

ES704 – Instrumentação Básica

## **05 – Medição de temperatura**

Eric Fujiwara

Unicamp – FEM – DSI

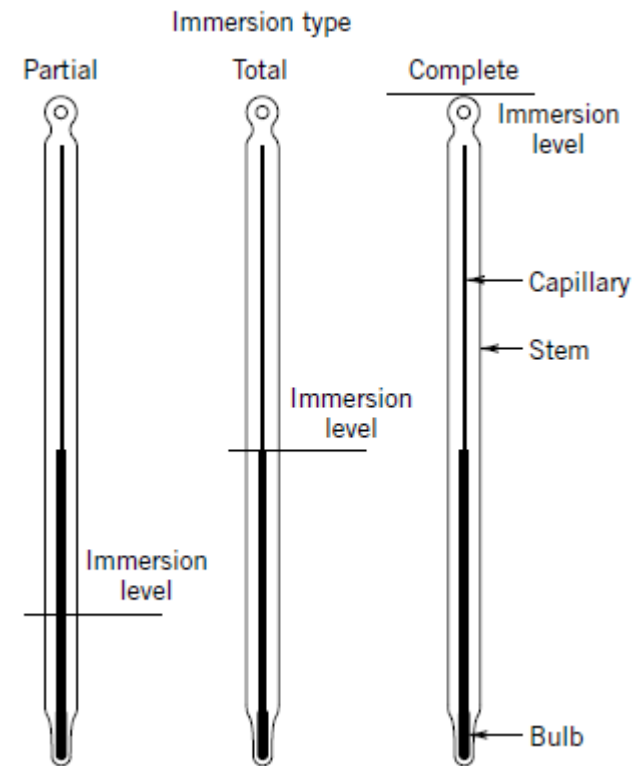
# Índice

- **Índice:**
  - 1) Termômetro de expansão térmica;
  - 2) Termorresistor;
  - 3) Termopar;
  - 4) Termômetro de radiação;
  - 5) Outros métodos;
  - Questionário;
  - Referências;
  - Exercícios.

# 1. Termômetro de expansão térmica

## ■ 1.1. Termômetro de líquido em vidro:

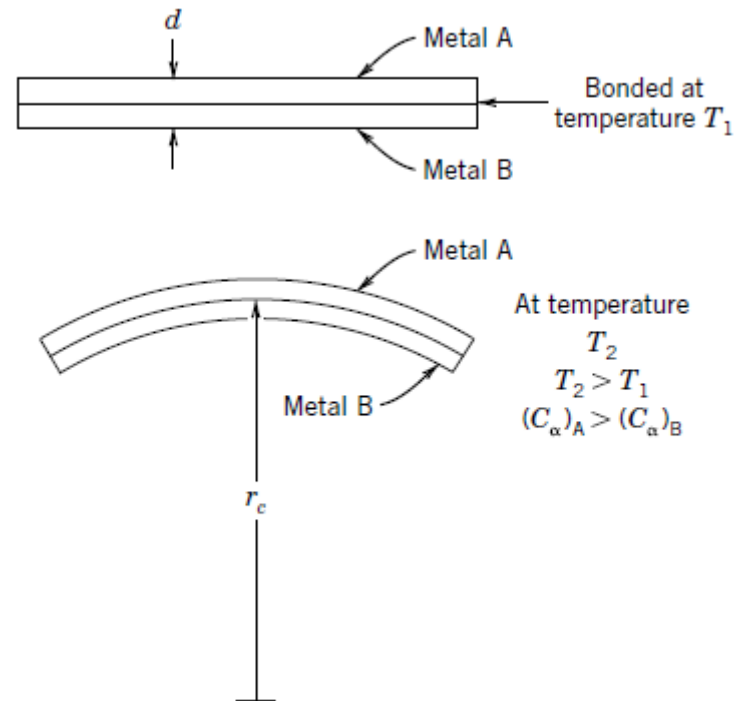
- O líquido armazenado no bulbo sofre expansão volumétrica com o aumento da temperatura  $T$ . O deslocamento linear sobre o capilar indica o valor de  $T$ ;
- Tipos de termômetros:
  - Imersão total;
  - Imersão parcial;
  - Imersão completa.



# 1. Termômetro de expansão térmica

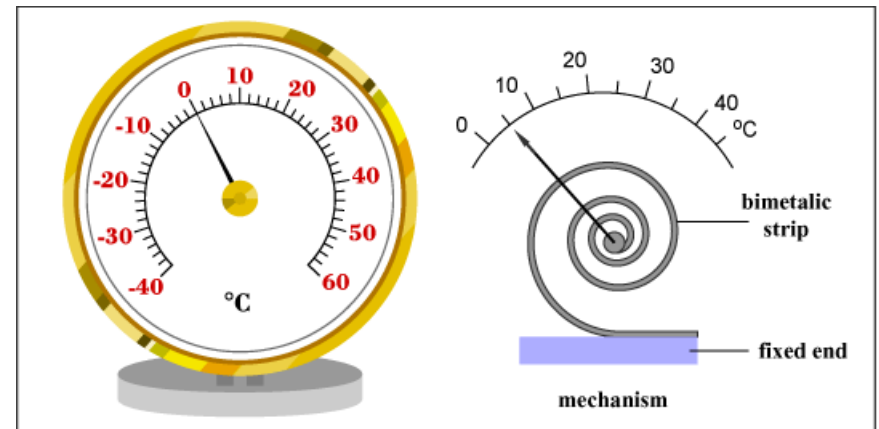
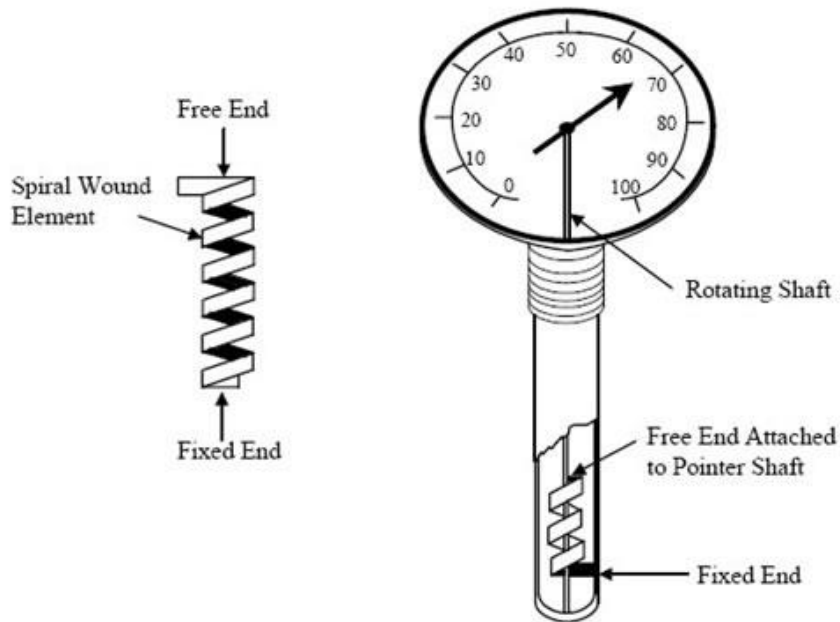
## ▪ 1.2. Termômetro bimetálico:

- Formado por materiais com coeficientes de expansão térmica dissimilares, causando curvatura da estrutura, posteriormente convertida em deslocamento sobre uma escala;
- Tipos de termômetros:
  - Helicoidal;
  - Espiral.



# 1. Termômetro de expansão térmica

- 1.2. Termômetro bimetálico:
  - Helicoidal e espiral.



## 2. Termorresistor

### ▪ 2.1. RTD:

- **Termorresistor (RTD):** dispositivo **condutor** cuja resistividade  $\rho$  varia com a temperatura.
  - O condutor (fio metálico) é instalado em um suporte isolante, e então encapsulado para proteger o fio dos efeitos do ambiente.

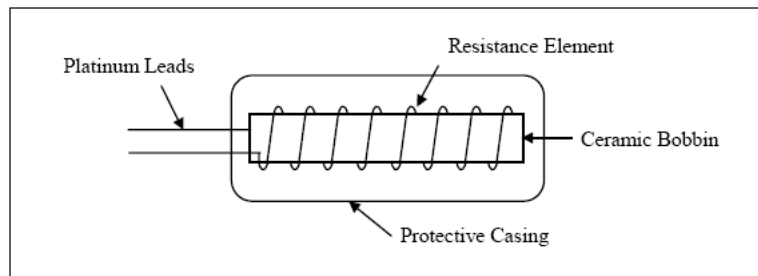
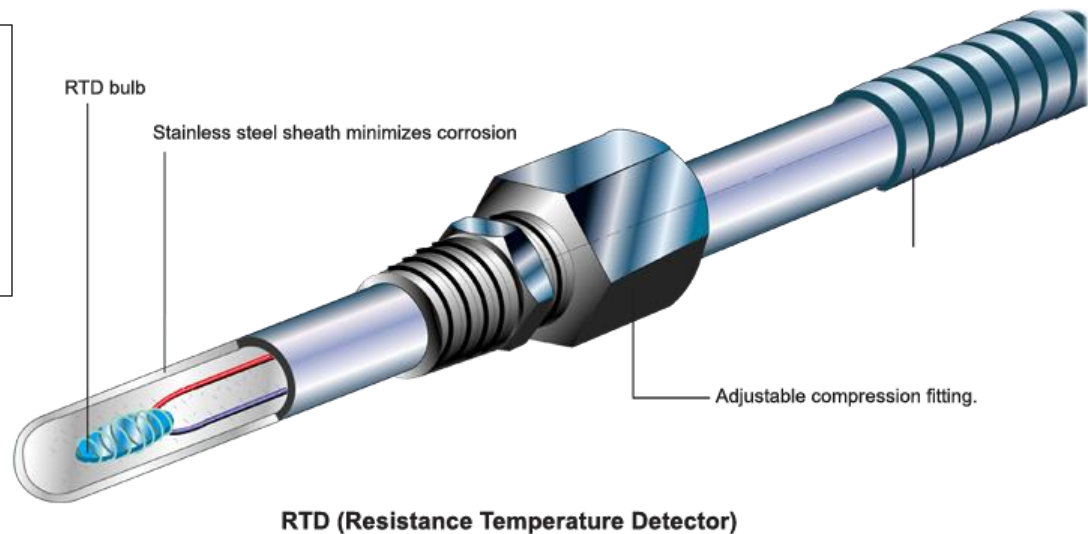


Figure 7-14. Typical RTD – resistance temperature detectors

$$R(T) = \frac{\rho(T)l}{A}$$



## 2. Termorresistor

### ▪ 2.1. RTD:

- **Variação linear da resistência elétrica:**

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (5.1)$$

- Onde  $R_0$  e  $T_0$  são valores de referência;
- O material mais utilizado é a platina, devido à alta sensibilidade e faixa de operação;
- RTDs são interrogados com ponte de Wheatstone.

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

Substance	$\alpha$ [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
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

## 2. Termorresistor

### ▪ 2.2. Termistor:

- Dispositivo **semicondutor**, pode apresentar coeficiente de temperatura negativo (NTC) ou positivo (PTC);
- **Variação não-linear da resistência** com a temperatura:

$$R(T) = R_0 \exp \left[ \beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (5.2)$$

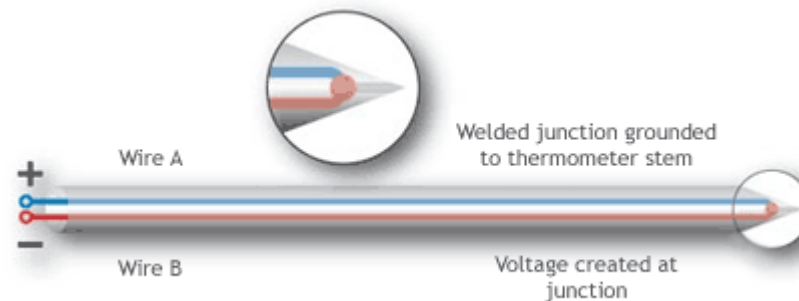




# 3. Termopar

## ▪ 3.1. Termopar:

- Circuito composto por **2 condutores elétricos de materiais dissimilares**, sendo que eles possuem pelo menos **uma conexão elétrica**;
  - **Junção**: conexão elétrica entre os materiais, obtida por solda ou outro tipo de contato;
  - A **tensão de saída** do circuito do termopar é função da **temperatura da junção**.



# 3. Termopar

- 3.1. Termopar:
  - Tipos de termopares:

Table 8.4 Thermocouple Designations

Type	Material Combination		Applications
	Positive	Negative	
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)

# 3. Termopar

- 3.1. Termopar:
  - Tipos de termopares:

Table 8.5 Standard Thermocouple Compositions<sup>a</sup>

Type	Wire		Expected Systematic Uncertainty <sup>b</sup>
	Positive	Negative	
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

<sup>a</sup>From Temperature Measurements ANSI PTC 19.3-1974.

<sup>b</sup>Use greater value; these limits of error do not include installation errors.

# 3. Termopar

## ▪ 3.2. Efeito termoelétrico:

- Quando um condutor elétrico é submetido a um gradiente de temperaturas, **ocorrem fluxos de energia térmica e de energia elétrica**;
- Este efeito pode ser explorado para obter a relação entre a emf e a diferença de temperaturas nas junções;
- Em um circuito com termopar, ocorrem 3 efeitos:
  - 1) Efeito Seebeck;
  - 2) Efeito Peltier;
  - 3) Efeito Thomson.

# 3. Termopar

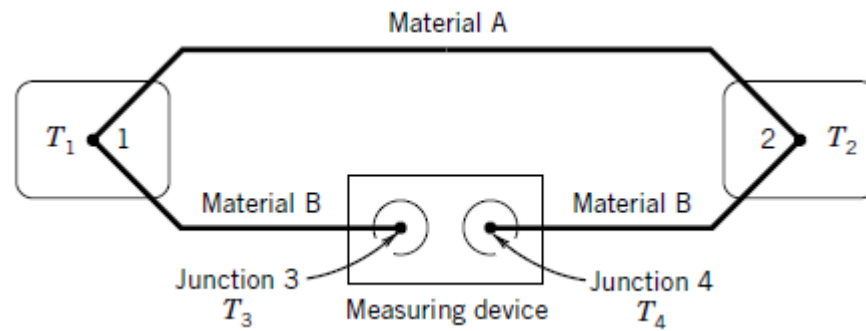
## ▪ 3.2. Efeito termoelétrico:

- **Efeito Seebeck:** a emf é gerada pela diferença de temperatura entre as junções do circuito. A emf só depende da temperatura nas extremidades do condutor, e não do gradiente de temperatura ou distância entre as extremidades;
- **Efeito Peltier:** uma corrente conduzida na junção gera dissipação de potência por efeito Joule → absorver ou dissipar potência na outra junção para manter o equilíbrio térmico;
- **Efeito Thomson:** dissipação de potência devido ao gradiente de temperaturas ao longo do condutor;
- Se a **corrente é nula** (tensão de circuito aberto), somente o **efeito Seebeck** é considerado.

# 3. Termopar

## 3.3. Leis dos termopares:

- **Circuito de termopares:** Seja um circuito de termopar com duas junções, utilizado para medir a diferença entre as temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ ;
  - A **junção de referência** é mantida a uma temperatura constante previamente conhecida ( $T_2$ );
  - A **junção de medição** é utilizada para medir uma temperatura desconhecida ( $T_1$ ) com base na emf obtida.



# 3. Termopar

## ▪ 3.3. Leis dos termopares:

- **1) Lei dos materiais homogêneos:** são necessários pelos menos dois materiais condutores para construir um circuito de termopar;
- **2) Lei dos materiais intermediários:** a emf produzida por junções parasitas (fio de cobre) são anuladas na emf de saída do termopar;
- **3) Lei das temperaturas intermediárias:** seja  $e_{12}$  a emf da junção  $T_1$  com referência  $T_2$ , e  $e_{23}$  a emf junção  $T_2$  com referência  $T_3$ , para a junção  $T_1$  com referência  $T_3$ ,

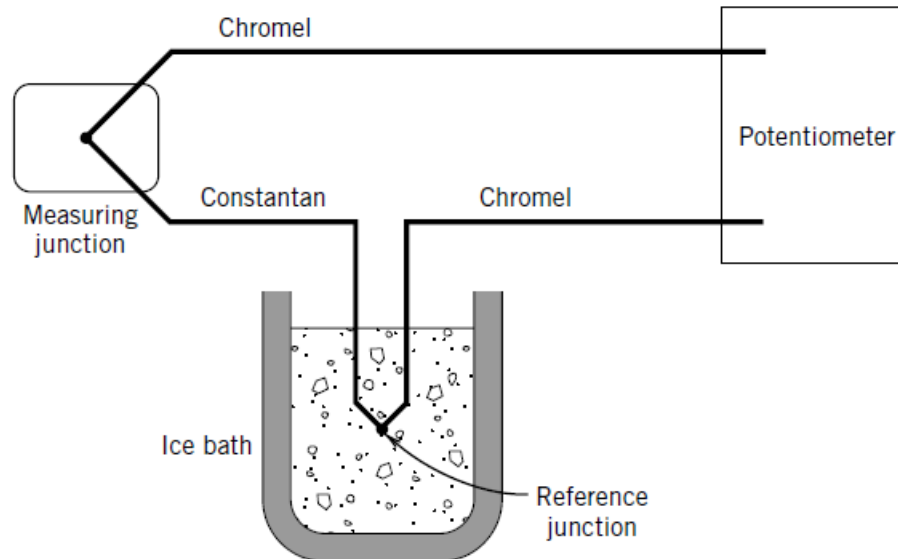
$$e_{13} = e_{12} + e_{23}$$

(5.3)

# 3. Termopar

## ▪ 3.4. Circuitos com termopares:

- **Circuito básico:** junção de medição e de referência;
  - A junção de referência pode ser um banho de gelo ( $0^{\circ}\text{C}$ ) ou uma junção eletrônica para compensar a emf de saída;
  - Datasheets geralmente possuem referência a  $0^{\circ}\text{C}$ .

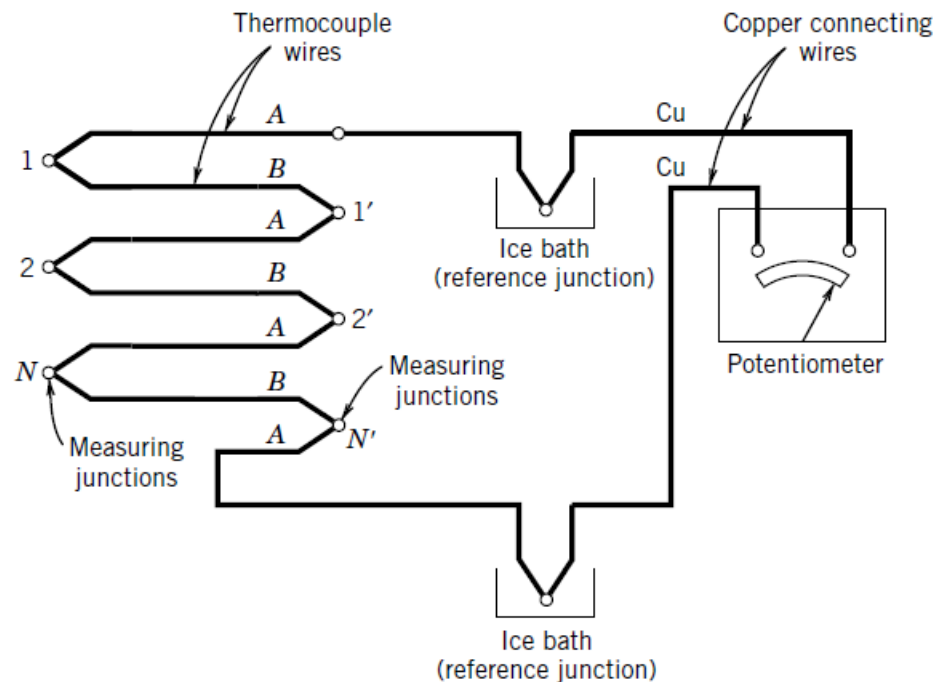




# 3. Termopar

## ■ 3.4. Circuitos com termopares:

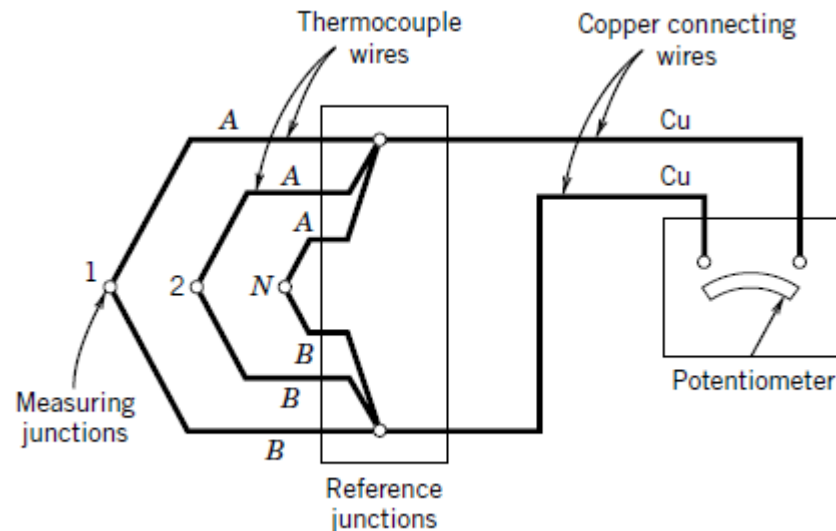
- **Termopilha:** termopares em série. A emf é saída é amplificada pelo número de junções de medição.



# 3. Termopar

## ▪ 3.4. Circuitos com termopares:

- **Paralelo:** termopares em paralelo. A temperatura é dada pela média das emfs produzidas por cada junção.



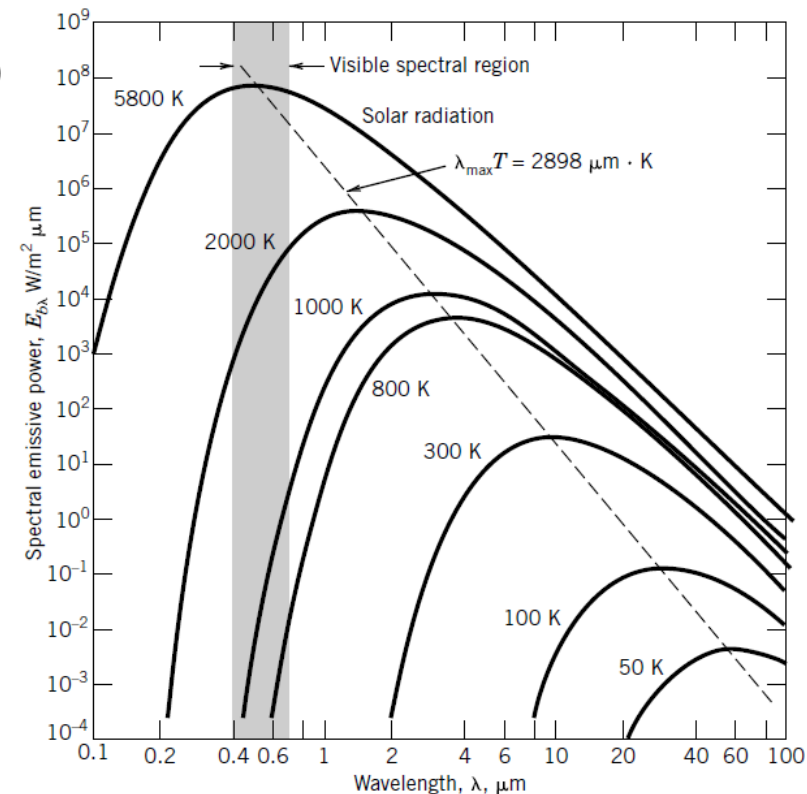
# 4. Termômetro de radiação

## ■ 4.1. Radiação térmica:

- Espectro de emissão do corpo negro:

$$E_b(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda} \left[ \exp\left(\frac{hc}{k\lambda T} - 1\right) \right]^{-1} \quad (5.4)$$

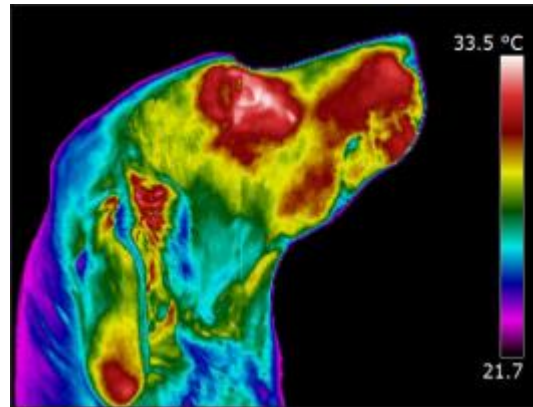
- Onde  $c$  é a velocidade da luz,  $h$  é a constante de Planck e  $k$  é a constante de Boltzmann;



# 4. Termômetro de radiação

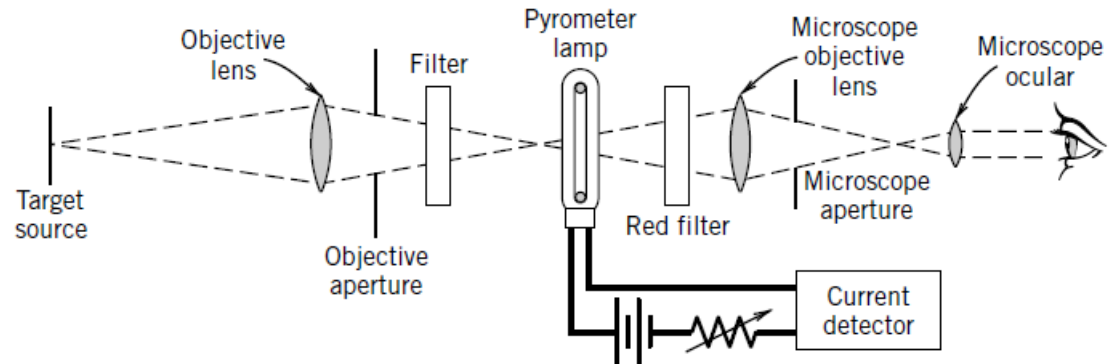
## ■ 4.2. Termômetros IR:

- Termômetro IR;
- Câmera térmica.

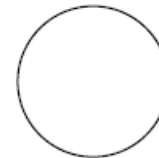


## 4. Termômetro de radiação

### ■ 4.3. Pirômetro:



Filament too cold



Null condition



Filament too hot

Appearance of lamp filament in eyepiece of optical pyrometer.

# 5. Outros métodos

- **5.1. Outros métodos de medição de temperatura:**
  - **Termômetro de pressão:** baseado na expansão térmica de um fluido confinado em um tubo;
  - **Termômetro de quartzo:** temperatura afeta a frequência de ressonância;
  - **Termômetro acústico:** velocidade do som em um gás varia com a temperatura;
  - **Termômetro piroelétrico:** produção de carga elétrica em resposta a um fluxo de calor;
  - **Termômetro de fibra óptica:** variação do índice de refração com a temperatura, ou espalhamento Raman estimulado → medição distribuída de temperatura ao longo da fibra.

# Questionário

## ▪ Questionário:

- 1) Identifique quais sistemas para medição de temperatura são invasivos e não-invasivos. Qual é o mecanismo de transferência de calor que ocorrem em cada um deles?
- 2) Qual é diferença entre RTD, termistor e termopar?
- 3) Como funciona a malha de controle de temperatura de um computador? Que tipo de sensor é utilizado? Por que é necessário regular a temperatura do sistema?
- 4) Por que a tensão gerada por um termopar depende dos materiais que compõem a junção?

# Referências

## ■ Referências:

- W.D. Callister, Materials Science and Engineering: an Introduction, Willey, 2007.
- R.S. Figliola, D.E. Beasley, Theory and Design for Mechanical Measurements, Wiley, 2011.
- D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Fundamentals of Physics, Willey, 2007.
- A.S. Morris, Measurement & Instrumentation Principles, Butterworth Heinemann, 2001.
- J.G. Webster, H. Eren (Ed.) Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, CRC Press, 2014.



# Exercícios

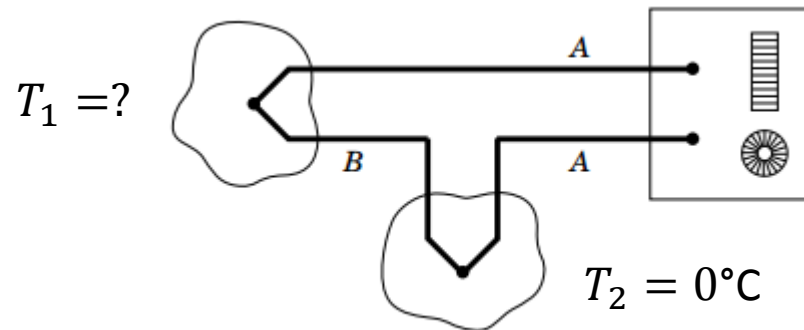
# Exercícios

- **Ex. 5.1)** Um termopar do tipo J (Fe-Constantan) é utilizado para medir uma temperatura  $T_1$ .
  - a) Para a junção de referência em  $T_2 = 0^\circ\text{C}$ , foi obtida uma emf de 9,669 mV. Determine  $T_1$ .
  - b) A junção de referência seja submetida a  $30^\circ\text{C}$ , resultando em uma emf de 8,132 mV. Determine a temperatura medida pela junção de medição.

# Exercícios

## ▪ Ex. 5.1)

- a) Referência a 0°C:



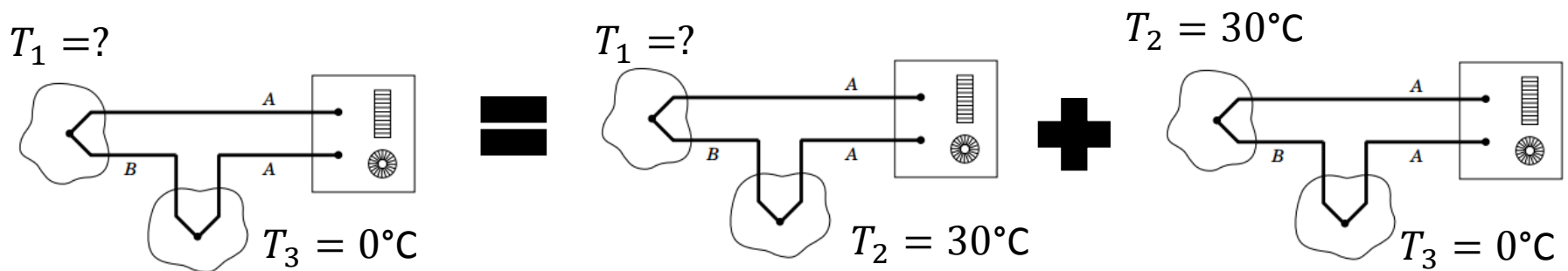
- Consultando o datasheet do termopar tipo J, para  $T_2 = 0$  e  $e_{12} = 9.669 \text{ mV}$ ,  $T_1 = 180^\circ\text{C}$ .

# Exercícios

## ▪ Ex. 5.1)

- b) Referência a 30°C:

- Referência a  $T_2 = 30^\circ\text{C} \rightarrow$  lei das temperaturas intermediárias.



$$e_{13} = e_{12} + e_{23}$$

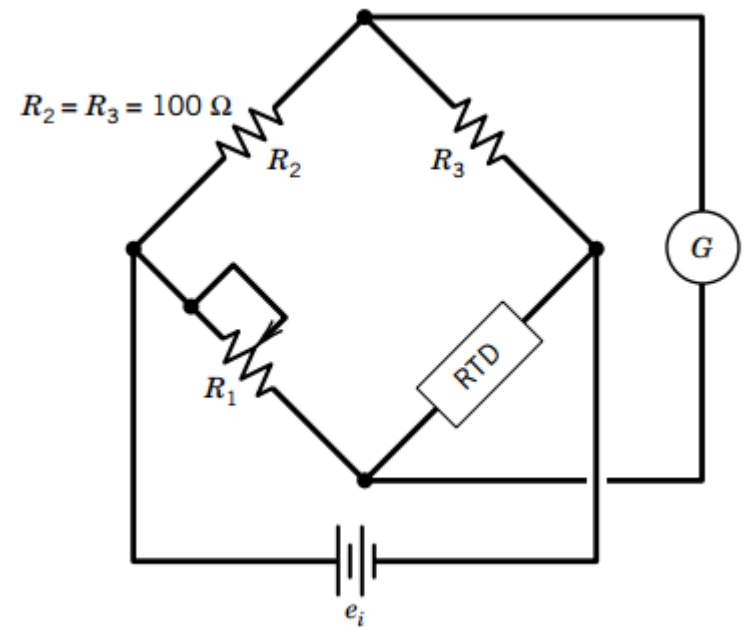
# Exercícios

## ▪ Ex. 5.1)

- b) Referência a 30°C:
  - A referência agora é  $T_2 = 30^\circ\text{C}$ . Para  $T_3 = 0$ ,  $e_{23} = 1.537 \text{ mV}$ ;
  - A tensão medida é  $e_{12} = 8.132 \text{ mV}$ . Pela lei da temperaturas intermediárias,  $e_{13} = e_{12} + e_{23} = 9.669 \text{ mV}$ ;
  - Finalmente, do datasheet, para  $T_3 = 0$  e  $e_{13} = 9.669 \text{ mV}$ ,  $T_1 = 180^\circ\text{C}$ .

# Exercícios

- **Ex. 5.2)** Seja um RTD de platina interrogado através de uma ponte de Wheatstone ( $E_i = 5\text{ V}$ ). O RTD possui resistência  $R_0 = 25\ \Omega$  ( $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ). A ponte se encontra inicialmente equilibrada. Determine a temperatura para os casos:
  - a) Modo nulo: após a variação de temperatura, a ponte é equilibrada com  $R_1 = 35\ \Omega$ ;
  - b) Modo de deflexão: supondo a ponte equilibrada com  $R_1 = 25\ \Omega$ , a tensão de saída é  $E_o = 0.62\text{ V}$ . após a variação de temperatura.



# Exercícios

## ▪ Ex. 5.2)

- a) Modo nulo:

- RTD:  $R_0 = 25 \, \Omega @ T_0 = 0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha = 0.003925^\circ\text{C}^{-1}$  (Pt);

- Ponte equilibrada ( $0^\circ\text{C}$ ):

- $\frac{R_2}{R_3} = \frac{R_1}{R_4} \rightarrow R_1 = R_4 = 35 \, \Omega;$

- Ajuste de resistência:

- $R_4 = 35 = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] = 25[1 + 0.003925(T - 0)];$

- $T = 101.9^\circ\text{C}$

# Exercícios

## ▪ Ex. 5.2)

- b) Modo de deflexão:

- Tensão de saída:

- $E_o = E_i \left( \frac{R_2}{R_2 + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_4} \right) \Rightarrow \frac{0.62}{5} = \frac{100}{200} - \frac{25}{25 + R_4} \Rightarrow R_4 = 41.5 \, \Omega;$

- Temperatura do RTD:

- $R_4 = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \Rightarrow T = 168^\circ\text{C}.$



# Exercícios

- **Ex. 5.3)** Um termopar tipo S (Pt/10% Rh-Pt) é utilizado para medir a temperatura de um forno. Foi obtida uma emf de 5,975 mV para a junção de referência a 50°C. Determine a temperatura no forno.

# Exercícios

## ▪ Ex. 5.3)

- Termopar tipo S:

- $T_2 = 50^\circ\text{C}, T_3 = 0 \rightarrow e_{23} = 0.299 \text{ mV};$
- $e_{13} = e_{12} + e_{23} = 6.274 \text{ mV};$
- $T_3 = 0 \rightarrow T_1 = 700^\circ\text{C}.$

# Exercícios

- **Ex. 5.4)** Uma termopilha formada por quatro termopares tipo J apresenta tensão de saída de 26,536 mV. As junção de referência é posicionada a 0°C.
  - a) Determine a temperatura medida pela termopilha.

# Exercícios

## ▪ Ex. 5.4)

- a) Termopilha:

- Tensão para um termopar:

- $e_o = \frac{26.563}{4} = 6.634 \text{ mV};$

- Temperatura: tabela do termopar J @0°C:

- $T = 125^\circ\text{C}.$