

Medição de Temperatura

CARLOS FREDERICO MESCHINI ALMEIDA

Introdução

- ✓ A **Temperatura (T)** é uma das variáveis mais medidas e comuns nos processos industriais e manufaturas
- ✓ Os processos que são afetados pela **Temperatura** são denominados de processos térmicos

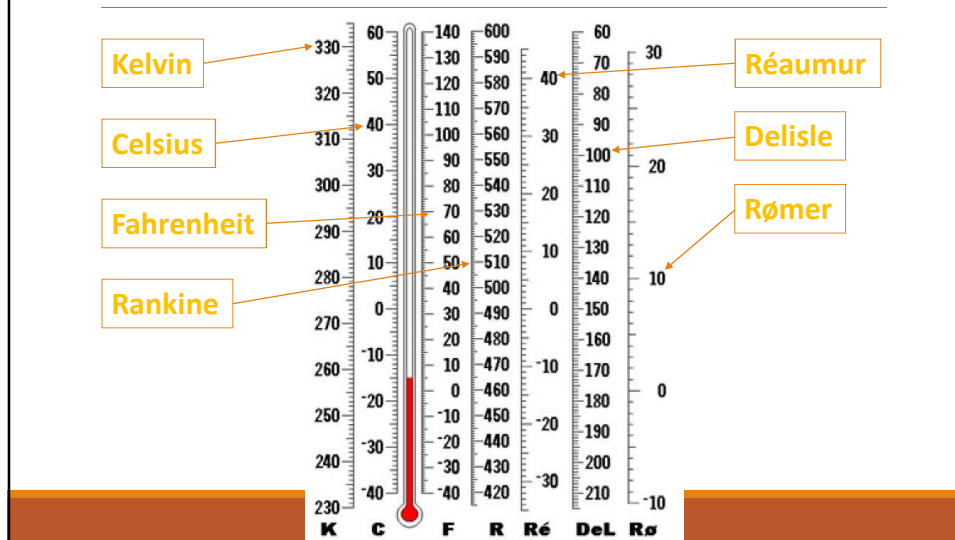
Definições

- ✓ Movimento molecular cria calor, conhecido como energia térmica
- ✓ **Temperatura** é medida da energia cinética média das partículas que compõem um corpo
 - Quanto maior é a energia cinética das partículas, maior será a **Temperatura** do corpo
- ✓ **Temperatura** é a capacidade de um corpo transferir a energia térmica para outro corpo
 - Se dois corpos estão em equilíbrio térmico e não é trocada energia térmica entre ambos, os corpos estão na mesma **Temperatura**
- ✓ Zero absoluto
 - 0° ou K = -273,15°C
 - Não há movimento molecular → não é produzido calor

Escala de Medição

- ✓ Existem 4 escalas usadas para medir **Temperatura**
- ✓ **Celsius e Fahrenheit**
 - São as mais usadas no cotidiano
 - $[K] = [^{\circ}\text{C}] + 273,15$
- ✓ **Kelvin e Rankine**
 - São usadas quando trabalhamos em escala absoluta (comumente empregada em engenharia e em pesquisas)
 - $[^{\circ}\text{R}] = [^{\circ}\text{F}] + 459,67$
- ✓ Conversão: $T_{(^{\circ}\text{C})} = \frac{5^{\circ}\text{C}}{9^{\circ}\text{F}} (T_{(^{\circ}\text{F})} - 32^{\circ}\text{F})$

Escala de Medição



Medição de Temperatura

- ✓ Tal como outras medições de variáveis do processo, os dispositivos de medição são divididos em 3 categorias:
 - Indicadores
 - Sensor/Transdutor
- ✓ O design e construção desses dispositivos são baseados segundo:
 - A forma de como os diferentes materiais reagem quando estão sujeitos ao calor
 - Ao tipo de medição requerida (somente indicação, medição de pontos, saída análoga, etc.)

Transferência de Calor

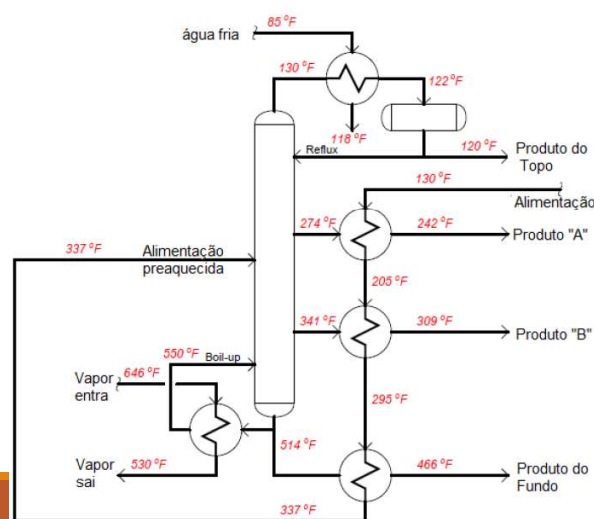
- ✓ A quantidade de calor necessária para elevar ou baixar a temperatura de uma dada massa de um corpo pode ser calculada a partir da seguinte equação

$$Q = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1)$$

- ✓ Formas de Transferência

- Calor por condução: $Q = -\frac{k \cdot A}{L} \cdot (T_2 - T_1)$
- Calor por convecção: $Q = h \cdot A \cdot (T_2 - T_1)$
- Calor por radiação: $Q = C \cdot A \cdot (T_2^4 - T_1^4)$

Aplicações



Instrumentos de Medição de Temperatura

✓ Existem vários métodos de medição da temperatura que podem ser classificados do seguinte modo:

1. Expansão de um material para dar uma indicação visual, pressão, ou mudança dimensional (dispositivos de expansão de líquido)
2. Mudança de resistência elétrica (RTD, termistor)
3. Semicondutor alteração de característica
4. Tensão gerada por metais diferentes (termopares)
5. Energia irradiada (pirômetros)

Termômetros de Dilatação

✓ Este tipo de termômetro é baseado no fundamento teórico de quando um líquido é aquecido seu volume ou pressão mudará proporcionalmente à temperatura

✓ Há 2 tipos:

- Termômetro de tubo de vidro
- Sistema térmico de preenchimento

Termômetros à Dilatação de Líquidos

- ✓ Os materiais líquidos se dilatam com aquecimento e se contraem com o resfriamento, segundo uma lei de expansão volumétrica a qual relaciona seu volume com a temperatura e o coeficiente de expansão que é próprio de cada material

$$V_T = V_0[1 + \beta_1 \cdot \Delta T + \beta_2 \cdot \Delta T^2 + \beta_3 \cdot \Delta T^3]$$

Em que:

- T=Temperatura do líquido em °C.
- V_0 = Volume do líquido a temperatura inicial de referência °C.
- V_T = Volume do líquido na temperatura T.
- β_1 , β_2 e β_3 = Coeficiente de expansão do líquido em °C⁻¹.
- $\Delta T = T - T_0$.

Termômetros à Dilatação de Líquidos

Coeficiente de dilatação de líquidos

$$V(T) = V_0(1 + aT + bT^2 + cT^3)$$

$$dV/dT = a + 2bT + 3cT^2$$

$$0.81 < a < 1.57 \times 10^{-3}$$

Table 10-42
COEFFICIENTS OF CUBICAL EXPANSION FOR VARIOUS
LIQUIDS AND AQUEOUS SOLUTIONS

See also the table *Coefficients of Cubical Expansion For Various Solids*.
If V_1 is the volume at 0°C, then the volume at $t^\circ\text{C}$ is $V_t = V_1(1 + a t + b t^2 + c t^3)$. When the compound is marked with * the basic volume is not that at 0°C, but at some other temperature, t_0 . The equation then reads $V_t = V_1(1 + a(t - t_0) + b(t - t_0)^2 + c(t - t_0)^3)$. In the case of aqueous solutions, the concentrations in percent are given after the name.

Liquid	Coef. of Exp. $\times 10^3$	Range °C	$a \times 10^3$	$b \times 10^6$	$c \times 10^9$
Acetic acid	1.071	16 to 107	1.063	-0.10530	1.0870
Acetone	1.487	0 to 54	1.324	3.809	-0.8763
Allyl alcohol	1.049	0 to 64	0.9749	1.8735	0.56450
Allyl bromide	1.241	0 to 69	1.2275	-0.44385	2.5843
Allyl ether	1.475	0 to 44	1.2018	0.379	-4.1819
Allyl iodide	1.346	0 to 88	1.2819	2.2401	0.30779
Amyl acetate	1.091	0 to 101	0.9009	0.8372	1.0056
Amyl alcohol	1.102	0 to 124	1.1021	-0.09046	1.3018
Amyl benzoate	0.802	-15 to 80	0.89001	0.82729	1.18458
Amyl benzoate	0.868	0 to 198	0.8711	0.7777	0.10393
Amyl bromide	1.107	0 to 80	1.03201	1.80080	0.19706
Amyl chloride	1.208	0 to 100	1.17130	0.50077	1.10368
Amyl iodide	0.808	20 to 142	0.92058	1.4647	0.09027
Aniline	0.858	0 to 141	0.82349	0.8608	0.10741
Aqueous chloride	1.020	-15 to 130	0.97807	0.99933	0.17770
Benzene	1.237	11 to 81	1.17026	1.27705	0.60046
Benzyl chloride	1.113	10 to 60	1.03819	1.27138	0.14471
Benzyl iodide	0.880	0 to 146	0.85893	0.44719	0.57129
Bromine	1.113	10 to 60	1.03819	1.27138	0.14471
n-Butyl alcohol	0.950	0 to 108	0.83791	2.8834	-0.12415
n-Butyl acid	1.063	0 to 100	1.02853	0.85760	0.16084
iso-Butyl acid	1.068	16 to 118	0.97826	2.3076	-0.12143
Carbon tetrachloride	0.508	17 to 94	0.42383	0.8571	.....
Calcium chloride, 40.5%	0.343	0 to 35	0.3536	2.547	.....
Capric acid	0.975	13 to 155	0.94413	0.68058	0.26086
Carbon disulfide	1.718	0 to 76	1.18084	0.88881	1.28120
Carbon tetrachloride	0.504	13 to 81	0.5043	-2.2739	5.292
Chloroform	1.273	0 to 63	1.12715	4.6473	-1.74308
c-Cresol	.....	60 to 108	0.71072	1.1664	0.2261
n-Cresol	0.946	0 to 100	0.895	1.277	0.3688
Cymene	1.079	0 to 60	1.0453	-0.36339	3.8933
Diallyl ketone	1.233	0 to 95	1.15342	1.8836	0.20201
Diethyl ether	1.381	0 to 68	1.2945	1.7471	1.2583
Diethyl sebacate	1.389	-35 to 72	1.2585	2.9968	0.14022
Diethyl iodide	.....	0 to 62	1.04139	2.7835	0.1818
Diethyl alcohol 50%	.....	0 to 39	0.7450	1.05	0.730
Diethyl benzoate	0.990	0 to 109	0.99056	0.8259	0.15064
Diethyl benzene	0.981	24 to 131	0.86772	2.5344	-0.18319
Diethyl bromide	1.418	32 to 84	1.3370	1.59135	1.1909
Diethyl chloride	1.706	-22 to 26	1.57458	2.8736	1.58827
Diethyl ether	1.400	-15 to 38	1.31026	2.3918	4.09192
Diethyl formate	1.417	0 to 63	1.36146	0.13528	3.2948
Diethyl iodide	1.179	10 to 65	1.1550	0.2602	1.101
Diethyl nitrate	1.099	0 to 72	1.1290	4.7915	-1.8113
Diethyl sebacate	1.136	0 to 141	1.00031	1.0863	2.6607

Termômetros à Dilatação de Líquidos

✓ Mercúrio

- $a = 0,181690 \times 10^{-3}$
- $b = 0,00295 \times 10^{-6}$
- $c = 0,0115 \times 10^{-8}$

Isoprene
Mercury

1.367 0 to 33
..... 0 to 100
..... 24 to 299

Table 10-42 (Continued)
COEFFICIENTS OF CUBICAL EXPANSION FOR VARIOUS LIQUIDS
AND AQUEOUS SOLUTIONS

Liquid	Coef. at 20°C, $\times 10^{-6}$	Range, °C	$a \times 10^3$	$b \times 10^6$	$c \times 10^8$
Ethyl sulfate	1.378	0 to 80	1.1843	1.8053	0.78821
Ethylene chloride	1.161	-20 to 64	1.1103	1.0465	0.13409
Ethylene glycol	0.4375	11 to 136	0.3657	1.7074	0.593
Formic acid	1.376	0 to 104	0.9058	0.6214	0.8465
Glycerol	0.568	.....	0.4883	0.4883	.....
Hydrochloric acid, 31.5%	1.445	0 to 64	1.1708	0.9749	0.4919
Hydrochloric acid, 41.5%	0.458	0 to 33	0.4402	0.316	.....
Hydrochloric acid, 44.5%	0.398	0 to 33	0.4602	0.235	.....
Hydrochloric acid, 46.5%	0.211	0 to 32	0.3153	0.489	.....
Isoprene	1.367	0 to 100	0.99793	0.0021187	0.0014562
Mercury	1.827	0 to 323	1.8023	0.002951266	0.0114562
Methyl acetate	1.147	0 to 50	1.0402	0.8708	0.3062
Methyl alcohol	1.258	-20 to 70	1.0207	1.0603	0.5113
Methyl benzoate	0.895	0 to 162	0.8523	0.7414	0.1809
Methyl benzoate	1.091	-20 to 28	1.1121	0.31233	1.5801
Methyl cyanide	1.301	0 to 66	1.2119	1.7780	1.5322
Methyl ethyl ketone	1.115	0 to 70	1.0804	0.3743	0.2335
Methyl formate	1.593	0 to 10	1.0504	10.533	-1.8883
Petroleum, sp. gr. 0.9467	0.500	24 to 100	0.8998	1.335	.....
Petroleum ether	2.20	-30 to 45	1.46	1.50	.....
Phenol	1.020	30 to 127	0.824	0.10737	0.444
Phosphorus tribromide	0.858	0 to 150	0.8472	0.43872	0.2578
Phosphorus trichloride	1.154	-30 to 75	1.0882	0.8788	1.7936
Phosphorus oxybromide	1.116	0 to 107	1.0543	1.1266	0.599
Phosphorus oxychloride, 24.1%	0.263	10 to 25	0.2595	2.58	.....
Propionic acid	1.102	0 to 133	1.0285	1.1487	0.6001
n-Propyl alcohol	0.956	0 to 84	0.7743	0.908	-1.405
is-Propyl alcohol	1.094	0 to 83	1.0435	0.4303	0.7274
n-Propyl chloride	1.447	0 to 47	1.3265	0.3713	-1.368
n-Propyl chloride	1.591	0 to 38	1.3686	0.5287	.....
n-Propyl ether	1.264	0 to 88	1.1819	0.918	-1.364
is-Propyl ether	1.452	0 to 67	1.2872	0.2953	-0.3873
Propyl iodide	1.102	10 to 38	1.0271	1.884	-0.001
Silicon tetrachloride	1.430	-20 to 39	1.2612	1.814	0.6662
Sodium acetate, 21.5%	0.655	0 to 34	0.5361	0.76	.....
Sodium chloride, 20.4%	0.414	0 to 70	0.364	1.95	.....
Sodium sulfate, 55%	0.255	0 to 40	0.248	0.748	.....
Sulfur dioxide	0.410	11 to 40	0.388	1.358	.....
Stannic chloride	1.178	-15 to 113	1.1328	0.8171	0.7798
Sulfur trioxide	0.468	10 to 111	0.468	-0.23816	0.7788
Sulfuric acid, conc.	.....	0 to 30	0.978	-3.85	.....
Sulfuric acid, 10.3%	0.387	0 to 30	0.383	2.465	.....
Sulfuric acid, 14.5%	0.311	0 to 30	0.3160	0.443	.....
Sulfuric acid, 18.5%	0.224	0 to 30	0.2203	0.508	.....
Sulfuric acid, 24.5%	.....	110 to 140	0.729	2.8	.....

Termômetros à Dilatação de Líquidos

- ✓ Água
- ✓ etc.

Table 10-42 (Continued)
COEFFICIENTS OF CUBICAL EXPANSION FOR VARIOUS LIQUIDS
AND AQUEOUS SOLUTIONS

Liquid	Coef. at 20°C, $\times 10^{-6}$	Range, °C	$a \times 10^3$	$b \times 10^6$	$c \times 10^8$
Water (see also below)	.....	110 to 140	0.548	4.9	.....
Thymol	.....	62 to 157	0.8490	0.2825	0.3597
Titanium tetrachloride	0.998	-22 to 134	0.94297	1.38579	0.0988
Toluene	1.099	0 to 100	1.028	1.779	.....
n-Toluidine	0.817	0 to 141	0.82136	0.6448	0.1466
Trimethyl carbolic	1.023	23 to 77	1.31261	-8.8155	3.61209
n-Valeric acid	1.004	8 to 144	0.97537	0.61892	0.3878
Water (see also below)	.....	-13 to 0	-0.09417	1.449	-59.85
p-Xylene	0.973	16 to 131	0.91734	1.3245	0.1588
m-Xylene	1.009	0 to 141	0.95095	1.0201	0.32753
p-Xylene	1.011	15 to 121	0.97013	0.8714	0.5387

WATER

To find the cubical expansion of water, substitute in the following formulas:
 0° to 33° : $V_t = V_0(1 - 0.0464268t + 0.00000001t^2 - 0.0000000001t^3 + 0.000000000001t^4)$
 0° to 80° : $V_t = V_0(1 - 0.0453255t + 0.00000001t^2 - 0.0000000001t^3 + 0.000000000001t^4)$

Table 10-43
CUBICAL EXPANSION OF SOLIDS

The coefficient of cubical expansion is the increase in volume per unit volume per degree C. rise in temperature. For ordinary work the assumption may be made that the coefficient of cubical expansion is about three times the coefficient of linear expansion.

Water (see also below)
p-Xylene

-13 to 0
..... 16 to 131

WATER

To find the cubical expansion of water, substitute in the following formulas:
 0° to 33° : $V_t = V_0(1 - 0.0464268t + 0.00000001t^2 - 0.0000000001t^3 + 0.000000000001t^4)$
 0° to 80° : $V_t = V_0(1 - 0.0453255t + 0.00000001t^2 - 0.0000000001t^3 + 0.000000000001t^4)$

Island spar	50 to 80	144.7	Tin	0 to 100	888.9
Iron	0 to 100	335.0	Zinc	0 to 100	882.3
Lead	0 to 100	839.0			

Termômetros de Dilatação de Líquidos

- ✓ Termômetros à dilatação de líquidos em recipiente de vidro transparente

LÍQUIDOS MAIS UTILIZADOS:

Melting or boiling		°C	°F	°K	°R
Melting-point-of-water	(H ₂ O)	0	32	273.15	491.67
Boiling-point-of-water	(H ₂ O)	100	212	373.15	671.67
Melting-point-of-ammonia	(NH ₃)	-77.7	-107.9	195.45	351.77
Boiling-point-of-ammonia	(NH ₃)	-33.6	-28.5	239.55	431.17
Melting-point-of-gold	(Au)	1063	1945	1336	2405
Melting-point-of-magnesium	(Mg)	651	1203.8	924.2	1663.5
Boiling-point-of-acetone	(C ₃ H ₆ O)	56.5	133.7	329.65	593.37
Boiling-point-of-propane	(C ₃ H ₈)	-42.1	-43.8	231.05	415.87
Boiling-point-of-ethanol	(C ₂ H ₆ O)	78.4	173.1	351.55	632.77

Termômetros de Dilatação de Líquidos

- ✓ Termômetros à dilatação de líquidos em recipiente de vidro transparente

LÍQUIDOS MAIS UTILIZADOS:

LÍQUIDO	PONTO DE SOLIDIFICAÇÃO [°C]	PONTO DE EBULIÇÃO [°C]	FAIXA DE USO [°C]
Mercúrio	-39	+357	-38 a 550
Álcool Etílico	-115	+78	-100 a 70
Tolueno	-92	+110	-80 a 100

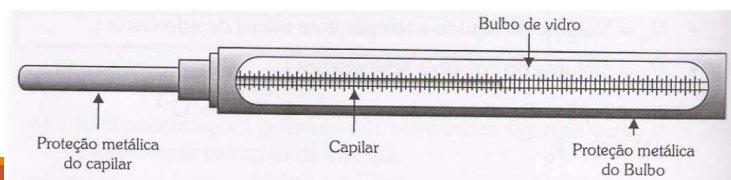
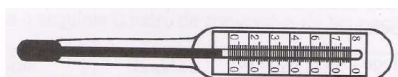
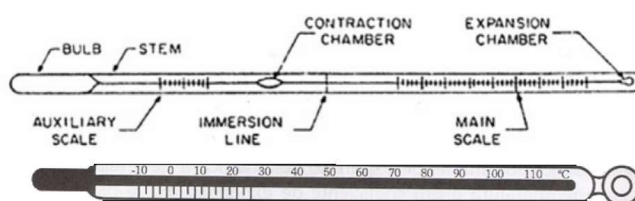
Termômetros de Dilatação de Líquidos

✓ Termômetros de vidro

- Indicam a temperatura como diferença entre o coeficiente de dilatação do vidro e do líquido empregado (Ex.: mercúrio)



Termômetros de Dilatação de Líquidos



Termômetros à Dilatação de Líquidos

✓ Vantagens:

- Portabilidade
- Independe de equipamento auxiliar
- Baixo custo
- Compatibilidade com a maioria de ambiente
- Ampla faixa : -40 a 250°C

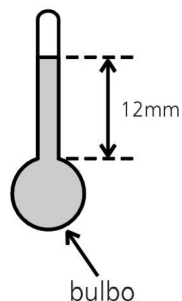
✓ Desvantagens:

- Impossibilidade de automatizar e leitura contínua
- Constante de tempo grande
- Dimensões inábeis e histereses (exceto tipo especiais)
- Quebra (contaminação Hg)

Termômetros à Dilatação de Líquidos

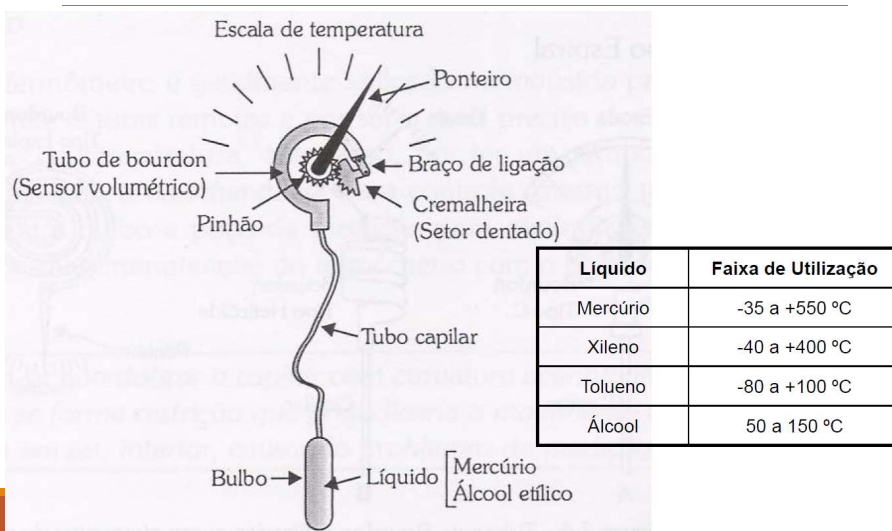
✓ Termômetros de Bulbo

- A variação de temperatura produz a expansão ou contração do fluido, o que deforma o recinto que o contém



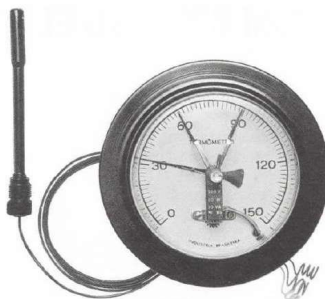
- Os termômetros de bulbo ou de vidro trabalham em cima de um princípio simples: um fluido volátil muda seu volume conforme sua temperatura é alterada
- Os líquidos ocupam menos espaço quando estão frios e ocupam mais espaços quando estão quentes

Termômetros de Dilatação de Líquidos em Recipiente Metálico



Termômetros de Dilatação de Líquidos em Recipiente Metálico

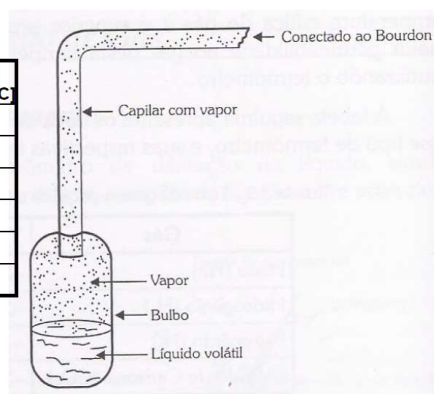
- ✓ Quando há mudança de temperatura, o fluido se expande ou contrai, o que faz com que o tubo de Bourdon se mova, movendo assim a posição da agulha sobre a escala



Termômetros de Dilatação de Líquidos em Recipiente Metálico

Líquidos mais utilizados:

Líquido	Ponto de fusão [°C]	Ponto de ebulição [°C]
Cloreto de Metila	-139	-24
Butano	-135	-0,5
Éter Etilico	-119	34
Tolueno	-95	110
Dióxido de enxofre	-73	-10
Propano	-190	-42

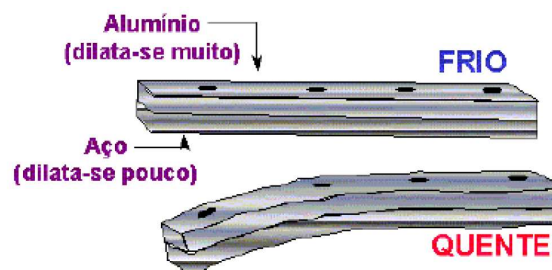


Termômetros de Dilatação de Líquidos em Recipiente Metálico



Termômetros à Dilatação de Sólidos (Bimetálicos)

- ✓ O princípio de um termômetro bimetálico conta com o fato de que metais diferentes dilatam em proporções diferentes à medida que esquentam
- ✓ Ao se unir dois metais diferentes, pode-se fazer um simples controlador elétrico, que pode ter boa resistência em temperaturas altas
- ✓ Este tipo de dispositivo geralmente é encontrado em fornos



Termômetros à Dilatação de Sólidos (Bimetálicos)

A seguinte fórmula relaciona expansão linear à mudança de temperatura

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta T)$$

l = comprimento do material após o aquecimento

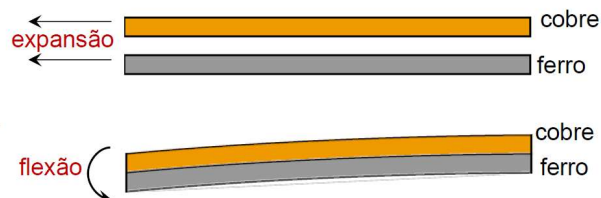
l_0 = comprimento original do material

α = Coeficiente de expansão linear

ΔT = Variação de temperatura

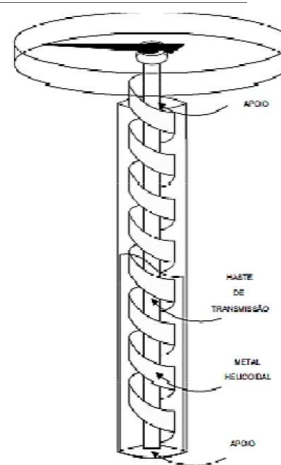
Usos típicos:

sistemas de climatização,
interruptores de proteção,
etc.



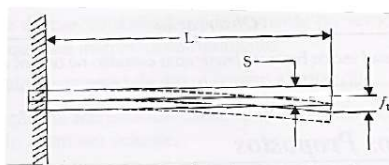
Termômetros à Dilatação de Sólidos (Bimetálicos)

- ✓ Na prática a lâmina bimetálica é enrolada em forma de espiral ou hélice, o que aumenta mais ainda a sensibilidade do sistema
- ✓ O termômetro mais usado é o de lâmina bimetálica helicoidal
- ✓ Ele consiste de um tubo condutor de calor, no qual é fixada num eixo que por sua vez recebe um ponteiro que se desloca sobre uma escala
- ✓ Normalmente o eixo gira de um ângulo de 270° para uma variação de temperatura que abrange toda a faixa do termômetro

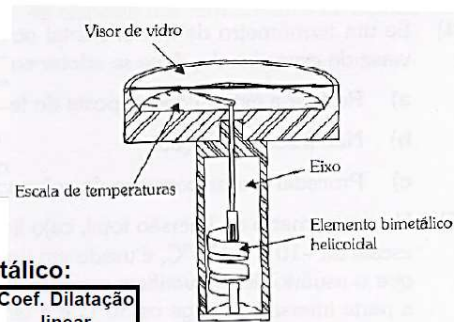


Termômetros à Dilatação de Sólidos (Bimetálicos)

Funcionam baseado no princípio de flexão térmica



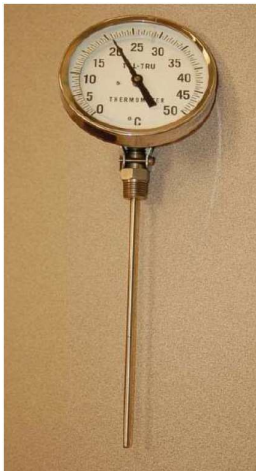
Características construtivas



Lâminas componentes do par bimetálico:

Material do par bimetálico	Faixa de Medição	Coef. Dilatação linear $\alpha [10^{-6} 1/K]$
Invar (64%Fe + 36%Ni)	-50 a 800	0,7
Latão		19

Termômetros à Dilatação de Sólidos (Bimetálicos)



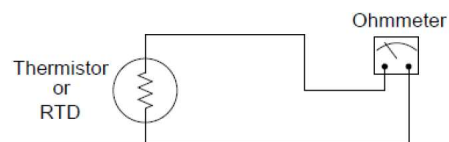
- ✓ Utilizar sempre poço protetor metálico para evitar corrosão, dar proteção mecânica e permitir manutenção com o processo em operação
- ✓ A baixa temperatura a caixa do termômetro bimetálico deve ser hermeticamente selada para evitar que a penetração da umidade venha a formar gelo, prejudicando os componentes internos do instrumento
- ✓ Para evitar erros devido à temp. ambiente, o bimetálico deve estar completamente imerso no fluido
- ✓ A velocidade do fluido deve ser bastante alta a fim de assegurar uma rápida transferência de calor

Termômetros de Contato Elétrico

- ✓ Todo condutor elétrico apresenta uma resistência que depende de sua temperatura, por tanto, pode-se utilizar a resistência elétrica como variável termométrica

- ✓ Há dois tipos:

- Termômetro de resistência metálica
 - Detectores de Resistência de Platina (RTD)
 - Termistores
- Termopares



Termômetros Sensíveis à Resistência (RTD)

- ✓ Utiliza o fato de que a resistência de alguns metais sofre variação com a temperatura
- ✓ Faixa de temperatura : -200°C a 600°C
- ✓ Material de construção
 - Platina Faixa: - 200 à 600°C (excepcionalmente 1200°C) - Ponto de Fusão 1774°C
 - Níquel Faixa: -200 a 300°C - Ponto de Fusão: 1455°C
 - Cobre Faixa: -200 à 120°C - Ponto de Fusão: 1023°C

Termômetros Sensíveis à Resistência (RTD)

- ✓ Termômetros de resistência metálica

$$R_{(T)} = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

α Para alguns metais:

- Níquel = 0.00672 /°C
- Tungsteno = 0.0045 /°C
- Prata = 0.0041 /°C
- Ouro = 0.0040 /°C
- Cobre = 0.0038 /°C
- Platina = 0.00392 /°C (valor americano)
- **Platina = 0.00385 /°C** (valor europeu)

Termômetros Sensíveis à Resistência (RTD)

✓ Termômetros de resistência metálica

- Exemplo: Qual é a resistência de uma resistência da platina em 250°C, se a resistência a 20°C é de 1050Ω?

$$R_{(T)} = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$\begin{aligned} \text{Resistência a } 250^\circ\text{C} &= 1050 (1 + 0,00385 [250 - 20]) \\ &= 1050(1 + 0,8855) \\ &= 1979.775 \, \Omega \end{aligned}$$

Termômetros Sensíveis à Resistência (RTD)

✓ Termômetros de resistência metálica

- Os RTD são especificados pelo valor da resistência a 0°C e pelo material de construção
- Platina (Pt)
 - Pt100 (100Ω@0°C) - 0,4Ω/°C
 - Pt1000 (1000Ω@0°C) - 4Ω/°C
- Níquel (Ni): Ni120 (120Ω@0°C)
- Cobre (Cu): Cu10 (10Ω @ 0°C)
- A platina é o melhor material por ser fácil de obter de forma pura, quimicamente inerte, dúctil, com ponto de fusão alto e por sua alta linearidade

Termômetros Sensíveis à Resistência (RTD)

✓ Termômetros de resistência metálica

- A exatidão dos termômetros de resistência, quando corretamente instalados é grande, podendo atingir $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$
- Normalmente as sondas utilizadas industrialmente apresentam uma precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$

Termômetros Sensíveis à Resistência (RTD)

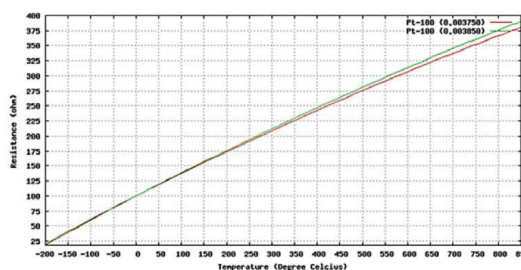
✓ Termômetros de resistência metálica

PT100



A norma DIN EN 60751 define as resistências elétricas e desvios permitidos em função da temperatura. O valor nominal de um sensor PT100 é 100 a 0°C .

Curvas características do PT100



Coef. angular, $\alpha = 0,00385$
(Pt100/Pt1000)

Termômetros Sensíveis à Resistência (RTD)

✓ Tabela: Resistência vs Temperatura ($\alpha = 0,00385$)

0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51	103.90	0
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40	107.79	10
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29	111.67	20
30	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.15	115.54	30
40	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01	119.40	40
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.47	122.86	123.24	50
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69	127.08	60
70	127.08	127.46	127.84	128.22	128.61	128.99	129.37	129.75	130.13	130.52	130.90	70
80	130.90	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.57	133.95	134.33	134.71	80
90	134.71	135.09	135.47	135.85	136.23	136.61	136.99	137.37	137.75	138.13	138.51	90
100	138.51	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.78	141.16	141.54	141.91	142.29	100
110	142.29	142.67	143.05	143.43	143.80	144.18	144.56	144.94	145.31	145.69	146.07	110
120	146.07	146.44	146.82	147.20	147.57	147.95	148.33	148.70	149.08	149.46	149.83	120
130	149.83	150.21	150.58	150.96	151.33	151.71	152.08	152.46	152.83	153.21	153.58	130
140	153.58	153.96	154.33	154.71	155.08	155.46	155.83	156.20	156.58	156.95	157.33	140

- Veja que termômetros de resistência de platina o valor de 100,00 Ω a 0°C, e de 138,51 Ω a 100°C
- Para cada variação de °C a resistência incrementa 0,385 Ω

Termômetros Sensíveis à Resistência (RTD)

✓ Vantagens

- Inerentemente mais linear
- Estáveis por um longo período
- Muito precisos
- Fácil de calibrar

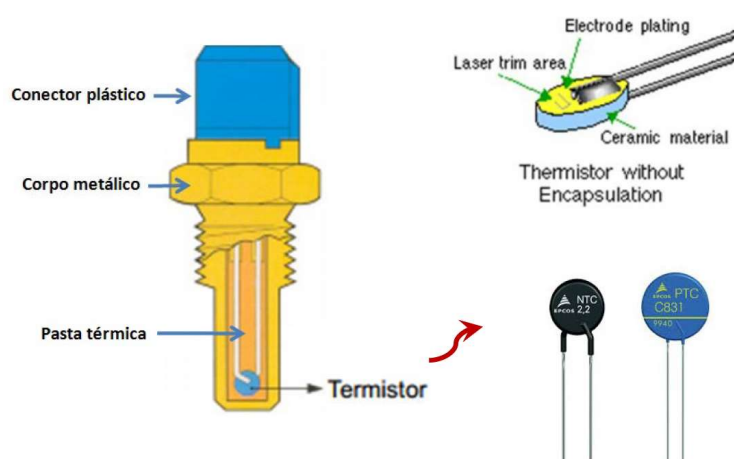
✓ Desvantagens

- Caro
- Requer de fonte de corrente
- Pequena mudança na resistência
- Menos robusto do que termopares
- Menor faixa de leitura em relação aos termopares
- Auto-aquecimento: $P = I^2R$

Termômetros Sensíveis à Resistência (Termistores)

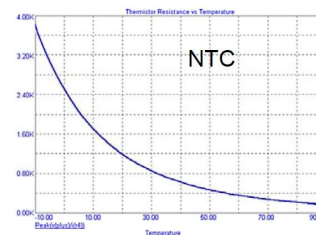
- ✓ Tratam-se de elementos semicondutores ou diferentes compostos químicos (ex. óxidos metálicos a base de magnésio, níquel, ferro e cobalto), cuja resistência varia sensivelmente com a temperatura
- ✓ São termistores:
 - PTC (*Positive Temperature Coefficient*) aqueles que aumentam sua resistência com a temperatura
 - NTC (*Negative Temperature Coefficient*) os que diminuem a resistência com a temperatura
 - Os mais conhecidos são os NTC

Termômetros Sensíveis à Resistência (Termistores)

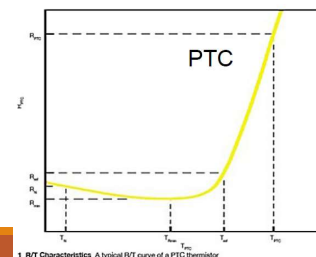


Termômetros Sensíveis à Resistência (Termistores)

- ✓ Semicondutores ou cerâmicos
- ✓ Alta sensibilidade: $100\Omega/^{\circ}\text{C}$
- ✓ Não linear: é preciso linearizar em torno do ponto de trabalho
- ✓ Faixa de temperatura pequena (50°C a $+150^{\circ}\text{C}$)
- ✓ Útil para temperatura ambiente
- ✓ Muito baratos e pequenos
- ✓ Elevada precisão



Os mais conhecidos são os NTC



Mais utilizado para sobrecarga de corrente do que medição de temperatura

1 R/T Characteristics A typical RT curve of a PTC thermistor

Termômetros Sensíveis à Resistência (Termistores)

- ✓ Equação de Steinhart-Hart

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c \ln^3(R)$$

- a, b e c: parâmetros da eq. De Steinhart-Hart, especificados para cada dispositivo
- T: temperatura em K
- R : resistência em Ω

- ✓ O erro na equação de Steinhart-Hart é geralmente inferior a $0,02^{\circ}\text{C}$, na medida de temperatura

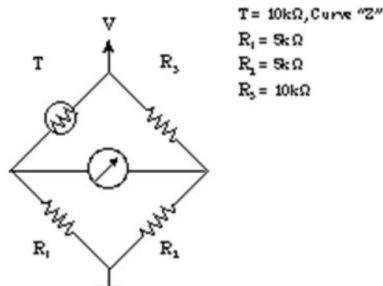
- ✓ Termistores do tipo NTC também podem ser caracterizados com a equação do parâmetro B, que é essencialmente a equação Steinhart-Hart com $c = 0$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)$$

Termômetros Sensíveis à Resistência (Termistores)

✓ Usualmente especificado pela sua resistência a temperatura ambiente por exemplo um termistor NTC T25 tem uma resistência de 3,0K Ω , 5,0K Ω , 10,0 K Ω a 25°C

- Precisão é de muito boa na média
- Tempo de resposta é de rápida a moderada
- Tipicamente usados para detectar em pequena faixa de temperatura



Termômetros Sensíveis à Resistência (Termistores)

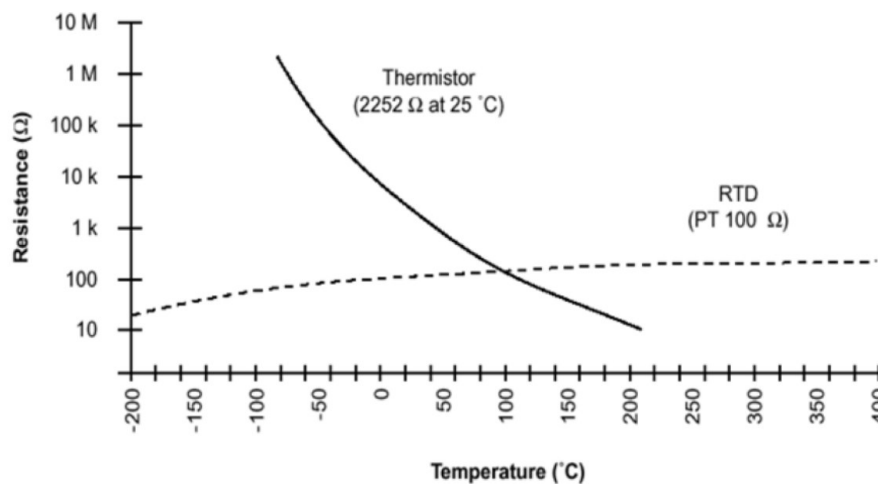
✓ Vantagens

- Muito sensível (tem maior mudança saída a partir da temperatura de entrada)
- Resposta rápida
- Mais preciso que o RTD e termopar, em medição de temperaturas baixas

✓ Desvantagens

- A saída é uma função não linear
- Intervalo de temperatura limitada
- Requer uma fonte de corrente
- Auto aquecimento
- Frágil

Comparação de Termistor vs RTD



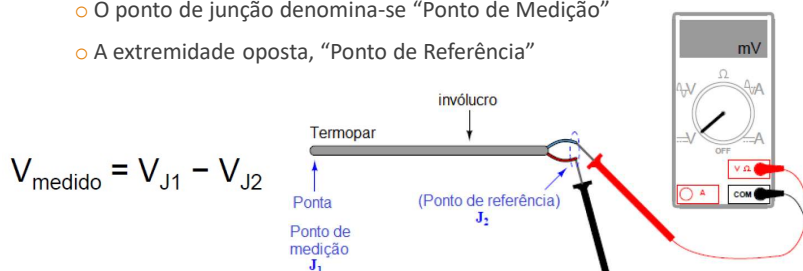
Comparação de Termistor vs RTD

- ✓ Em Sistemas AVAC (Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado), onde a faixa temperatura de medição é relativamente estreita, a não linearidade dos termistores não é uma preocupação séria e sua imunidade em relação à resistência do fio é uma vantagem decisiva sobre RTDs
- ✓ Em aplicações industriais de medição de temperatura, onde a faixa de temperatura geralmente é muito mais ampla, a não-linearidade de termistor é um problema significativo, por isso recomenda-se lidar com o de menor resistência do fio $\Rightarrow$ RTD

Termômetros Sensíveis à Resistência (Termopar)

✓ Quando dois metais diferentes são unidos por uma junção, a diferença de temperatura entre o ponto da união e a outra extremidade dos condutores faz surgir uma tensão decorrente da Força Eletromotriz (FEM)

- O ponto de junção denomina-se “Ponto de Medição”
- A extremidade oposta, “Ponto de Referência”

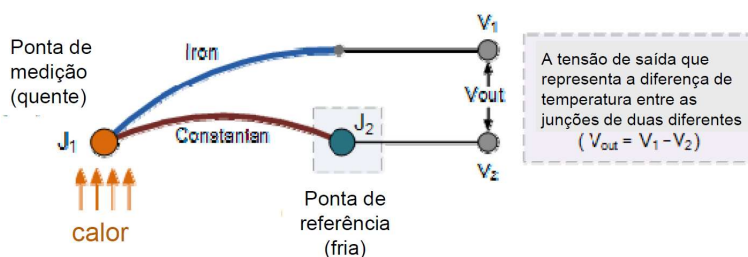


Termômetros Sensíveis à Resistência (Termopar)

✓ Os termopares são sensores de temperatura que se baseiam em um efeito termoelétrico, denominado o **efeito Seebeck**

*Quando dois metais diferentes são colocados em contato, migram elétrons de um metal para o outro, até que um campo elétrico equilibre o gradiente de concentração na união, provocando o aparecimento de uma tensão (potencial de contato ou potencial termoelétrico **Seebeck**) aproximadamente proporcional à temperatura da união*

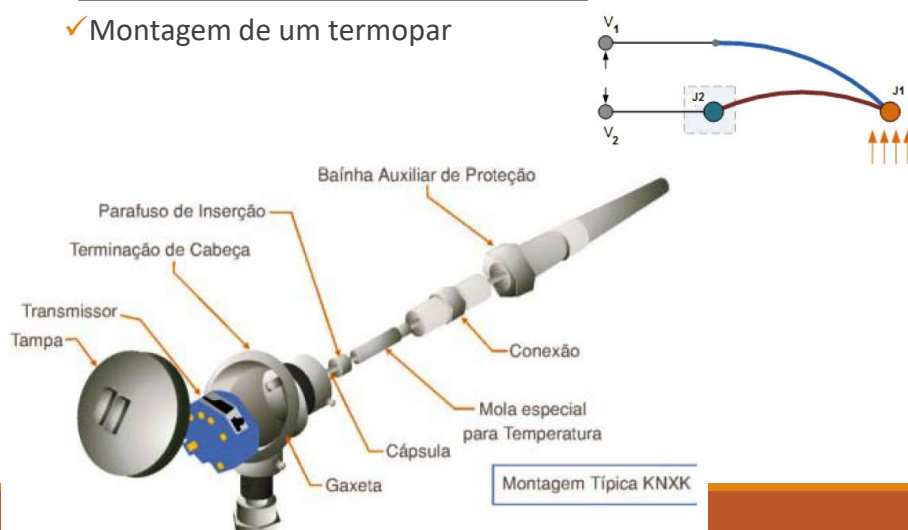
Termômetros Sensíveis à Resistência (Termopar)



- ✓ A tensão é proporcional à diferença de temperatura
- ✓ Sinal de saída muito baixa: $\mu V/^\circ C$
- ✓ Suportam altas temperaturas (Ex.: caldeiras)

Termômetros Sensíveis à Resistência (Termopar)

- ✓ Montagem de um termopar



Termômetros Sensíveis à Resistência (Termopar)

- ✓ Existem vários tipos de termopares identificados por um código ANSI, que consiste em uma letra do alfabeto

Type	Positive wire	Negative wire	Temperature range
T	copper (blue)	constantan (red)	-300 to 700 °F
J	iron (white)	constantan (red)	32 to 1400 °F
E	chromel (violet)	constantan (red)	32 to 1600 °F
K	chromel (yellow)	alumel (red)	32 to 2300 °F
S	Pt90% - Rh10% (black)	Platinum (red)	32 to 2700 °F
B	Pt70% - Rh30% (black)	Pt94% - Rh6% (red)	32 to 3380 °F

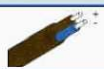
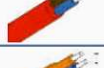
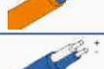
Tipo	Liga	Máx. temp. (°C)	Coef. temp. (μV/°C)	Saída @ 100°C (mV)
J	Fe/Constantan	700 (750)	51,45	5,268
K	Chromel/Alumel	1.100 (1.370)	42	4,095
S	Platina Pt/Rh (90/10)	1.550 (1.750)	8	0,645
W	W/Rh (26/74) W/Rh (5/95)	2.500	7,86	1

Notas:

- Temperaturas entre parênteses são as que os sensores podem suportar por pouco tempo
- Constantan: 55%Cu / 45%Ni
- Chromel: 90%Ni / 10%Cr
- Alumel: 96%Ni / 2%Mn / 2%Al
- Tipos básicos: T, J, E, K, N
- Tipos nobres (Platina / Ródio) : S,R,B
- Especiais (Platina / Ródio-Platina)

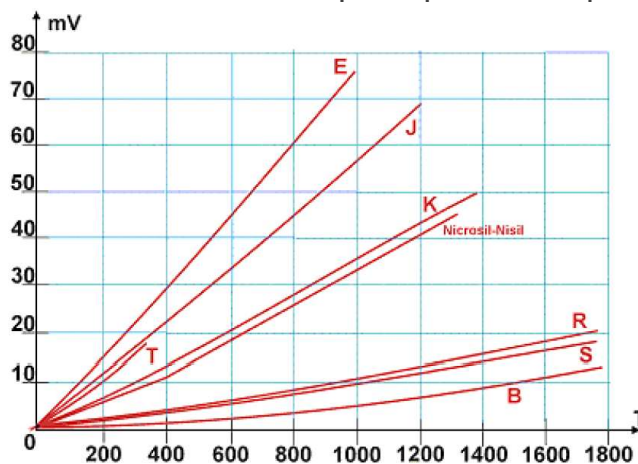
Termômetros Sensíveis à Resistência (Termopar)

Thermocouple Colour Codes

Thermocouple Sensor Colour Codes <i>Extension and Compensating Leads</i>			
Code Type	Conductors (+/-)	Sensitivity	British BS 1843:1952
E	Nickel Chromium / Constantan	-200 to 900°C	
J	Iron / Constantan	0 to 750°C	
K	Nickel Chromium / Nickel Aluminium	-200 to 1250°C	
N	Nicrosil / Nisil	0 to 1250°C	
T	Copper / Constantan	-200 to 350°C	
U	Copper / Copper Nickel Compensating for "S" and "R"	0 to 1450°C	

Termômetros Sensíveis à Resistência (Termopar)

- ✓ Curvas características dos principais termopares



Termômetros Sensíveis à Resistência (Termopar)

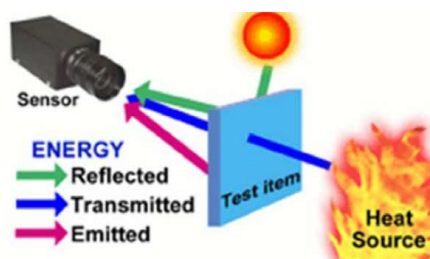
- ✓ A escolha de um termopar para um determinado serviço deve ser feita considerando todas as possíveis variáveis e normas exigidas pelo processo
- ✓ Portanto, alguns dados para orientação na escolha correta dos mesmos são fornecidos pelo fabricante
- ✓ A tabela seguinte relaciona os tipos de termopares e a faixa de temperatura usual, com as vantagens e restrições

Termômetros Sensíveis à Resistência (Termopar)

TABELA - Tipos e termopares e faixa de temperatura usual - vantagens e restrições.

Tipo	Elemento Positivo	Elemento Negativo	Faixa de temp. usual	Vantagens	Restrições
T	Cobre	Constantan	- 184 a 370°C	1) Resiste a atmosfera corrosiva. 2) Aplicável em atmosfera redutora ou oxidante abaixo de 310°C. 3) Sua estabilidade o torna útil em temperaturas abaixo de 0°C.	1) Oxidação do cobre acima de 310°C.
J	Ferro	Constantan	0 a 760°C	1) Baixo Custo. 2) Indicado para serviços contínuos até 760°C em atmosfera neutra ou redutora.	1) Limite máximo de utilização em atmosfera oxidante de 760°C devido à rápida oxidação do ferro. 2) Utilizar tubo de proteção acima de 480°C.
E	Chromel	Constantan	0 a 870°C	1) Alta potência termoeletrônica. 2) Os elementos são altamente resistentes à corrosão, permitindo o uso em atmosfera oxidante.	1) Baixa estabilidade em atmosfera redutora.
K	Chromel	Alumel	0 a 1260°C	1) Indicado para atmosfera oxidante. 2) Para faixa de temperatura mais elevada fornece rigidez mecânica melhor do que os tipos S ou R e vida mais longa do que o tipo J.	1) Vulnerável em atmosferas redutoras, sulfurosas e gases como SO ₂ e H ₂ S, requerendo substancial proteção quando utilizado nestas condições.
S	Platina 10% Rhodio	Platina	0 a 1480°C	1) Indicado para atmosferas oxidantes. 2) Apresenta boa precisão a altas temperaturas.	1) Vulnerável à contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes. 2) Para altas temperaturas, utilizar isoladores e tubos de proteção de alta alumina.
	Platina 13% Rhodio	Platina			
R	Platina 30% Rhodio	Platina 6% Rhodio	870 a 1705°C	1) Melhor estabilidade do que os tipos S ou R. 2) Melhor resistência mecânica. 3) Mais adequado para altas temperaturas do que os tipos S ou R. 4) Não necessita de compensação de junta de referência, se a temperatura de seus terminais não exceder 50°C.	1) Vulnerável à contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes. 2) Utilizar isoladores e tubos de proteção de alta alumina.

Métodos sem contato (Espectrômetro)



Métodos sem contato (Espectrômetro)

- ✓ Sensores de temperatura de radiação podem ser utilizados como dispositivos portáteis de medição da temperatura local ou para fornecer um sinal contínuo
- ✓ São amplamente usados nas indústrias onde as temperaturas são extremamente altas e/ou medições por contato não são viáveis
- ✓ Por exemplo: prensas, moinhos, tanque refratário, moldes térmicos, máquinas de garrafas

Métodos sem contato (Espectrômetro)

- ✓ Mais especificamente, os dispositivos baseados na radiação dos corpos são os medidores a escolher quando o objeto cuja temperatura se pretende medir está sob as seguintes condições:
 - Move-se, roda, vibra
 - Está sob o efeito de campos magnéticos fortes (ex. aquecimento por indução)
 - Sofre mudanças de temperaturas muito rápidas (ex. fundição, incineradora)
 - Está localizado em posição inacessível (dentro de um recipiente)

Métodos sem contato (Espectrômetro)

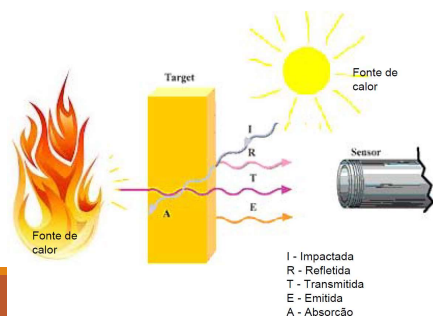
- Requer medidas de temperatura ao longo da sua superfície
- Está a temperaturas demasiado elevadas para um termômetro de contato, i.e., superiores a 1400°C (ex. está dentro de um forno ou de uma fundição)
- Está fisicamente inacessível para um termômetro de contato
- Pode danificar-se ou contaminar-se por contato com um medidor (ex. indústria de vidros, farmacêutica, química, alimentar)
- Tem uma distribuição superficial de temperatura muito variada
- É feito de um material com baixa capacidade calorífica ou condutividade térmica

Métodos sem contato (Espectrômetro)

- ✓ Medem a temperatura a partir da radiação térmica que emitem os corpos e baseiam-se na lei de Stefan-Boltzmann

“Todas as substâncias a qualquer temperatura acima do zero absoluto radiam energia como resultado da agitação atômica associada com sua temperatura”

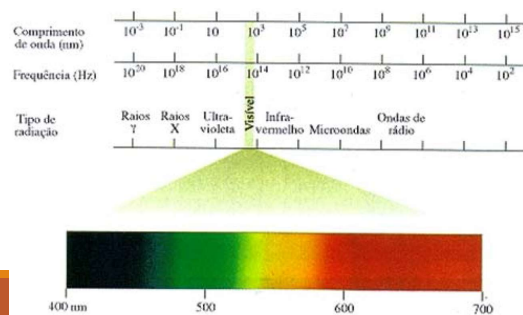
“A energia emitida pelo corpo aumenta proporcionalmente com a quarta potência da temperatura absoluta do corpo”



Métodos sem contato (Espectrômetro)

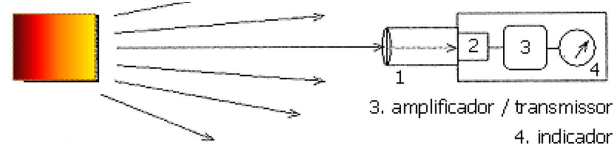
✓ Princípio de Funcionamento

- Os vários tipos de energia radiada podem ser caracterizados pela frequência (f) ou comprimento de onda (λ)
- A zona do visível abrange comprimentos de onda compreendidos entre 400nm e 700nm, e os infravermelhos (IV) entre 700nm e 20 microns
- Na prática, o pirômetro de IV comum usa a banda entre 5 e 20 microns



Métodos sem contato (Espectrômetro)

- ✓ Quanto mais elevada for a temperatura de um corpo maior é a radiação eletromagnética (EM)
- ✓ Transdutores eletromagnéticos de radiação convertem a energia em forma de radiação, EM, em uma corrente elétrica ou potencial, ou modificam uma corrente elétrica ou potencial



- A superfície ideal para efetuar medições de temperatura é a do corpo negro, i.e., um objeto com $\epsilon=1$ e $R=T=0$
- Na prática, contudo, a maioria dos corpos são corpos cinzentos (têm a mesma emissividade em todos os comprimentos de onda) ou corpos não-cinzentos (a emissividade varia com o comprimento de onda/temperatura)

Métodos sem contato (Espectrômetro)

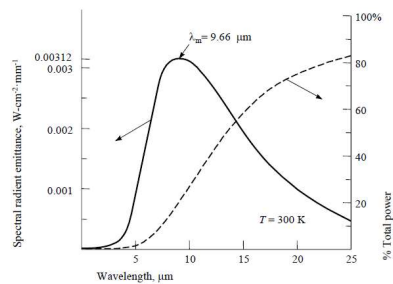
$$W_{\lambda} = \frac{\varepsilon C_1}{\lambda^5 \left(e^{C_2/\lambda T} - 1 \right)}$$

Energia radiante total:

$$W_t = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_{\lambda} d\lambda = \varepsilon \sigma T^4$$

Unidade : W/cm². μm

$$\sigma = \text{Cte de Stefan} = 5.67 \times 10^{-12} \text{ (W / cm}^2\text{) K}^4$$



80% da energia total de radiação encontra-se na faixa de comprimento de onda 4 a 25 μm

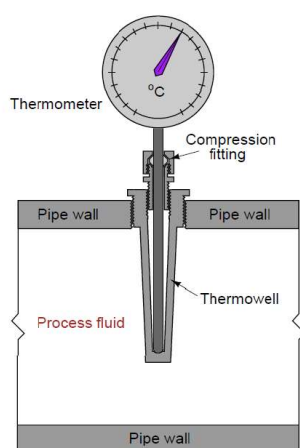
Métodos sem contato (Espectrômetro)

✓ Também conhecido como:

- Pirômetros óticos
- Pirômetros de radiação
- Pirômetros de radiação total
- Termômetros automáticos infravermelhos
- Termômetros de ouvido
- Termômetros de radiação contínua
- Scanners térmicos
- Termômetros de fibra óptica

Acessórios de Sensores de Temperatura

✓ Poço de proteção (Thermowell)



Transdutores de Temperatura

✓ São os dispositivos com os quais se pode converter a variação de valor ôhmico de um sensor térmico num sinal proporcional de corrente contínua

✓ O sinal serve para ativar:

- Instrumentos indicadores convencionais de bobina móvel
- Indicadores digitais de temperatura
- Registradores de temperatura
- Unidades de controle e processamento de dados

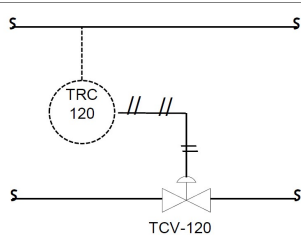


Transdutores de Temperatura

✓TRANSMISSOR: dispositivo que adapta o sinal do condicionador para a rede industrial, que pode ser um sinal de 4-20mA, 3-15psi, digital, etc.

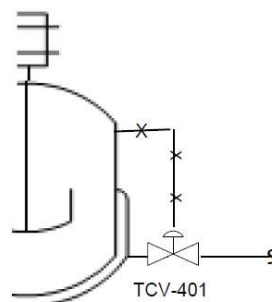


Malhas de Controle e Medição de Temperatura



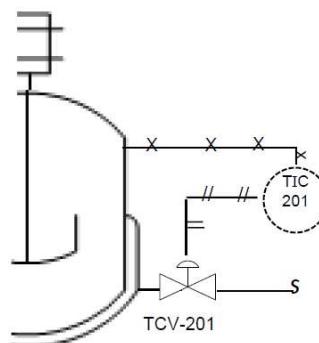
Válvula de controle auto atuada

Registrador controlador de temperatura, no painel (com transmissão elétrica) comandando válvula de controle, com transmissão pneumática



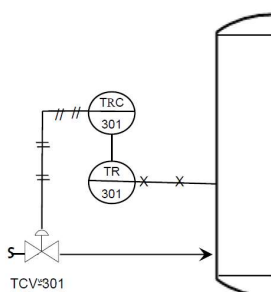
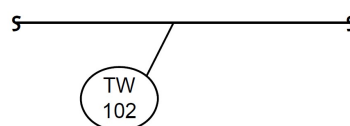
Malhas de Controle e Medição de Temperatura

Controlador/Indicador de temperatura, tipo expansão, comandando válvula de controle, com transmissão pneumática



Malhas de Controle e Medição de Temperatura

Poço para termômetro ou termopar



Instrumento combinado de registro e controle de temperatura no painel, comandando válvula de controle com transmissão pneumática

Conversão de Sinal

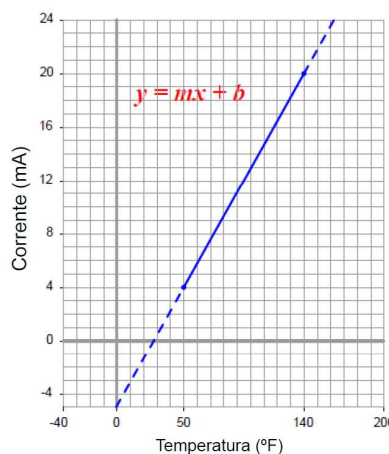
- ✓ Um transmissor eletrônico de temperatura calibrado de 50-140°F e tem um sinal de saída de 4-20mA. Calcule a corrente de saída do transmissor, se a temperatura medida é de 79°F

$$y = \left(\frac{20 - 4}{140 - 50} \right) x + b = \left(\frac{16}{90} \right) x + b$$

- ✓ Usando os valores de 4mA para y e 50 de para x

$$4 = \left(\frac{16}{90} \right) 50 + b \quad \therefore b = -4,89$$

- ✓ Logo $y = \left(\frac{16}{90} \right) 79 - 4,89 \quad \therefore y = 9,16mA$



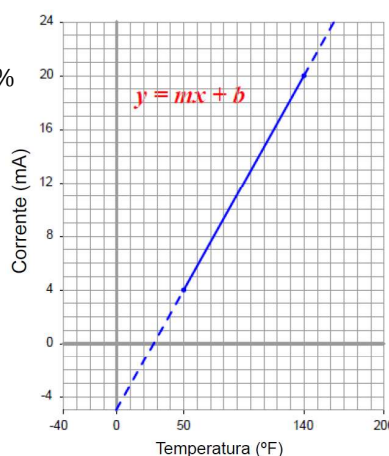
Conversão de Sinal

- ✓ Outra alternativa

$$\text{Porcentagem} = \frac{(79 - 50)^{\circ}\text{C}}{(140 - 50)^{\circ}\text{C}} \cdot 100\% = 32,22\%$$

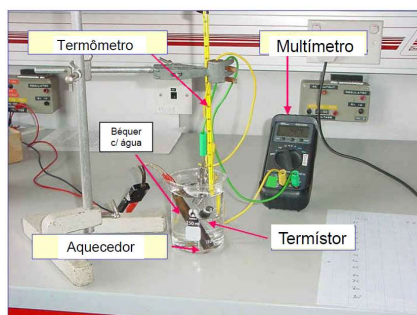
- ✓ Substituindo este valor percentual na equação linear para sinais de 4-20mA:

$$y = \left(\frac{16}{100} \right) \cdot 32,22 + 4 \quad \therefore y = 9,16mA$$



Experimento

- ✓ Na bancada do laboratório um RTD, termistor e um termopar foram colocados num becker com 750 ml de água sob aquecimento e as leituras foram feitas a partir de 19°C a 80°C

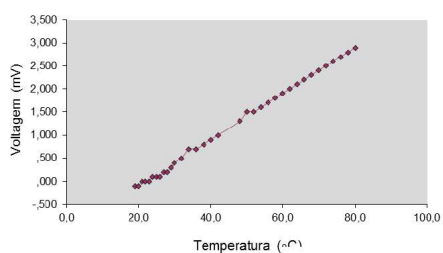


Experimento

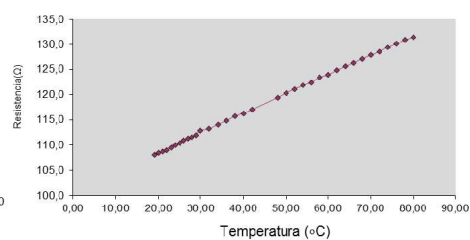
Temperatura (°C)	Termopar (mille-Volts)	RTD (ohms)	Termistor (kilo-ohms)
19	-0.10	108.00	105.60
20	-0.10	108.40	99.80
21	0.00	108.70	94.20
22	0.00	109.00	88.20
23	0.00	109.50	83.80
24	0.10	110.00	79.70
25	0.10	110.40	75.90
26	0.10	110.90	73.30
27	0.20	111.30	70.00
28	0.20	111.50	68.40
29	0.30	112.00	63.40
30	0.40	112.90	60.50
32	0.50	113.20	54.80
34	0.70	114.10	49.20
36	0.70	114.80	45.50

Experimento

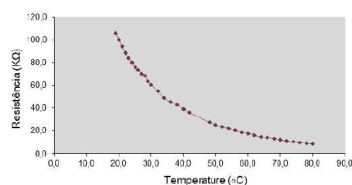
Termopar



RTD



Termistor



Experimento

Termopar	RTD	Termistor
✓ Simples ✓ Robustos ✓ autoalimentado ✓ Baratos ✓ Ampla variedade ✓ Ampla faixa de T°	✓ Mais estáveis ✓ Mais precisos ✓ Mais lineais que os termopares	✓ Alta saída ✓ Rápido ✓ medições ohms de dois fios
○ Não lineais ○ Baixa voltagem ○ Requer referencia ○ Menos estáveis ○ Menos sensitivos	○ Caros ○ Requer fonte de corrente ○ Pequeno ΔR ○ autoaquecimento	○ Não linear ○ Faixa limitada de T° ○ Frágeis ○ Requer fonte de corrente ○ autoaquecimento