

Termopares industriais

2.ª Parte

1. LEIS DE COMPORTAMENTO DOS TERMOPARES

O funcionamento dos termopares baseia-se nas seguintes leis, ilustradas na figura 1.

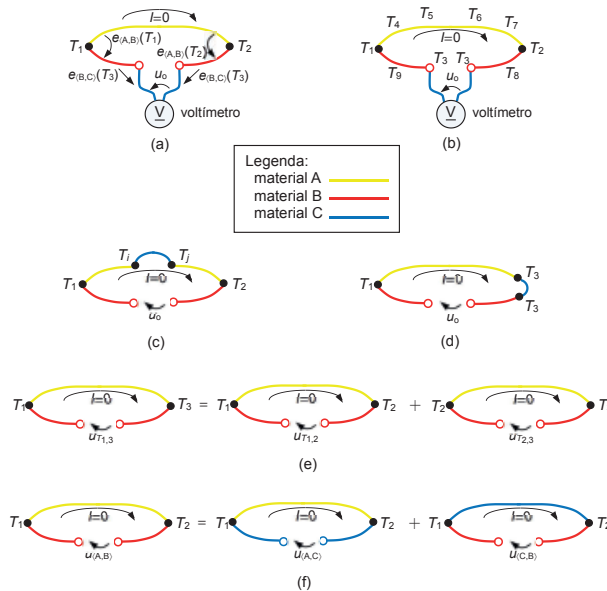


Figura 1. Representação esquemática das leis de funcionamento dos termopares: lei dos dois metais e duas junções (a); lei da independência da temperatura do percurso (b); lei dos metais intermédios I (c); lei dos metais intermédios II (d); lei das temperaturas sucessivas (e); lei dos metais sucessivos (f).

Lei dos dois metais e duas junções – Um circuito utilizando termopares, deve conter pelo menos dois materiais distintos e pelo menos duas junções (figura 1 (a)).

Lei da independência da temperatura do percurso – A tensão de saída do termopar, u_o , depende apenas das temperaturas das junções, T_1 e T_2 , sendo independente da forma como a temperatura se distribui pelos condutores, desde que nestes não haja corrente elétrica (figura 1 (b)) e os terminais do voltmetro estejam à mesma temperatura.

Lei dos metais intermédios I – Se um terceiro material homogéneo C for inserido no material A ou no material B de um circuito com termopares (figura 1 (c)), a tensão de saída u_o permanece inalterada, desde que as novas junções estejam à mesma temperatura ($T_i = T_j$).

Lei dos metais intermédios II – A instalação de um material intermédio C numa junção (A,B) (figura 1 (d)) não afeta a tensão de saída u_o , desde que as novas junções, assim criadas, sejam mantidas à temperatura T_3 .

Lei das temperaturas sucessivas – Um circuito de termopares com temperaturas T_1 e T_2 (figura 1 (e)) origina uma tensão de saída $u_{T_1,2} = f(T_1, T_2)$. O mesmo circuito, exposto às temperaturas T_2 e T_3 , produz uma tensão $u_{T_2,3} = f(T_2, T_3)$. Se o circuito for exposto às temperaturas T_1 e T_3 , a tensão de saída será

$$u_{T_1,3} = f(T_1, T_3) = u_{T_1,2} + u_{T_2,3} \quad (1)$$

Lei dos metais sucessivos – Se um termopar constituído pelos materiais A e C, com as junções expostas às temperaturas T_1 e T_2 , gera uma tensão $u_{(A,C)}$ (figura 1 (f)) e um circuito semelhante, construído com os materiais C e B, gera às mesmas temperaturas uma tensão $u_{(C,B)}$, então, um terceiro termopar, semelhante na configuração e fabricado com os materiais A e B, gerará às mesmas temperaturas

$$u_{(A,B)} = u_{(A,C)} + u_{(C,B)} \quad (2)$$

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS LEIS ANTERIORES

A justificação da primeira lei foi dada na 1ª parte deste artigo, no ponto 2. **Funcionamento dos termopares**, em particular através da equação (de acordo com a figura 1 (a))

$$u_o = e_{(A,B)}(T_1) - e_{(A,B)}(T_2) \quad (3)$$

- A segunda lei resulta do facto de não haver produção de f.e.m. termoelétricas, se não houver heterogeneidades no material (pelo efeito de Seebeck), e de não haver modificações nas temperaturas, se a corrente for nula (efeitos de Thomson e de Peltier). Esta lei é de grande importância prática, pois é devido a ela que é possível instalar, despreocupadamente, o caminho dos cabos dos termopares, ou das suas extensões (a serem apresentadas na 3ª e última parte deste artigo), sem ter de atender às temperaturas ao longo do percurso.
- A demonstração da terceira lei faz-se, efetuando a circulação ao longo de um caminho que inclua o termopar e o material inserido no circuito e constatando que há cancelamento das tensões, nas junções com o novo metal, desde que estas se encontrem à mesma temperatura. Esta lei permite a utilização de um cabo normal (e.g. cobre) para efetuar emendas nos condutores de um termopar, sem que daí resulte nenhum erro na determinação da temperatura. Tem que se verificar, no entanto, para este efeito, nas novas junções i e j , a condição $T_i = T_j$. É conveniente que a corrente elétrica no circuito seja nula ($I = 0$ A), para que as temperaturas das junções não se alterem devido ao efeito de Peltier, o que, na prática, poderia conduzir a que T_i se tornasse diferente de T_j .
- A demonstração da quarta lei faz-se recorrendo à **lei de Volta**:

Num circuito fechado, constituído por diferentes materiais, todos à mesma temperatura, a soma das f.e.m. de Seebeck é nula.

¹ Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta, físico e químico italiano, inventor da pilha elétrica, 1745–1827.

Pode provar-se a lei de Volta do seguinte modo: se a soma das f.e.m. no circuito fechado não fosse nula haveria passagem de corrente elétrica, com consequente dissipação de calor nos condutores, por efeito de Joule, e com aquecimento/arrefecimento das junções por efeito de Peltier. Mas, de acordo com a Termodinâmica, tal não é possível, uma vez que, para que um sistema possa fornecer calor, são necessárias duas fontes a temperaturas diferentes, o que não acontece pois está-se a admitir todo o circuito à mesma temperatura.

Considere-se um circuito termoelétrico fechado, constituído por três materiais, A, B e C, e pelas três respetivas junções (A, B), (A, C) e (C, B), todas à mesma temperatura (o material C corresponde ao metal intermédio numa das junções de um termopar duplo constituído pelos materiais A e B). Pela lei de Volta, as tensões $u_{(A,C)} + u_{(C,B)}$ têm de igualar a tensão $u_{(A,B)}$. Fica, assim, demonstrado que a introdução de um metal intermédio não altera a tensão da junção original $u_{(A,B)}$. Esta lei é importante no fabrico dos termopares, em que a introdução de um terceiro material na junção (e.g. para efetuar a soldadura) não afeta a tensão de saída.

- Na quinta lei, a demonstração faz-se efetuando a ligação de termopares em série. Esta lei é muito útil nos casos em que se pretenda utilizar uma temperatura de referência diferente de zero graus Celsius. Como exemplo, suponha-se que se utiliza um termopar para medir a temperatura da fornalha de uma caldeira, θ . A junção de medida estará no interior da fornalha, normalmente protegida por uma bainha, e relativamente perto da parede da fornalha (a 30 cm ou a 50 cm de afastamento). A junção de referência encontra-se, normalmente, numa sala com ar condicionado (e.g. 20 °C), onde

também se encontra o sistema de controlo distribuído. Nestas condições, a temperatura de saída do termopar, $u_{T_{\theta},20}$, virá mais baixa do que se a junção de referência estivesse a 0 °C

$$u_{T_{\theta},0} = u_{T_{\theta},20} + u_{T_{20},0} \quad (4)$$

Ao valor medido com a referência a 20 °C e antes de efetuar a entrada nas tabelas para a obtenção da temperatura, será preciso acrescentar o valor constante de $u_{T_{20},0}$, já que todas as tabelas de termopares são construídas considerando que a junção de referência se encontra à temperatura de 0 °C.

- A sexta lei demonstra-se pelo princípio da sobreposição. Ela permite reduzir o número de tabelas de pares de materiais. Se forem utilizados $N=20$ materiais diferentes, haverá um número de emparelhamentos igual a ${}^{20}C_2 = 20! / (2! \times 18!) = 190$ combinações. Se, no entanto, se referirem todos os materiais a apenas um material padrão, ter-se-ão $(N-1)$ emparelhamentos, no caso do exemplo dado, 19 emparelhamentos. Utiliza-se a platina como material padrão (de referência).

3. SENSIBILIDADE

A sensibilidade de um termopar, a uma determinada temperatura T , é dada por

$$S_T = \frac{du_o}{dT} \quad (5)$$

O índice T , em S_T , indica que a sensibilidade é referida à temperatura T , uma vez que ela própria é função da temperatura.

PUB



O FUTURO DA QUINAGEM

Quinadora Servo-Elétrica de Alta Precisão e Produtividade



Precisa
Servomotor duplo e exclusivo,
precisão micrométrica
e maior rentabilidade



EG 4010



Ergonómica
Estação de trabalho compacta,
confortável e produtiva



Ecológica
Sem óleo hidráulico
e só 5,3 kW de potência instalada

Growing Together with Our Customers

AMADA



AMADA MAQUINARIA IBÉRICA
Tel. +351 308 809 511
E-mail: info@amada.pt
www.amada.pt

A tabela 1 indica a sensibilidade de alguns materiais, quando usados com a platina, para uma temperatura da junção de 273,15 K (0 °C), existindo uma grande variação nas sensibilidades, consoante os materiais. Repare-se que as sensibilidades são baixas, da ordem dos $\mu\text{V/K}$, e que para os semicondutores (quatro últimos materiais da tabela) as sensibilidades são bastante superiores às dos metais.

Para que a sensibilidade de um termopar, constituído por dois metais A e B, seja elevada, convirá associar materiais com sensibilidades altas (em módulo) em relação à platina e de sinais contrários. No entanto, para a construção de termopares, há outros critérios a ter em consideração. Assim, o par (cromel, bismuto), que tem uma sensibilidade, a 273,15 K (0 °C), de $(+21,7) - (-72) = 93,7 \mu\text{V/K}$, não se utiliza devido ao facto do bismuto ser quebradiço e ter um ponto de fusão baixo (271 °C). Para se aumentar a sensibilidade dos termopares, estes podem ser associados em série, desde que se garantam N junções à temperatura de medida e outras N junções à temperatura de referência.

Tabela 1. Sensibilidade de alguns termopares, referenciados à platina, com uma temperatura da junção de 273,15 K (0 °C).

Material	Sensibilidade ($\mu\text{V/K}$)	Material	Sensibilidade ($\mu\text{V/K}$)
bismuto	-72	cobre	+6,5
constantan	-35	ouro	+6,5
alumel	-17,3	tungsténio	+7,5
níquel	-15	ferro	+19
nisil	-11	cromel	+21,7
platina	0	nicrosil	+29,3
mercúrio	+0,6	germânio	+300
carbono	+3	silício	+440
alumínio	+3,5	telúrio	+500
estanho	+4	selénio	+900
prata	+6,5		

4. TERMOPARES NORMALIZADOS

O estudo dos materiais utilizados nos termopares tem sido efetuado exaustivamente. Devido à grande quantidade de possibilidades foram escolhidos determinados pares e a sua designação normalizada. Assim, os **termopares normalizados** foram designados pelas letras B, C, D, E, G, J, K, M, N, P, R, S e T. A tabela 2 indica a constituição material de cada um destes termopares e, também, o intervalo de medição máximo de temperaturas e a respetiva tensão de saída. Ao consultar-se um catálogo de um fabricante, poderá notar-se que o intervalo de medição máximo depende do diâmetro dos condutores constituintes do termopar. Termopares construídos com condutores delgados não suportam temperaturas tão elevadas, como os que são construídos com condutores grossos.

Na figura 7 da 1.ª parte deste artigo, no ponto **2. Funcionamento dos termopares**, indicaram-se as tensões de saída para os termopares do tipo B, E, J, K, R, S e T. A não-linearidade da resposta é um pouco mais acentuada nos termopares usados em temperaturas elevadas (tipos B, R e S), ou quando se utiliza um campo de medida muito amplo.

Existem diversas formas de exprimir a temperatura medida, T_1 , em função da tensão de saída do termopar, u_o , ou seja, de replicar a temperatura que se está a medir. Esta relação pode ser

apresentada de uma forma gráfica, por meio de tabelas, ou de forma analítica aproximada por um polinómio de grau n

$$T_1 = a_0 + a_1 u_o + a_2 u_o^2 + \dots + a_n u_o^n \quad (6)$$

em que T_1 é dado em °C e u_o em μV .

Tabela 2. Intervalo de medição máximo de temperaturas e intervalo de medição de tensões de saída para termopares normalizados.

Tipo	Constituição	Intervalo de medição máximo de temperaturas (°C)	Intervalo de medição de tensões de saída (mV)
B	70% Pt, 30% Rh 94% Pt, 6% Rh	0 a 1820	0 a 13,820
C	95% W, 5% Re 74% W, 26% Re	0 a 2320	0 a 37,066
D	97% W, 3% Re 75% W, 25% Re	0 a 2320	0 a 39,506
E	90% Ni, 10% C 55% Cu, 45% Ni	-270 a 1000	-9,835 a 76,373
G	W 74% W, 26% Re	0 a 2320	0 a 38,564
J	Fe 55% Cu, 45% Ni	-210 a 1200	-8,095 a 69,553
K	90% Ni, 10% Cr 95% Ni, 2% Al, 2% Mn, 1% Si	-270 a 1372	-6,458 a 54,886
M	82% Ni, 18% Mo 99,2% Ni, 0,8% Co	-50 a 1410	-1,732 a 74,104
N	84,1% Ni, 14,4% Cr, 1,5% Si 95,5% Ni, 4,5% Si	-270 a 1300	-4,345 a 47,513
P	55% Pd, 31% Pt, 14% Au 65% Au, 35% Pd	0 a 1395	0 a 55,257
R	87% Pt, 13% Rh Pt	-50 a 1768	-0,226 a 21,101
S	90% Pt, 10% Rh Pt	-50 a 1768	-0,236 a 18,693
T	Cu 55% Cu, 45% Ni	-270 a 400	-6,258 a 20,872

5. CÓDIGO DE CORES PARA OS TERMOPARES

As cores dos termopares estão definidas pelas normas ASTM E230/E230M-17 e ANSI MC96.1:1982, nos EUA e no Canadá, e pela norma IEC 584-3, internacional. Existem, ainda, as normas BS 1843, inglesa e checa, DIN 43710, alemã e holandesa, JIS C 1610, japonesa, e a norma AFNOR NF C 42-324, francesa.

Na tabela 3 apresenta-se o código de cores para termopares normalizados, de acordo com as normas ASTM E230/E230M-17 e IEC 584-3. As cores indicadas nas colunas intituladas *Exterior*, + e -, referem-se às cores do material de isolamento exterior, de isolamento do condutor mais positivo e de isolamento do condutor menos positivo, respetivamente. $\color{blue}{\blacktriangleright}$

Tabela 3. Código de cores para termopares normalizados, de acordo com as normas ASTM E230/E230M-17 e IEC 584-3.

Tipo de termopar	Norma ASTM E230/E230M-17			Norma IEC 584-3		
	Exterior	+	-	Exterior	+	-
T	castanho	azul	vermelho	castanho	castanho	branco
J	castanho	branco	vermelho	preto	preto	branco
E	castanho	roxo	vermelho	roxo	roxo	branco
K	castanho	amarelo	vermelho	verde	verde	branco
N	castanho	laranja	vermelho	rosa	rosa	branco
S	n.e.	n.e.	n.e.	laranja	laranja	branco
R	n.e.	n.e.	n.e.	laranja	laranja	branco
B	n.e.	n.e.	n.e.	cinzento	cinzento	branco

n.e. - não estabelecido.