Medição de Temperatura

Dificuldades no estabelecimento de um padrão

Kelvin – O Kelvin, unidade de temperatura termodinâmica, é a fração 1/273.16 da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água.

Uma escala de temperatura

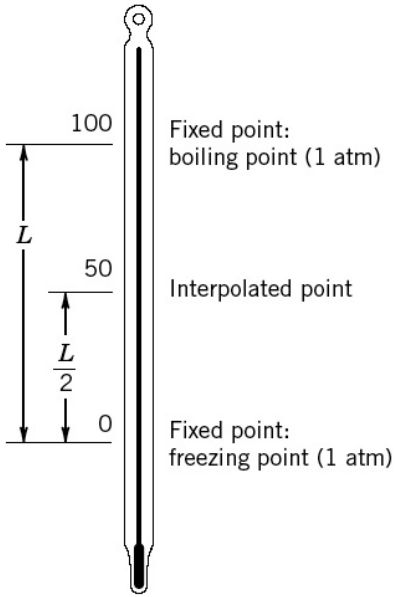
Definição da magnitude do grau
Pontos de referência fixos para o estabelecimento de temperaturas conhecidas
Meios para interpolação entre esses pontos

Temperaturas de pontos fixos e interpolação

Definição dos pontos fixos

Ponto triplo da água
0,01ºC
~32ºF

Pontos de mudança de fase de uma substância pura



Definição da escala

Pontos de interpolação variam com o material usado
Expansão pode não ser linear

Escalas de Temperatura e Padrões

Temperatura termodinâmica e absoluta

Comportamento energético de um gás ideal – definição de um zero absoluto

Definição de uma escala baseada em pontos fixos de temperatura e equipamentos padrões para a interpolação

Entre 13,8033 e 1234,93 K o padrão é um termômetro de resistência de platina.
Acima disso a temperatura é definida em termos da BBR, sem definição de instrumento.

Table 8.1 Temperature Fixed Points as Defined by ITS-90

	Temperature	
Defining State	K	C
Triple point of hydrogen	13.8033	−259.3467
Liquid–vapor equilibrium for hydrogen at 25/76 atm	≈17	≈−256.15
Liquid–vapor equilibrium for hydrogen at 1 atm	≈20.3	≈−252.87
Triple point of neon	24.5561	−248.5939
Triple point of oxygen	54.3584	−218.7916
Triple point of argon	83.8058	−189.3442
Triple point of water	273.16	0.01
Solid–liquid equilibrium for gallium at 1 atm	302.9146	29.7646
Solid–liquid equilibrium for tin at 1 atm	505.078	231.928
Solid–liquid equilibrium for zinc at 1 atm	692.677	419.527
Solid–liquid equilibrium for silver at 1 atm	1234.93	961.78
Solid–liquid equilibrium for gold at 1 atm	1337.33	1064.18
Solid–liquid equilibrium for copper at 1 atm	1357.77	1084.62

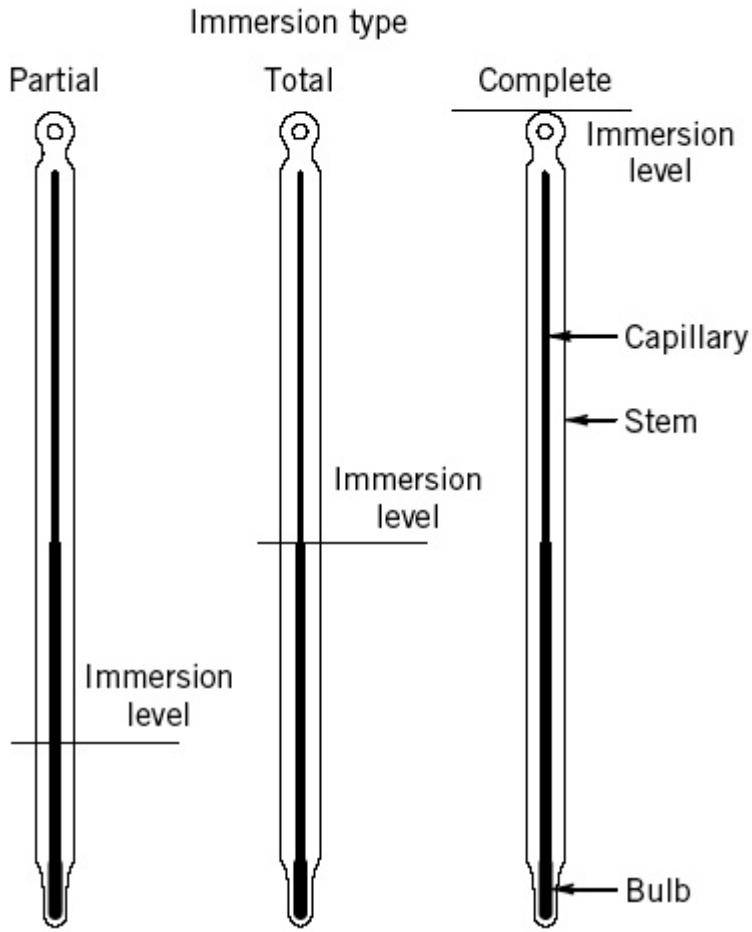
Termometria baseada em expansão térmica

Variação do tamanho dos materiais com a temperatura

Termômetros de bulbo de líquido

Variação do volume total do fluido com a temperatura causa alteração de nível perceptível no capilar

Calibração depende do modo de utilização (figura)



Termometria baseada em expansão térmica

Variação do tamanho dos materiais com a temperatura

Termômetros bimetálicos

Sensores contruídos a partir de metais com diferentes coeficientes de dilatação térmica

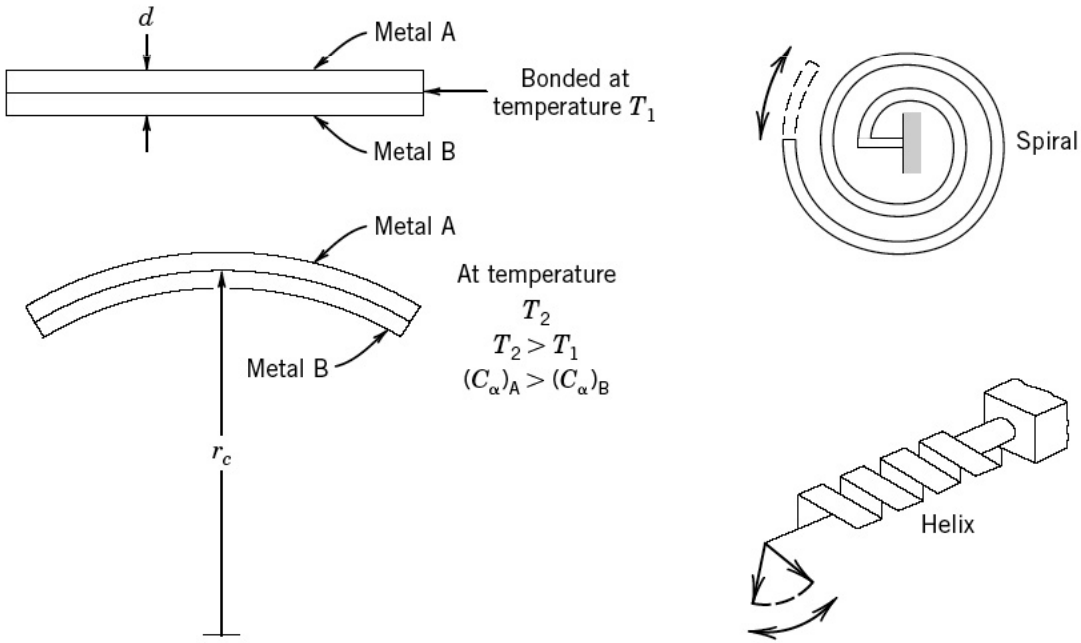


Figure 8.3 Expansion thermometry: bimetallic strip.

Termometria de Resistência Elétrica

Variação da resistência de um condutor ou semicondutor $R = \frac{\rho_e l}{A}$

Termômetros de resistência

Fio de metal montado em uma estrutura isolante de sustentação
Minimização de deformações mecânicas
Encapsulamento para minimizar efeitos externos

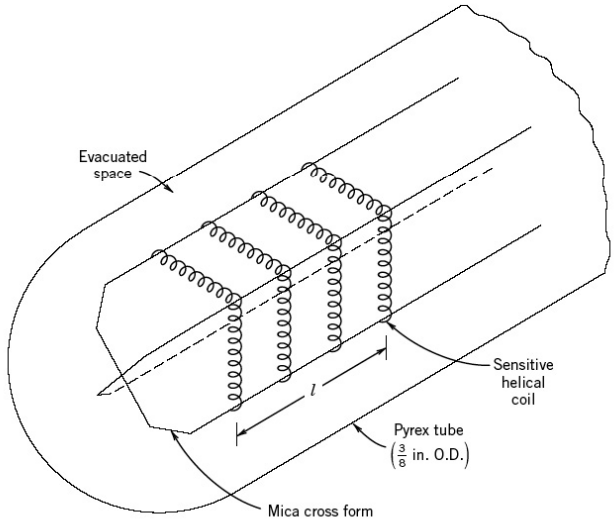


Figure 8.4 Construction of a platinum RTD.

$$R = R_0\left[1 + \alpha\left(T - T_0\right) + \beta\left(T - T_0\right)^2 + \ldots\right]$$

Termometria de Resistência Elétrica

Termômetros de resistência

$$R = R_0\left[1+\alpha\left(T-T_0\right)+\beta\left(T-T_0\right)^2+\ldots\right]$$

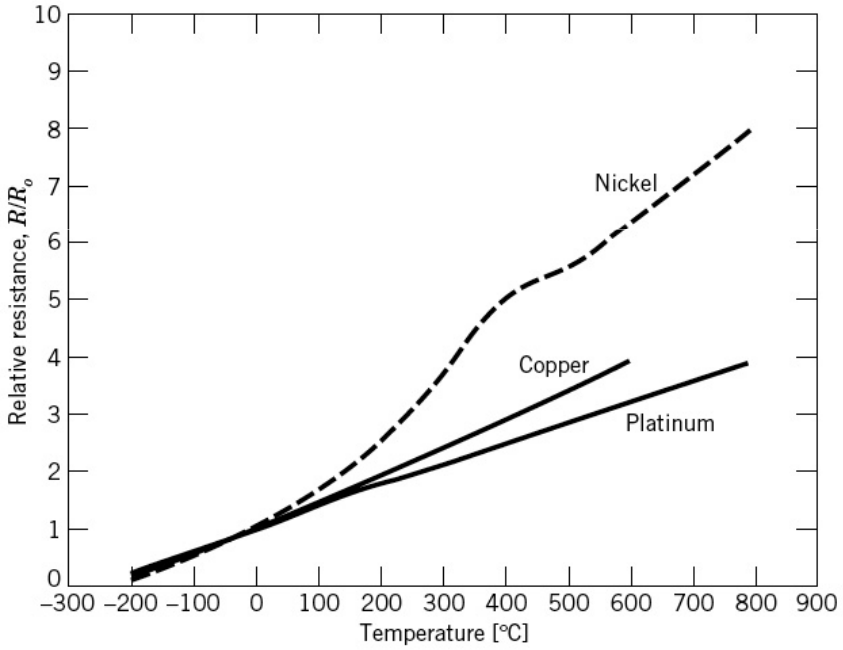


Figure 8.5 Relative resistance of several pure metals (R_o at 0°C).

Table 8.2 Temperature Coefficient of Resistivity for Selected Materials at 20°C

Substance	$\alpha[°C^{-1}]$
Aluminum (Al)	0.00429
Carbon (C)	−0.0007
Copper (Cu)	0.0043
Gold (Au)	0.004
Iron (Fe)	0.00651
Lead (Pb)	0.0042
Nickel (Ni)	0.0067
Nichrome	0.00017
Platinum (Pt)	0.003927
Tungsten (W)	0.0048
Thermistors	−0.068 to +0.14

Sensor de Platina

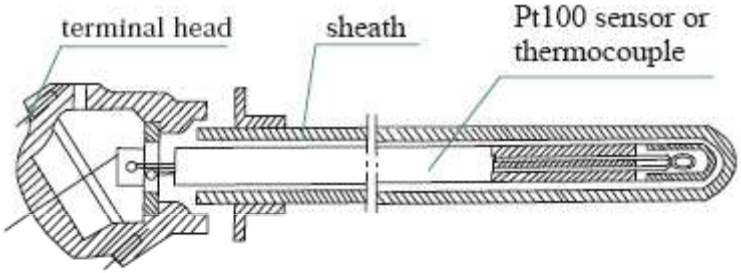
$$R = R_0\left[1+\alpha\left(T-T_0\right)\right]$$

$$\pm 0{,}3\%\left(0-200^{o}C\right)$$

$$\pm 1{,}2\%\left(200-800^{o}C\right)$$

Pt100

T [°C]	R [Ω]	T [°C]	R [Ω]	T [°C]	R [Ω]	T [°C]	R [Ω]
–200	18.52	50	119.40	250	194.10	600	313.71
–100	60.26	100	138.51	300	212.05	700	345.28
–50	80.31	150	157.33	400	247.09	800	375.70
0	100.00	200	175.86	500	280.98	850	390.48



Medida do valor de resistência

Métodos de três e quatro fios

Compensação da resistência dos condutores de ligação

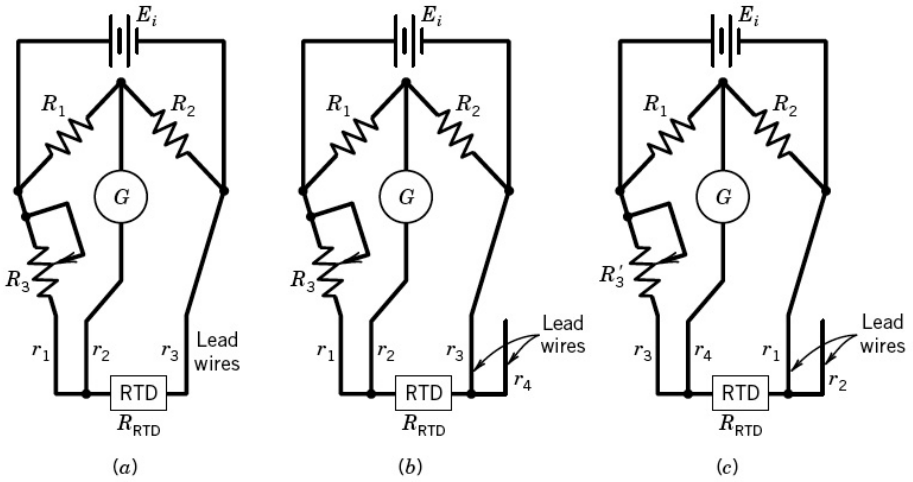
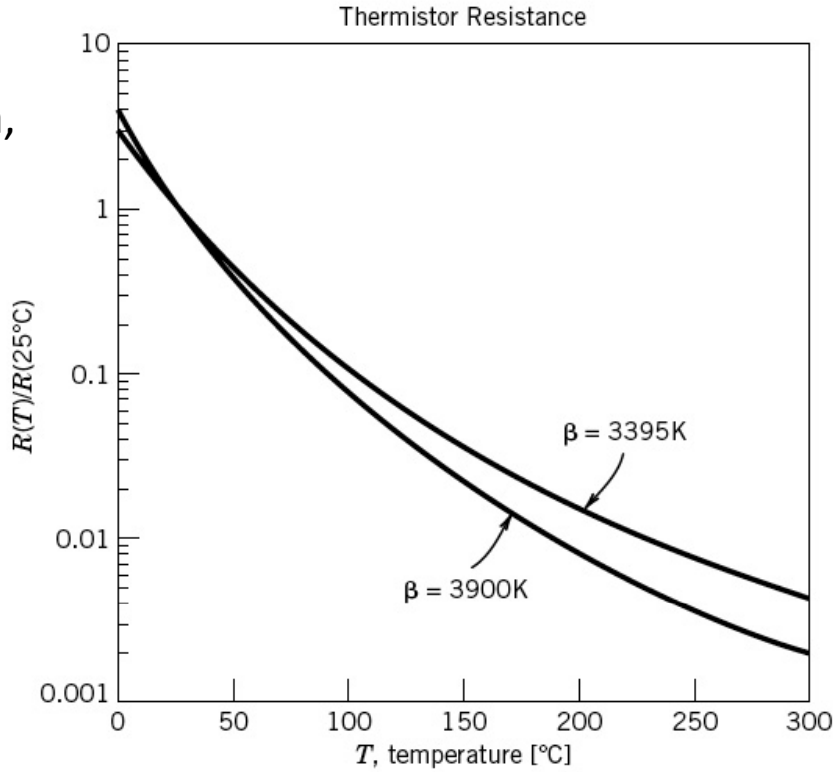


Figure 8.6 Bridge circuits. Average of the two readings (in b and c) eliminates the effect of lead wire resistances.

Termistor

Sensor com resistência dependente de temperatura, fabricado de material semicondutor.

$$R = R_0 e^{\beta\left(1/T - 1/T_0\right)}$$



Maior sensibilidade
Menor tempo de resposta
Variação de características em altas temperaturas

Efeito de auto-aquecimento

Constante de dissipação

$$\delta = \frac{P}{T - T_\infty}$$

Potência fornecida ao termistor

Temperatura do termistor

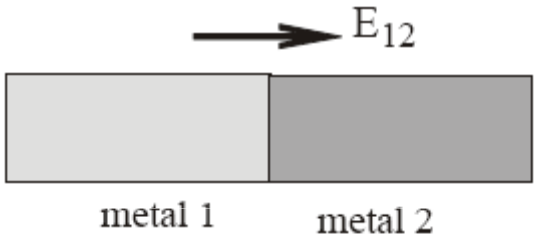
Temperatura ambiente

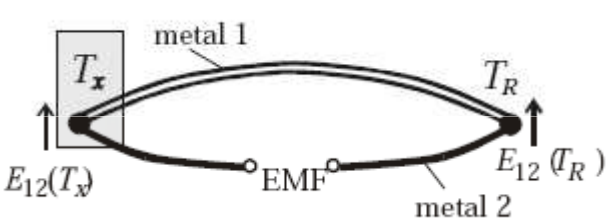
Medição Termoelétrica de Temperatura

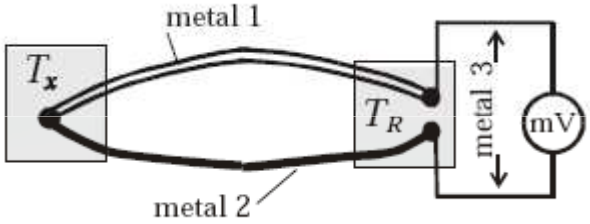
Termopar

Junção de dois metais (ou ligas metálicas) forma um potencial de contato que depende da temperatura.

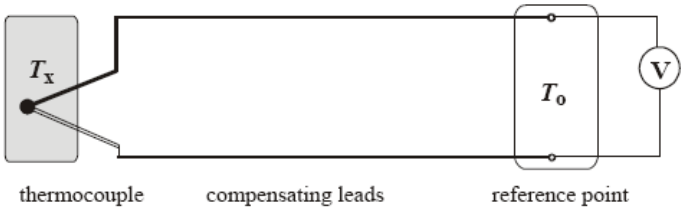
$$E_{12} = \frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right)$$







$$\text{EMF} = E_{\text{EMF}} = E_{12}(T_x) - E_{12}(T_R) = \frac{k_B}{e}(T_x - T_R) \times \ln(N_1/N_2)$$



$$\text{EMF} = E_{\text{EMF}} = k_T(T_x - T_R)$$

Termopar

Efeito Seebeck: geração de um potencial elétrico de tensão em um circuito aberto

Coeficiente de Seebeck entre dois materiais

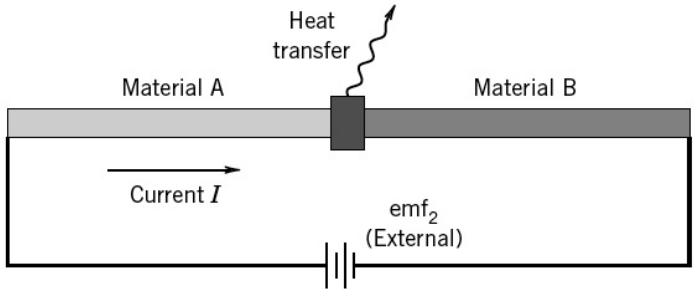
Não há circulação de corrente!!!

$$\alpha_{AB} = \left[\frac{\partial(fem)}{\partial T}\right]_{circuito_aberto}$$

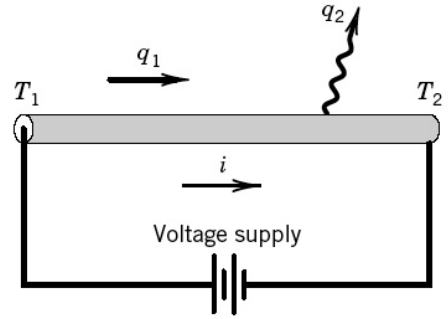
Com circulação de corrente:

Outros efeitos influenciam na medição de temperatura

Efeito Peltier



Efeito Thompson



q_1 Energy flow as a result of a temperature gradient
q_2 Heat transfer to maintain constant temperature

Termopares

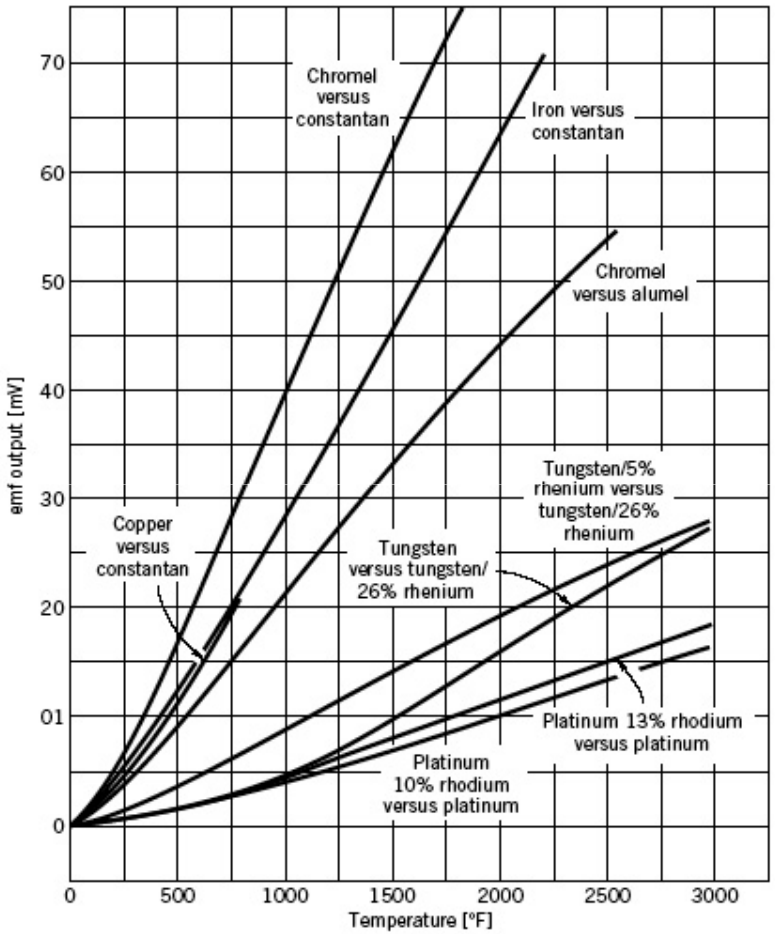


Figure 8.18 Thermocouple voltage output as a function of temperature for some common thermocouple materials. Reference junction is at 0°C. (From R. P. Benedict, *Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurements*, 3d ed., copyright © 1984 by John Wiley and Sons, New York. Reprinted by permission.)

Table 8.4 Thermocouple Designations

	Material Combination		
Type	Positive	Negative	Applications
E	Chromel(+)	Constantan(−)	Highest sensitivity (<1000°C)
J	Iron(+)	Constantan(−)	Nonoxidizing environment (<760°C)
K	Chromel(+)	Alumel(−)	High temperature (<1372°C)
S	Platinum/ 10% rhodium	Platinum(−)	Long-term stability high temperature (<1768°C)
T	Copper(+)	Constantan(−)	Reducing or vacuum environments (<400°C)

Table 8.5 Standard Thermocouple Compositions[a]

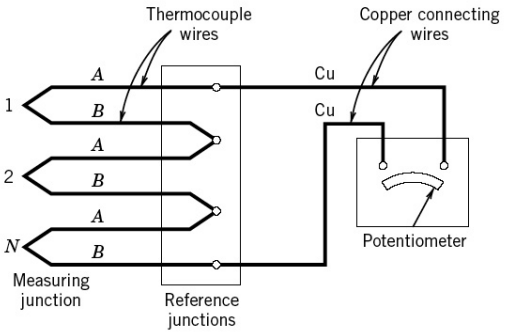
	Wire		
Type	Positive	Negative	Expected Systematic Error[b]
S	Platinum	Platinum/10% rhodium	±1.5°C or 0.25%
R	Platinum	Platinum/13% rhodium	±1.5°C
B	Platinum/30% rhodium	Platinum/6% rhodium	±0.5%
T	Copper	Constantan	±1.0°C or 0.75%
J	Iron	Constantan	±2.2°C or 0.75%
K	Chromel	Alumel	±2.2°C or 0.75%
E	Chromel	Constantan	±1.7°C or 0.5%

Alloy Designations
Constantan: 55% copper with 45% nickel
Chromel: 90% nickel with 10% chromium
Alumel: 94% nickel with 3% manganese, 2% aluminum, and 1% silicon

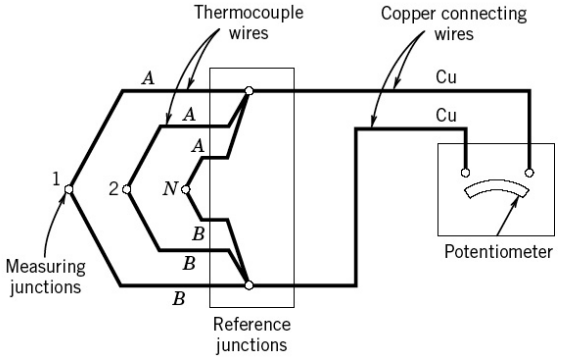
[a]From Temperature Measurements ANSI PTC 19.3-1974.
[b]Use greater value; these limits of error do not include installation errors.

Combinações de Termopares

Termopilha



Termopares em paralelo



Compensação da junção parasita

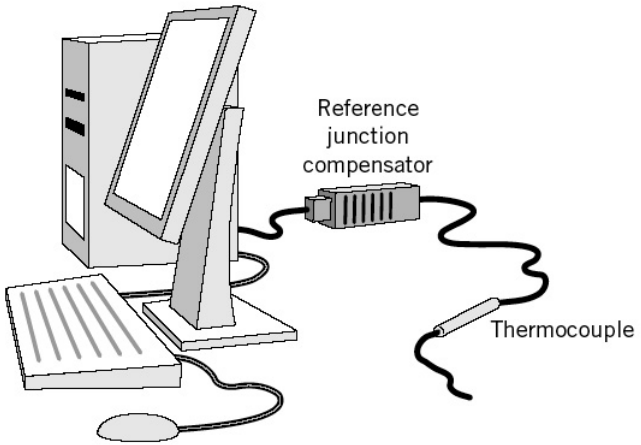
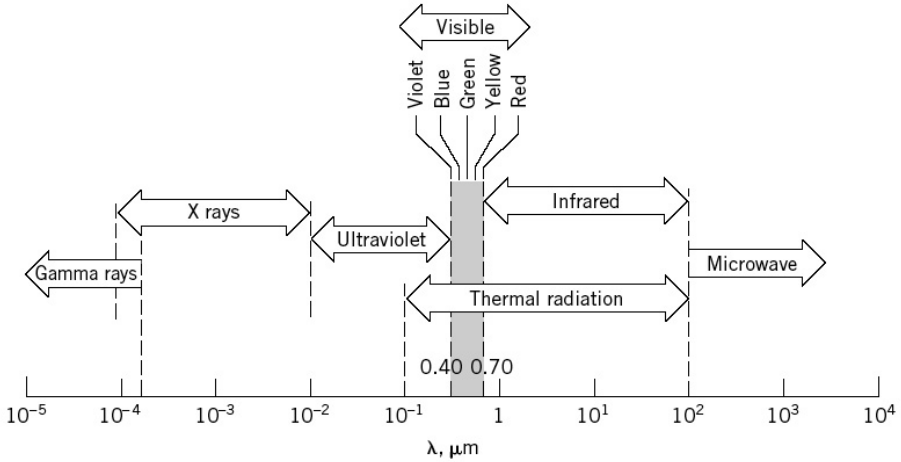


Figure 8.23 PC-based temperature measurement system.

Medição de Temperatura Radiante



Radiação de corpo negro (BBR)

Radiação emitida por um objeto a uma dada temperatura

Aproximação de corpo negro

$$E = KT^4$$

$$E_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5[e^{hc/k\lambda T} - 1]}$$

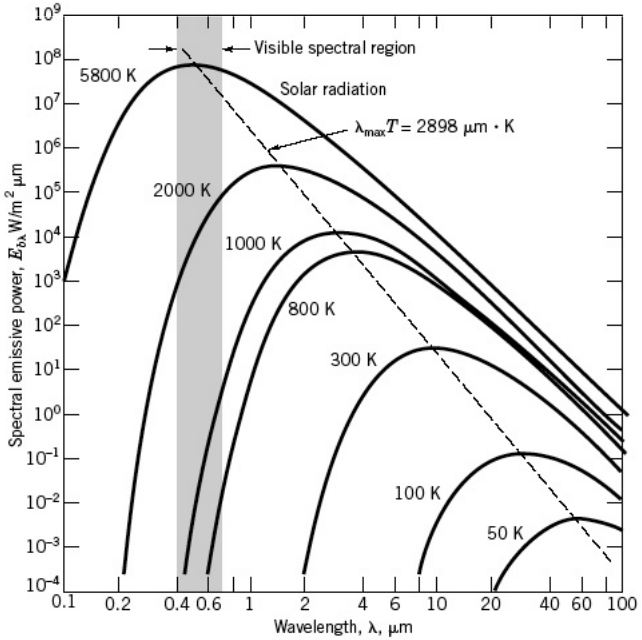
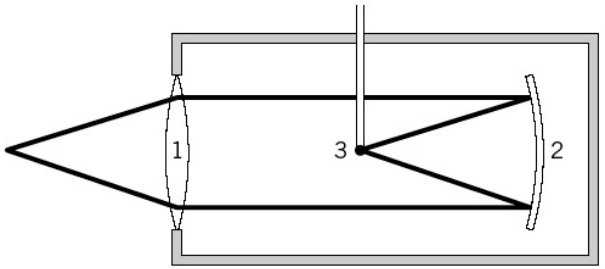
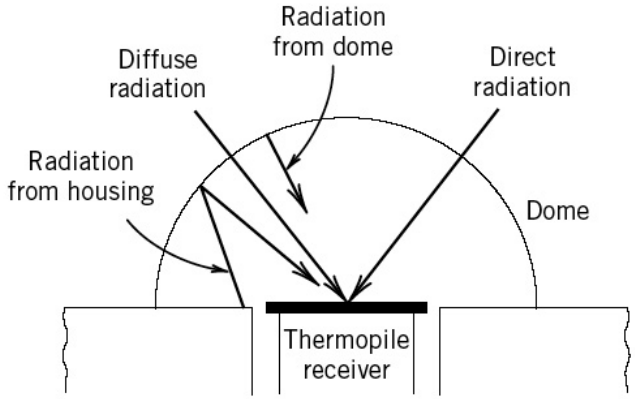


Figure 8.25 Planck distribution of blackbody emissive power as a function of wavelength. (From F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 2d ed., copyright © 1985 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission.)

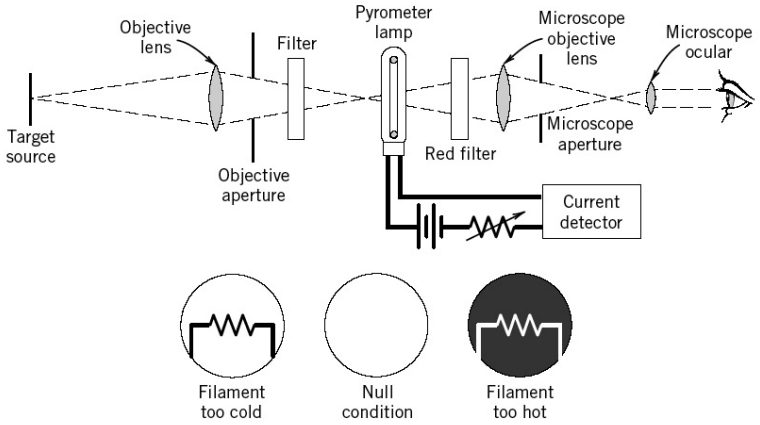
Sensores de temperatura por radiação

Detecção por aquecimento de um elemento sensor - temperatura





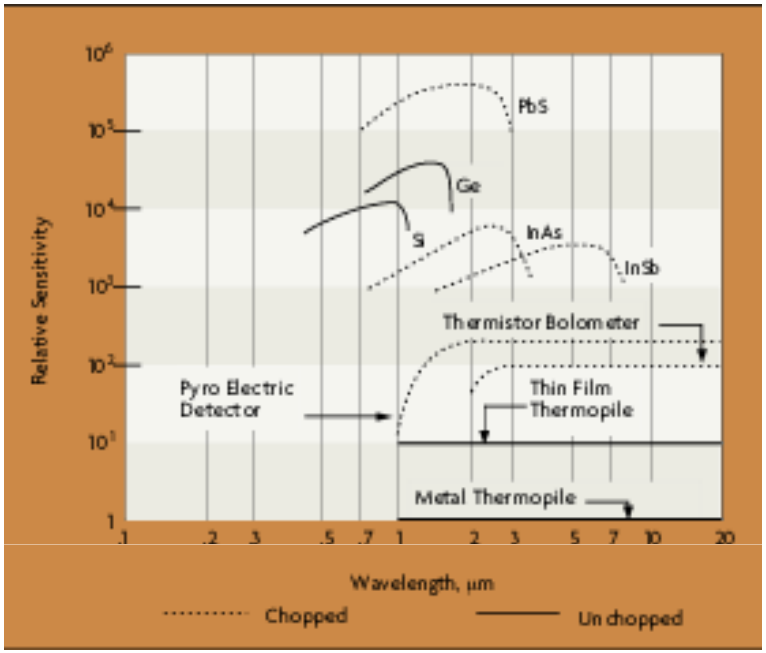
Pirometria – Desaparecimento do filamento

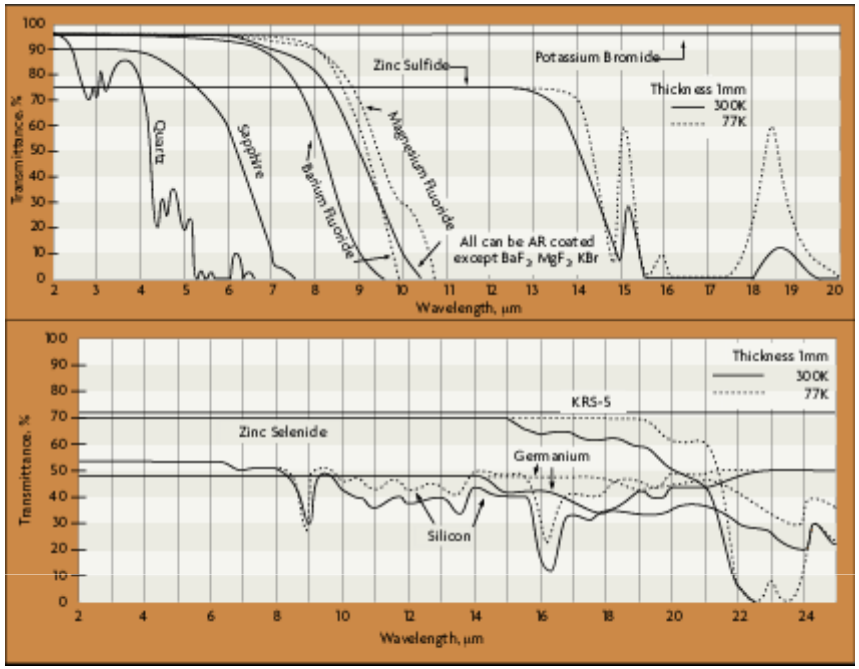


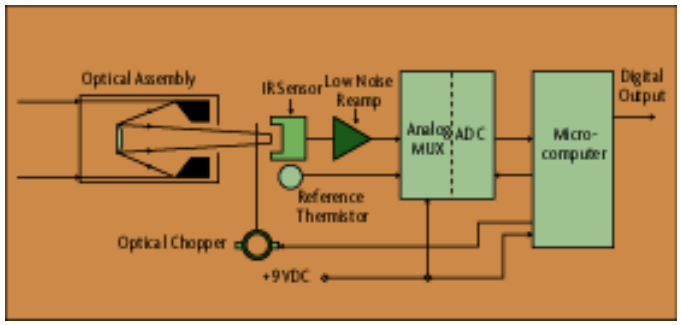
Appearance of lamp filament in eyepiece of optical pyrometer.

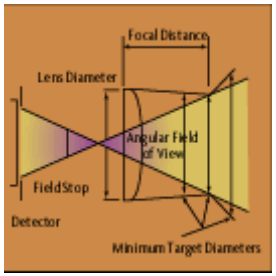
Figure 8.28 Schematic diagram of a disappearing filament optical pyrometer.

Detecção óptica



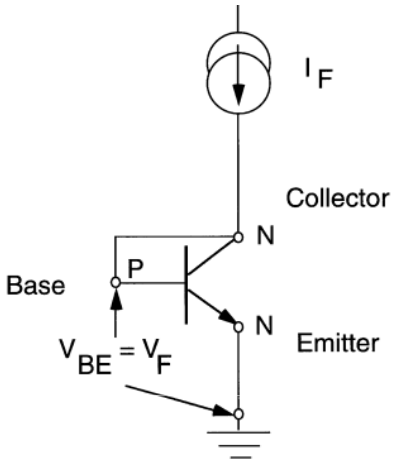


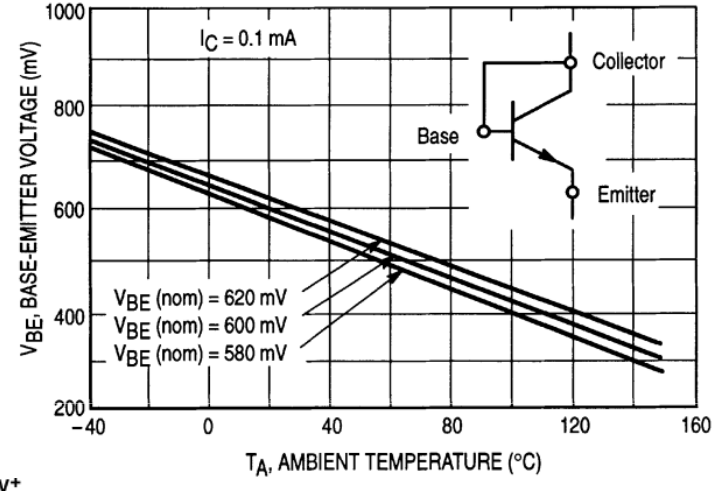


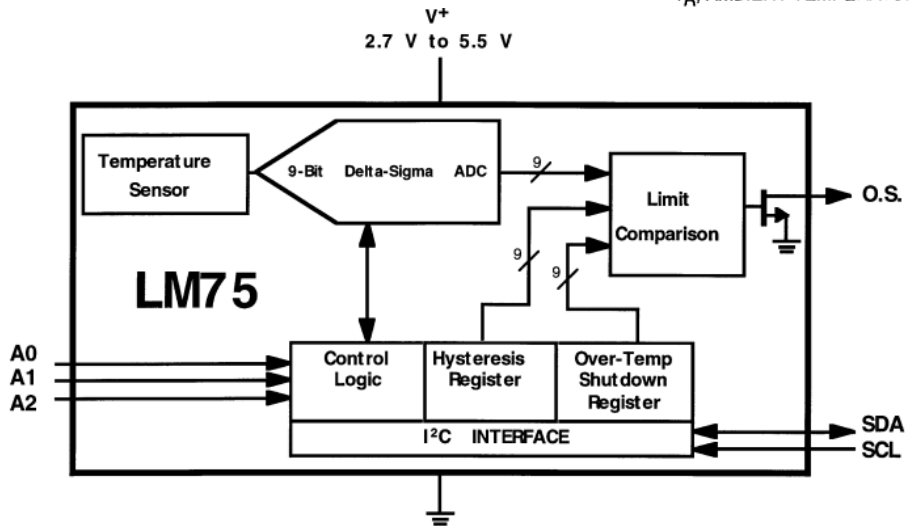


http://www.omega.com/literature/transactions/volume1/thermometers3.html

Termômetros de junção semicondutora







Erros de medição de temperatura

Erros de inserção – Ambiente que rodeia a sonda de temperatura

Erros de condução

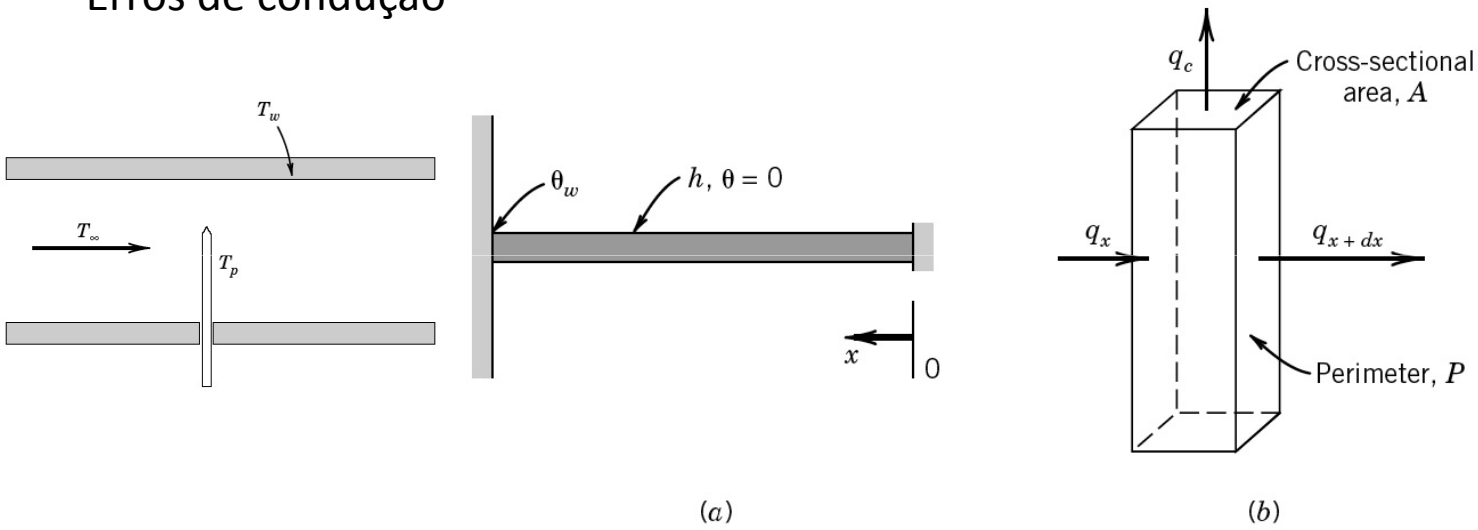


Figure 8.31 Model of a temperature probe as a one-dimensional fin.

Minimização da seção transversal da sonda e máxima inserção no ambiente