

Sensores de Temperatura

Principais tipos:

- RTD (altas temperaturas)
- NTC / PTC (alta sensibilidade)
- Termopar (altas temperaturas)
- Junções semicondutoras (facilidade de uso)

Temperatura - RTD

RTD – *Resistance Temperature Detector* (detetor de temperatura resistivo) ou termoresistor

- São dispositivos cuja resistância elétrica varia conforme a temperatura.
- condutores apresentam esta característica devido a sua resistividade variável com T.
- Modelo matemático:
$$R_t = R_0 (1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots + \alpha_n T^n)$$

Termoresistor

- Determinados metais exibem melhor linearidade, podendo-se desprezar $n > 1$:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha T)$$

onde:

R_0 → resistência à temperatura de referência (normalmente 0°C)

α → coeficiente linear de temperatura

T → Temperatura

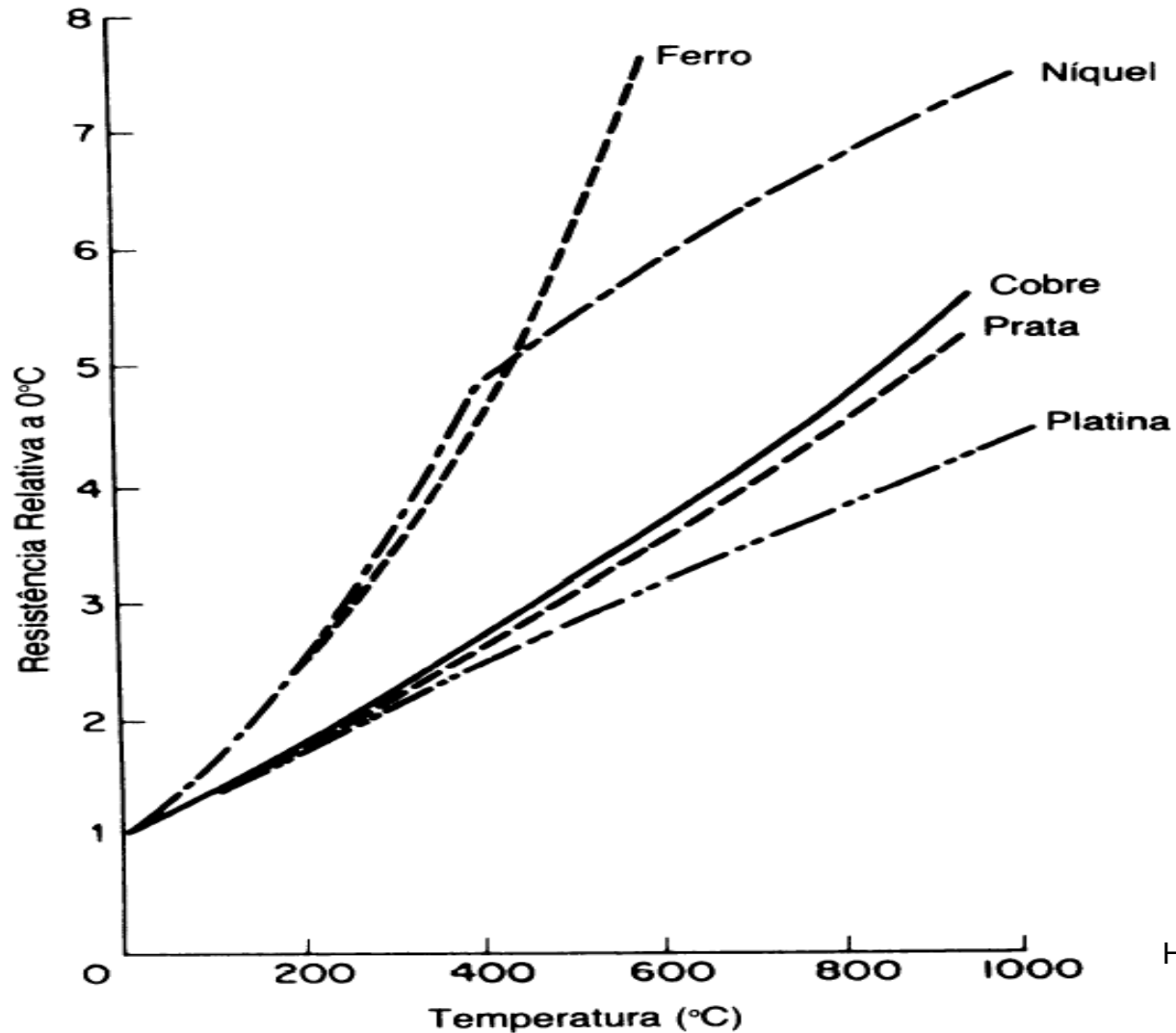
- Exemplo:

Determinar a resistência do Pt₁₀₀ a 25°C:

$$R_0 = 100 \, \Omega \text{ (@ } 0^\circ\text{C)} \quad \alpha = 3,85 \times 10^{-3}$$

- $R_{25} = 100 (1 + 25 * 3,85 \cdot 10^{-3}) = 110 \, \Omega$

Resistência do RTD



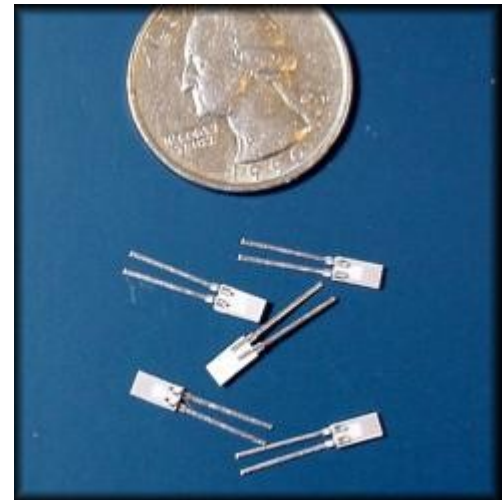
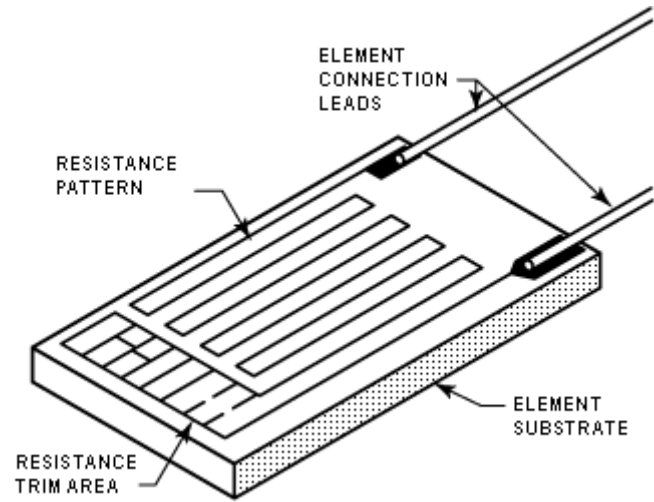
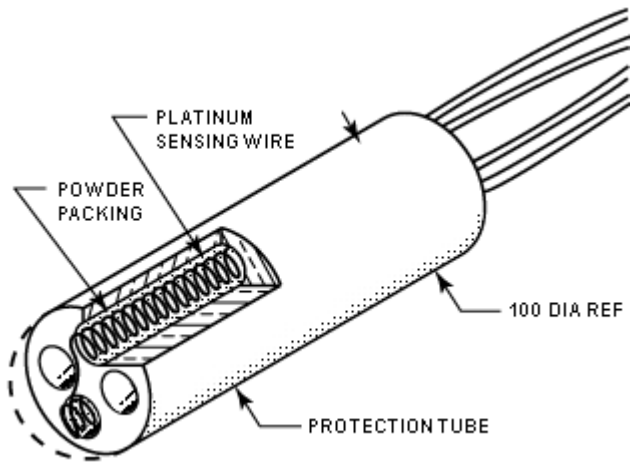
Helfrick, p.264

Materiais utilizados

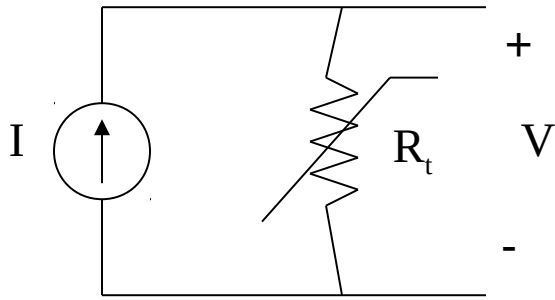
Tipo	Faixa de temperatura	Exatidão	Vantagem	Desvantagem
Platina	-170°C a + 750°C	±2°C	Baixo custo Alta estabilidade Larga faixa de operação	Tempo de resposta lento (15 s) Não tão linear quanto termômetros de cobre
Cobre	-180°C a + 110°C	±1°C	Alta linearidade Alta precisão nas redondezas da temperatura ambiente	Faixa de temperatura limitada
Níquel	0°C a + 60°C	±1°C	Alta estabilidade Duração longa Alta sensibilidade Alto coeficiente de temperatura	Não linear Faixa de temperatura limitada

Helfrick,p.264

Tipos de RTD



Circuito de Medição

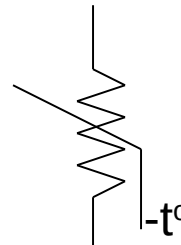
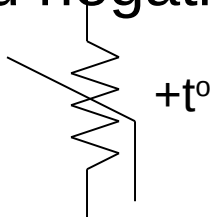


$$V = I \cdot R_t = I \cdot R_0 (1 + \alpha T)$$

- Quanto maior a corrente I , maior a sensibilidade
- A corrente I provoca um aquecimento no transdutor que pode levar a erros de medida na temperatura. Seu valor limite é definido pelas características de dissipação do RTD, fornecida pelo fabricante.
- De modo geral, a potência dissipada no RTD deve ser inferior a 10 mW.

Termistor

- Resistores baseados em materiais semicondutores que apresentam grande variação de resistência com a temperatura
- Podem possuir coeficiente de temperatura positivo (PTC) ou negativo (NTC)



PTC: resistência aumenta com T NTC: resistência diminui com T

- Materiais: óxidos metálicos: manganês, níquel, cobalto, cobre, ferro, urânio.
- Faixa dinâmica usual: -50 a 200 °C
- Resistência a 25 °C: 100 Ω a 10 M Ω

Modelo exponencial

$$R_t = R_o e^{(B/T - B/T_o)}$$

Onde:

R_o = resistencia na temperatura de referência

B = coeficiente exponencial do material (K)

T = temperatura (K)

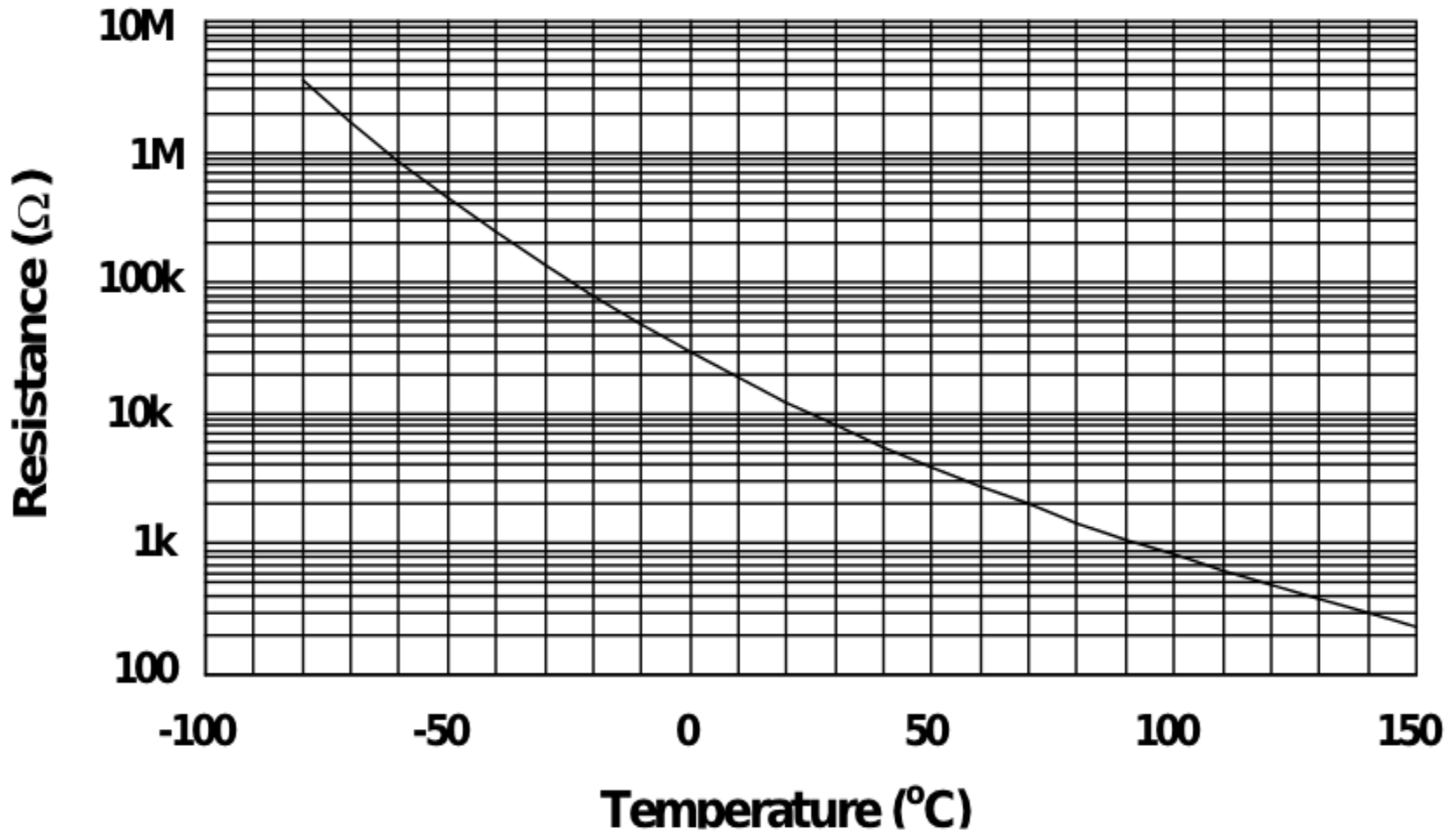
T_o = temperatura de referência em Kelvin

(ex: 0 °C → 273 K, 25 °C → 298 K)

Valores típicos de B : 3000 a 4500

NTC – Curva típica

Thermistor Resistance vs Temperature



Sensibilidade

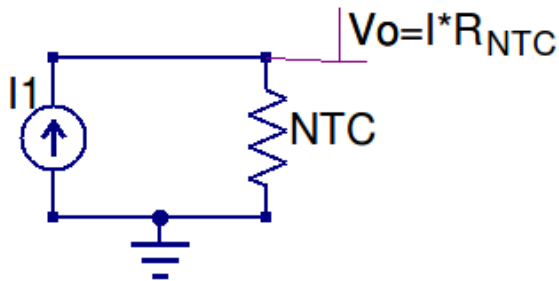
$$\alpha = dR_t / dT \quad \text{ou} \quad d\alpha/dT = dR_t / dT \cdot 1/R_t$$

$$\alpha = -B \cdot R_t / T^2 \quad \text{ou} \quad d\alpha/dT = -B / T^2$$

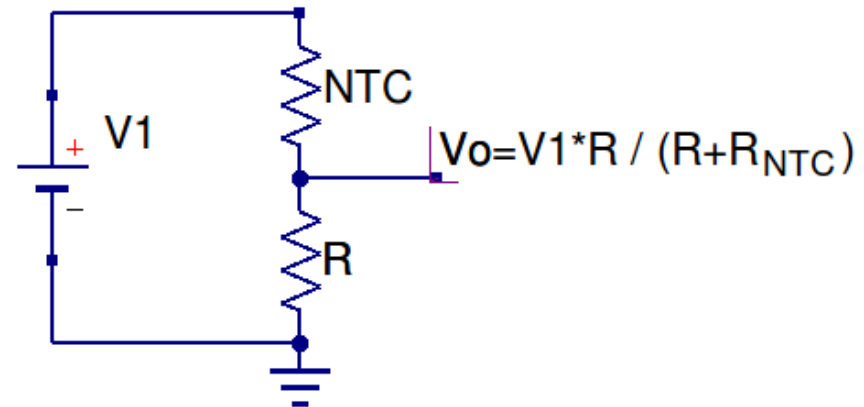
- O valor de α depende da temperatura (não linear)
- Sensibilidade Termistor \gg RTD $>$ Termopar

Circuitos de Medição

Alimentação com Fonte de Corrente



Alimentação com Fonte de Tensão



Linearização de Sensores Resistivos com Resposta Exponencial

- Sensores resistivos do tipo NTC, umidade, possuem variação exponencial da resistência com a grandeza
- Circuitos de linearização são utilizados de modo a aproximar a variação da resistência de uma função linear.
- O circuito mais simples consiste em um resistor de valor adequado em paralelo com o sensor

Determinação do resistor de linearização

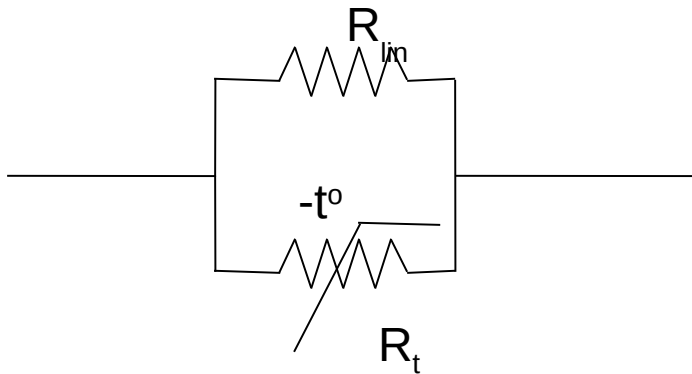
- Método do ponto de inflexão:
- toma-se a resistência do sensor no centro da faixa de utilização (R_{TC})
- Define-se neste ponto a inflexão da curva de resistência equivalente R_p .
- Igualando-se a zero a 2ª derivada de R_p obtém-se:

$$R_{lin} = R_{TC} \frac{B - 2T_c}{B + 2T_c}$$

onde:

- R_{TC} : resistência do sensor no centro da faixa
- T_c : centro da faixa de utilização
- B : coeficiente exponencial do sensor

Linearização com resistor paralelo

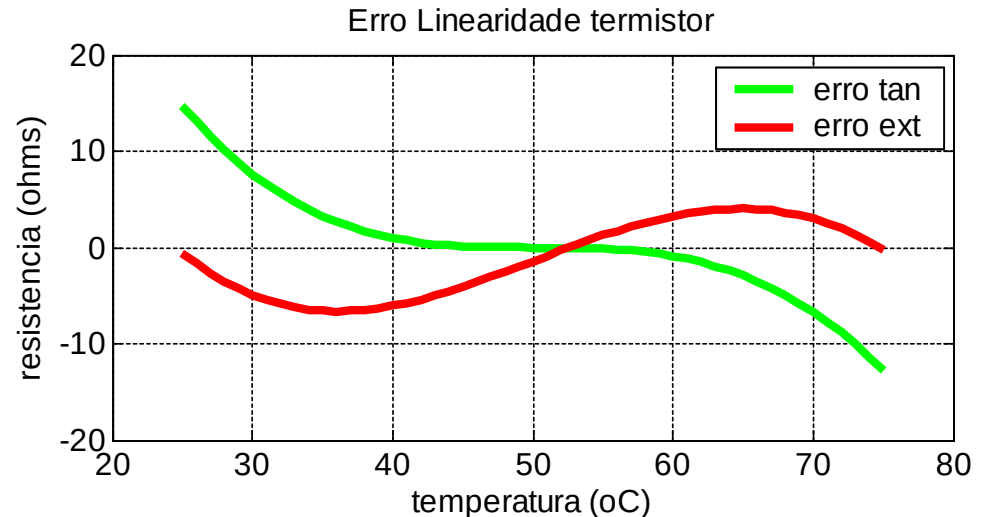
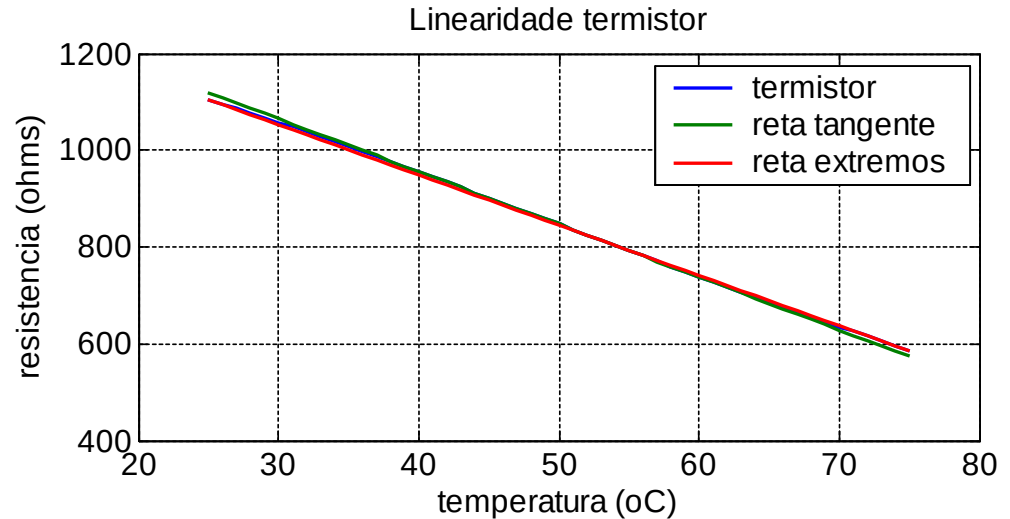


$$R_p = R_{lin} \times R_t / (R_{lin} + R_t)$$

$$R_t = R_0 \exp[B(1/T - 1/T_0)]$$

$$\frac{dR_p}{dT} = \frac{R_{lin}^2}{(R_{lin} + R_t)^2} \frac{dR_t}{dT}$$

$$\frac{dR_t}{dT} = \frac{-B \cdot R_t}{T^2}$$



Redução de sensibilidade

Para o sensor:

$$\frac{dR_t}{dT} = \frac{-B.R_t}{T^2}$$

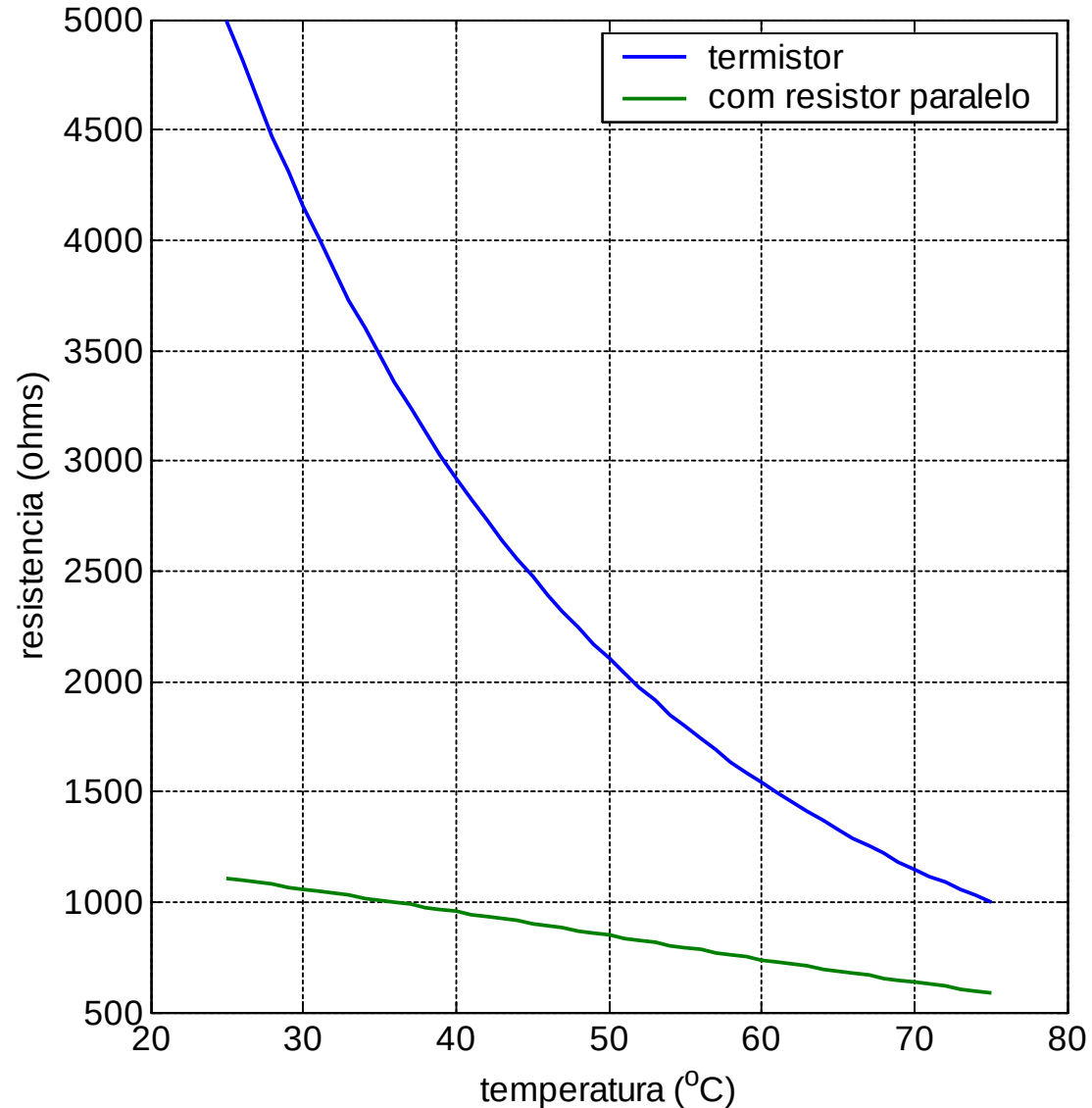
Para associação paralelo:

$$\frac{dR_p}{dT} = \frac{R_{lin}^2}{(R_{lin} + R_t)^2} \frac{dR_t}{dT}$$

$dR/dT = \text{constante}$

$$R_{lin}^2 < (R_{lin} + R_t)^2$$

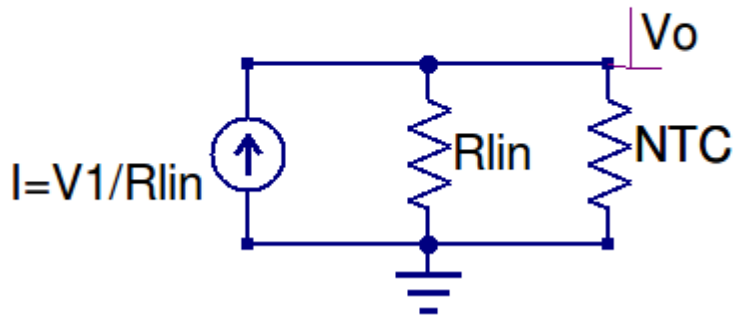
Linearidade termistor



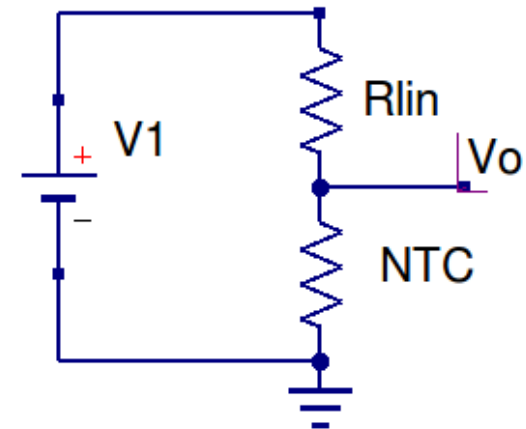
Equivalência Norton - Thévenin

- A conversão ΔR em ΔV pode ser feita em modo Norton (fonte de corrente e resistores em paralelo) ou no modo Thévenin (circuito divisor de tensão com o NTC e o resistor de linearização em séries):

Circuito Equivalente Norton



Circuito Equivalente Thévenin



- Dada a equivalência entre os dois circuitos, o resistor de linearização é calculado da mesma forma vista na seção anterior.
- Na prática a fonte de tensão é mais simples barata de ser implementada se comparada a uma fonte de corrente.
- Caso se queira uma tensão de saída diretamente proporcional à temperatura, a posição do NTC e Rlin devem ser trocadas.

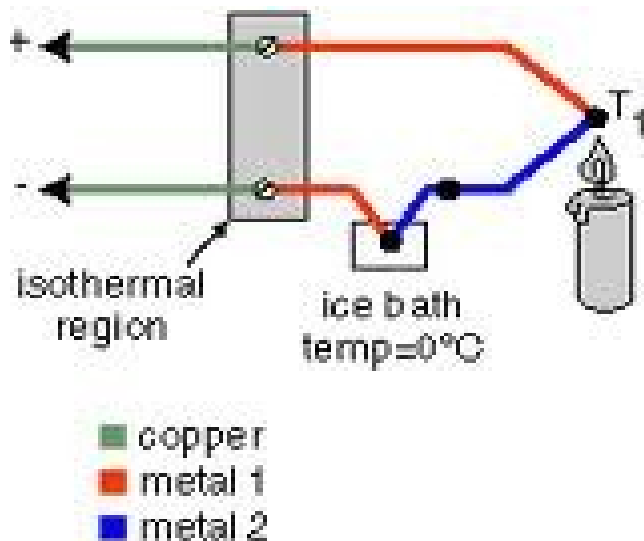
Exercício 1

Sabendo-se que a resistência de um NTC é $5\text{k}\Omega$ a 25°C e $1\text{k}\Omega$ a 75°C determine

- a) o valor de B e a resistência R_t a 40°C .
- b) o valor do resistor de linearização para uma faixa de temperatura de 0 a 80°C .
- c) a sensibilidade da tensão de saída (dV_o/dT) do conjunto no centro da faixa de temperatura (40°C) quando alimentado por uma fonte de tensão de 5 V (conectado como divisor de tensão).

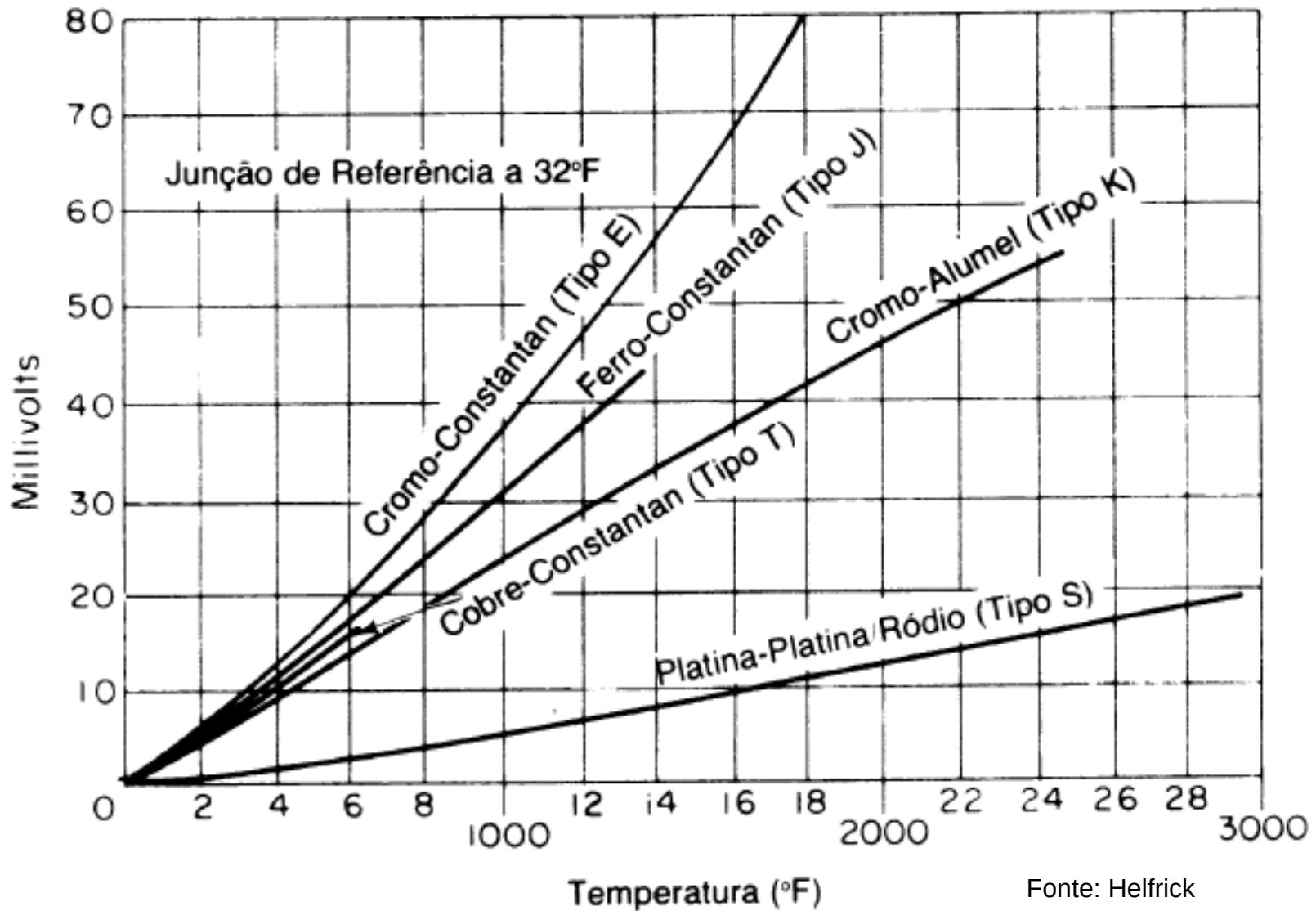
Termopar

- Descoberto por Thomas Seebeck, 1821 – efeito Seebeck
- 2 metais diferentes em contato exibem tensão variável com a temperatura na junção (difusão de elétrons)
- Coeficiente Seebeck dependente do material



<u>Material</u>	<u>Seebeck Coeff. *</u>	<u>Material</u>	<u>Seebeck Coeff. *</u>
Aluminum	3.5	Gold	6.5
Antimony	47	Iron	19
Bismuth	-72	Lead	4.0
Cadmium	7.5	Mercury	0.60
Carbon	3.0	Nichrome	25
Constantan	-35	Nickel	-15
Copper	6.5	Platinum	0

Tensão de saída

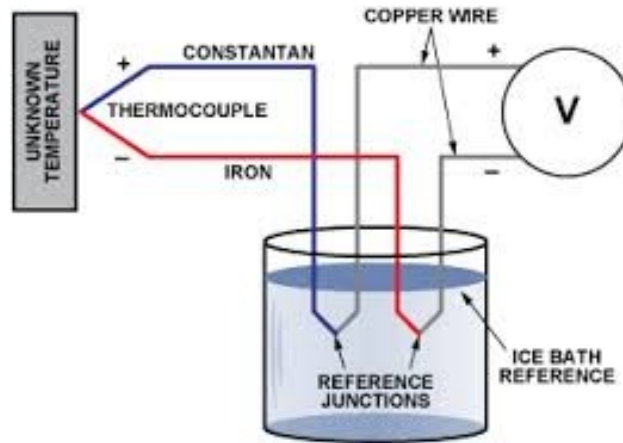


Fonte: Helfrick

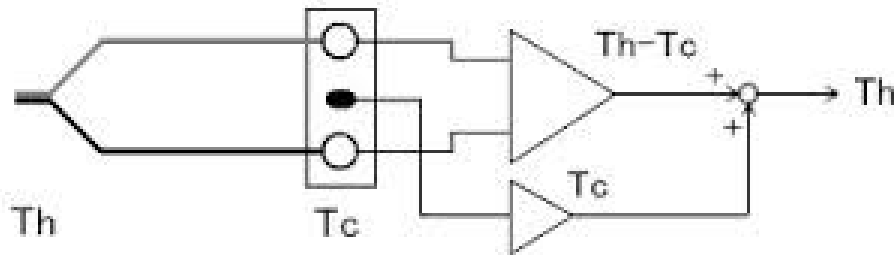
Compensação da junção fria (referência)

- junção entre os fios do termopar e os fios de cobre também possui efeito

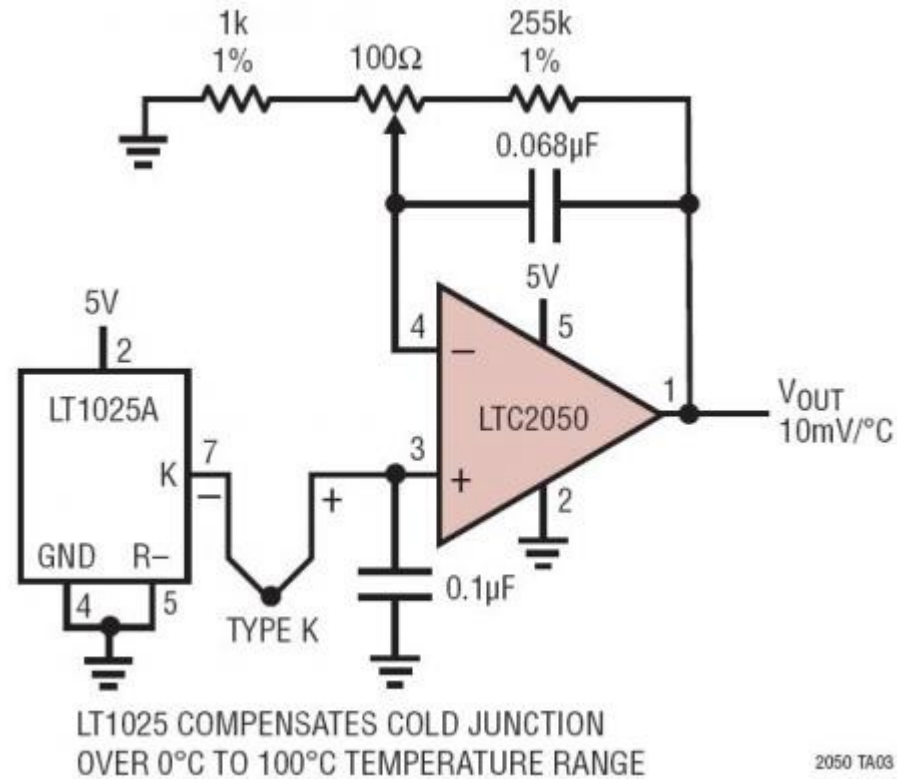
a)



b)



Circuito de medição



Junções Semicondutoras

- A característica de tensão (V_D) X corrente (I_D) de uma junção semicondutora varia com a temperatura

$$I_D = I_S \left[e^{\left(\frac{V_D}{nV_T} \right)} - 1 \right]$$

$$I_S(T) = I_S(T_0) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{n}} e^{\left[\frac{E_g(qTT_0)}{nk(T-T_0)} \right]} \quad V_T = \frac{kT}{q}$$

T: temperatura em K

Junções Semicondutoras

- Para uma junção polarizada com uma corrente constante $I_d \gg I_s$:

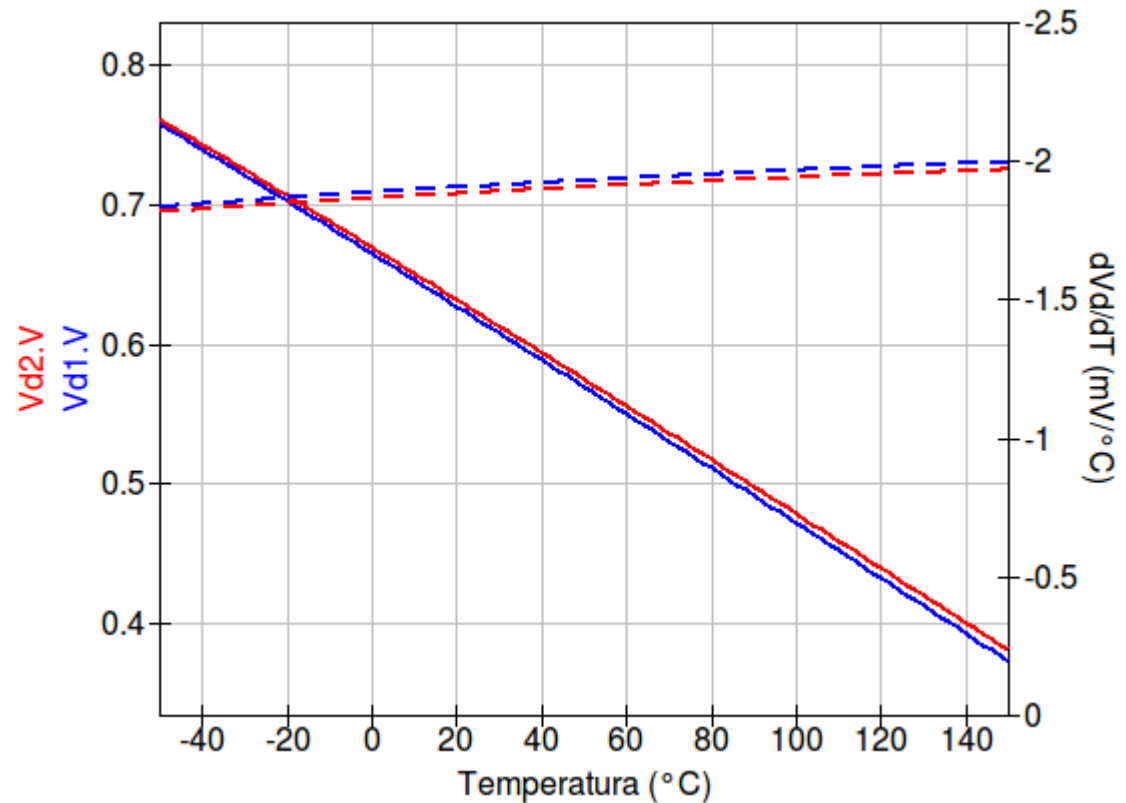
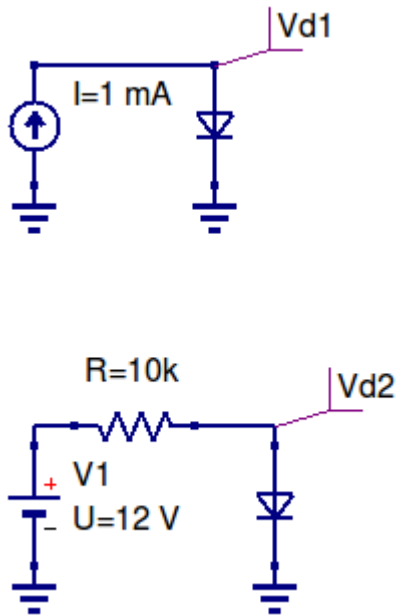
$$V_d = nV_T \ln \left(\frac{I_d}{I_s} \right)$$

$$\frac{dV_d}{dT} \approx -2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

Obs: V_T e I_s variam com a temperatura, sendo que a variação de I_s é não linear

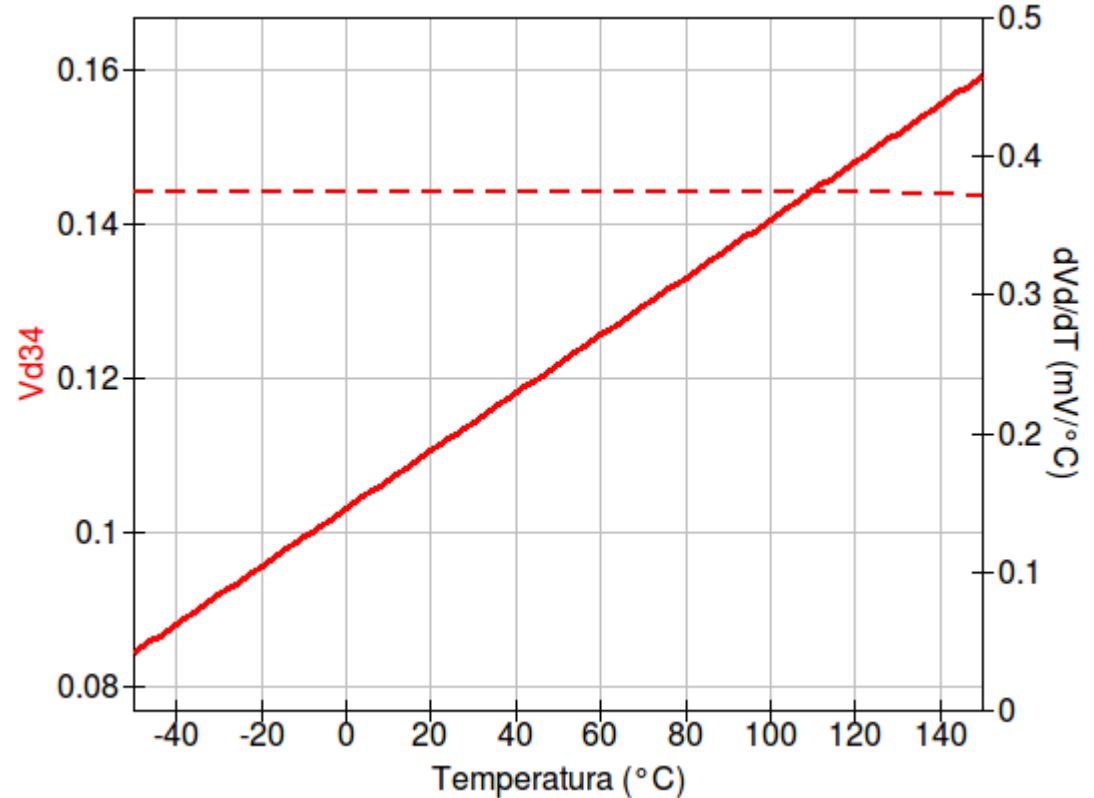
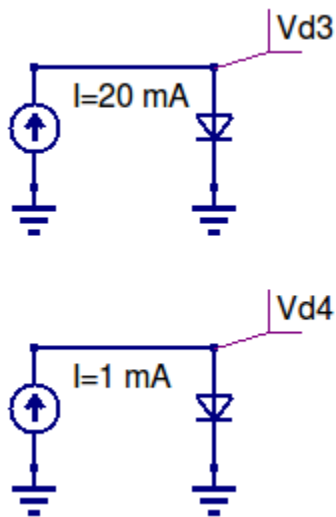
Junções Semicondutoras

- Circuitos práticos com diodos: junção polarizada com corrente constante



Junções Semicondutoras

- Circuitos práticos com diodos: PTAT (Proportional to Absolute Temperature)



Junções Semicondutoras

- Para $I_{d1} > I_{d2}$ e $I_{s1} = I_{s2} = I_s$:

$$V_{d1} - V_{d2} = nV_T (\ln I_{d1} - \ln I_s - \ln I_{d2} + \ln I_s) = nV_T \ln \left(\frac{I_{d1}}{I_{d2}} \right)$$

$$d \frac{(V_{d1} - V_{d2})}{dT} = \frac{nk}{q} \ln \left(\frac{I_{d1}}{I_{d2}} \right)$$

Junções Semicondutoras

- Circuitos Integrados baseados em PTAT:

Sensor	Manuf.	Output	Tolerance (range)	Package	Comments
AD22100	Analog Devices	22.5mV/°C at 5V 250mV offset	±2°C & ±4°C (-50 to +150°C)	TO-92 SO-8	Output ratiometric with supply voltage - good with ratiometric ADC's
AD22103	Analog Devices	28mV/°C (at 3.3V), 250mV offset	±2.5°C (0°C to +100°C)	TO-92 SO-8	Output ratiometric with supply voltage
LM135 LM235 LM335	National Semi, Linear Tech	10mV/°K or 10mV/°C	±2.7°C to ±9°C (-55°C to 150°C -40°C to 100°C)	TO-92 TO-46	Zener like operation with scale trim pin, 400µA
LM34	National Semi	10mV/°F	±3°F & ±4°F (-20°C to 120°C)	TO-46 TO-92 SO-8	Needs a negative supply for temperatures < -5°C
LM35	National Semi	10mV/°C	±1°C & ±1.5°C (-20°C to 120°C)	TO-46 TO-92 SO-8	Needs a negative supply for temperatures < 10°C
LM45	National Semi	10mV/°C 500mV offset	±1°C & ±1.5°C (-20°C to 120°C)	TO-46 TO-9 SO-8	LM35 with 500mV output offset
LM50	National Semi	10mV/°C 500mV offset	±3°C & ±4°C (-40°C to 125°C)	TO-46 TO-92 SO-8	Low cost part, 500mV off set, easy to use

Junções Semicondutoras

- Circuitos Integrados baseados em PTAT:
 - LM35

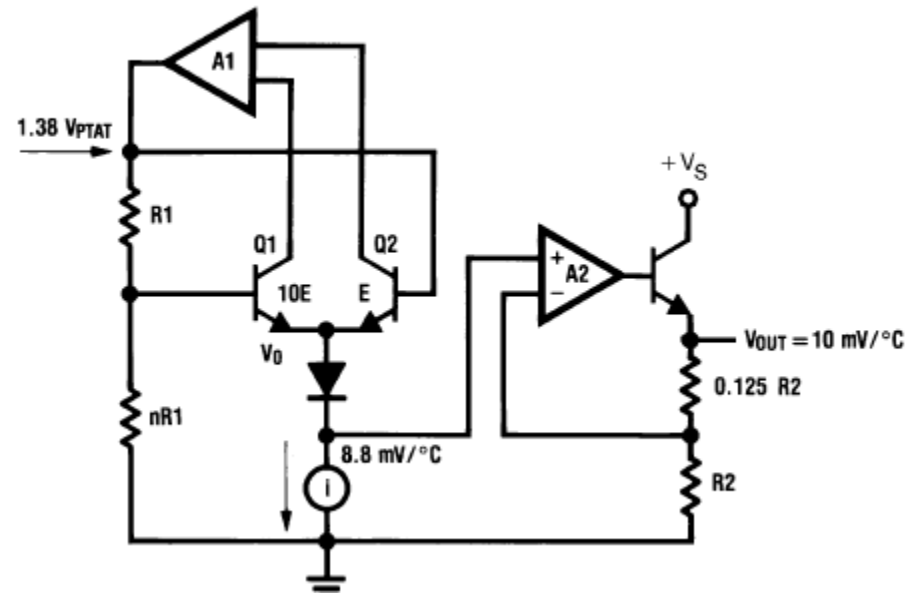
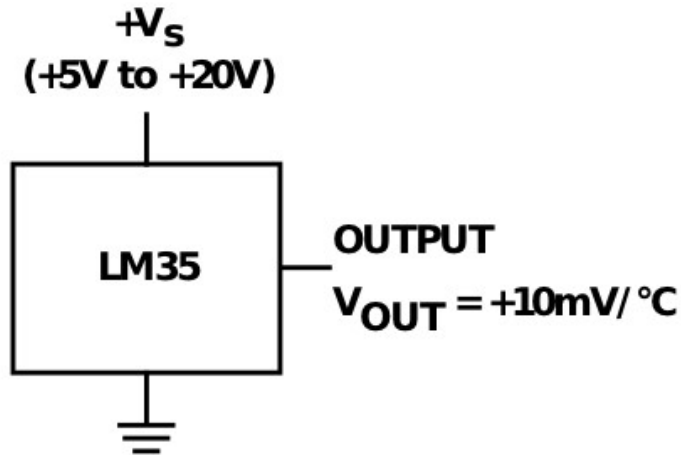


Tabela comparativa dos sensores de temperatura



	Termopar	RTD	Termistor	Semicondutor
Faixa de temperatura	-184°C a +2300°C	-200°C a +850°C	-50°C a +200°C	-55°C a +150°C
Sensibilidade	baixa	média	alta	média
Linearidade	média-alta	alta	baixa	alta
Exatidão	alta	média	média	média
custo	médio	médio	baixo	baixo
Obs	Necessita compensação de junção fria			

Exercício 2

O sensor de temperatura LM35 é baseado na topologia PTAT, e possui uma sensibilidade da tensão de saída em relação à temperatura $dV_o/dT=10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, com $V_o=0\text{V}$ para 0°C . Considerando o seu circuito simplificado como mostrado abaixo, pede-se:

- determine o ganho necessário ao amplificador diferencial para obter-se a sensibilidade especificada;
- a tensão de “off-set” necessária para que $V_o=0\text{V}$ quando $T=0^\circ\text{C}$.

Dados dos diodos: $D1=D2$; $I_s=1\times 10^{-10} \text{ A}$; $n=1,65$; $q=1,60\times 10^{-19}$; $k=1,38\times 10^{-23}$

