

PTC3421 – Instrumentação Industrial

Temperatura – Parte II

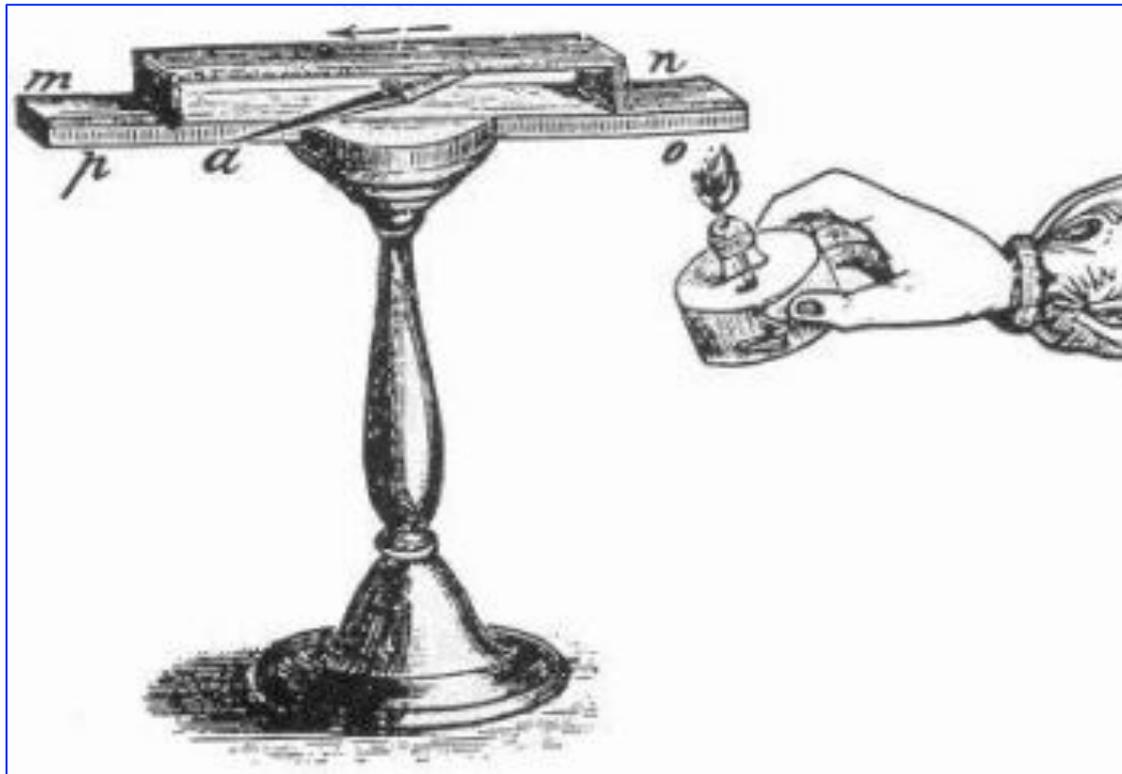
V2017A

PROF. R. P. MARQUES

Termopares

O Efeito Seebeck

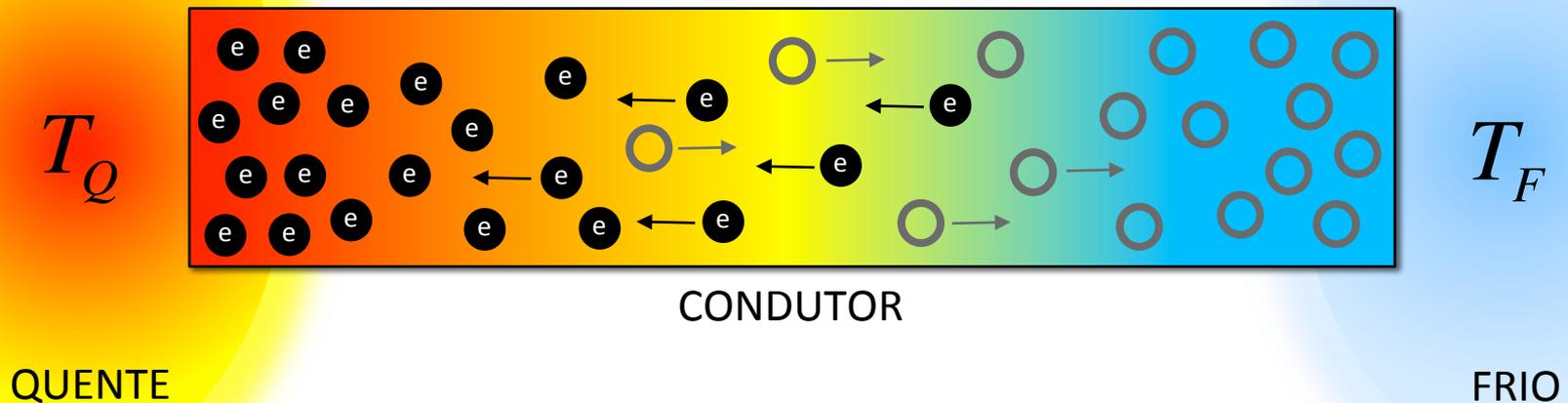
Thomas Johan Seebeck observou em 1821 que a agulha de uma bússola era defletida por um circuito formado pela junção de dois condutores de metais diferentes quando a temperatura entre junções era diferente.



Termopares

O Efeito Seebeck

Um modelo simples:

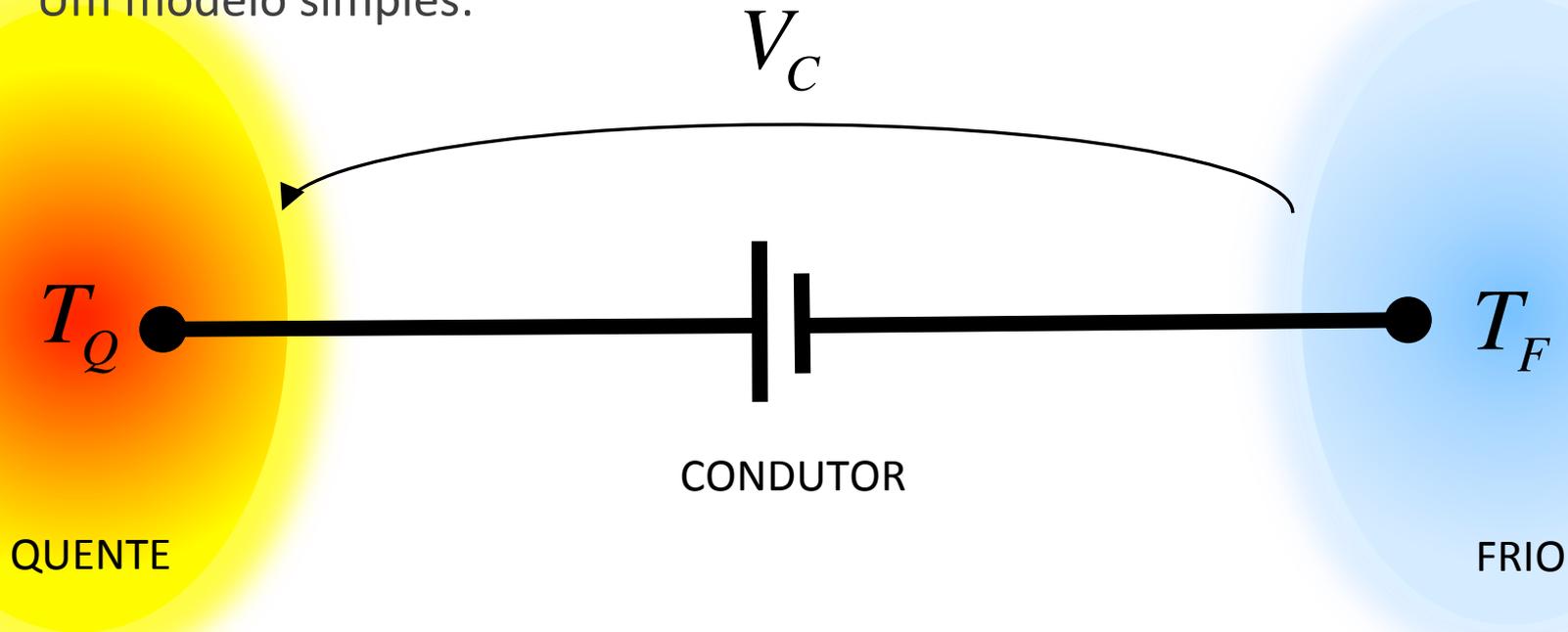


A agitação térmica na ponta quente favorece a movimentação dos elétrons livres do condutor. Conseqüentemente os elétrons tendem a se difundir em direção à ponta quente enquanto lacunas tendem a se difundir para a ponta fria. Dessa forma aparece uma diferença de potencial entre as pontas.

Termopares

O Efeito Seebeck

Um modelo simples:

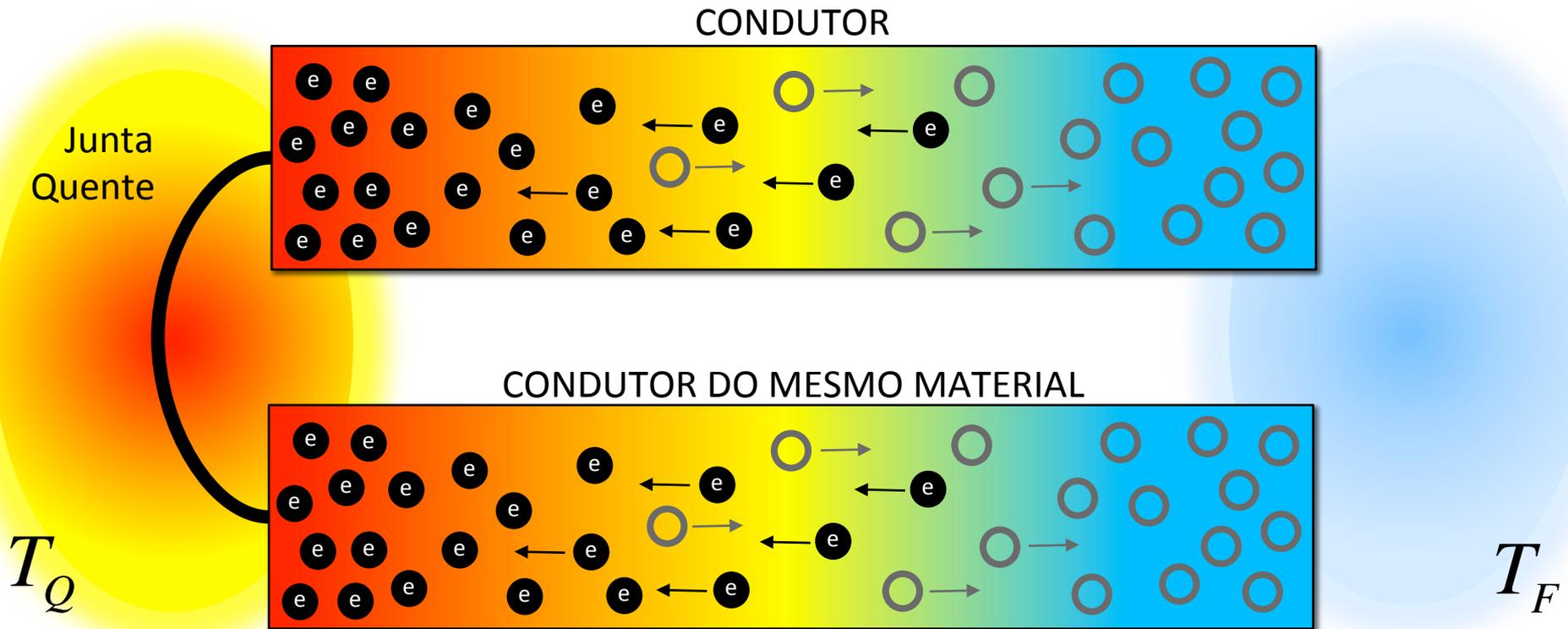


A tensão V_C depende da diferença de temperaturas e do tipo do material.

Termopares

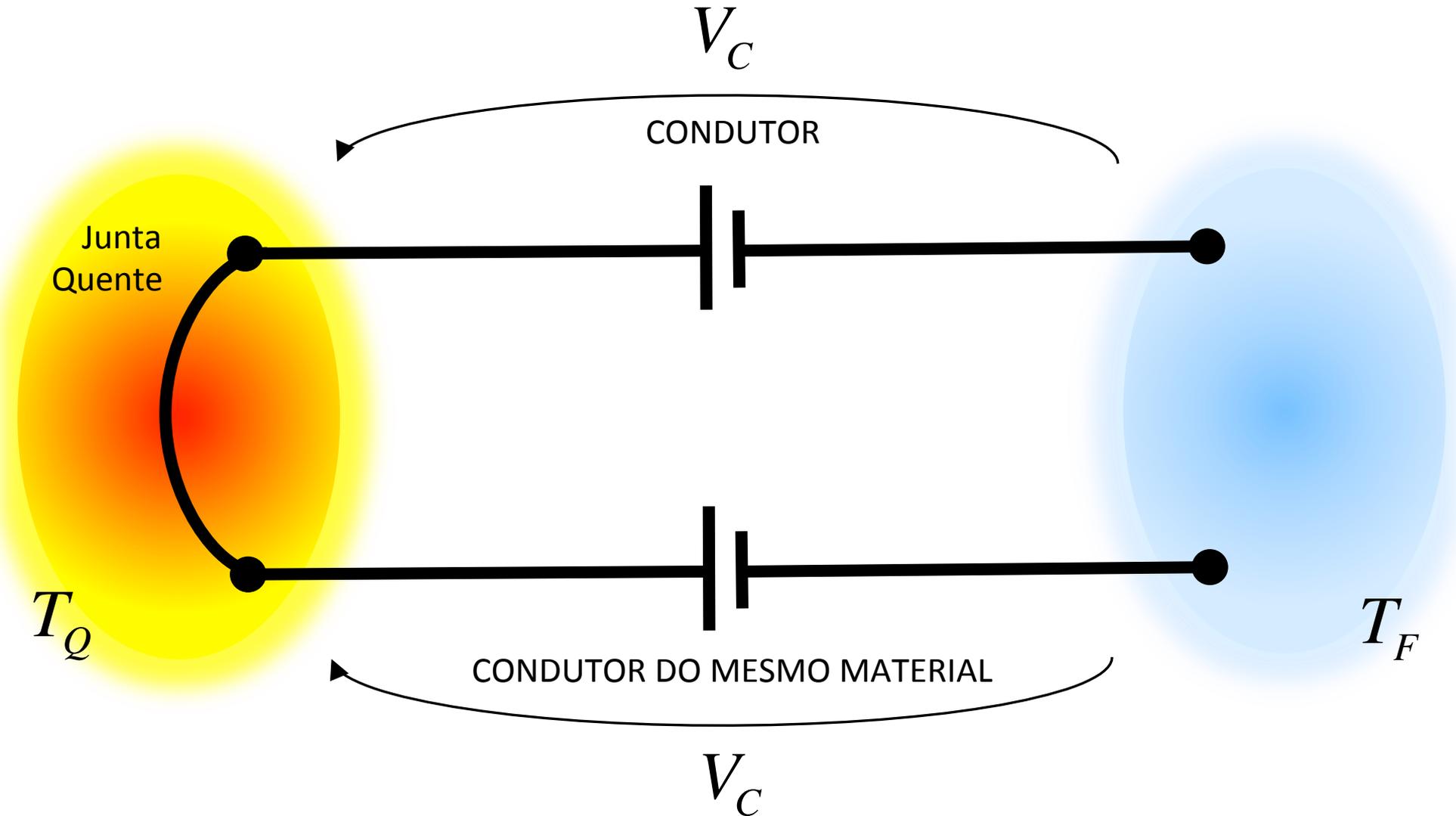
O Efeito Seebeck

Seja o seguinte arranjo:



Termopares

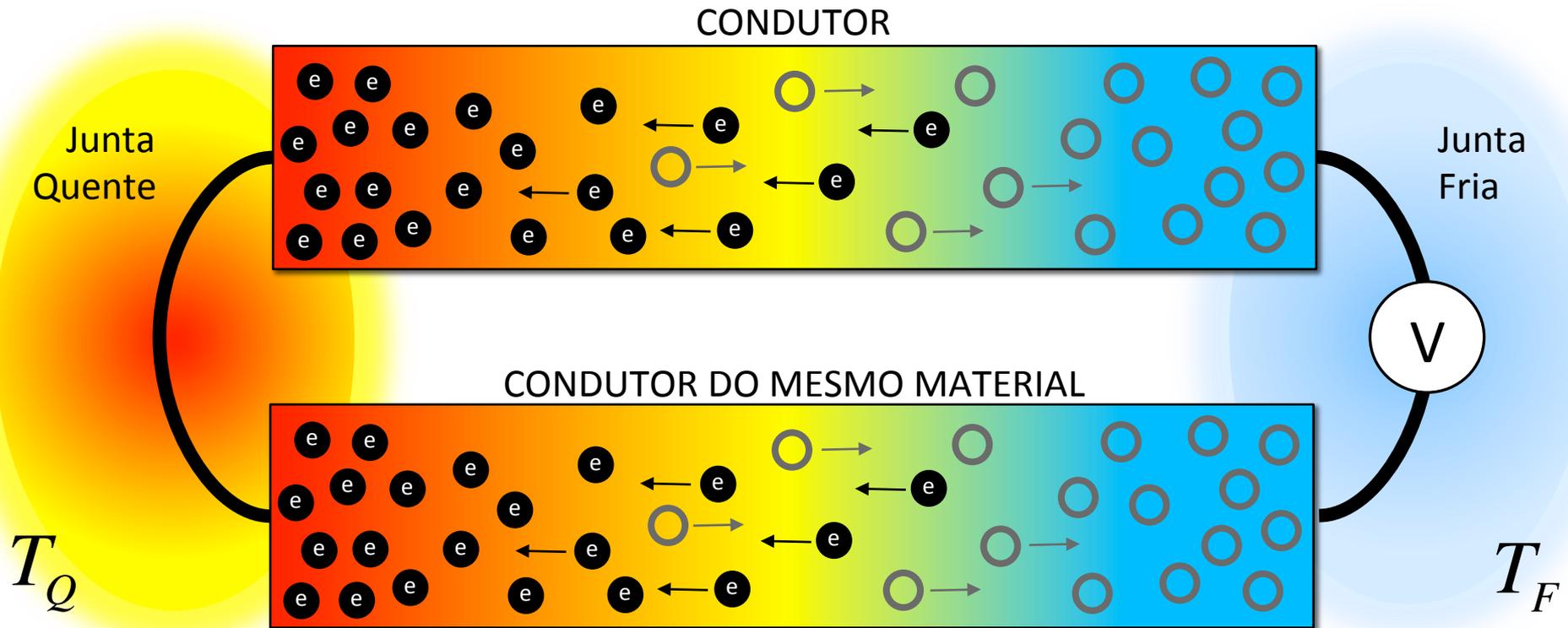
O Efeito Seebeck



Termopares

O Efeito Seebeck

Com isso:

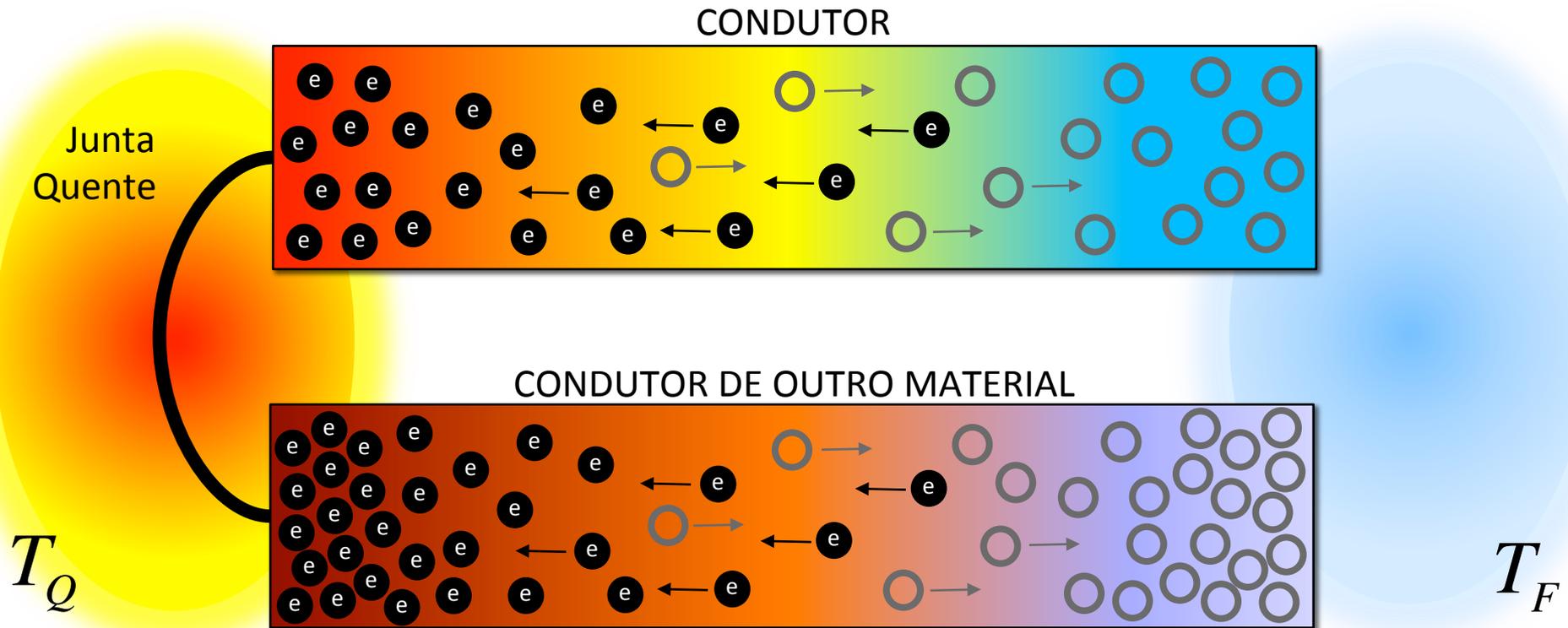


A tensão medida no voltímetro da junta fria é IGUAL A ZERO.

Termopares

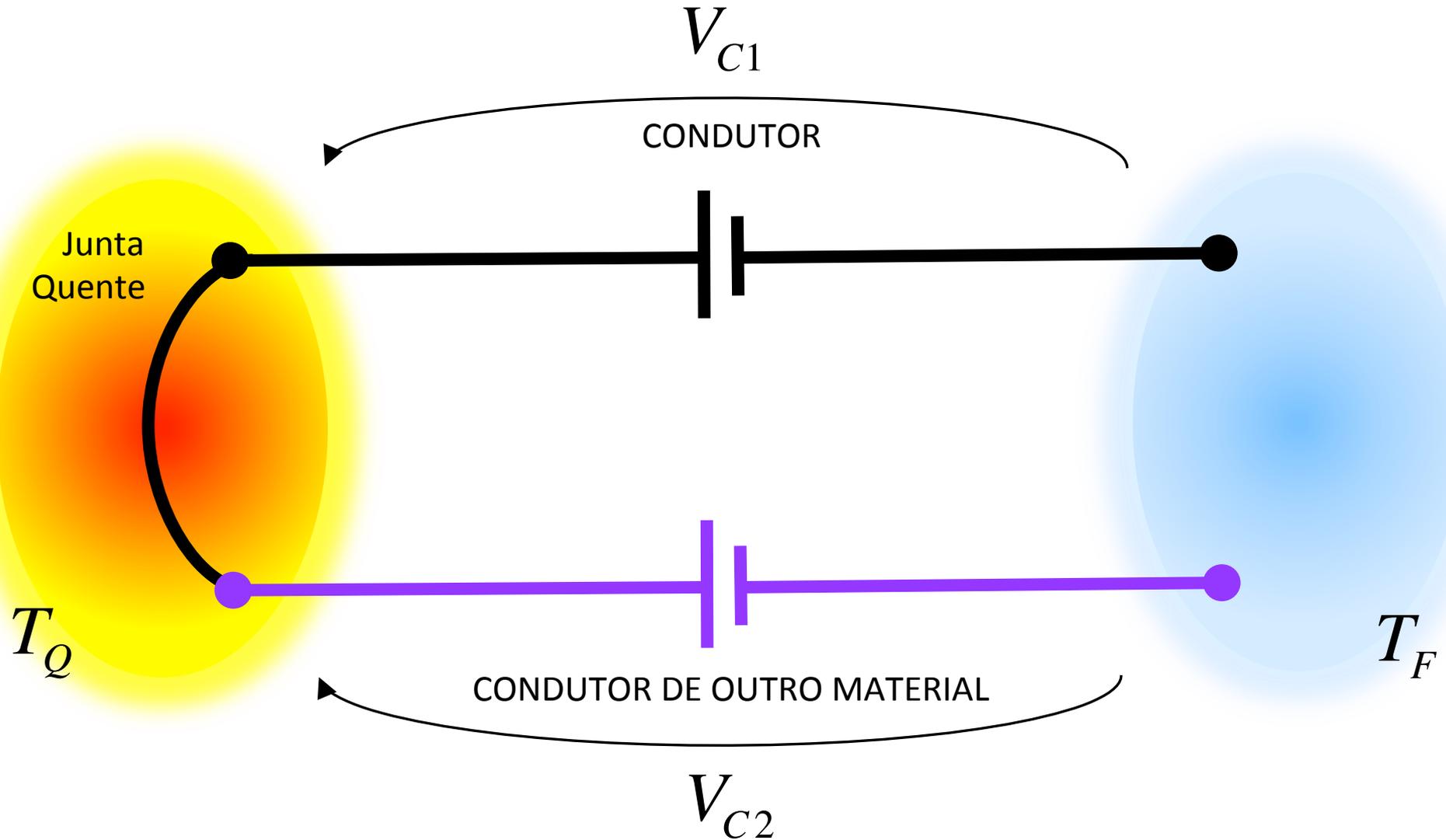
O Efeito Seebeck

Seja agora o seguinte arranjo (chamado par termoeétrico):



Termopares

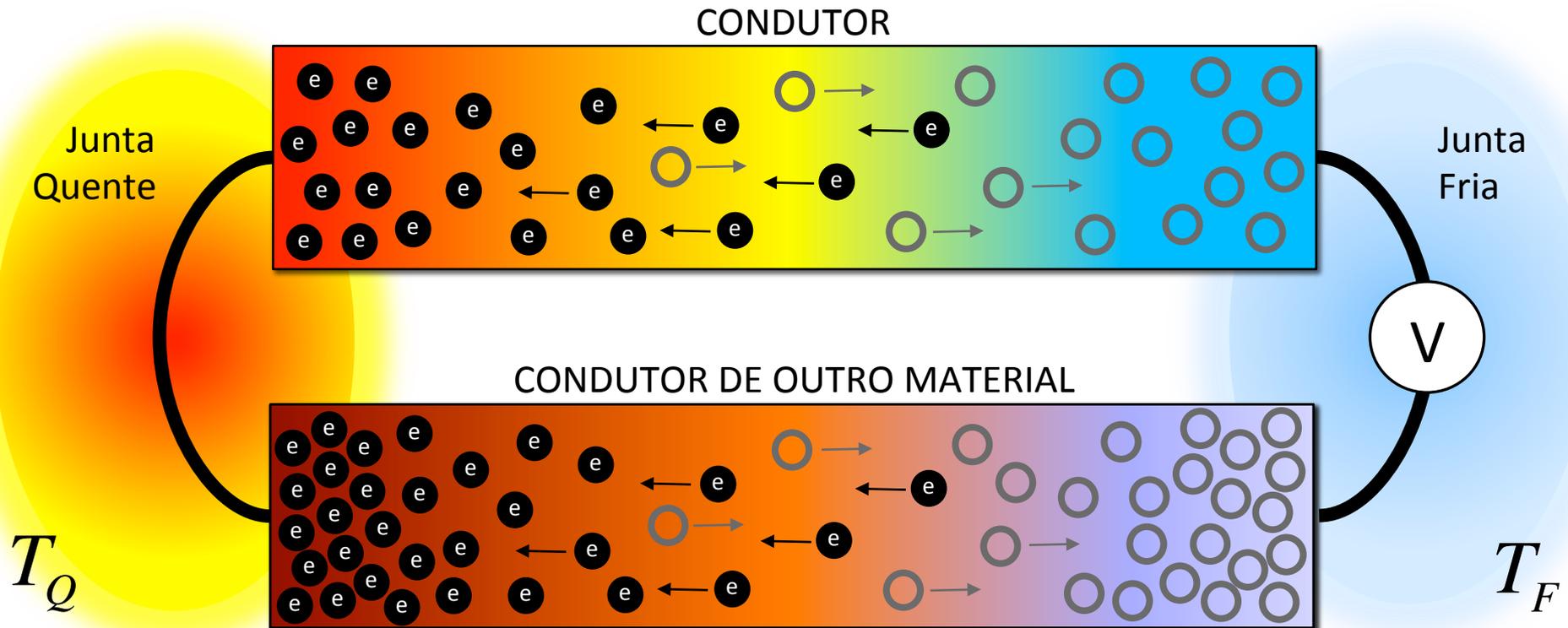
O Efeito Seebeck



Termopares

O Efeito Seebeck

Com isso:



A tensão medida no voltímetro da junta fria é DIFERENTE DE ZERO.

Termopares

O Efeito Seebeck

Temos então:

$$\Delta V = V_{C1} - V_{C2} \approx T_Q - T_F$$

A tensão medida pelo voltímetro é proporcional à diferença de temperaturas e depende dos materiais condutores utilizados.

Com isso é possível utilizar o efeito Seebeck para construir sensores de temperatura.

Caso o voltímetro (de impedância infinita) seja substituído por um resistor ou caso a junta fria esteja em curto, corrente circulará através do par termoelétrico.

OBS. Em 1851, Gustav Magnus descobriu que a diferença de tensão não depende da distribuição de temperaturas ao longo dos condutores, mas apenas das temperaturas nas juntas.

Termopares

O Efeito Peltier

Em 1834, Jean Charles Athanase Peltier observou que ao se aplicar corrente a um par termoelétrico, calor era produzido ou absorvido (a depender da polaridade da corrente) na junta dos materiais.

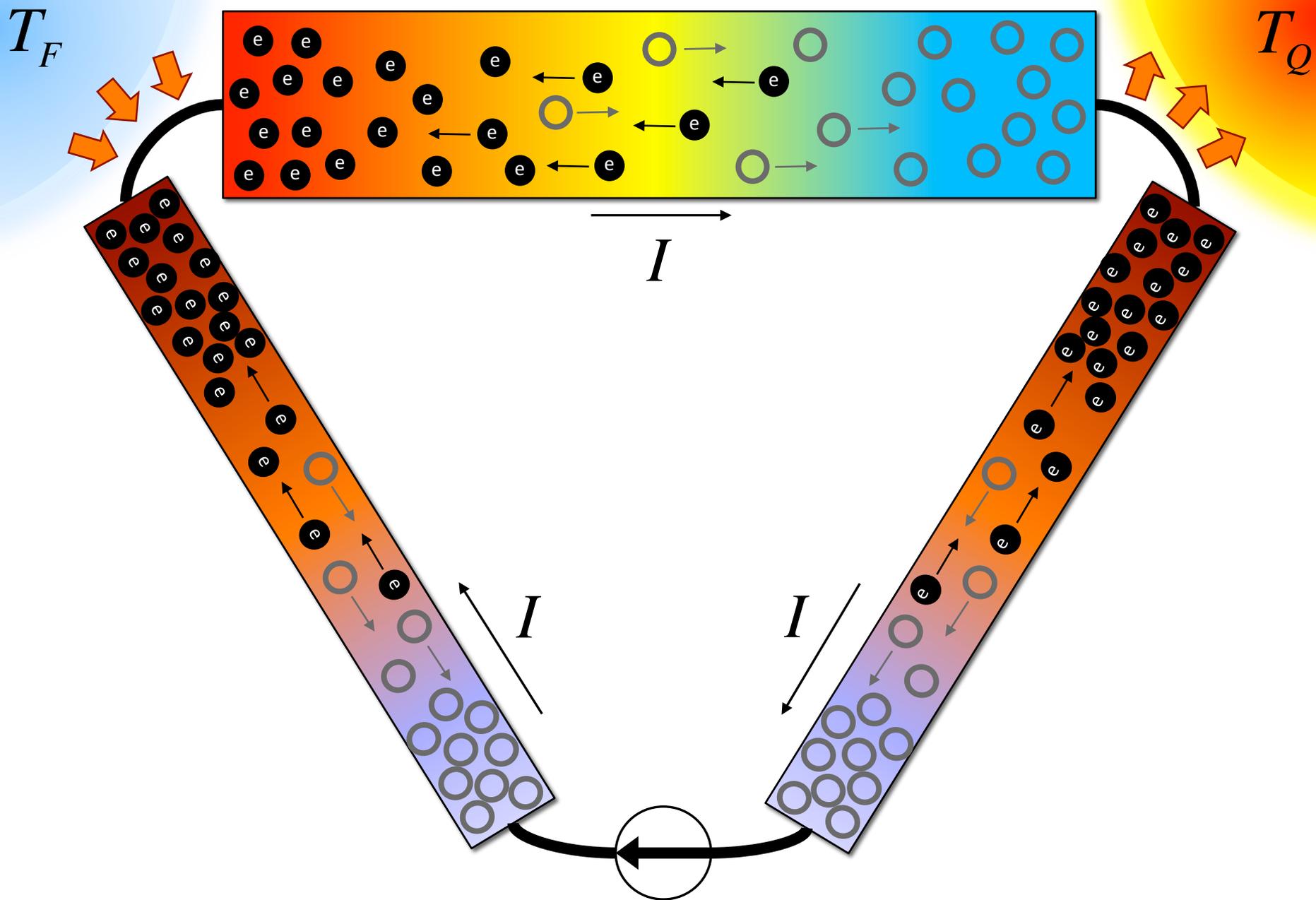
Este é uma espécie de oposto do Efeito Seebeck:

Naquele uma diferença de temperaturas provocava uma corrente elétrica.

Neste uma corrente elétrica provoca uma diferença de temperaturas (na verdade um fluxo de calor).

O efeito Peltier pode ser utilizado para construir dispositivos aquecedores/refrigeradores.

O uso industrial é relativamente restrito por uma questão de escala e eficiência. Dispositivos Peltier de pequeno porte são relativamente comuns.

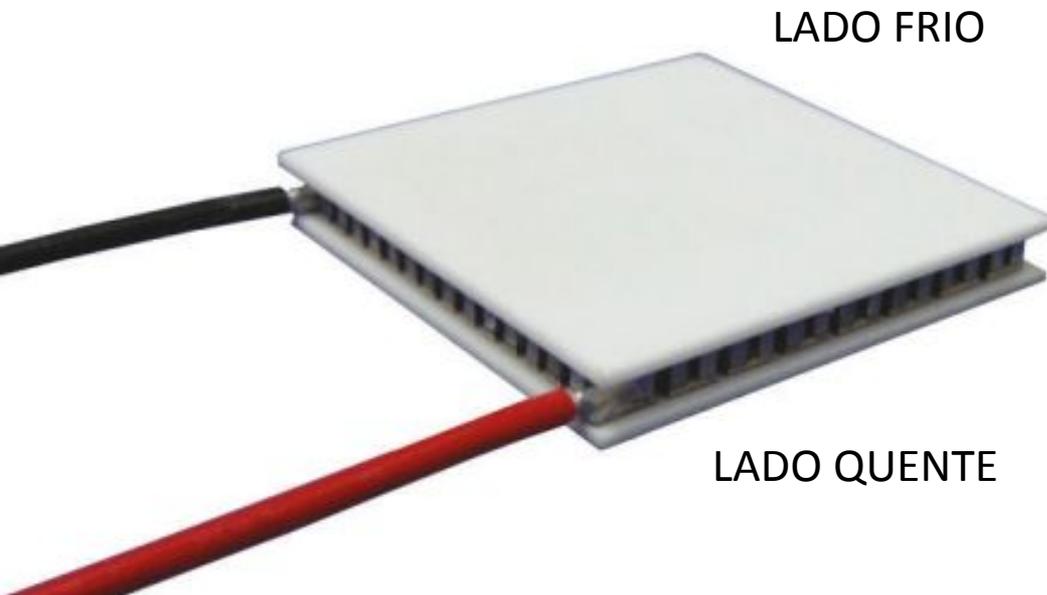


Termopares

O Efeito Peltier

MÓDULOS PELTIER

de pequena potência (poucos Watts) são comuns no mercado. Cada placa tem dezenas de pequenos pares termoelétricos. São utilizados semicondutores em vez de condutores para aumentar a intensidade do Efeito Peltier.



Termopares

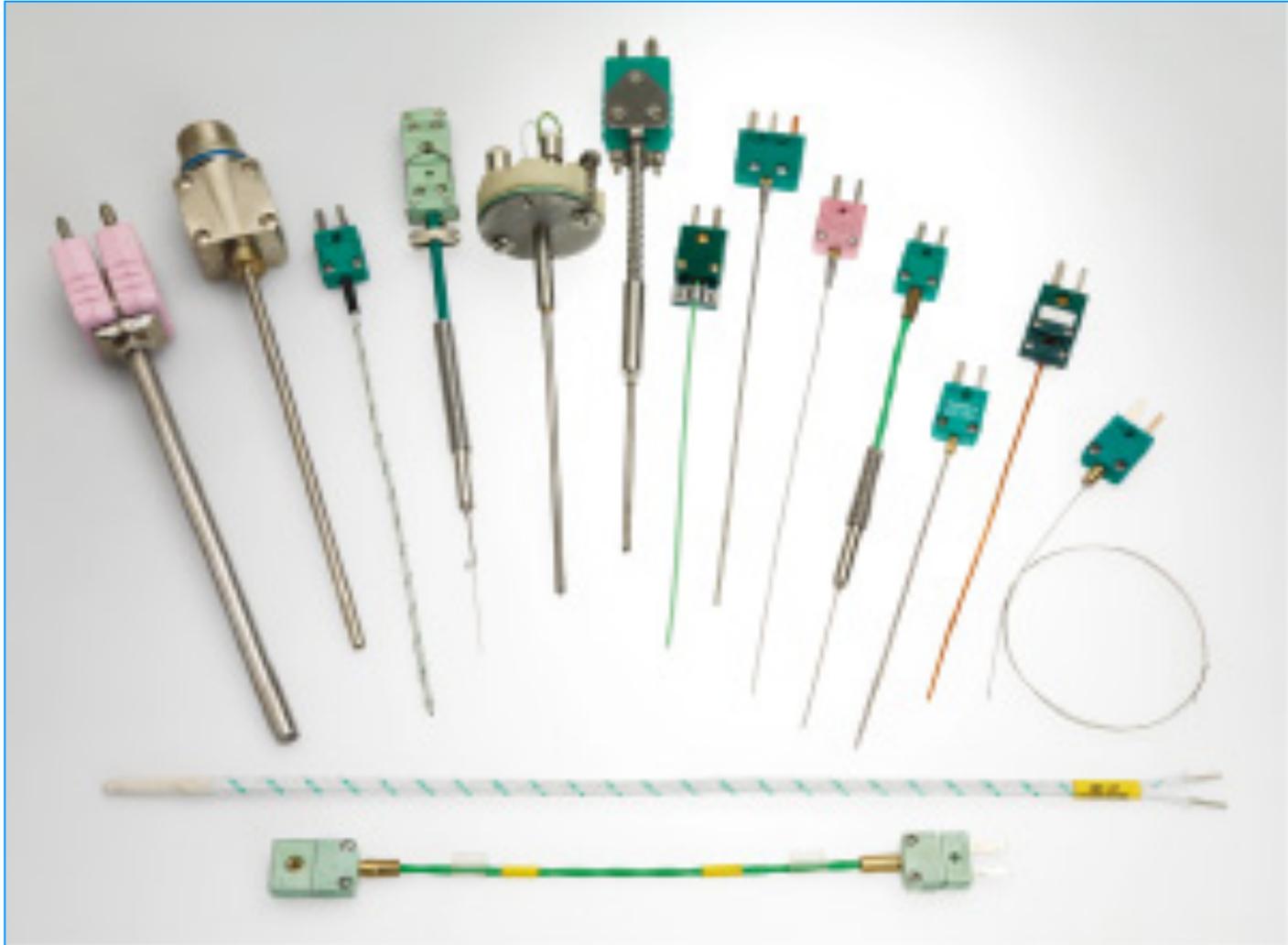
O Efeito Thomson

Em 1854, William Thomson (Lorde Kelvin) relacionou os efeitos Seebeck e Peltier e previu um terceiro efeito:

Num par termoelétrico em que circula corrente (portanto com juntas a temperaturas diferentes), calor é produzido ou absorvido ao longo do par, proporcionalmente à intensidade da corrente e da diferença de temperaturas.

Termopares

Características



Termopares

Características

- Termopares são elementos primários compostos basicamente por dois fios metálicos isolados com as pontas soldadas.
 - São de simples construção (às vezes são montados na própria fábrica);
 - São extremamente robustos e confiáveis;
 - São baratos (um kit básico pode custar menos de US\$20).
- A escolha adequada das ligas metálicas permite obter termopares a diferentes faixas de temperatura, ambientes, sensibilidade, etc. Por exemplo:
 - Atmosferas inertes;
 - Atmosferas redutoras (ricas em hidrogênio, monóxido de carbono, etc.)
 - Atmosferas oxidantes (ricas em oxigênio)
- A FEM (Força Eletro Motriz) produzida pelos pares metálicos é da ordem de mV, portanto é necessário condicionar os sinais para utilização.

Termopares

Características

- A princípio, quaisquer combinações de condutores produzem o efeito Seebeck, porém algumas acabaram se tornando populares para uso industrial. Uma série de fatores leva a isso:
 - Custo;
 - Disponibilidade;
 - Propriedades físicas (incluindo magnetização) e químicas (incluindo resistência a corrosão);
 - Estabilidade e repetibilidade;
 - Faixa de temperaturas utilizável;
 - Sensibilidade;
 - Faixa de tensões produzidas.

Termopares

Observações

- **IMPORTANTE:** Os termopares não medem temperatura absoluta. Eles medem a diferença de temperaturas entre a junta quente e a junta fria. Para se obter a temperatura absoluta é necessário ter a junta fria a uma temperatura constante conhecida ou medir a temperatura na junta fria por outros meios (o mais usual).
- Os termopares podem ser utilizados com cabos auxiliares. Esses cabos também estão sujeitos ao Efeito Seebeck, que deve ser considerado na implementação. Existem cabos especiais (cabos de extensão e compensação) para mitigar tais efeitos.
- Como os termopares são frequentemente expostos a altas temperaturas e eventualmente atmosferas agressivas, eles podem apresentar vida útil limitada, quer por corrosão, erosão ou pelo enrijecimento causado por repetidos ciclos de aquecimento e resfriamento.

Termopares

Normas

- Norma para termopares (o Brasil adota as normas IEC):
 - IEC 60584-1:2013
Termopares – Parte 1: Especificações e tolerâncias para FEM
 - IEC 60584-3:2007
Termopares – Parte 3: Cabos de extensão e compensação – Tolerâncias e sistema de identificação
- (não há parte 2 – foi incorporada à parte 1)

Termopares

Os tipos normatizados

Os seguintes tipos de termopares são normatizados pela IEC 60584:

METAIS COMUNS	K	CROMEL / ALUMEL
	J	FERRO / CONSTANTAN
	N	NICROSIL / NISIL
	E	CROMEL / CONSTANTAN
	T	COBRE / CONSTANTAN
	C	TUNGSTÊNIO - RÊNIO
	A	TUNGSTÊNIO - RÊNIO
METAIS NOBRES	S	PLATINA – RÓDIO / PLATINA
	R	PLATINA – RÓDIO / PLATINA
	B	PLATINA – RÓDIO

K

	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
Faixa de Operação (°C)	$-40 \leq T \leq 1000$	$-40 \leq T \leq 1200$	$-200 \leq T \leq 40$
Tolerância (°C)	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$
(usar o maior valor)	$\pm 0,004 T $	$\pm 0,0075 T $	$\pm 0,0075 T $

CROMEL / ALUMEL

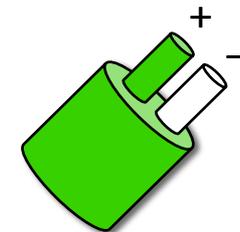
+ : Cromel: Ni (90%) + Cr (10%)
- : Alumel: Ni (95%) + Al (2%) + Mn (2%) + Si (1%)

FEM: -6,458mV (-270°C) a 54,886mV (1372°C) (junta fria a 0°C)

Termopar de baixo custo resistente a oxidação.
(provavelmente o mais popular dos termopares).

Adequado para atmosferas inertes e oxidantes. Não deve ser exposto a atmosferas sulfurosas, redutoras e vácuo.

Como são resistentes a oxidação, são especialmente adequados para uso em atmosfera normal a temperaturas acima de 550°C.



J

	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
Faixa de Operação (°C)	$-40 \leq T \leq 750$	$-40 \leq T \leq 750$	-
Tolerância (°C) (usar o maior valor)	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	-
	$\pm 0,004 T $	$\pm 0,0075 T $	-

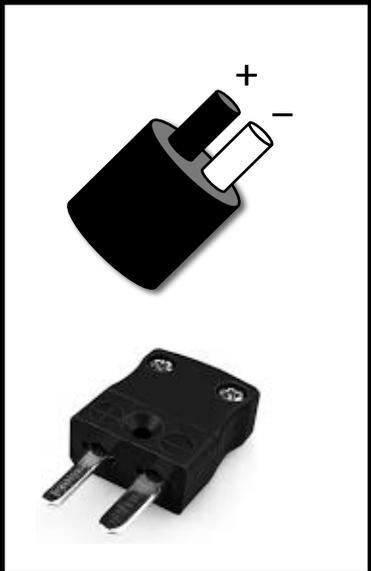
FERRO / CONSTANTAN

+ : Ferro (Ferromagnético): Fe (99,5%)
- : Constantan (Cobre + Níquel): Cu (58%) + Ni (42%)
FEM: -8,095mV (-210°C) a 69,553mV (1200°C) (junta fria a 0°C)

Termopar de baixo custo e uso geral.
(um dos termopares mais populares)

Adequado para vácuo, atmosferas inertes, oxidantes e redutoras. Evitar atmosferas sulfurosas.

O Ferro é propenso à oxidação em caso de condensação, portanto deve ser evitado o uso em temperaturas negativas. Uso limitado em atmosferas oxidantes em altas temperaturas.



N

	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
Faixa de Operação (°C)	$-40 \leq T \leq 1000$	$-40 \leq T \leq 1200$	$-200 \leq T \leq 40$
Tolerância (°C)	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$
(usar o maior valor)	$\pm 0,004 T $	$\pm 0,0075 T $	$\pm 0,0075 T $

NICROSIL / NISIL

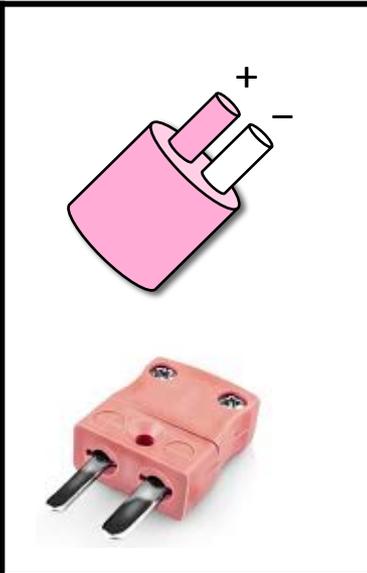
+ : Nicrosil (Níquel + Cromo + Silício): Ni (84,4%) + Cr (14,2%) + Si (1,4%)
- : Nisil (Níquel + Silício): Ni (95,5%) + Si (4,4%) + Mn (0,10%)
FEM: -4,345mV (-270°C) a 47,513mV (1300°C) (junta fria a 0°C)

Termopar de maior custo, similar ao tipo K.
(melhor repetibilidade e estabilidade, especialmente em altas temperaturas).

Substitui o termopar tipo K (a FEM produzida é ligeiramente menor).

Adequado para atmosferas inertes e oxidantes. Não deve ser exposto a atmosferas sulfurosas, redutoras e vácuo.

É mais resistente a oxidação que o tipo K, tem melhor repetibilidade e estabilidade e vida útil mais longa.



E

	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
Faixa de Operação (°C)	$-40 \leq T \leq 800$	$-40 \leq T \leq 900$	$-200 \leq T \leq 40$
Tolerância (°C)	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$
(usar o maior valor)	$\pm 0,004 T $	$\pm 0,0075 T $	$\pm 0,0075 T $

CROMEL / CONSTANTAN

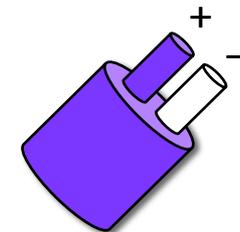
+ : Cromel: Ni (90%) + Cr (10%)
- : Constantan (Cobre + Níquel): Cu (58%) + Ni (42%)

FEM: -9,835mV (-270°C) a 76,373mV (1000°C) (junta fria a 0°C)

Termopar de baixo custo resistente a oxidação.
(maior sensibilidade entre os termopares comuns).

Adequado para atmosferas inertes e oxidantes. Uso limitado em atmosferas redutoras e vácuo.

Possui a maior FEM por °C dos termopares comuns. Útil para aplicações que requerem maior sensibilidade.



T

	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
Faixa de Operação (°C)	$-40 \leq T \leq 350$	$-40 \leq T \leq 350$	$-200 \leq T \leq 40$
Tolerância (°C)	$\pm 0,5$	± 1	± 1
(usar o maior valor)	$\pm 0,004 T $	$\pm 0,0075 T $	$\pm 0,0075 T $

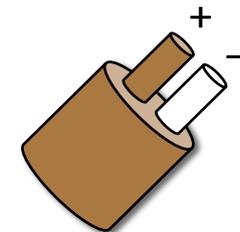
COBRE / CONSTANTAN	+ : Cobre: Cu (>99,9%)		
	- : Constantan (Cobre + Níquel): Cu (58%) + Ni (42%)		
FEM: -6,258mV (-270°C) a 20,872mV (400°C) (junta fria a 0°C)			

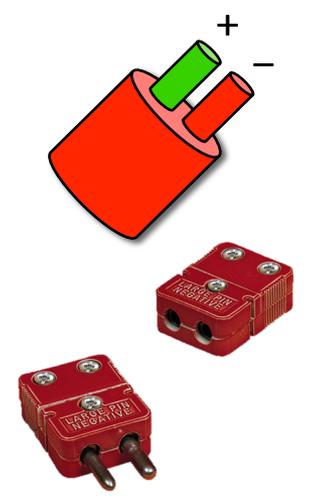
Termopar de baixo custo resistente a oxidação em atmosferas úmidas.
(o uso de cobre limita o uso em altas temperaturas).

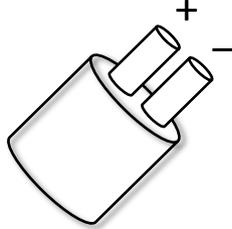
Adequado para atmosferas inertes, redutoras e oxidantes.

Possui boa precisão e sensibilidade.

Como são resistentes a oxidação em atmosfera úmida, são especialmente adequados para temperaturas negativas.



C		CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
	Faixa de Operação (°C)	-	$426 \leq T \leq 2315$	-
Tolerância (°C)	-	$\pm 0,01 T$	-	
TUNGSTÊNIO - RÊNIO	+ : Tungstênio + Rênio: W (95%) + Re (5%) - : Tungstênio + Rênio: W (73%) + Re (26%)			
	FEM: 6,732mV (400°C) a 37,070mV (2315°C) (junta fria a 0°C)			
<p>Termopar para altíssima temperatura. (novo tipo normatizado pela IEC em 2013)</p> <p>Adequado para atmosferas inertes, redutoras e especialmente vácuo. Não deve ser exposto a atmosferas oxidantes em alta temperatura. O Termopar tipo C tem ponto de fusão acima de 2315°C, porém o tungstênio se oxida facilmente em temperaturas extremas.</p> <p>Imprático para baixas temperaturas. A norma IEC ainda não definiu um código de cores para o termopar tipo C. A codificação ANSI/ASTM é apresentada aqui.</p>				

		CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
	Faixa de Operação (°C)	-	$1000 \leq T \leq 2500$	-
	Tolerância (°C)	-	$\pm 0,01 T$	-
TUNGSTÊNIO - RÊNIO	+ : Tungstênio + Rênio: W (95%) + Re (5%) - : Tungstênio + Rênio: W (80%) + Re (20%)			
	FEM: (não disponível)			
<p>Termopar para altíssima temperatura. (novo tipo normatizado pela IEC em 2013)</p> <p>Adequado para atmosferas inertes, redutoras e especialmente vácuo. Não deve ser exposto a atmosferas oxidantes em alta temperatura. O Termopar tipo A tem ponto de fusão acima de 2500°C, porém o tungstênio se oxida facilmente em temperaturas extremas.</p> <p>Imprático para baixas temperaturas. A norma IEC ainda não definiu um código de cores para o termopar tipo A.</p>				

S

	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
Faixa de Operação (°C)	$0 \leq T \leq 1600$	$0 \leq T \leq 1600$	-
Tolerância (°C) (usar o maior valor)	± 1 (para $T < 1100$)	$\pm 1,5$	-
	$\pm (1+0,003 (T-1100))$ (para $T \geq 1100$)	$\pm 0,0025 T $	-

PLATINA – RÓDIO / PLATINA

+ : Platina + Ródio: Pt (90%) + Rh (10%)
- : Platina: Pt (100%)

FEM: -0,236mV (-50°C) a 18,693mV (1768°C) (junta fria a 0°C)

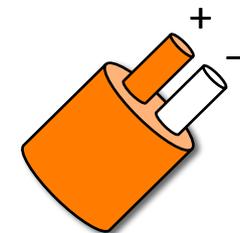
Termopar de alto custo e grande estabilidade para altas temperaturas.
(para aplicações que requerem precisão em temperaturas elevadas).

Adequado para atmosferas inertes e oxidantes. Não deve ser exposto a atmosferas redutoras, vácuo ou vapores metálicos.

Alta precisão e estabilidade em altas temperaturas.

Sensível a contaminação e erosão.

Difere do tipo R pela FEM ligeiramente menor.



R

	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
Faixa de Operação (°C)	$0 \leq T \leq 1600$	$0 \leq T \leq 1600$	-
Tolerância (°C)	± 1 (para $T < 1100$)	$\pm 1,5$	-
(usar o maior valor)	$\pm (1+0,003 (T-1100))$ (para $T \geq 1100$)	$\pm 0,0025 T $	-

PLATINA – RÓDIO / PLATINA	+ : Platina + Ródio: Pt (87%) + Rh (13%) - : Platina: Pt (100%)		
	FEM: -0,226mV (-50°C) a 21,101mV (1768°C) (junta fria a 0°C)		

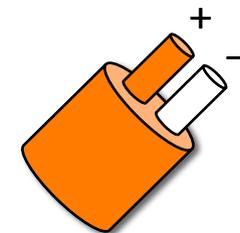
Termopar de alto custo e grande estabilidade para altas temperaturas.
(para aplicações que requerem precisão em temperaturas elevadas).

Adequado para atmosferas inertes e oxidantes. Não deve ser exposto a atmosferas redutoras, vácuo ou vapores metálicos.

Alta precisão e estabilidade em altas temperaturas.

Sensível a contaminação e erosão.

Difere do tipo S pela FEM ligeiramente maior.



B

	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
Faixa de Operação (°C)	-	$600 \leq T \leq 1700$	$600 \leq T \leq 1700$
Tolerância (°C)	-	$\pm 1,5$	± 4
(usar o maior valor)	-	$\pm 0,0025 T$	$\pm 0,005 T$

PLATINA – RÓDIO	+ : Platina + Ródio: Pt (70%) + Rh (30%)
	- : Platina + Ródio: Pt (70%) + Rh (30%)
FEM: 0mV (0°C) a 13,820mV (1820°C) (junta fria a 0°C)	

Termopar de alto custo e grande estabilidade para altas temperaturas.
(muito utilizado na indústria de vidro).

Adequado para atmosferas inertes e oxidantes e exposição limitada ao vácuo. Não deve ser exposto a atmosferas redutoras ou vapores metálicos.

Alta precisão e estabilidade em altas temperaturas.

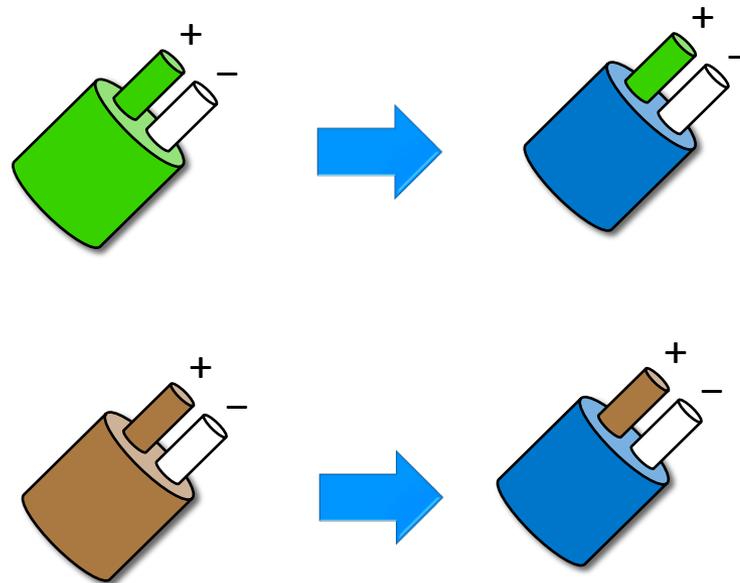
Sensível a contaminação.



Termopares

Segurança intrínseca

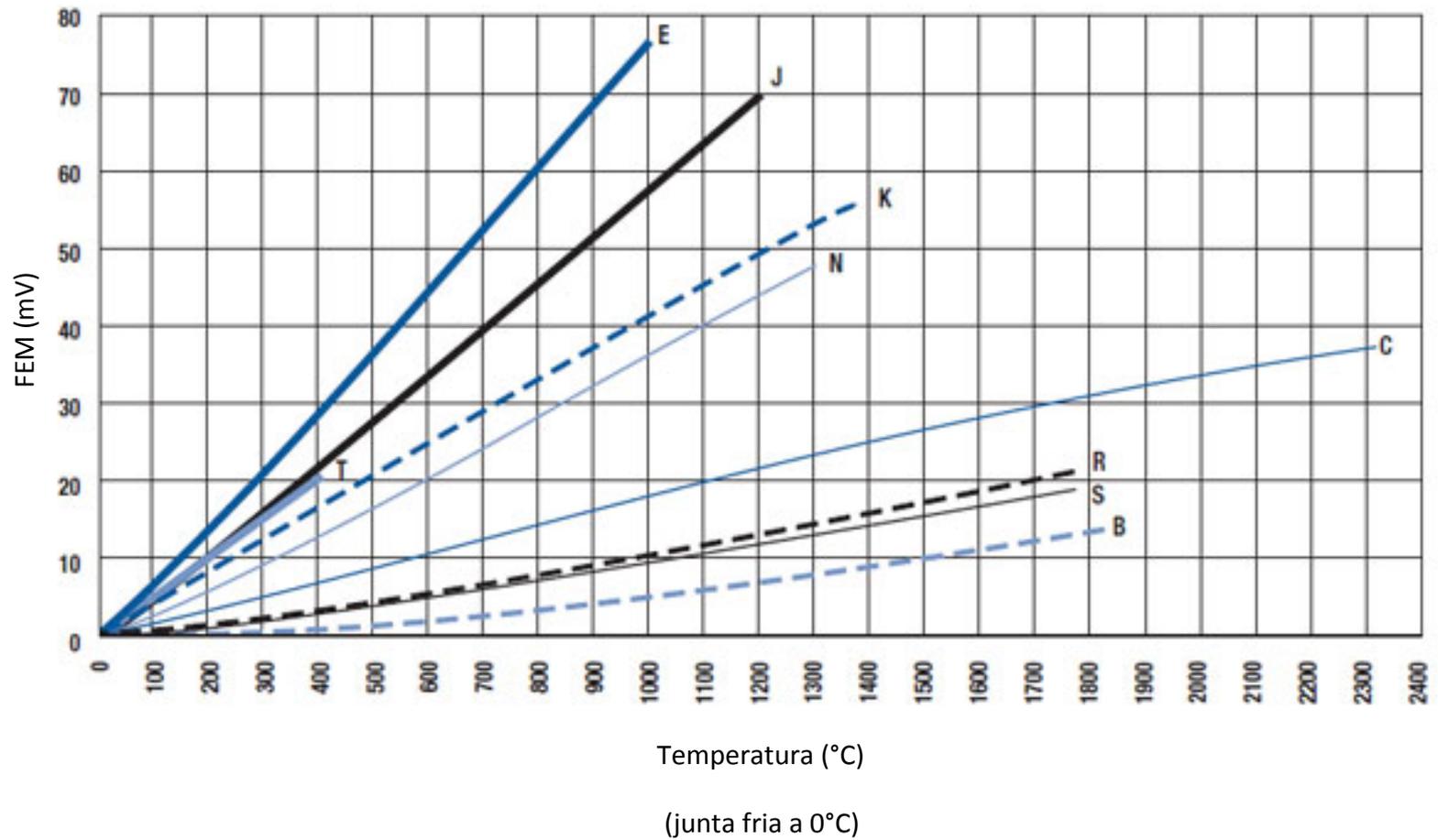
Termopares certificados como intrinsecamente seguros para atmosfera explosiva são isolados na cor azul segundo a norma IEC 60584:



Tais termopares utilizam isolamentos minerais (não orgânicos), resistentes a chama e ao calor.

Termopares

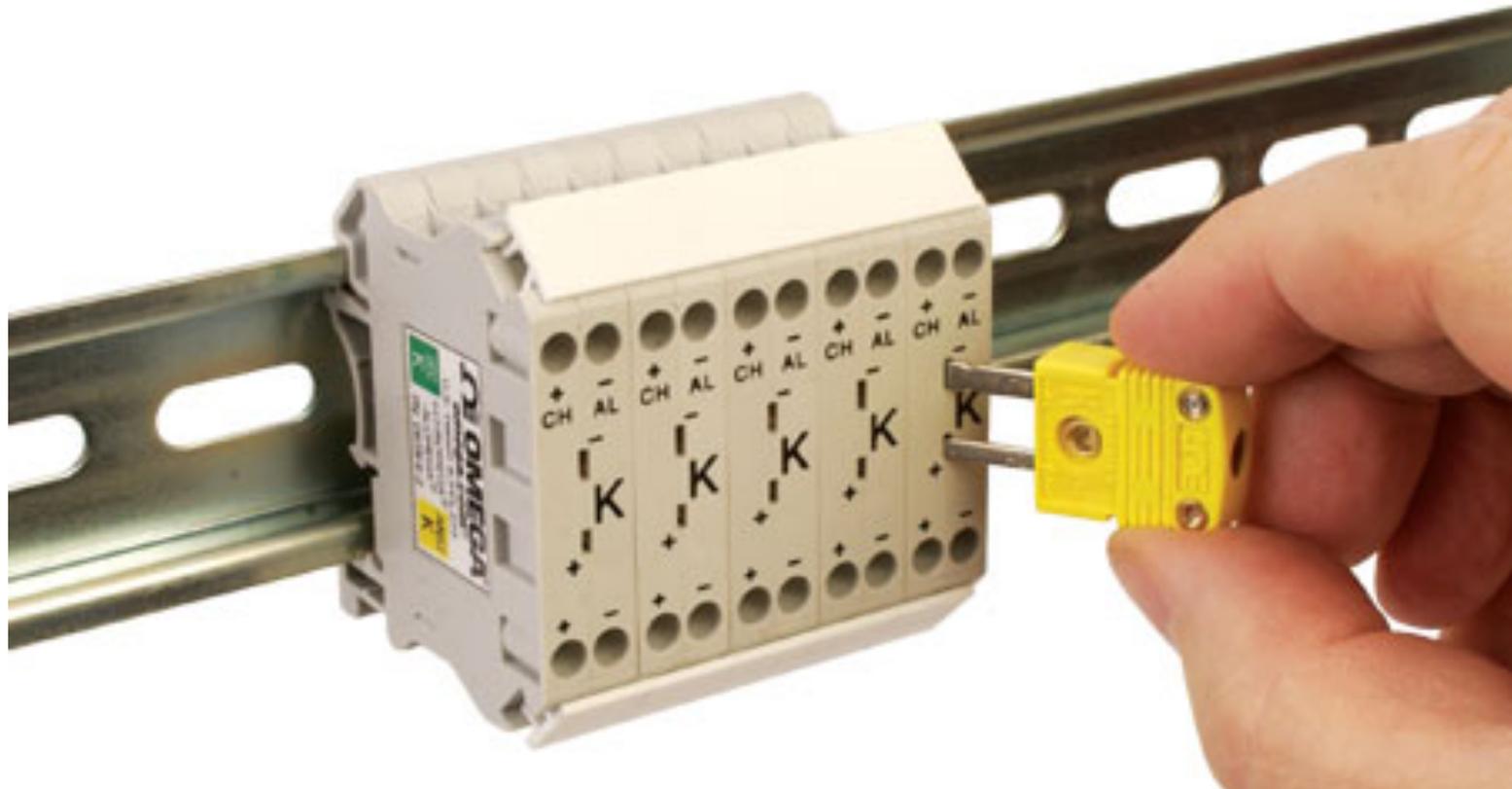
Curvas de Temperatura vs. FEM



Termopares

Benefícios da padronização

A padronização de termopares permite que existam equipamentos (sensores, conversores, transmissores, etc.) também padronizados, e que diversos fornecedores possam ofertar termopares e equipamentos compatíveis com a base previamente instalada.



Termopares

Chip para leitura



Precision Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation

AD8494/AD8495/AD8496/AD8497

FEATURES

- Low cost and easy to use
- Pretrimmed for J or K type thermocouples
- Internal cold junction compensation
- High impedance differential input
- Standalone 5 mV/°C thermometer
- Reference pin allows offset adjustment
- Thermocouple break detection
- Laser wafer trimmed to 1°C initial accuracy and 0.025°C/°C ambient temperature rejection
- Low power: <1 mW at $V_s = 5\text{ V}$
- Wide power supply range
 - Single supply: 2.7 V to 36 V
 - Dual supply: $\pm 2.7\text{ V}$ to $\pm 18\text{ V}$
- Small, 8-lead MSOP

APPLICATIONS

- J or K type thermocouple temperature measurement
- Setpoint controller
- Celsius thermometer
- Universal cold junction compensator
- White goods (oven, stove top) temperature measurements
- Exhaust gas temperature sensing
- Catalytic converter temperature sensing

GENERAL DESCRIPTION

The AD8494/AD8495/AD8496/AD8497 are precision instrumentation amplifiers with thermocouple cold junction compensators on an integrated circuit. They produce a high level (5 mV/°C) output directly from a thermocouple signal by combining an ice point reference with a precalibrated amplifier. They can be used as standalone thermometers or as switched output setpoint controllers using either a fixed or remote setpoint control.

The AD8494/AD8495/AD8496/AD8497 can be powered from a single-ended supply (less than 3 V) and can measure temperatures below 0°C by offsetting the reference input. To minimize self-heating, an unloaded AD849x typically operates with a total supply current of 180 μA , but it is also capable of delivering in excess of $\pm 5\text{ mA}$ to a load.

The AD8494 and AD8496 are precalibrated by laser wafer trimming to match the characteristics of J type (iron-constantan) thermocouples; the AD8495 and AD8497 are laser trimmed to match the characteristics of K type (chromel-alumel) thermocouples. See Table 1 for the optimized ambient temperature range of each part.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

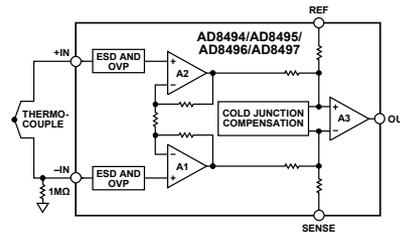


Figure 1.

Table 1. Device Temperature Ranges

Part No.	Thermo-Couple Type	Optimized Temperature Range	
		Ambient Temperature (Reference Junction)	Measurement Junction
AD8494	J	0°C to 50°C	Full J type range
AD8495	K	0°C to 50°C	Full K type range
AD8496	J	25°C to 100°C	Full J type range
AD8497	K	25°C to 100°C	Full K type range

The AD8494/AD8495/AD8496/AD8497 allow a wide variety of supply voltages. With a 5 V single supply, the 5 mV/°C output allows the devices to cover nearly 1000 degrees of a thermocouple's temperature range.

The AD8494/AD8495/AD8496/AD8497 work with 3 V supplies, allowing them to interface directly to lower supply ADCs. They can also work with supplies as large as 36 V in industrial systems that require a wide common-mode input range.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. Complete, precision laser wafer trimmed thermocouple signal conditioning system in a single IC package.
2. Flexible pinout provides for operation as a setpoint controller or as a standalone Celsius thermometer.
3. Rugged inputs withstand 4 kV ESD and provide over-voltage protection (OVP) up to $V_s \pm 25\text{ V}$.
4. Differential inputs reject common-mode noise on the thermocouple leads.
5. Reference pin voltage can be offset to measure 0°C on single supplies.
6. Available in a small, 8-lead MSOP that is fully RoHS compliant.



AD849x
(custo aproximado US\$ 2,50)