



TERMOPARES

Dispositivos utilizados para medir temperatura

Gustavo Monteiro da Silva

Professor Adjunto – Área Científica de Instrumentação e Medida

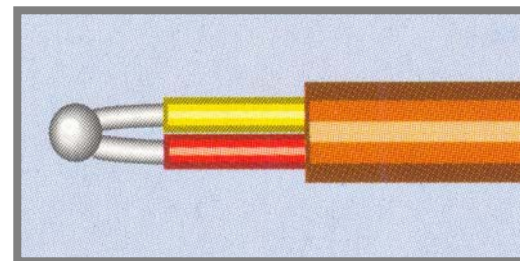
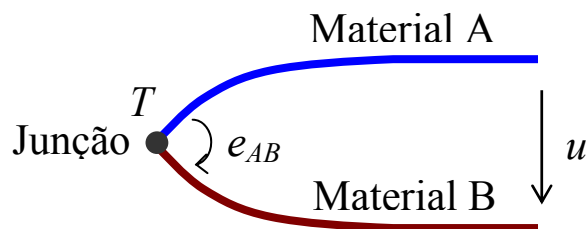
ESTSetúbal/IPS – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal

R. do Vale de Chaves, Estefanilha, 2914-508 SETÚBAL, PORTUGAL

Tel: 265 790 000, Fax: 265 721 869, E-mail: gsilva@est.ips.pt

TERMOPAR – EFEITO DE SEEBECK

Termopar – elemento primário de medida de temperatura constituído por dois materiais diferentes ligados um ao outro.



(OMEGA ENGINEERING INC.)

Junção – ligação dos materiais por aperto ou por soldadura

Termopares industriais – dois materiais *metálicos*, soldados um ao outro

$$e_{AB}^T = f(\text{matA}, \text{matB}, T) \quad (f. \text{ biunívoca}) \rightarrow \text{Efeito termoelétrico de Seebeck}$$

Obtenção da temperatura: mede-se $u (=e_{AB}^T)$ e pela relação anterior calcula-se T por tabela (pág.10) ou por fórmula. O termopar é um **sensor activo**.

OUTROS EFEITOS TERMOELÉTRICOS

Efeito de Peltier:

Libertação (absorção) de **calor** numa junção percorrida por uma corrente eléctrica



$$Q_P = \pi_{AB} I \quad \pi_{AB} - \text{coeficiente de Peltier}$$

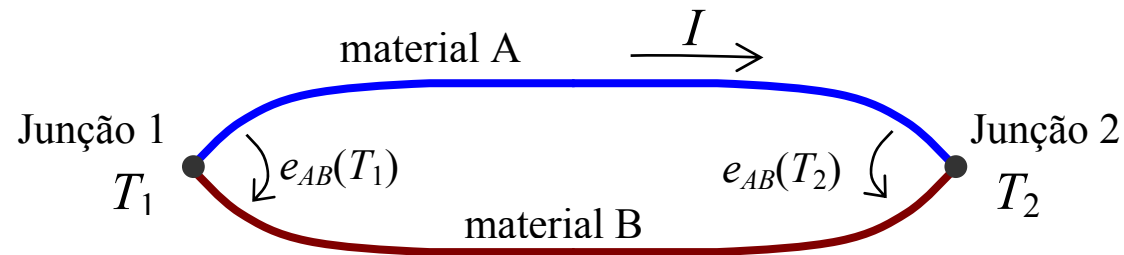
Efeito de Thomson:

Libertação (absorção) de calor num condutor onde existe gradiente de temperatura



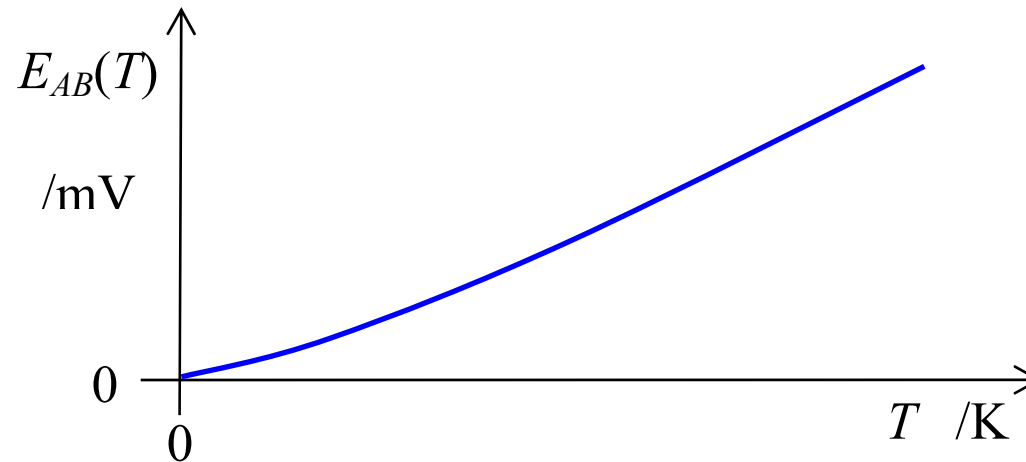
$$Q_T = \sigma I(T_1 - T_2) \quad \sigma - \text{coeficiente de Thomson}$$

INTERDEPENDÊNCIA DOS EFEITOS TERMOELÉCTRICOS



1. Junção 1 a $T_1 \rightarrow e_{AB}(T_1)$ (Seebeck)
2. Junção 2 a $T_2 \rightarrow e_{AB}(T_2)$ (Seebeck)
3. $e_{AB}(T_1)$ e $e_{AB}(T_2) \rightarrow I$ (Ohm)
4. I nas junções origina libertação/absorção de calor $\rightarrow T_1$ e T_2 mudam (Peltier)
5. I nos condutores origina libertação/absorção de calor $\rightarrow T_1$ e T_2 também mudam (Thomson)

FORÇA ELECTROMOTRIZ DE SEEBECK



$E_{AB}(T)$ é: nula ao zero absoluto
 crescente com T , **quase** uma recta: $E_{AB} = \alpha_{AB} T$, α_{AB} quase constante

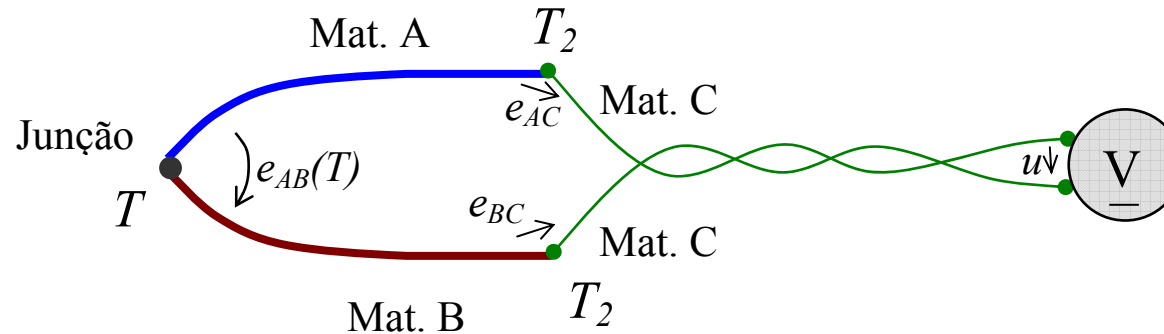
$T_{max} \approx 500$ a 2500 °C, consoante os metais do termopar $E_{AB\ max} \approx 10$ a 80 mV

Para cada termopar (par A,B) conhecido E_{AB} sabe-se T : $E_{AB}(T) \Leftrightarrow T$

Sensibilidade da junção: $S = \frac{dE_{AB}}{dT} = \alpha_{AB}$ (da ordem de $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)

MEDIÇÃO DA F.E.M. DE SEEBECK

Primeira sugestão – utilização de um voltímetro de CC:



Junção de medida: (A,B), à temperatura T

Junções introduzidas com os cabos do voltímetro: (A,C) e (B,C)

F.e.m. de Seebeck: $e_{AB}(T)$, $e_{AC}(T_2)$, $e_{BC}(T_2)$

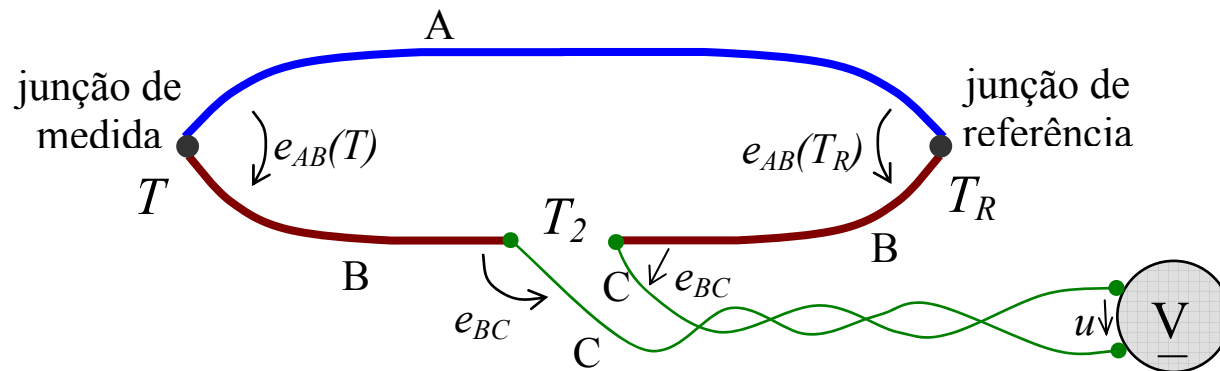
Tensão lida pelo voltímetro: $u = -e_{AC}(T_2) + e_{AB}(T) + e_{BC}(T_2)$

$e_{AC}(T_2) \neq e_{BC}(T_2) \Rightarrow u \neq e_{AB}(T)$

$e_{BC}(T_2) \neq e_{AC}(T_2)$ vai corresponder a um erro na medida

ELIMINAÇÃO DAS F.E.M. INDESEJÁVEIS

Solução utilizada – Introdução de uma junção de referência



$$\begin{aligned} \text{Tensão lida pelo voltímetro: } u(T) &= -e_{BC}(T_2) - e_{AB}(T_R) + e_{AB}(T) + e_{BC}(T_2) \\ &= e_{AB}(T) - e_{AB}(T_R) \end{aligned}$$

Está definido (ANSI⁽¹⁾, ISA⁽²⁾, DIN, CEI) que $T_R = 0 \text{ }^\circ\text{C}$

Resultado obtido – $u(T)$ não depende dos cabos de ligação ao voltímetro

$$T < 0 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow u < 0, \quad T = 0 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow u = 0, \quad T > 0 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow u > 0,$$

¹ ANSI - American National Standards Institute

² Instrumentation Systems and Automation Society.

TERMOPARES NORMALIZADOS

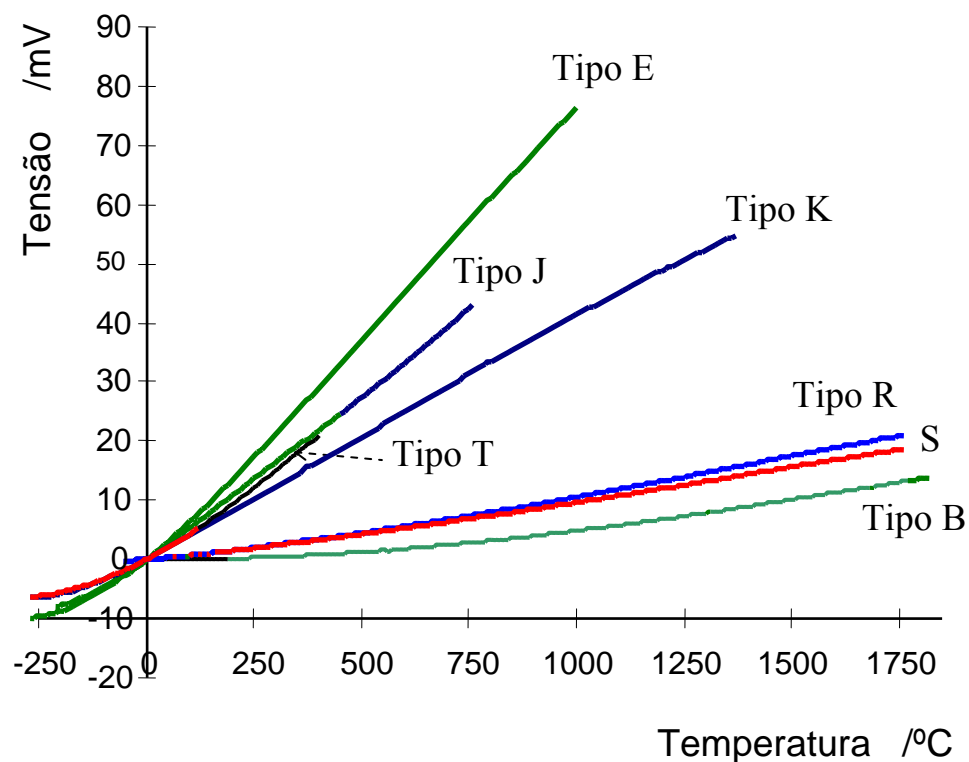
Nomes de termopares normalizados (tipos de termopares)

nome	Constituição	Gama de Temperatura
B	Platina / 30% Ródio-Platina	0–1800 °C
C	Tung-5% Rénio/Tung-26% Rénio	0–2320 °C
E	Cromel / Constantan	-270–1000 °C
G	Tungsténio/ Tung-26% Rénio	0–2300 °C
J	Ferro / Constantan	-210–750 °C
K	Cromel / Alumel	-270–1370 °C
N	Nicrosil /Nisil	-270–1300 °C
R	Platina / 13%Ródio-Platina	-50–1750 °C
S	Platina / 10%Ródio-Platina	-50–1750 °C
T	Cobre / Constantan	-270–400 °C

Constantan = Cobre-Níquel
Alumel = Níquel-Alumínio

Cromel = Níquel-Crómio
Nicrosil = Ni-Cr-Si

Tensões de saída, usando uma junção de referência a 0 °C



Nisil = Ni-Si-Mg

TABELAS DE TERMOPARES

(Termopar tipo J -210:750 °C parte de tabela)

T (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	T (°C)
...
0	0,000	0,050	0,101	0,151	0,202	0,253	0,303	0,354	0,405	0,456	0,507	0
10	0,507	0,558	0,609	0,660	0,711	0,762	0,813	0,865	0,916	0,967	1,019	10
20	1,019	1,070	1,122	1,174	1,225	1,277	1,329	1,381	1,432	1,484	1,536	20
30	1,536	1,588	1,640	1,693	1,745	1,797	1,849	1,901	1,954	2,006	2,058	30
40	2,058	2,111	2,163	2,216	2,268	2,321	2,374	2,426	2,479	2,532	2,585	40
50	2,585	2,638	2,691	2,743	2,796	2,849	2,902	2,956	3,009	3,062	3,115	50
60	3,115	3,168	3,221	3,275	3,328	3,381	3,435	3,488	3,542	3,595	3,649	60
70	3,649	3,702	3,756	3,809	3,863	3,917	3,971	4,024	4,078	4,132	4,186	70
80	4,186	4,239	4,293	4,347	4,401	4,445	4,509	4,563	4,617	4,671	4,725	80
90	4,725	4,780	4,834	4,888	4,942	4,996	5,050	5,105	5,159	5,213	5,268	90
100	5,268	5,322	5,376	5,431	5,485	5,540	5,594	5,649	5,703	5,758	5,812	100
110	5,812	5,867	5,921	5,976	6,031	6,085	6,140	6,195	6,249	6,304	6,359	110
120	6,359	6,414	6,468	6,523	6,578	6,633	6,688	6,742	6,797	6,852	6,907	120
130	6,907	6,962	7,017	7,072	7,127	7,182	7,237	7,292	7,347	7,402	7,457	130
140	7,457	7,512	7,567	7,622	7,677	7,732	7,787	7,843	7,898	7,953	8,008	140
150	8,008	8,063	8,118	8,174	8,229	8,284	8,339	8,394	8,450	8,505	8,560	150
160	8,560	8,616	8,671	8,726	8,781	8,837	8,892	8,947	9,003	9,058	9,113	160
170	9,113	9,169	9,224	9,279	9,335	9,390	9,446	9,501	9,556	9,612	9,667	170
180	9,667	9,723	9,778	9,834	9,889	9,944	10,000	10,055	10,111	10,166	10,222	180
190	10,222	10,277	10,333	10,388	10,444	10,499	10,555	10,610	10,666	10,721	10,777	190
200	10,777	10,832	10,888	10,943	10,999	11,054	11,110	11,165	11,221	11,276	11,332	200
...

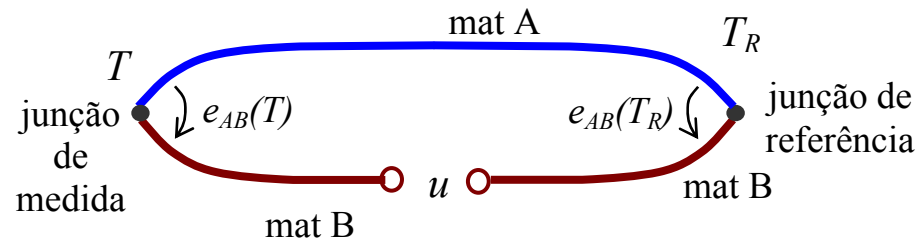
Valores da tabela, $u(T)$. Tensões em mV Referência a 0 °C

LEIS DE UTILIZAÇÃO DOS TERMOPARES / 1

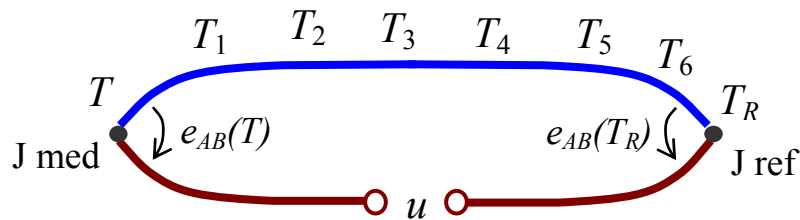
1. Dois metais, duas junções

Um circuito utilizando termopares deve conter pelo menos:

- dois materiais distintos,
- duas junções.



2. Independência da temperatura do percurso



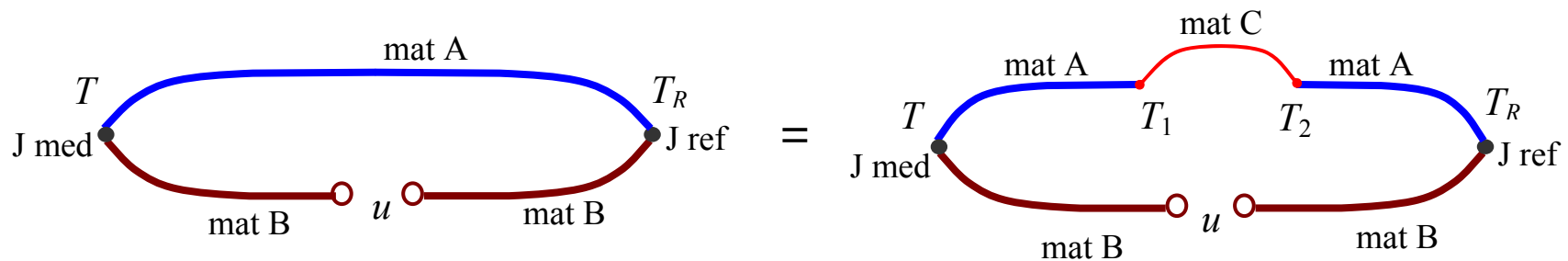
A tensão de saída do termopar, u :

- depende apenas das temperaturas das junções,
- é independente da forma como a temperatura se distribui pelos condutores, desde que nestes não haja corrente eléctrica.

LEIS DE UTILIZAÇÃO DOS TERMOPARES / 2

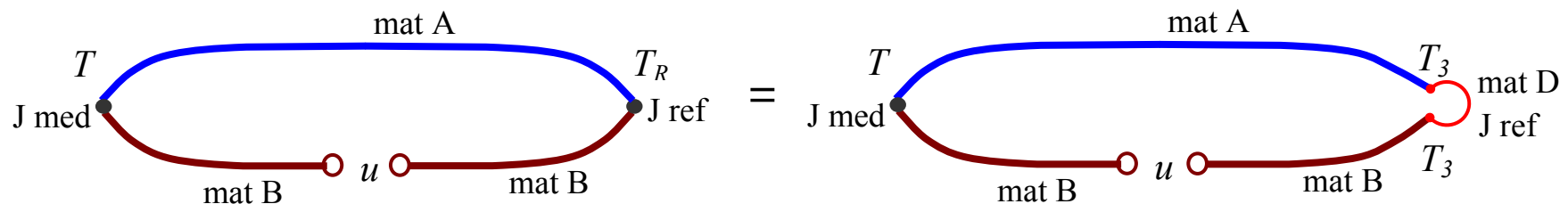
3. Metais intermédios nas ligações

Se um terceiro material homogéneo for inserido no condutor A ou no condutor B de um circuito com termopares, a tensão de saída u permanece inalterável, desde que as novas junções estejam à mesma temperatura ($T_2 = T_1$).



4. Metais intermédios nas junções

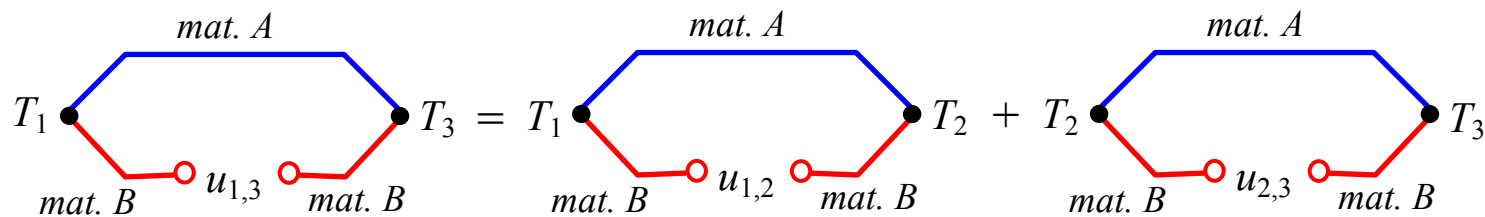
A colocação de um material intermediário numa junção (medida ou referência) não afecta a tensão de saída u , desde que as novas junções assim criadas sejam mantidas à mesma temperatura.



LEIS DE UTILIZAÇÃO DOS TERMOPARES / 3

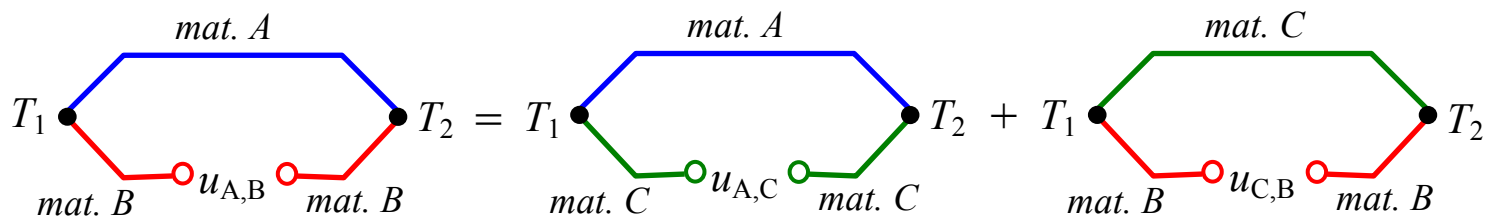
5. Lei das temperaturas sucessivas

Se um circuito de termopares com temperaturas T_1 e T_2 origina a tensão de saída $u_{1,2} = f(T_1, T_2)$, e exposto a T_2 e T_3 produz uma tensão $u_{2,3} = f(T_2, T_3)$, o mesmo circuito às temperaturas T_1 e T_3 originará uma tensão de saída $u_{1,3} = f(T_1, T_3) = u_{1,2} + u_{2,3}$.



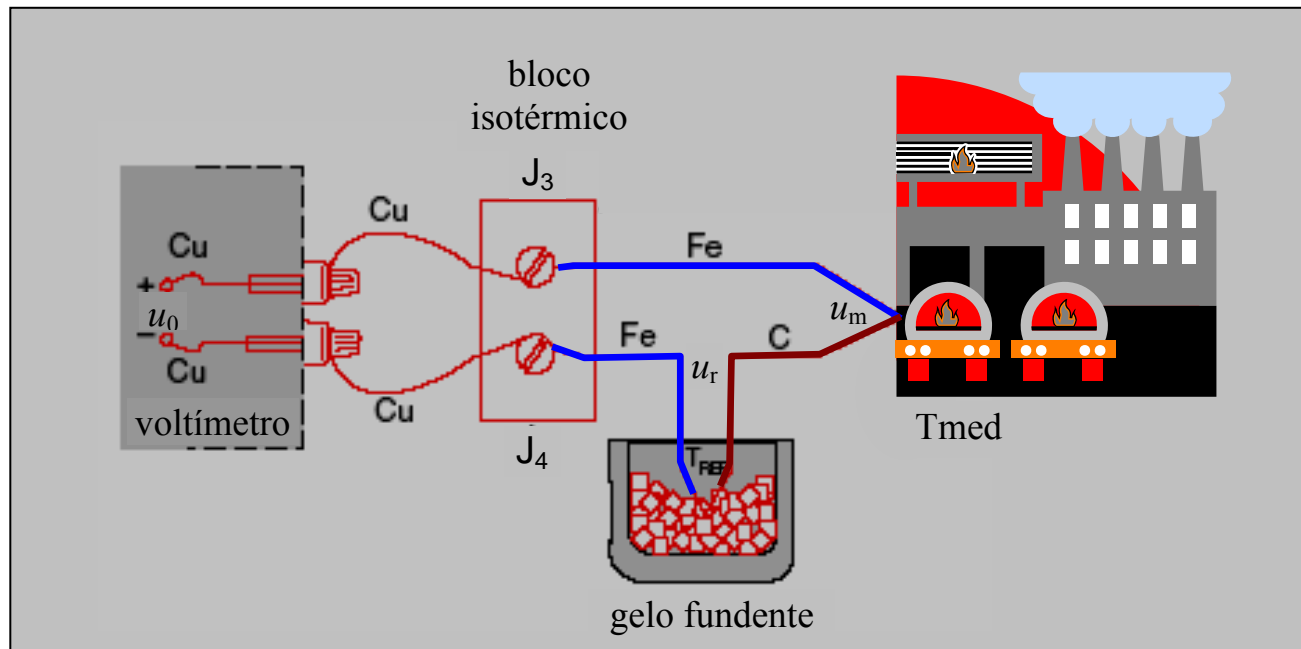
6. Lei dos metais sucessivos

Um termopar constituído pelos materiais A e C e com as junções expostas às temperaturas T_1 e T_2 gera uma tensão $u_{A,C}$. Um circuito semelhante construído de materiais C e B gera, às mesmas temperaturas, $u_{C,B}$. Um 3º termopar, semelhante na configuração, e fabricado com os materiais A e B, dará, às mesmas temperaturas $u_{A,B} = u_{A,C} + u_{C,B}$.



TEMPERATURA DE REFERÊNCIA

1. Colocar a junção de referência em gelo fundente



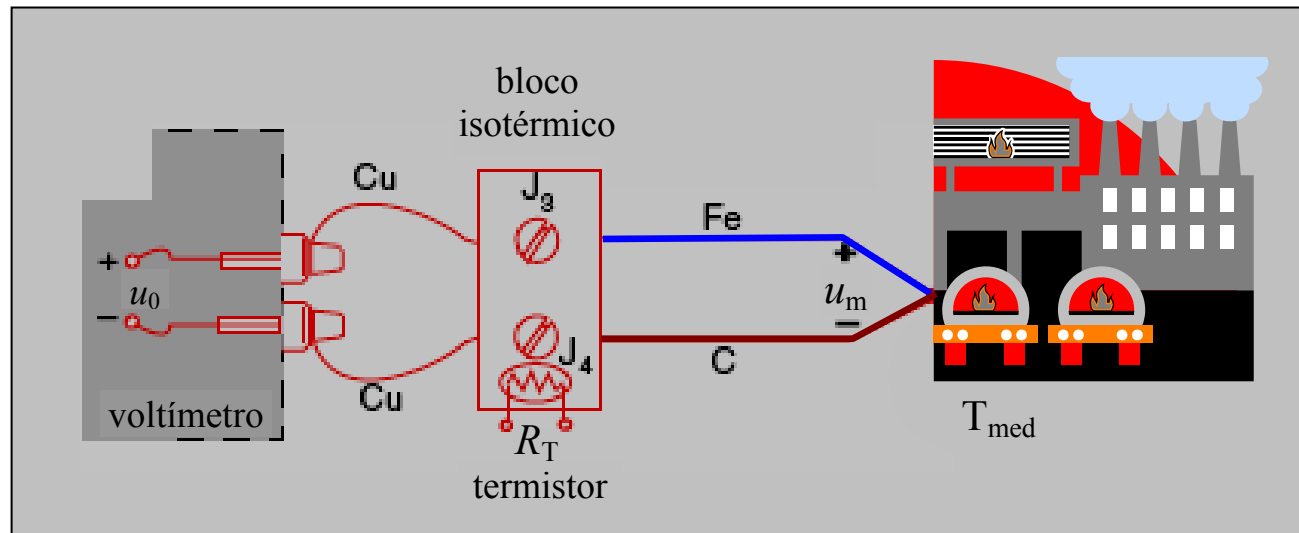
Este método é:

- Muito preciso - usado pelo NBS⁽³⁾ para a produção de tabelas de termopares
- Pouco prático para ser usado na indústria

³ National Bureau of Standards

TEMPERATURA DE REFERÊNCIA

2. Medir a temperatura da junção de referência e compensar por software



Passos a seguir

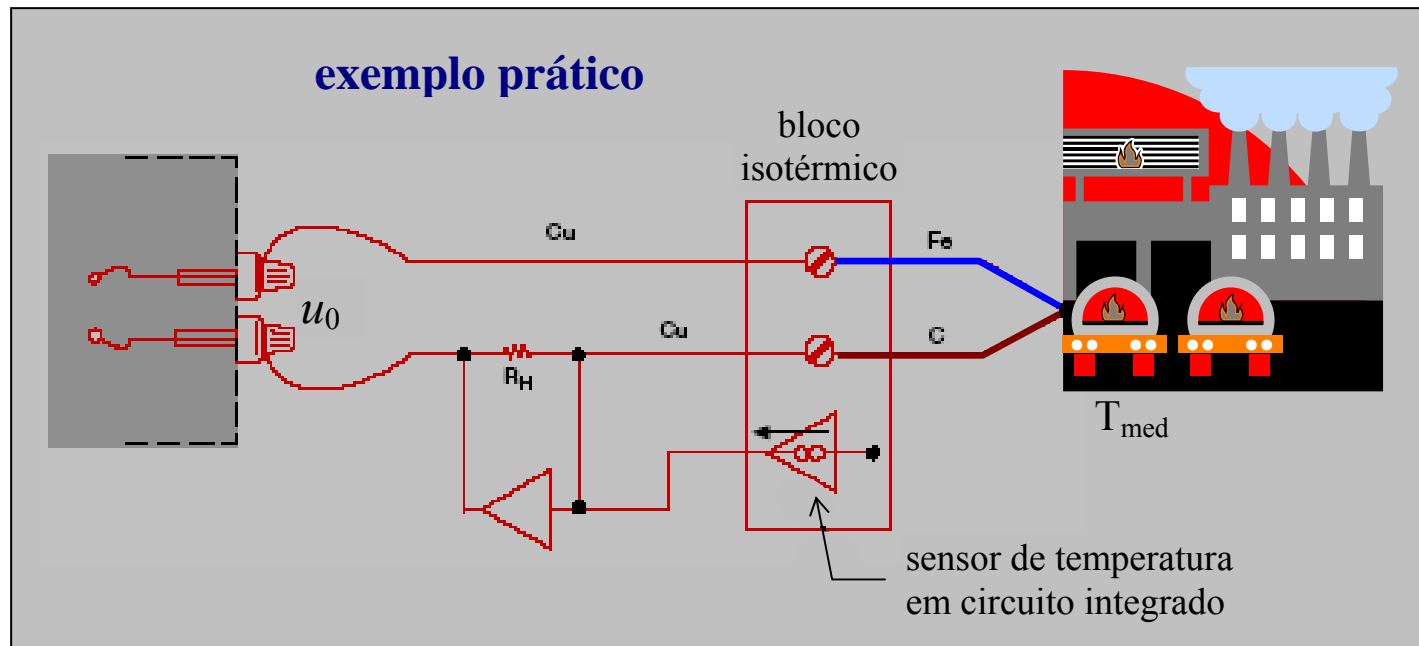
1. Mede-se R_T . Converte-se $R_T \rightarrow U_{REF}$
2. Mede-se U_m . Calcula-se $U_0 = U_m + U_{REF}$
3. Converte-se U_0 em temperatura

Vantagens / inconvenientes

- O bloco isotérmico + R_T servem para vários termopares (~20)
- Exige computador, que poderá estar longe do termopar (~100 m)
- Poderá ser lento, se houver muitos termopares (~1000)

TEMPERATURA DE REFERÊNCIA

3. Medir a temperatura da junção de referência e compensar por hardware



- Serve apenas para um termopar
- É rápido e pode ser feito junto do termopar
- É o método actualmente utilizado: bloco e transmissor incorporados na cabeça do sensor

TEMPERATURA DO OBJECTO

1. Converter a tensão u_0 directamente através dos coeficientes polinomiais⁽⁴⁾

$$T = a_0 + a_1 u_0 + a_2 u_0^2 + a_3 u_0^3 + a_4 u_0^4 + \dots \quad (u_0 / \text{V}, \quad T / ^\circ\text{C})$$

Coef. ↓	Tipo de termopar					
	Tipo E	Tipo J	Tipo K	Tipo R	Tipo S	Tipo T
	<i>- 100 a 1000 °C</i>	<i>0 a 760 °C</i>	<i>0 a 1370 °C</i>	<i>0 a 1000 °C</i>	<i>0 a 1750 °C</i>	<i>- 160 a 400 °C</i>
a_0	0,104967248	-0,048868252	0,226584602	0,263632917	0,927763167	0,100860910
a_1	17189,45282	19873,14503	24152,10900	179075,491	169526,5150	25727,94369
a_2	- 282639,0850	- 218614,5353	67233,4248	- 48840341,37	- 31568363,94	- 767345,8295
a_3	12695339,5	11569199,78	22110340,682	190002 E+10	8990730663	78025595,81
a_4	- 448703084,6	- 264917531,4	- 860963914,9	- 482704 × 10 ⁺¹²	- 1,63565 × 10 ⁺¹²	- 9247486589
a_5	1,10866 × 10 ⁺¹⁰	2018441314	4,83506 E+10	7,62091 × 10 ⁺¹⁴	1,88027 × 10 ⁺¹⁴	6,97688 × 10 ⁺¹¹
a_6	-1,76807 × 10 ⁺¹¹		- 1,18452 × 10 ⁺¹²	- 7,20026 × 10 ⁺¹⁶	- 1,37241 × 10 ⁺¹⁶	- 2,66192 × 10 ⁺¹³
a_7	1,71842 × 10 ⁺¹²		1,38690 × 10 ⁺¹³	3,71496 × 10 ⁺¹⁸	6,17501 × 10 ⁺¹⁷	3,94078 × 10 ⁺¹⁴
a_8	-9,19278 × 10 ⁺¹²		- 6,33708 × 10 ⁺¹³	- 8,03104 × 10 ⁺¹⁹	- 1,56105 × 10 ⁺¹⁹	
a_9	2,06132 × 10 ⁺¹³				1,6953 × 10 ⁺²⁰	

- Para cobrir a gama do termopar com um erro inferior a 1 ° C são necessários 9 coeficientes
- Computacionalmente pesado.

⁴ Coeficientes para os termopares padrão, fornecidos pela NBS

TEMPERATURA DO OBJECTO

2. Usar o termopar numa gama restrita e considerá-lo linear

- O desempenho satisfaz para os termopares mais lineares (ex., tipo K)
- Pode fazer-se a conversão linear directamente com um voltímetro ou um “DAQ”

3. Dividir a gama em sectores e converter com polinómio ordem de baixa

- Obtém-se a precisão do 1º método, com muito maior rapidez
- Divide-se a gama de medida (do termopar) em 8 sectores
- Utiliza-se um polinómio do 3º grau para cada sector (coeficientes diferentes dos anteriores)
- É o método usado na indústria:

no software dos sistemas de aquisição de dados, respeitante aos termopares nos transmissores inteligentes.

CABOS DE EXTENSÃO

Junção de medida – no campo

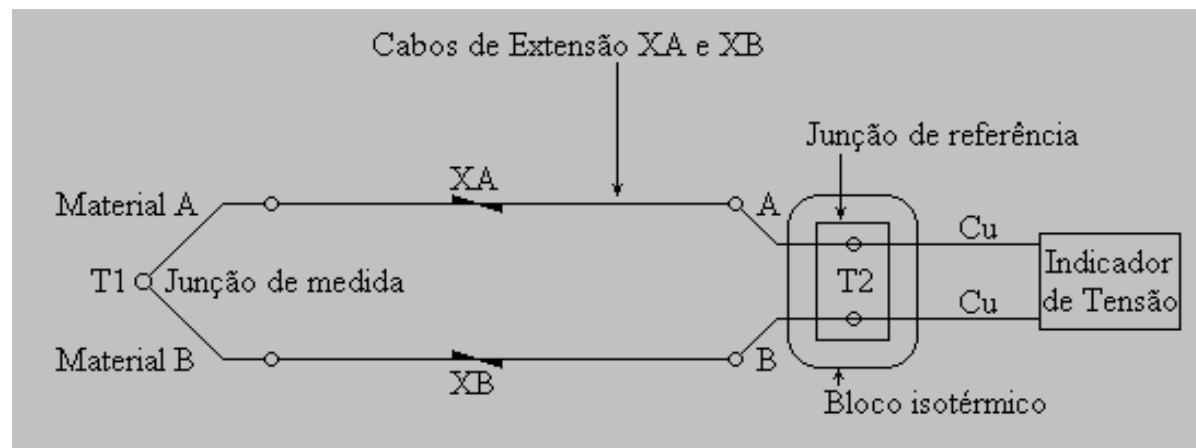
Junção de referência – na sala de armários

Distância entre as junções de medida e de referência – da ordem de 100 m

Ligações entre estas junções: por meio de *cabos de extensão* (ou cabos de compensação)

Características – propriedades termoelétricas equivalentes às dos metais dos termopares.

Porquê cabos de extensão em vez dos termopares? – flexíveis e de preço mais acessível



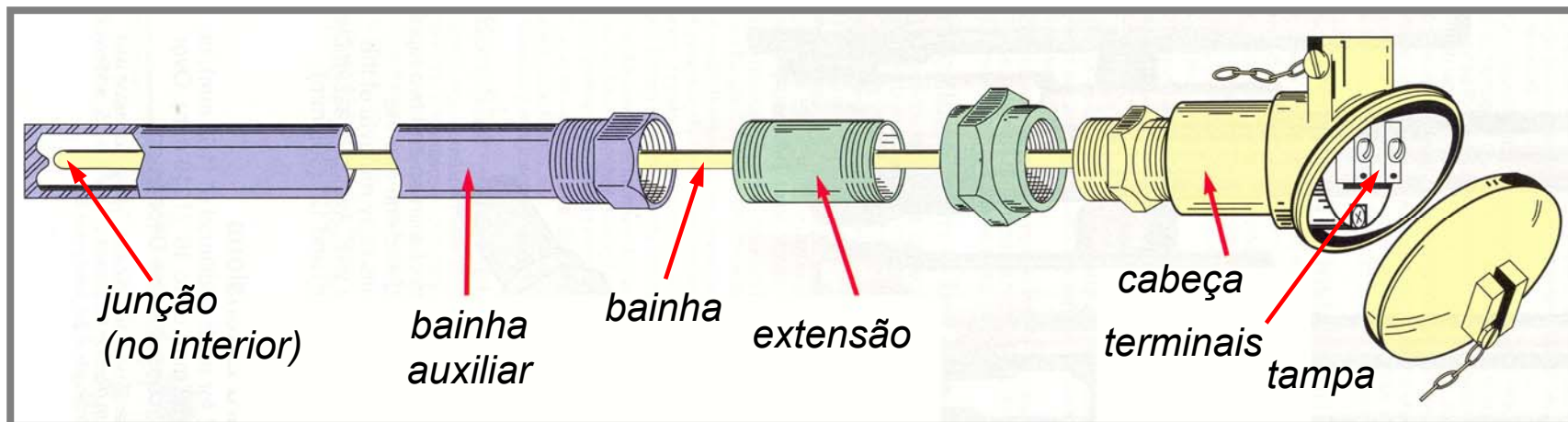
REJEIÇÃO DO RUÍDO

(Note-se que a sensibilidade de um termopar é da ordem dos microvolt/°C)

Acções a tomar (no projecto, na instalação)

- 1. Usar cabos curtos, se possível com o conversor junto do termopar**
- 2. Passar os cabos de sinal longe de cabos de potência**
- 3. Usar cabos de extensão adequados, que não devem ser muito apertados**
- 4. Utilização de cabos de sinal blindados, convenientemente ligados à terra**
- 5. Efectuar uma filtragem analógica do sinal**
- 6. Usar amplificadores com rejeição de modo comum elevada**
- 7. Agrupar os cabos dos sinais de entrada de acordo com as cartas do “DCS”**
- 8. Usar termopares adequados à atmosfera, com a junção soldada de origem**
- 9. Quando possível, usar termopares com sensibilidade elevada**

ASPECTOS CONSTRUTIVOS / 1



ASPECTOS CONSTRUTIVOS / 2



Nas aplicações em que se mede a temperatura de água ou de vapor a alta pressão **é obrigatório** usar-se uma bainha auxiliar de protecção, designada por “*thermowell*”, que deve ser **soldada** ao processo.

ASPECTOS CONSTRUTIVOS / 3



← bainhas cerâmicas

dimensões reduzidas →

