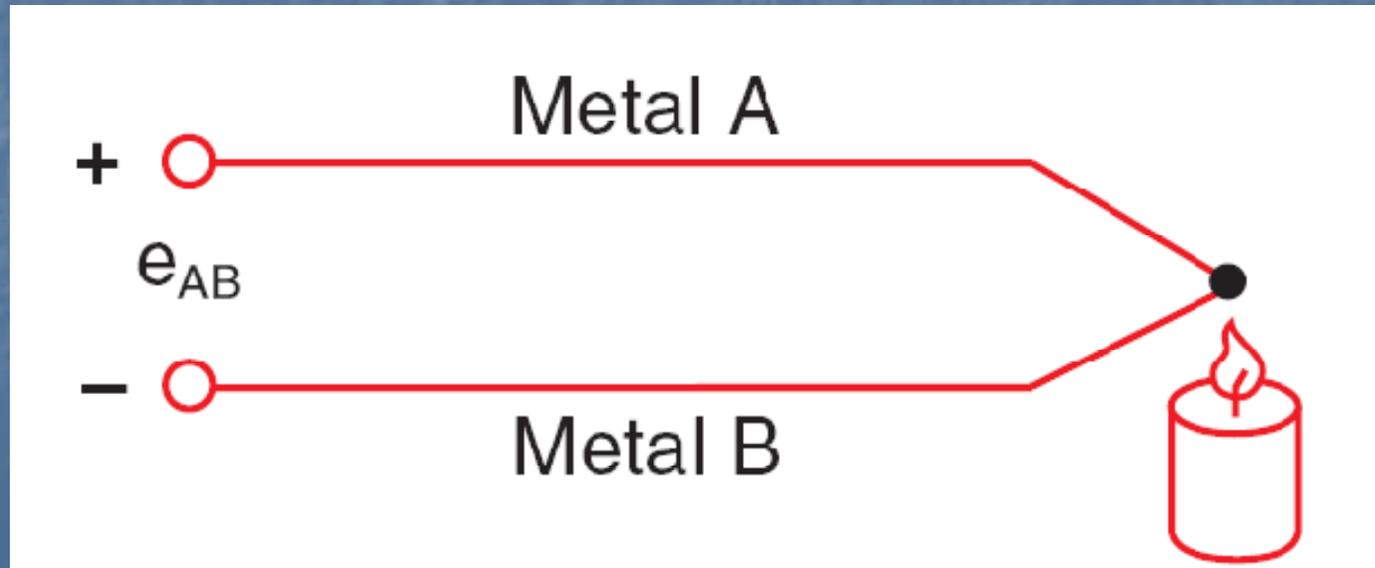


# Sensores de Temperatura: Termopares

Prof. Leonimer F Melo

# Termopares: conceito

- Se colocarmos dois metais diferentes em contato elétrico, haverá uma diferença de potencial entre eles em função da temperatura. Esse efeito é conhecido como efeito termoelétrico ou efeito Seebeck.
- Esse efeito foi descoberto acidentalmente em 1822 pelo físico Thomas Seebeck.



# Termopar: fabricação

- A junção é feita soldando-se dois fios de metais diferentes por suas pontas, sem utilizar na solda nenhum outro material que não seja os dois metais.
- Isto usualmente pode ser obtido por um arco elétrico dentro do qual os fios são colocados.
- É possível obter a junção termopar de forma “caseira” enrolando as pontas de dois fios quaisquer de materiais diferentes (cobre e alumínio por exemplo) e martelando-as.

'Cases'



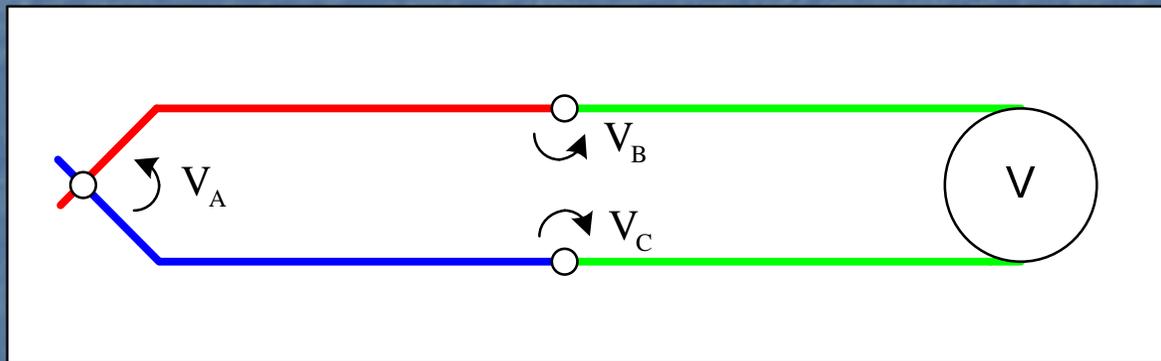
# Termopares: características

- Embora praticamente se possa construir um termopar com qualquer combinação de dois metais, utilizam-se apenas algumas combinações normalizadas, isto porque possuem tensões de saída previsíveis e suportam grandes gamas de temperaturas.
- Tendo por objetivo uma implementação de medida de temperatura foram pesquisados diferentes tipos de ligas e metais para se obter linearidade, acurácia, grandes coeficientes de temperatura e repetibilidade.
- De maneira geral, os tipos atuais de termopares pode medir de  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , com exatidão de  $0,5 \sim 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  no máximo e com coeficientes de temperatura (TC) de  $5 \sim 50\text{ micro-V}/^{\circ}\text{C}$ .

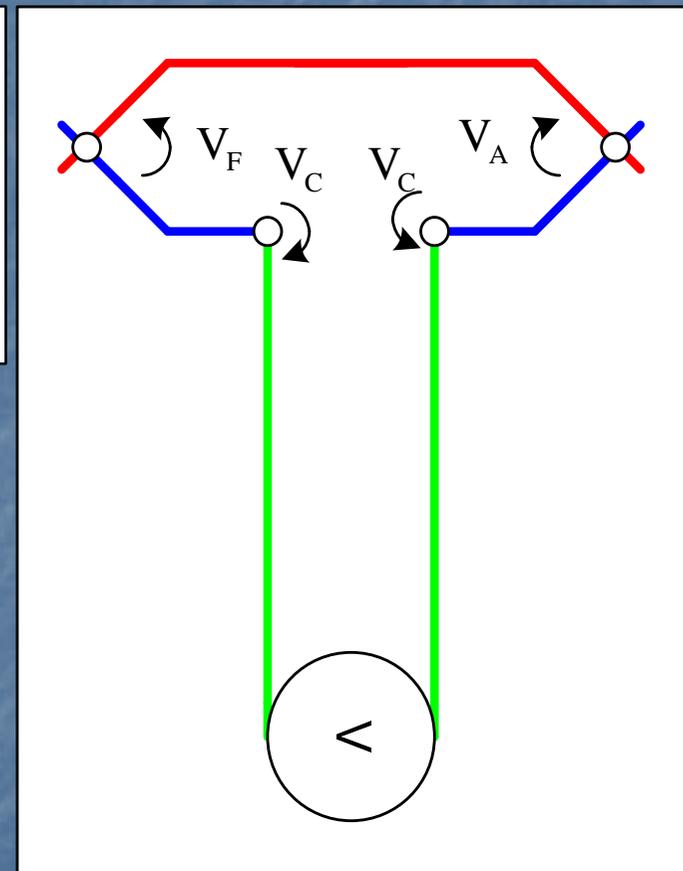
# Termopares: características

- Existem tabelas normalizadas que indicam a tensão produzida por cada tipo de termopar. Por exemplo, o termopar tipo K a uma temperatura de 300 °C irá produzir 12,2 mV.
- Não basta ligar um voltímetro ao termopar e registrar o valor da tensão produzida, uma vez que, ao ligarmos o voltímetro estamos a criar uma segunda (e indesejada) junção no termopar!
- Para se fazerem medições exatas devemos compensar este efeito, o que é feito recorrendo a uma técnica conhecida por ***compensação por junção fria***.

# Termopares: efeito "junção fria"

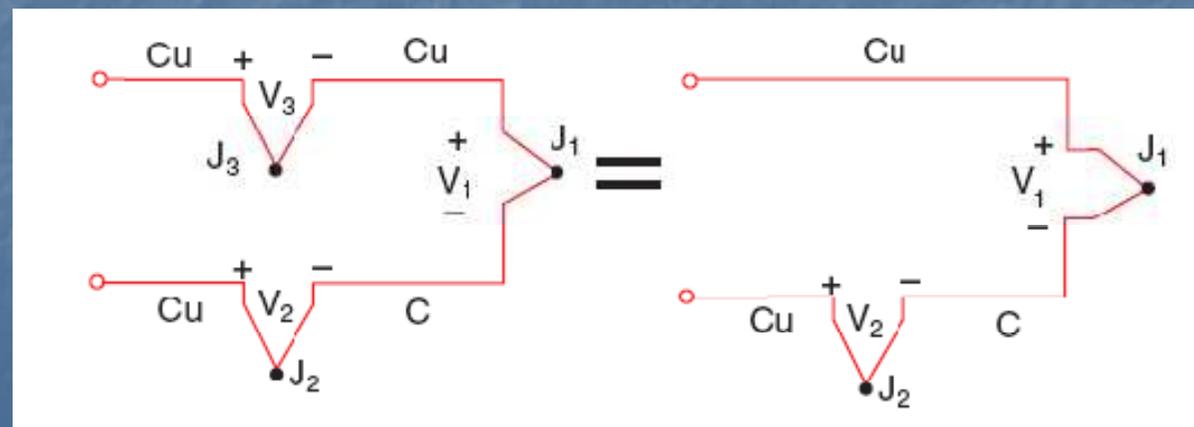
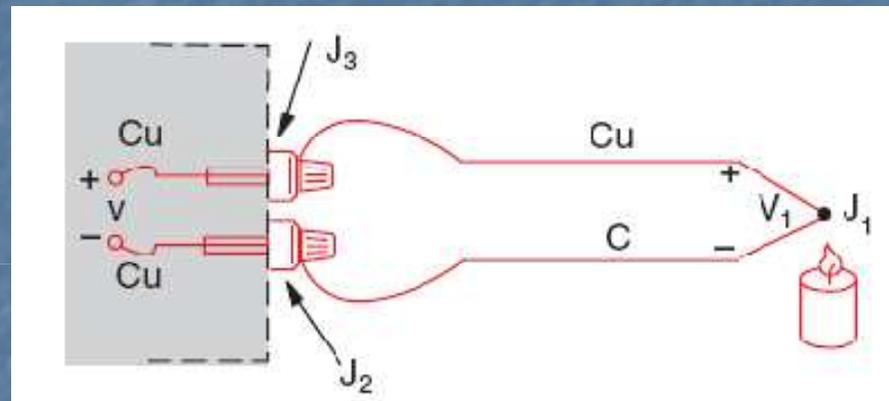


$$V = V_A + (V_B - V_C)$$



$$V = -V_C + (V_A - V_F) + V_C = V_A - V_F$$

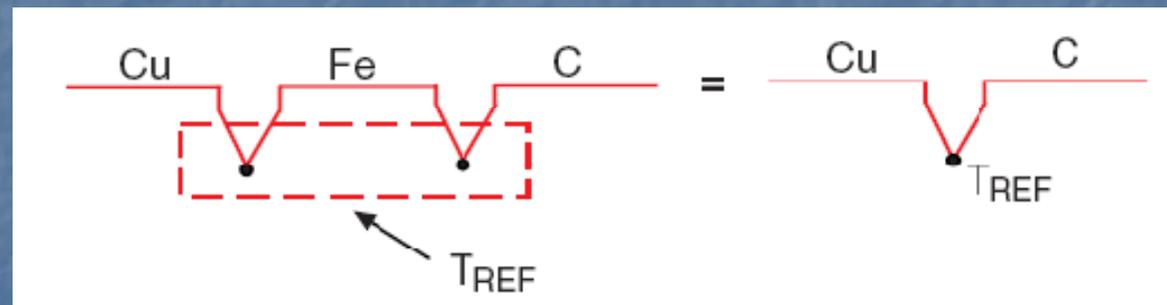
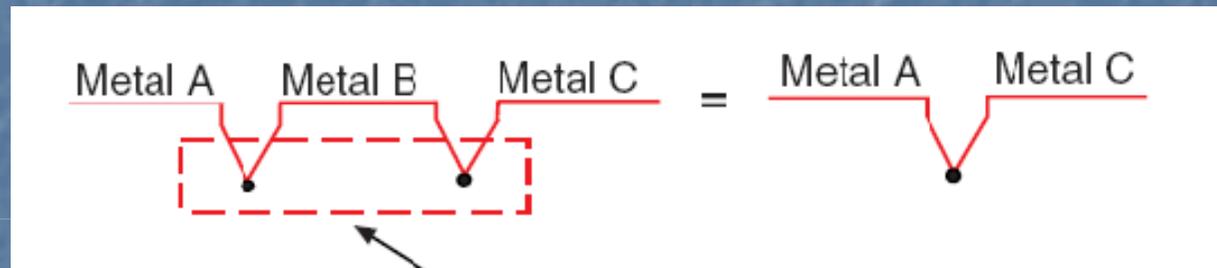
# Exemplo de conexão



# Termopares: junções intermediárias

- Por que é que ligando um voltímetro a um termopar não se geram várias junções adicionais (ligações ao termopar, ligações ao aparelho de medida, ligações dentro do próprio aparelho, etc...) ?
  - A resposta advém da lei conhecida como lei dos metais intermédios, que afirma que ao inserirmos um terceiro metal entre os dois metais de uma junção dum termopar, basta que as duas novas junções criadas com a inserção do terceiro metal estejam à mesma temperatura para que não se manifeste qualquer modificação na saída do termopar!
  - Esta lei é também importante na própria construção das junções do termopar, uma vez que assim se garante que ao soldar os dois metais a solda não irá afetar a medição.

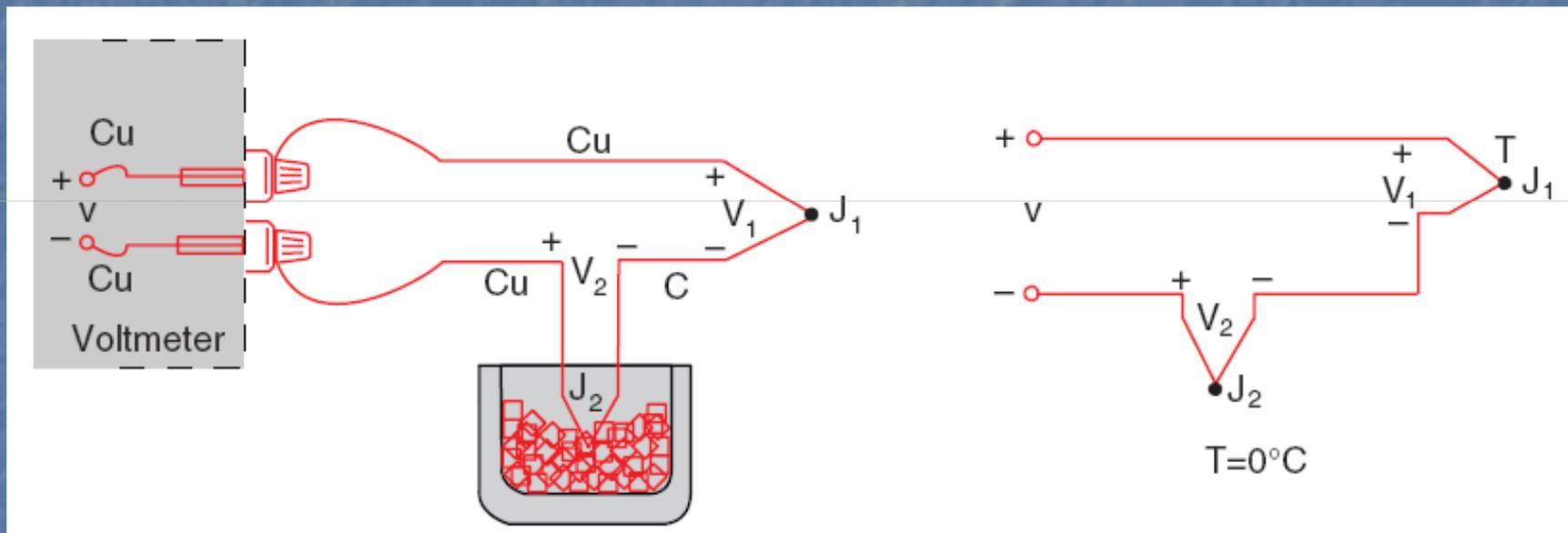
# Metais Intermediários



# Termopares: compensação da junção fria

- Todas as tabelas normalizadas dão os valores da tensão de saída do termopar considerando que a segunda junção do termopar (a junção fria) é mantida a exatamente zero graus Celsius.
- Antigamente a junção fria era mantida em contato com água com gelo (daqui o termo compensação por junção fria).
- A manutenção do gelo nas condições necessárias não é simples e muito menos prática! Logo optou-se por medir a temperatura da junção fria e compensar a diferença.

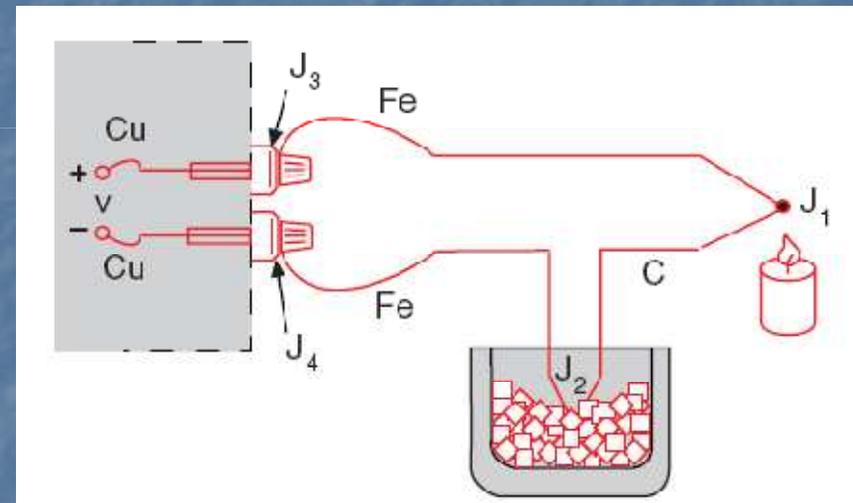
# Compensação da junção fria



# Compensação da junção fria

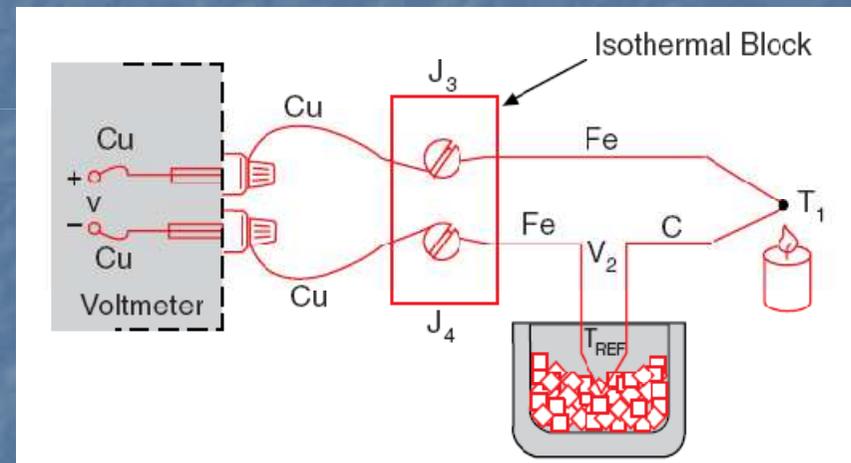
- As junções  $J_3$  e  $J_4$  se anulam desde que estejam sob a mesma temperatura.
- Neste caso a temperatura lida é:

$$T = k(T_{J_1} - T_{J_2})$$

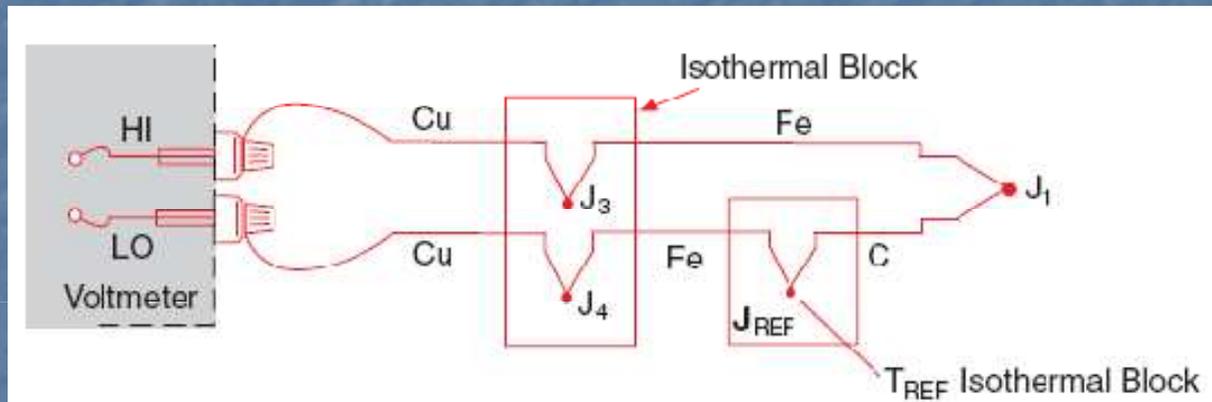


# Junção fria e bloco isotérmico

- Da forma ao lado a junção que era feita nos terminais do voltímetro (sem garantia de qualidade ou isoterмия) é transferida para um bloco isotérmico.

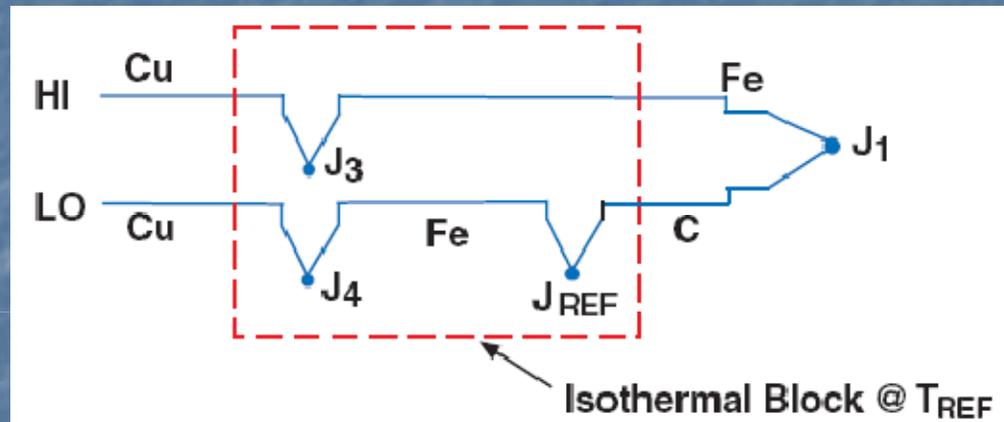


# Compensação da junção fria



- Não necessário o balde de água e gelo desde que seja conhecida a temperatura de  $J_{REF}$

# Compensação da junção fria

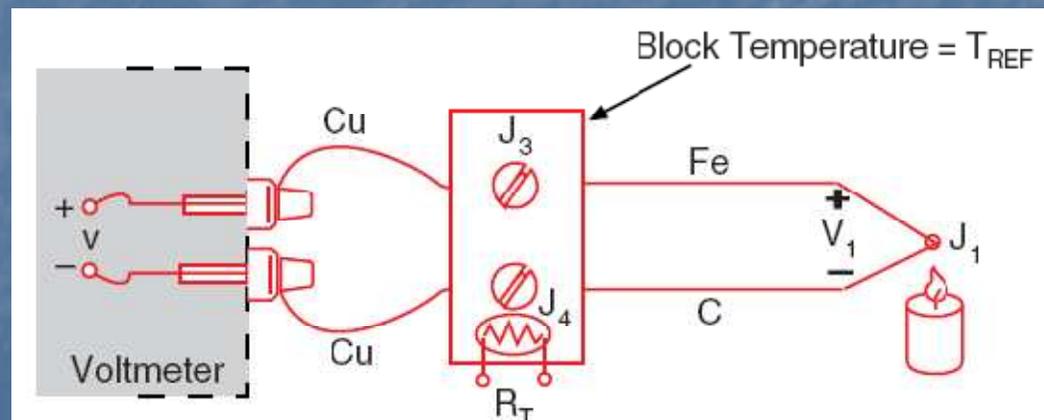


- $J_{REF}$  e demais junções do conector podem ser inseridas no mesmo bloco isotérmico.
- É necessário saber o valor de  $T_{REF}$ .



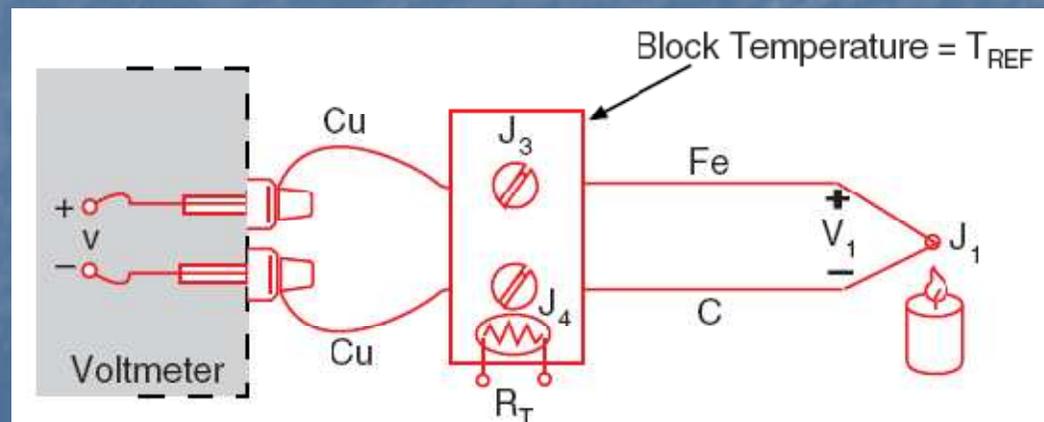
# Compensação da junção fria

- Agora simplificada é possível concluir que na montagem a seguir, basta medirmos a temperatura no bloco isotérmico para compensar a medida do termopar.



# Algoritmo da compensação

- (1) Medir a temperatura  $T_{REF}$  na junção isotérmica.
- (2) Converter  $T_{REF}$  para seu equivalente  $V_{REF}$ .
- (3) Medir a tensão  $V_1$  e somar  $V_{REF}$  a ela.
- (4) Converter  $V_1$  em  $T_{J1}$ .



# Termopares: escolha do tipo

- Quando se procede à escolha de um termopar deve-se analisar qual o mais adequado para a aplicação desejada, segundo as características de cada tipo de termopar, tais como:
  - Faixa de temperaturas suportada.
  - Exatidão e a confiabilidade das leituras na faixa em questão.

# Termopares: tipos K e E

## ■ Tipo K (*Cromel / Alumel*)

- O termopar tipo K é um termopar de uso genérico. Tem um baixo custo e, devido à sua popularidade estão disponíveis variadas sondas (cases). Cobrem temperaturas entre os -200 e os 1370 °C, tendo uma sensibilidade de aproximadamente 41 $\mu$ V/°C.

## ■ Tipo E (*Cromel / Constantan*)

- Este termopar tem uma elevada sensibilidade (68  $\mu$ V/°C) que o torna adequado para baixas temperaturas.

# Termopares: tipo J

- **Tipo J (*Ferro / Constantan*)**
  - A sua gama limitada (-40 a 750 °C) é a responsável pela sua menor popularidade em relação ao tipo K.
  - Este termopar está presente nos equipamentos mais antigos e por esse motivo não é compatível com termopares mais 'modernos'.
  - A utilização do tipo J acima dos 760 °C leva a uma transformação magnética abrupta que lhe estraga a calibração.

# Termopares: tipo N

- **Tipo N (*Nicrosil/ Nisil*)**
  - A sua elevada estabilidade e resistência à oxidação a altas temperaturas tornam o tipo N adequado para medições a temperaturas elevadas, sem recorrer aos termopares que incorporam platina na sua constituição (tipos B, R e S). Foi desenhado para ser uma “evolução” do tipo K.

# Termopares: tipo B

## ■ Tipo B (*Platina / Ródio-Platina*)

- Os termopares tipo B, R e S apresentam características semelhantes.
- São dos termopares mais estáveis, contudo, devido à sua reduzida sensibilidade (da ordem dos  $10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ), utilizam-se apenas para medir temperaturas acima dos  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Devido à reduzida sensibilidade destes termopares, a sua resolução de medida é também reduzida.
- Adequado para medição de temperaturas até aos  $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Contra aquilo que é habitual nos outros termopares, este tipo possui a mesma tensão na saída a  $0$  e a  $42 \text{ }^\circ\text{C}$ , o que impede a sua utilização abaixo dos  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

# Termopares: tipos R, S e T

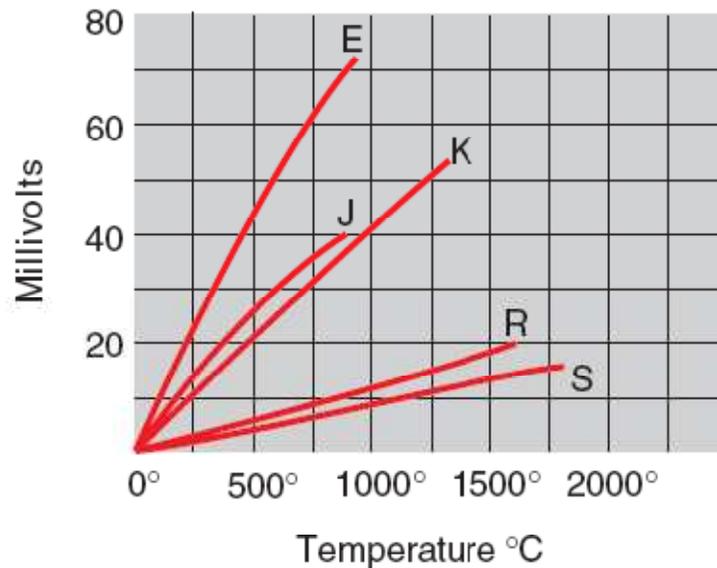
- **Tipo R (*Platina / Ródio-Platina*)**
  - Adequado para medição de temperaturas até aos 1600 °C.
  - Reduzida sensibilidade (10  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) e custo elevado.
- **Tipo S (*Platina / Ródio-Platina*)**
  - Adequado para medição de temperaturas até aos 1600 °C.
  - Reduzida sensibilidade (10  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ), elevada estabilidade e custo elevado.
- **Tipo T (*Cobre / Constantan*)**
  - É dos termopares mais indicados para medições na gama dos -270 °C a 400 °C.

# Termopare: tipos C e M

- **Tipo C (*Tungstênio 5% Rênio/ Tungstênio 26% Rênio*)**
  - Adequado para medidas na faixa de 0 a 2320°C.
  - Sua utilização é recomendada em fornos a vácuo em temperaturas extremamente elevadas.
  - NUNCA deve ser utilizado na presença de oxigênio em temperaturas acima de 260 °C.
- **Type M (*Liga Niquel 19% / Liga de Niquel-Molibidênio 20%*)**
  - Adequado para mesma aplicação do Tipo C, mas para temperaturas de até ~1400°C..

# Comparação entre os Tipos: faixa e função-resposta

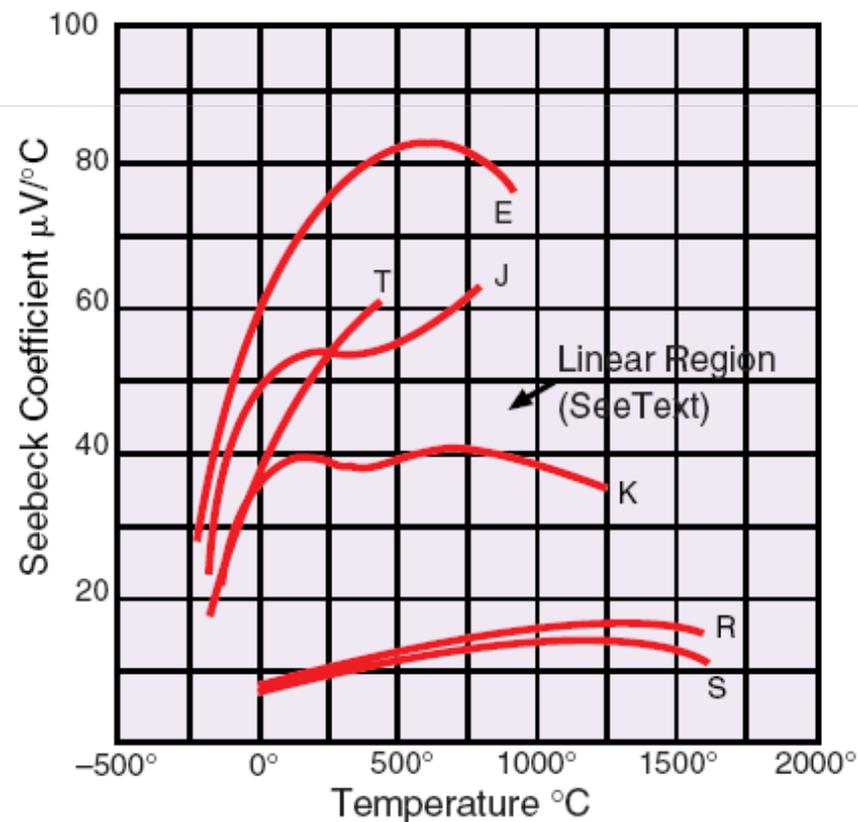
- Saída em mV para alguns tipos de termopares até o fim de sua faixa de operação:



Type	Metals	
	+	-
E	Chromel	Constantan
J	Iron	Constantan
K	Chromel	Alumel
R	Platinum	Platinum 13% Rhodium
S	Platinum	Platinum 10% Rhodium
T	Copper	Constantan

# Comparação entre os Tipos: TC

- TC de cada tipo em toda sua faixa de operação:



# Tabela de TCs @ 20 °C

- Tabela comparativa entre os tipos mais comuns de termopares e seus TCs em temperatura ambiente:

<b>THERMOCOUPLE TYPE</b>	<b>SEEBECK COEFFICIENT (<math>\mu\text{V}/^\circ\text{C}</math>) @ 20°C</b>
E	62
J	51
K	40
R	7
S	7
T	40

# Polinômio para calcular a Temperatura a partir da tensão

TYPE K	
Nickel-10% Chromium(+) Versus Nickel-5%(-) (Aluminum Silicon)	
0°C to 1370°C ± 0.7°C	
8th order	
0.226584602	
24152.10900	
67233.4248	
2210340.682	
-860963914.9	
4.83506E + 10	
-1. 18452E + 12	
1.38690E + 13	
-6.33708E + 13	

$$T(x) = \sum_{i=0}^8 a_i x^i = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_8 x^8$$

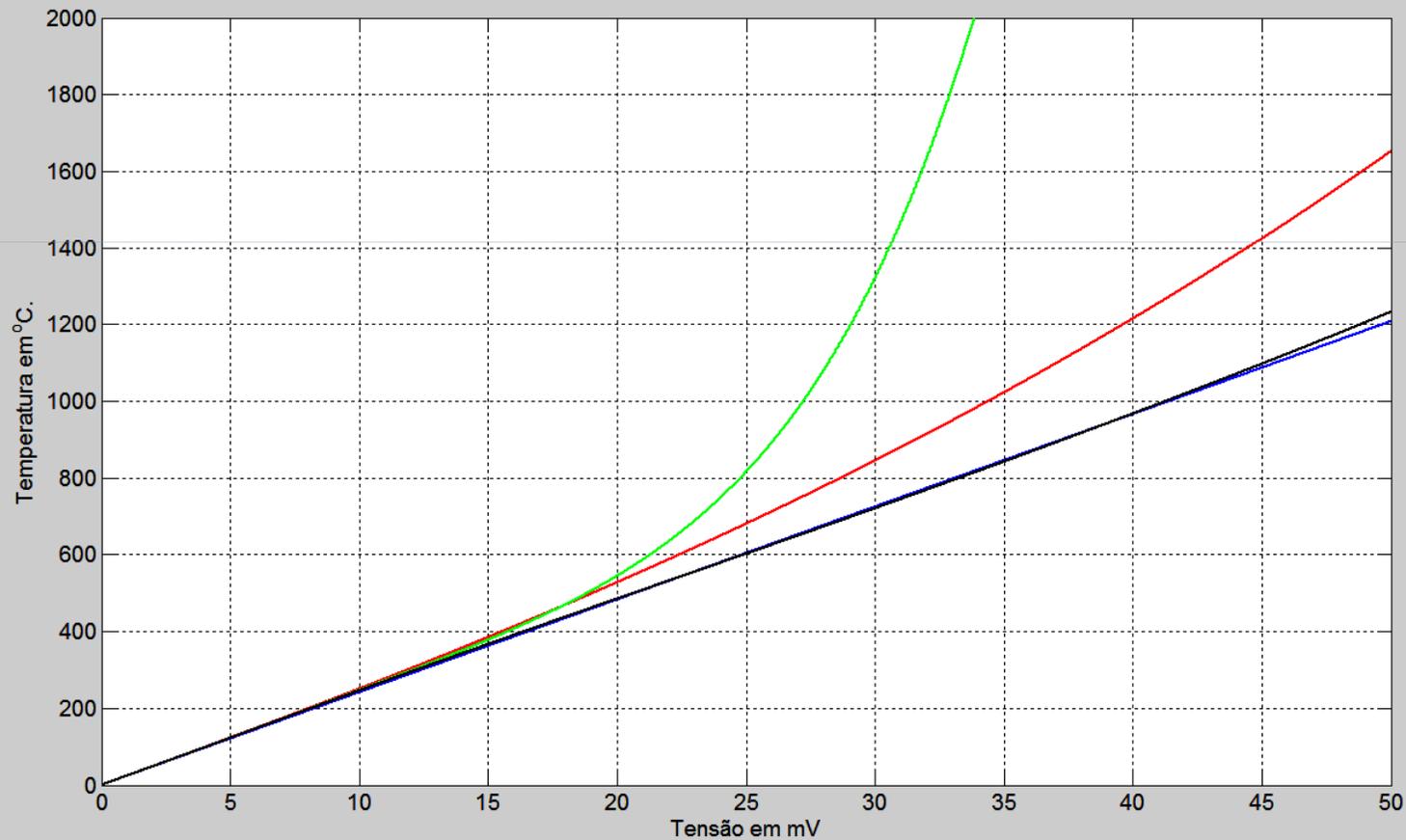
$x = \text{Volts}$

$T = \text{°C}$

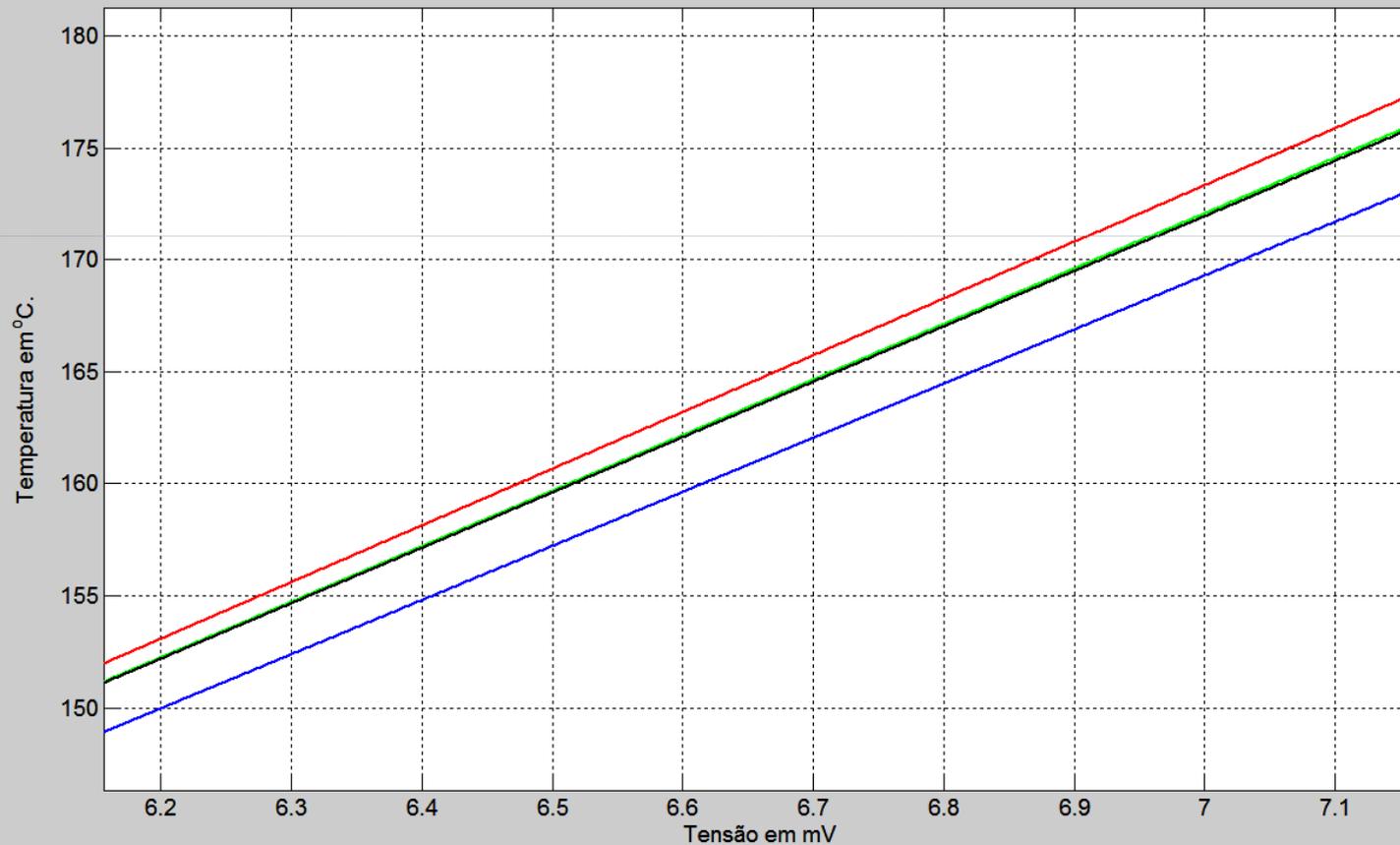
# Verificação do polinômio

```
% -----= script matlab -----  
a0 = 0.226584602  
a1 = 24152.10900  
a2 = 67233.4248  
a3 = 2210340.682  
a4 = -860963914.9  
a5 = 4.83506e10  
a6 = -1.18452e12  
a7 = 1.38690e13  
a8 = -6.33708e13  
x = 0:0.000001:0.050;  
T0 = a0;  
T1 = a0 + a1*x;  
T2 = a0 + a1*x + a2*x.^2;  
T3 = a0 + a1*x + a2*x.^2 + a3*x.^3;  
T4 = a0 + a1*x + a2*x.^2 + a3*x.^3 + a4*x.^4;  
T5 = a0 + a1*x + a2*x.^2 + a3*x.^3 + a4*x.^4 + a5*x.^5;  
T6 = a0 + a1*x + a2*x.^2 + a3*x.^3 + a4*x.^4 + a5*x.^5 + a6*x.^6;  
T7 = a0 + a1*x + a2*x.^2 + a3*x.^3 + a4*x.^4 + a5*x.^5 + a6*x.^6 + a7*x.^7;  
T8 = a0 + a1*x + a2*x.^2 + a3*x.^3 + a4*x.^4 + a5*x.^5 + a6*x.^6 + a7*x.^7 + a8*x.^8;
```

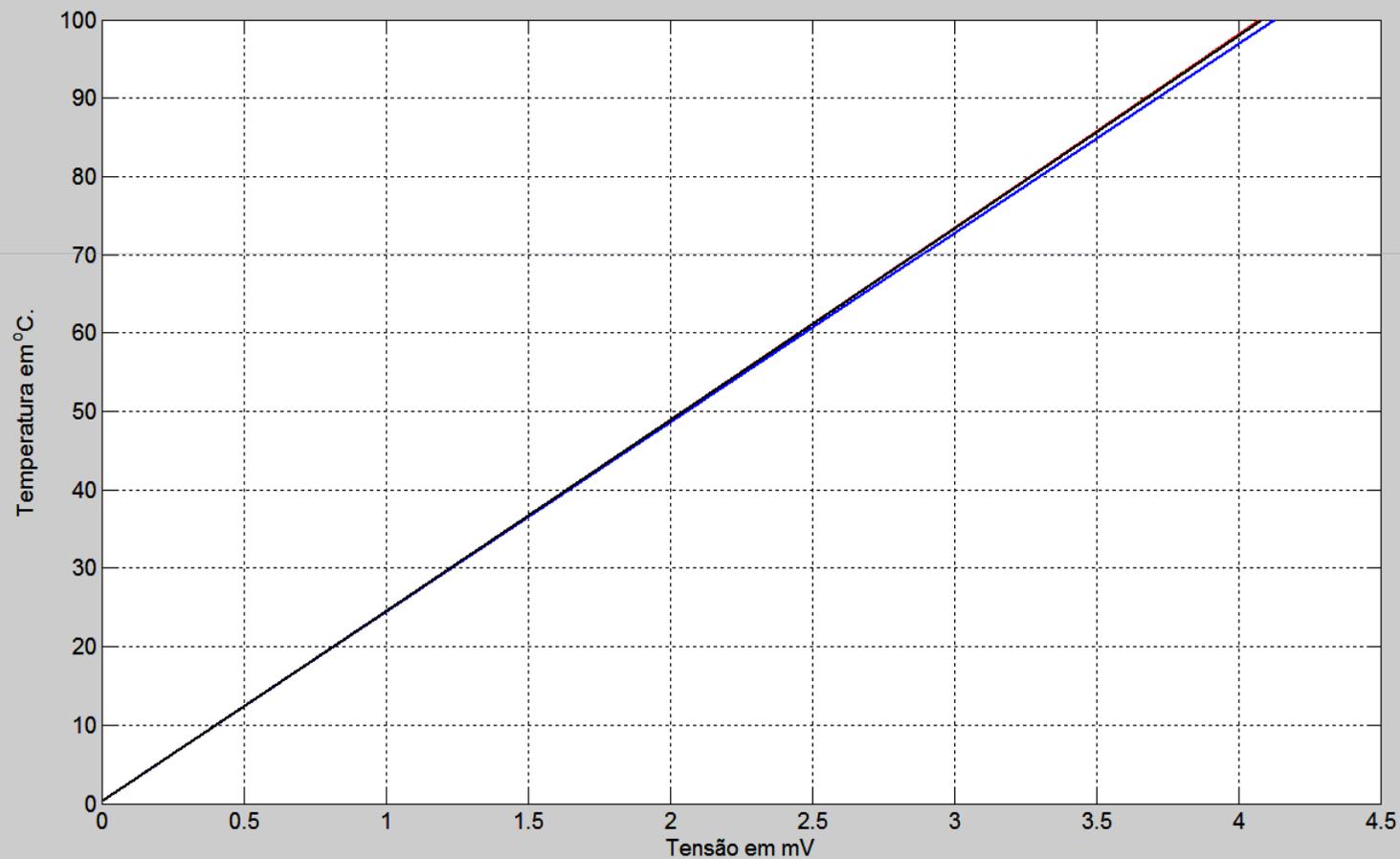
# Comparação: ordens 1, 3, 5 e 8 (azul, vermelho, verde, preto)



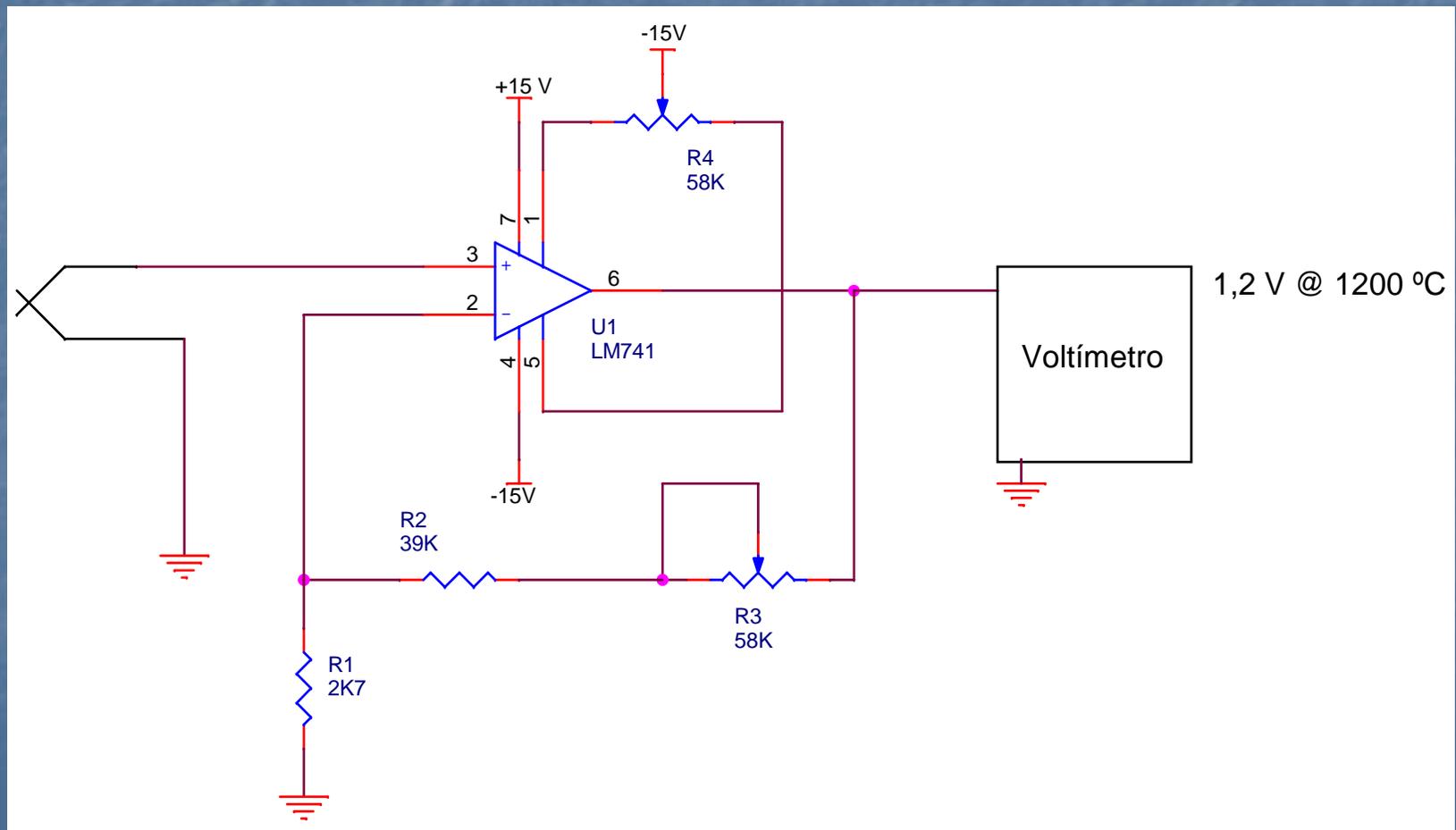
# Comparação: ordens 1, 3, 5 e 8 (azul, vermelho, verde, preto)



# Comparação de 0 a 100 °C

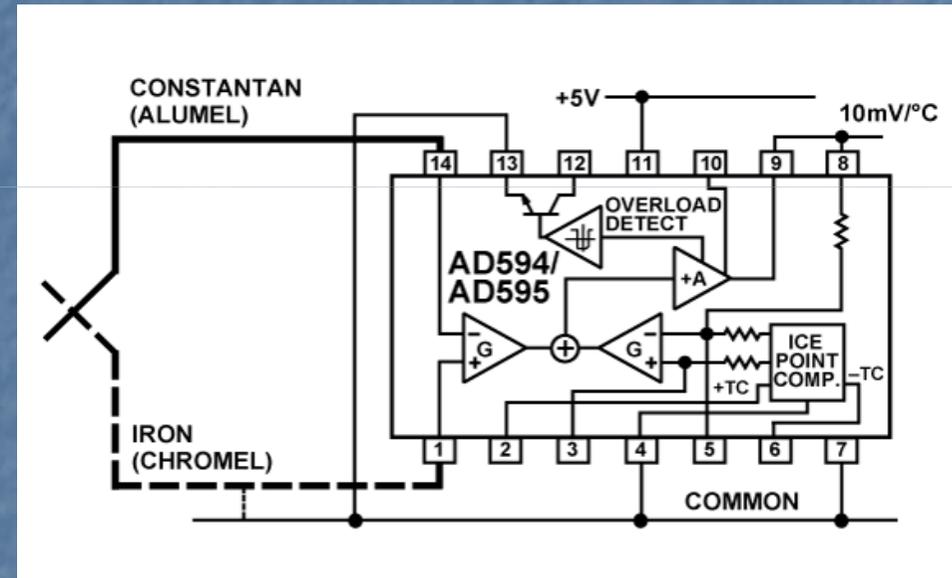


# Condicionamiento de señal para termopares



# CI's dedicados: AD594/595

- Características:
  - Disponível para os tipos J (AD594) ou Type K (AD595)
  - Pode ser utilizado também com Tipo T
  - Saída de tensão de baixa impedância: 10 mV/°C
  - Compensação do 0 °C embutido no próprio CI.
  - Vasta faixa de alimentação: +5 V a ±15 V
  - Baixo consumo: <1 mW (típico)
  - Alarme de falha do termopar
  - Setagem do modo de operação
  - Entrada diferencial de alta impedância



# Preço \$\$ – Exemplo de custo

## Price, Packaging, and Availability

 Print Table

### AD594 Model Options

Model	Status	Package	Pins	Temp Range	Price* (1000 pcs.)	Available	RoHS Compliant	Samples Cart	Purchase Cart
AD594AD	Prodn	<a href="#">14 ld Side-Brazed CerDIP</a>	14	Ind	\$11.36	8/10/2007	N <a href="#">Material Declaration</a>	<a href="#">Contact ADI</a>	<a href="#">Add to Cart</a>
AD594ADZ	Prodn	<a href="#">14 ld Side-Brazed CerDIP</a>	14	Ind	\$11.36	8/10/2007	Y <a href="#">Material Declaration</a>	<a href="#">Contact ADI</a>	<a href="#">Add to Cart</a>
AD594AQ	Prodn	<a href="#">14 ld CerDIP</a>	14	Ind	\$6.18	8/10/2007	N <a href="#">Material Declaration</a>	<a href="#">Contact ADI</a>	<a href="#">Add to Cart</a>
AD594CD	Prodn	<a href="#">14 ld Side-Brazed CerDIP</a>	14	Ind	\$17.54	-	N <a href="#">Material Declaration</a>	<a href="#">Contact ADI</a>	<a href="#">Add to Cart</a>
AD594CDZ	Prodn	<a href="#">14 ld Side-Brazed CerDIP</a>	14	Ind	\$17.54	8/10/2007	Y <a href="#">Material Declaration</a>	<a href="#">Contact ADI</a>	<a href="#">Add to Cart</a>
AD594CQ	Prodn	<a href="#">14 ld CerDIP</a>	14	Ind	\$10.80	8/10/2007	N <a href="#">Material Declaration</a>	<a href="#">Contact ADI</a>	<a href="#">Add to Cart</a>

The USA list pricing shown is for BUDGETARY USE ONLY, shown in United States dollars (FOB USA per unit for the stated volume), and is subject to change. International prices may differ due to local duties, taxes, fees and exchange rates. For volume-specific price or delivery quotes, please contact your local Analog Devices, Inc. sales office or authorized distributor. Pricing displayed for Evaluation Boards and Kits is based on 1-piece pricing.

[View Sales and Distribution Offices](#)

[View Samples Cart](#)

[View Purchase Cart](#)

Preço com impostos importação chega a ser 85% maior do que o preço FOB. Na média uns 65%.

Preço em reais pra comprar UMA unidade:

$$P = [U\$ 17,84 + U\$ 40,00] * 1,65 * 2,00 = \mathbf{R\$ 191,00}$$

Digi-Key Part Number	Manufacturer Part Number	Description	Vendor	Packaging	Amplifier Type	Number of Circuits	Package / Case	Slew Rate	Quantity Available	Minimum Quantity	Unit Price USD	
<a href="#">AD594ADZ-ND</a>	AD594ADZ	IC THERMOCOUPLE INSTR. AMP TO116	Analog Devices Inc	-	Thermocouple	1 - Single	TO-116	-	12	1	<a href="#">17.84000</a>	
<a href="#">AD594CDZ-ND</a>	AD594CDZ	IC THERMOCOUPLE INSTR. AMP TO116	Analog Devices Inc	-	Thermocouple	1 - Single	TO-116	-	36	1	<a href="#">27.23000</a>	