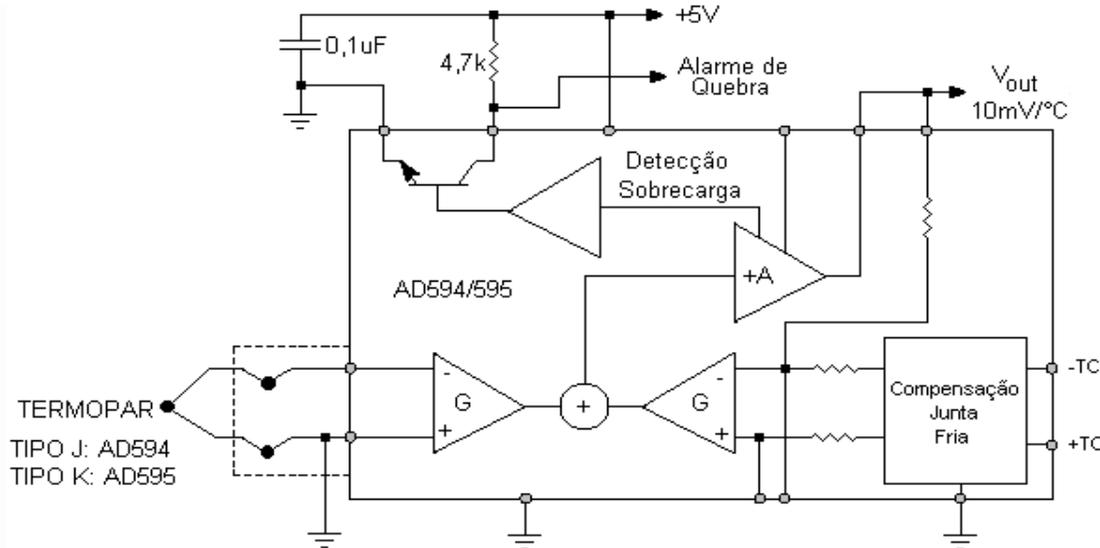
T e r m o p a r e s



Termopares



Utilização de um sensor de temperatura (TMP35) para compensação da junta fria.



Amplificador para termopar AD594/AD595 com compensação da junção fria do fabricante *Analog Devices*. Este circuito integrado combina uma referência ao ponto gelo com um amplificador pré-calibrado para fornecer uma saída de 10 mV/°C diretamente do sinal do termopar.

Junção PN

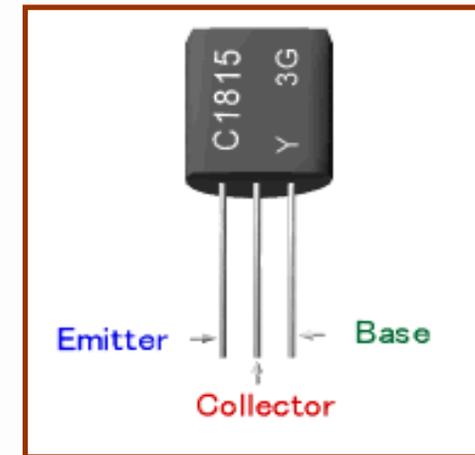
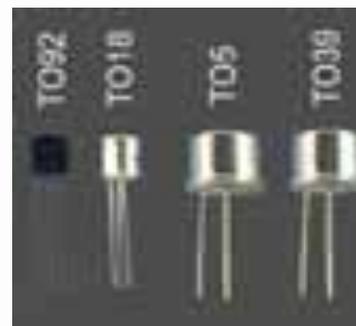
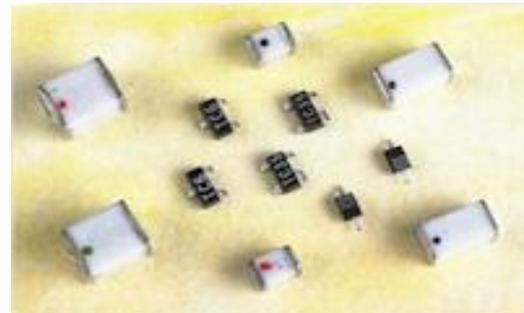
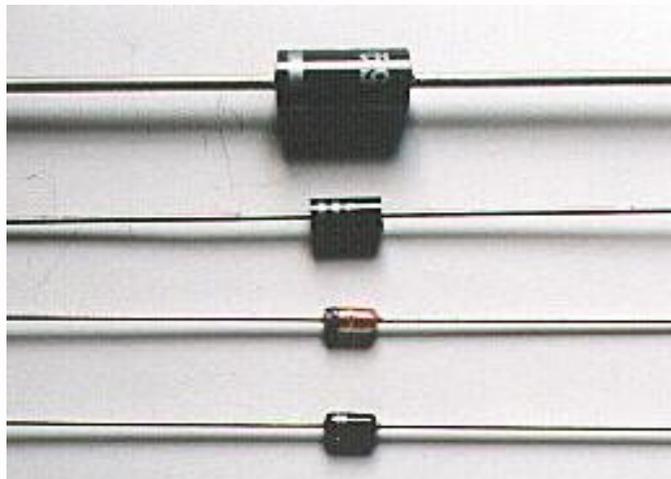
Principais características

- Sensores básicos são diodos ou transistores sob polarização direta
- Sensibilidade depende da geometria, densidade de corrente na junção, etc... ($\cong -2,3\text{mV}/^{\circ}\text{C}$)
- Praticamente lineares
- Em geral o condicionador é associado ao sensor na forma de circuito integrado, sendo feito um ajuste individual de sensibilidade para cada dispositivo.
- Faixa de Operação (-50 a $+125$ $^{\circ}\text{C}$) (danos ao dispositivo por sobre/sub temperatura)
- A temperatura fornece energia para que elétrons da banda de valência passem para a banda de condução. Isto aumenta o número de portadores na região de depleção diminuindo a resistência da junção.

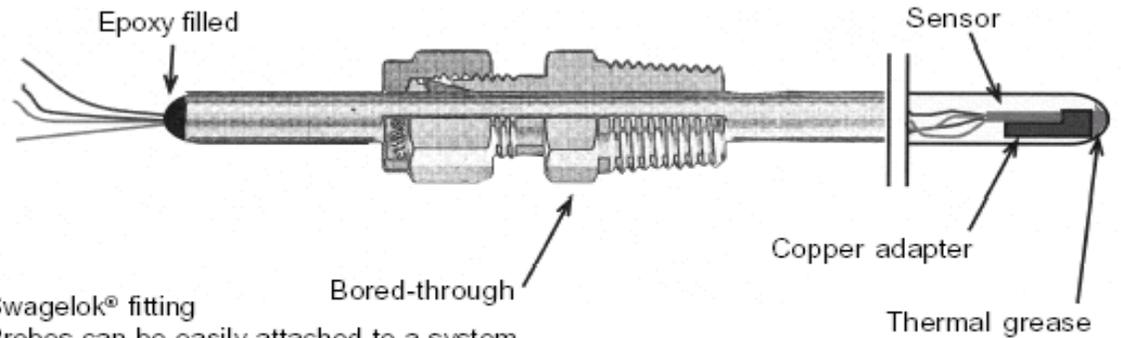
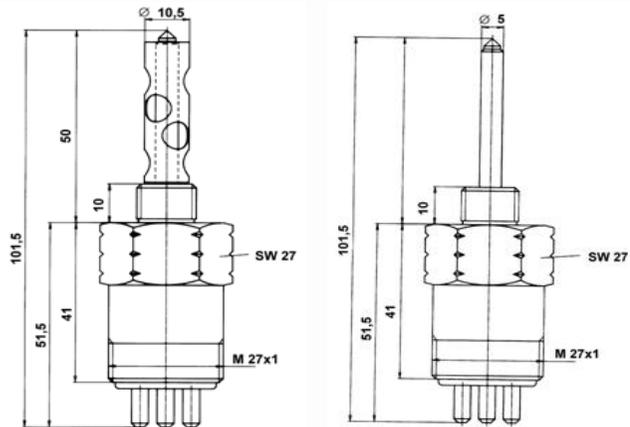


Junção PN

- Basicamente são diodos ou transistores, sob polarização direta, em geral, associados aos seus condicionadores de sinal, isto em função da necessidade de ajuste individual do sistema para cada sensor.

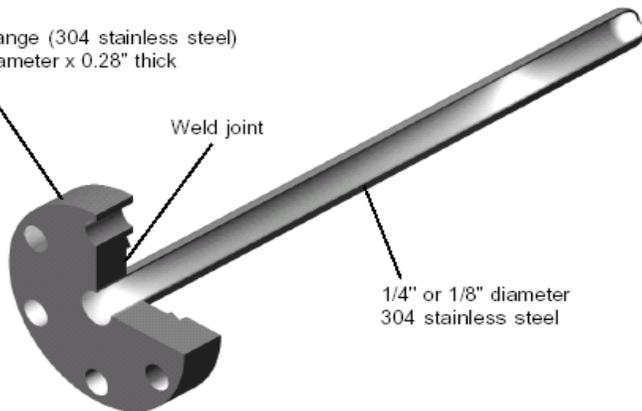


Junção PN - acondicionamento



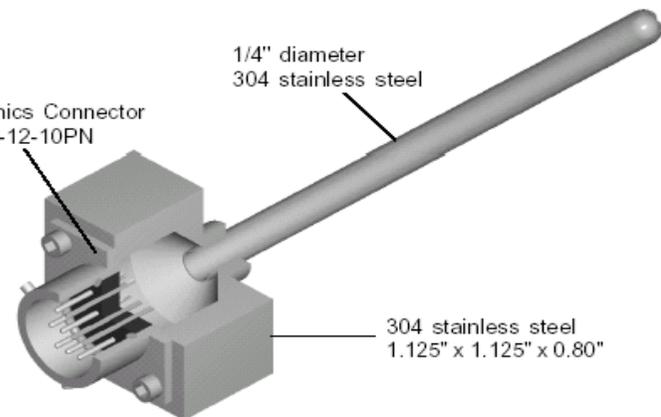
Swagelok® fitting
Probes can be easily attached to a system using the Swagelok® fitting. When ordering probes with a Swagelok® fitting, please specify the type of fitting.

CF™ Flange (304 stainless steel)
1.33" diameter x 0.28" thick

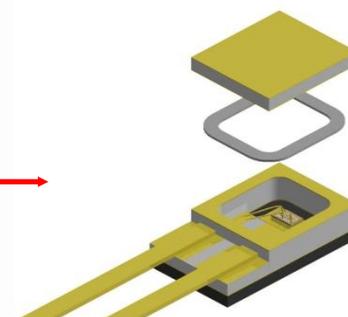
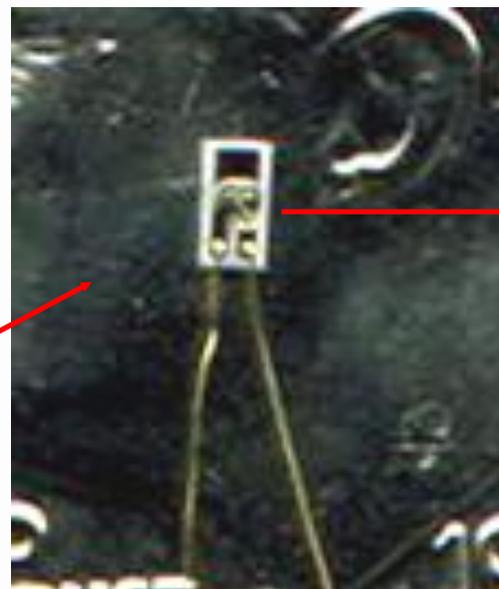
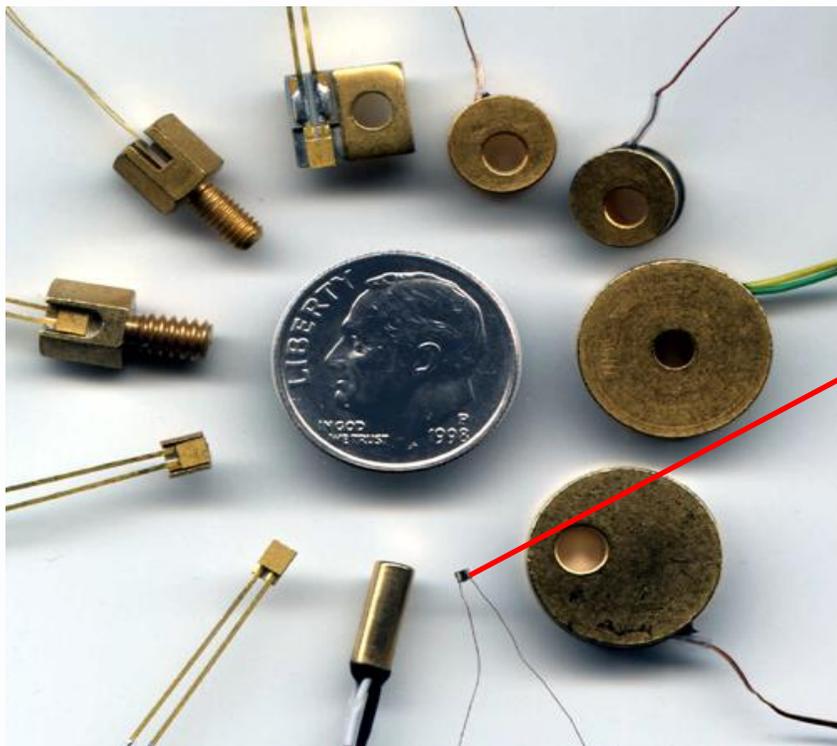


Detronics Connector
DT02H-12-10PN

1/4" diameter
304 stainless steel



Junção PN - Acondicionamento



Junção PN - Função de Transferência

$$I = I_0 \left(e^{qV/\eta kT} - 1 \right)$$

Característica I_C vs. V_{BE} de um transistor bipolar

$$I_C = I_S \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \cong I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

I_C é a corrente de coletor

V_T a tensão termodinâmica = $k_B T / q$

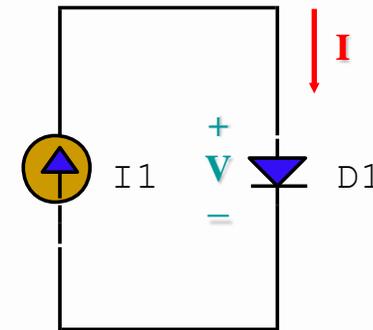
k_B é a constante de Boltzmann, $k_B = 1,38062 \times 10^{-23}$ [J/K]

T a temperatura em Kelvin

q a carga do elétron 1.60×10^{-19} [C]

portanto V_T @ temperatura ambiente = 25 mV

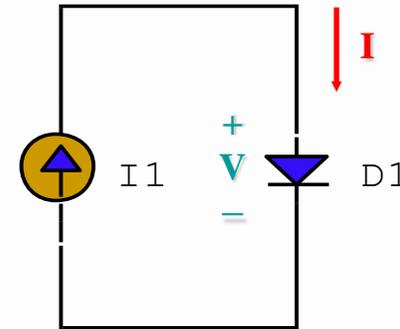
I_S corrente de saturação reversa



$$V = \frac{E_g}{q} - \frac{\eta kT}{q} \ln \left(\frac{B}{I} \cdot 5540 \right)$$

Este termo varia entre 8,29 e 8,96 para temperaturas entre -20°C e 120°C

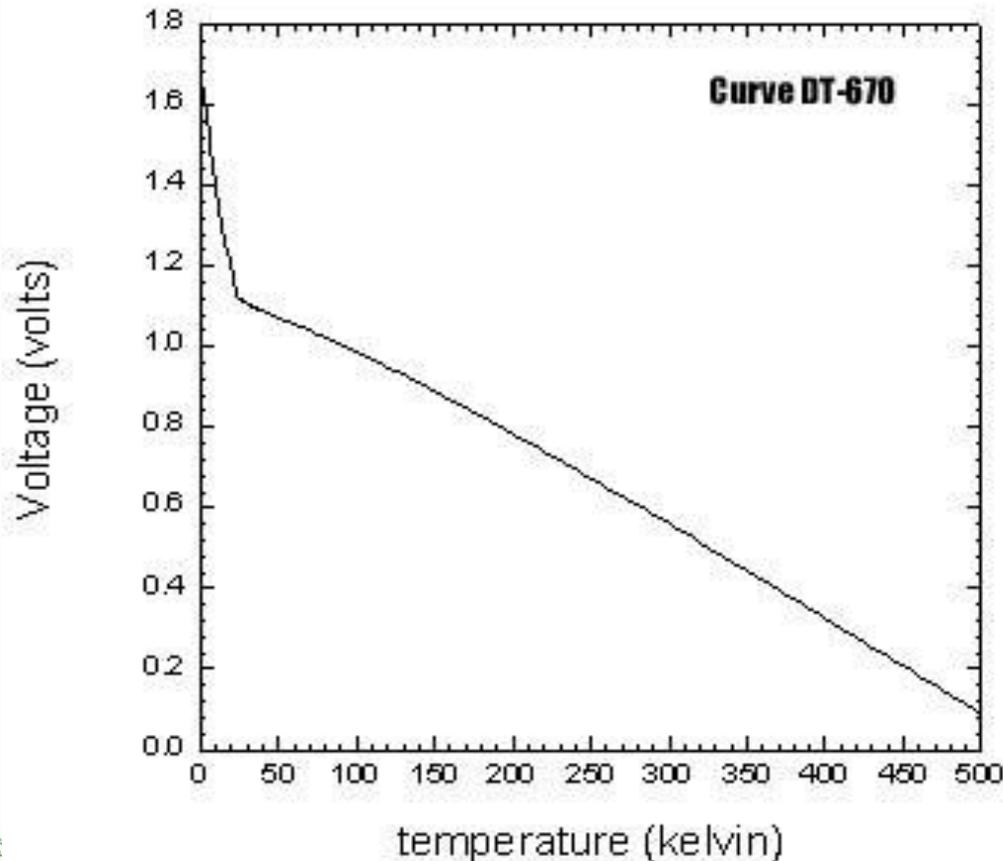
Junção PN - Função de Transferência



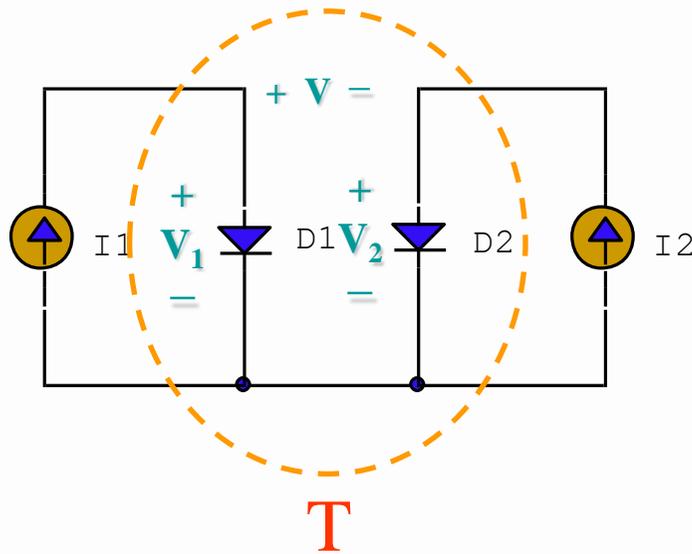
$$V = \frac{E_g}{q} - \frac{\eta k T}{q} \ln \left(\frac{B}{I} \cdot 5540 \right)$$

O valor de I_0 (B e η) depende muito da fabricação da junção

Dois diodos no mesmo substrato podem apresentar características semelhantes



Junção PN - Função de Transferência



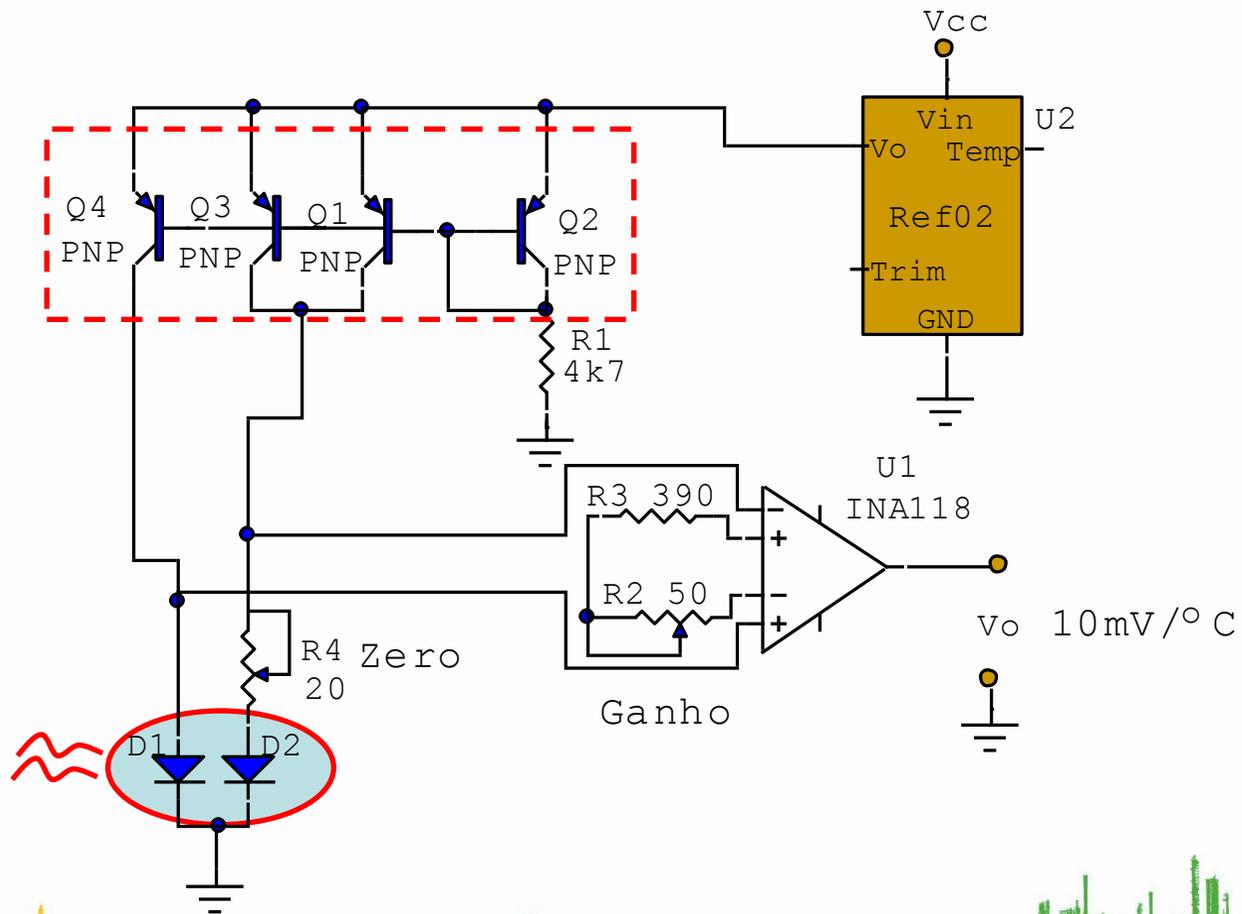
Se D1 e D2 forem casados $I_{0D1} \cong I_{0D2}$

$$V = V_1 - V_2 \cong T \frac{\eta k}{q} \ln \left(\frac{I_2}{I_1} \right)$$

Reduz a influência do valor de I_0

Aplicado quando se implementa o sensor com componentes discretos e deseja-se diminuir a variação de sensibilidade e desvio de zero com a troca dos diodos ou transistores

Junção PN - Condicionamento (comp. discretos)



Junção PN - Condicionamento (LM134 ou AD590)

$$I = (227 \mu\text{V}/\text{K}) / R$$

