

# Introdução

De entre todas as grandezas a temperatura é provavelmente aquela que é medida com mais frequência. Na indústria, o controlo da temperatura é essencial para que as reacções químicas, as soldaduras, a destilação fraccionada, a secagem de materiais, etc. se efectuem de uma forma possível e correcta. O tipo de aparelho utilizado em cada caso, a sua precisão e outras características dependem da aplicação. Uma das formas mais comuns de medição de temperaturas em unidades industriais consiste na utilização de termopares.



O termopar é um termómetro termoeléctrico que mede a temperatura pelo método de contacto. Este sensor de temperatura é formado pela junção de dois condutores ou semi condutores, de modo a formar um circuito fechado.

# Princípio de funcionamento

O termopar é um sensor activo, isto é, ele próprio gera uma força electromotriz (fem), não sendo portanto necessário alimentá-lo.

A operação de um termopar baseia-se em algumas leis da electricidade chamadas efeitos termoeléctricos: efeito de Seebeck, efeito de Peltier e efeito de Thompsom que se descrevem seguidamente:



a) Efeito de Seebeck:

Qualquer diferença de temperaturas entre as junções de dois metais diferentes gera uma diferença de potencial, isto é, força electromotriz entre os dois pontos extremos, dando origem a uma corrente do circuito. Para uma temperatura uniforme (T), o valor de fem depende dos materiais e da sua temperatura absoluta:

$$fem = f(T, \text{metal 1}, \text{metal 2})$$

Este princípio (efeito termoeléctrico) tem a contribuição de dois efeitos: o efeito de Peltier e o efeito de Thompsom.

b) Efeito de Peltier:

Sempre que uma junção de dois materiais é percorrido por uma corrente eléctrica, desenvolve-se nesta uma quantidade de calor proporcional à corrente que o atravessa. Isto é, a intensidade e sinal de fem, criados nas junções, são dependentes da sua temperatura, mas independente do modo como a junção foi feita. O sentido da fem é do metal mais negativo para o menos negativo.

c) Efeito de Thompsom:

Sempre que um material condutor homogéneo sujeito a uma diferença de temperatura entre as extremidades, cria-se uma força electromotriz devido á mobilidade de electrões desde a zona mais quente para a zona mais fria.

Por combinação dos dois efeitos, a fem é dada por:

$$E = a(T_1 - T_2) - b(T_1^2 - T_2^2) \quad T_1 > T_2$$

onde a e b são constantes, T<sub>1</sub> é a temperatura da junção quente e T<sub>2</sub> é a temperatura da junção fria (normalmente tomada como temperatura de referência a 0 °C).

Em suma, os efeitos termoelétricos expostos estão interligados.

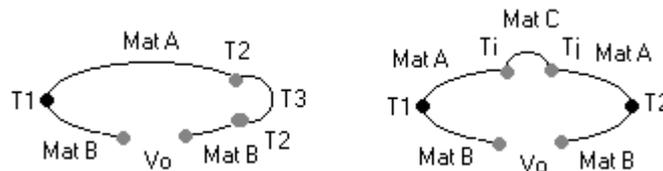
Segundo a contribuição do efeito de Peltier e Thompson, o potencial é determinado pelos três factores seguintes:

- O potencial é proporcional à diferença de temperatura entre as junções;
- O potencial depende da combinação de metais diferentes;
- O potencial depende da homogeneidade do material;

Para determinar a temperatura da junção quente a partir da fem é necessário ter em conta as seguintes leis:

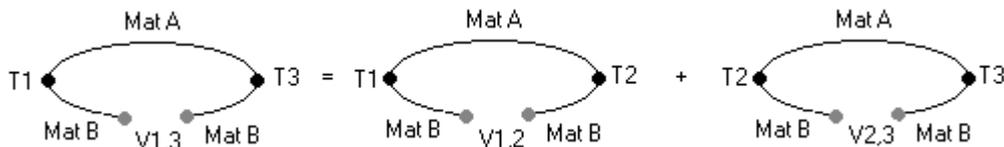
### *LEI DOS METAIS INTERMÉDIOS*

Seja um termopar um conjunto de dois metais A e B diferentes, cujas junções estão à temperatura  $T_1$  e  $T_2$ . A fem gerada nesse termopar não se altera se se colocar numa, ou em ambas as junções, diferentes metais entre A e B, desde que esse metal esteja à temperatura inicial das junções desse metal.



### *LEI DAS TEMPERATURA INTERMÉDIAS*

Sejam dois termopares constituídos pelos mesmos metais A e B. Um termopar (P1) possui as suas junções à temperatura  $T_1$  e  $T_2$ , e o outro (P2) às temperaturas  $T_2$  e  $T_3$ . Seja um outro termopar (P3) constituído pelos metais A e B, mas cujas junções estejam às temperaturas  $T_1$  e  $T_3$ . Então a fem gerada por P3 é dada pela soma das fem geradas por P1 e P2.



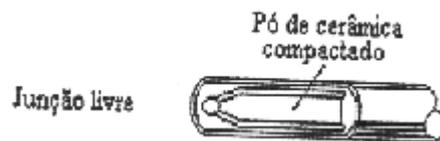
# Construção e materiais

Um termopar pode ter uma bainha de protecção que é utilizada para o proteger do ataque químico provocado por agentes corrosivos e também para o proteger mecanicamente. No entanto, a constante de tempo da resposta do sensor aumenta com a sua utilização. De entre os termopares com bainha há que considerar várias opções:

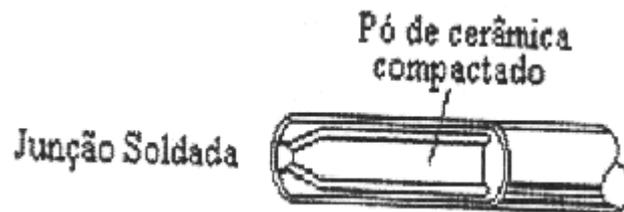
a) Junção exposta - este tipo de termopar não pode ser utilizado em fluidos corrosivos. A bainha oferece uma protecção mecânica razoável e tem uma constante de tempo baixa;



b) Junção livre;



c) Junção soldada - utiliza-se quando se pretende um termopar protegido com uma constante de tempo relativamente baixa.



Ao longo dos anos, vários termopares específicos foram sendo desenvolvidos para resolver o problema da medição de temperatura.

Devido à grande quantidade de possibilidades, foram escolhidos pela ANSI (*American National Standards Institute*) determinados pares, e foi normalizada a sua designação. Assim, os termopares "standart" foram designados pelas letras B, E, G, J, K, N, R, S, T.

O quadro seguinte indica a constituição do material de cada um destes termopares, indicando também a gama de temperaturas de utilização e a respectiva gama de variação da tensão de saída. No mesmo quadro referem-se ainda os valores de sensibilidade para os diferentes tipos.

Tipo	Par		Gama de Temperatura (°C)	Gama de Tensão de Saída (mV)	Sensibilidade (µV/°C)
	-	+			
J	Cu+Ni	Fe	-185 a 870	-7.52 a 50.05	53.5
K	Ni+Al	Cr+Ni	-185 a 1260	-5.51 a 51.05	39.4
T	Cu+Ni	Cu	-185 a 400	-5.824 a 20.805	41.5
S	Pt	Pt+10% Rh	0 a 1535	0 a 15.979	---
E	Cu+Ni	Ni+Cr	0 a 980	0 a 75.12	60.8
N	Ni+Si+Mg	Ni+Cr+Si	-270 a 1300	-4.345 a 47.502	26.1
R	Pt	Pt+13% Rh	0 a 1590	0 a 18.636	---
B	Pt+6%Rh	Pt+30% Rh	38 a 1800	0.007 a 13.499	---
G	W+26% Re	W	16 a 2800	0.042 a 43.25	---

Os termopares do tipo **B**, **R** e **S** têm em comum um metal nobre: platina, como tal têm determinadas características semelhantes.

Os termopares contendo platina são os mais estáveis de todos os termopares. O tipo **S** é tão estável que é o especificado para a temperatura de calibração padrão entre o ponto de antimónio (630.74 °C) e o ponto de ouro (1064.43°C).

Uma vantagem do tipo **B** é a temperatura de junção de referência ser quase imaterial, ou seja entre 0 a 40°C.

Ao contrário dos termopares constituídos por metais nobres, os outros tipos não têm uma composição química comum.

O tipo **E** é ideal para medição de temperaturas baixas devido ao seu coeficiente de Seebeck (58 µV/ °C), à sua baixa condutividade térmica e à resistência corrosiva. O coeficiente de Seebeck para o tipo **E** é o maior dos termopares "standard " pelo que este é o termopar mais utilizado para detectar pequenas alterações de temperatura.

O elemento positivo do termopar do tipo **J** é um metal dispendioso que raramente é produzido na sua forma pura: o ferro. Contudo, utilizando ferro com impurezas, o termopar é bastante usual devido ao seu alto coeficiente de Seebeck e ao seu baixo custo. O tipo **J** nunca deve ser usado abaixo 760 °C devido à possibilidade de uma transformação magnética brusca que pode causar descalibração mesmo quando se mede a baixas temperaturas.

O tipo **T** é o único termopar com erros standardizados para o fio para uma região de temperatura abaixo de 0 °C, no entanto o tipo **E** é , actualmente, mais apropriado para temperaturas muito baixas devido às suas características. O que distingue o tipo **T** é ter apenas uma sonda de cobre. Este facto pode ser uma vantagem numa situação especializada de monotização, onde a diferença de temperatura tem que ser a desejada uma vez que a sonda de cobre do termopar é do mesmo metal que os terminais, tornando desnecessário uma compensação da sonda.

O tipo **K** é semelhante ao tipo **N**, mas foi projectado para minimizar algumas das instabilidades existentes no tipo **K**.

Os termopares tipo **G** são normalmente usados a altas temperaturas em meios redutivos ou em vácuo, mas nunca em atmosferas oxidantes, devido à alta velocidade reactiva.

# Características estáticas

A selecção dos materiais a utilizar na construção de termopares deve obedecer aos seguintes critérios, dentro da gama de temperaturas desejadas: sensibilidade elevada; linearidade alta; estabilidade alta (e como é evidente, um custo baixo).



## *Sensibilidade*

A sensibilidade ( $S_T$ ) de um termopar é dada por:  $S_T = \Delta \text{fem} / \Delta T$ . O índice T em  $S_T$  indica que a sensibilidade é função da temperatura. O Quadro 1. indica a sensibilidade de alguns materiais quando usados com a platina, para uma temperatura de junção de 0 °C. Verifica-se que existe uma grande variação nas sensibilidades, consoante os materiais. Note-se que as sensibilidades são baixas apresentando valores da ordem dos  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

Outro aspecto que se pode constatar é que as sensibilidades referentes aos semi-condutores são bastante superior às dos metais.

Basicamente, para que a sensibilidade de um termopar seja elevada será conveniente associar materiais com sensibilidades altas em relação à platina (em módulo), e de sinais contrários.

Assim o par Constantan/Ferro (Tipo J) apresenta uma sensibilidade de  $53.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  que é igual à soma das sensibilidades respectivas a cada material.

Para aumentar a sensibilidade de sensores de temperatura com termopares, estes podem ser associado em série, desde que se garanta a existência de N junções à temperatura de medida e outras N à temperatura de referência.

## *Linearidade*

A não linearidade da resposta é particularmente acentuada nos termopares usados para temperaturas elevadas (ver Quadro).

## *Estabilidade*

A estabilidade dos termopares é sempre boa a curto prazo. O problema reside na instabilidade a longo prazo.

Com o passar do tempo verifica-se a oxidação da junção, tanto externa como internamente que conduz a uma oscilação na tensão de saída que vai conduzir a erros de alguns graus Celsius ao fim de um tempo considerável (algumas centenas de horas) de operação de um termopar.

Geralmente, essa oscilação será tanto menor, quanto maior for a secção do material constituinte. Os

termopares com Ferro e Cobre apresentam maior deriva do que os que são constituídos por Platina, Ródio, Irídio e Tungstênio. Mesmo o termopar tipo N, que apresenta uma boa estabilidade, tem uma deriva de 2 °C após 1000 horas a 1200°C. Deste modo, em aplicações a temperaturas elevadas, e em medidas contínuas, é conveniente escolher criteriosamente o termopar no que respeita também à estabilidade a longo prazo.

Quando os termopares são sujeitos a radiações nucleares, convirá ver qual o seu comportamento, em particular, em particular no que respeita à estabilidade. Assim, por exemplo, o Cobre sofre uma transmutação quando sujeito a um bombardeamento de neutrões, pelo que não deverá ser utilizado nesta aplicação.

### *Precisão*

A precisão dos termopares varia entre +/- 0.25% e +/- 2% do valor medido.

Tipo	Gama de Temperatura (°C)	Gama de Temperatura (°F)	Limites do Erro	
			Standart	Especial
T	0 a 350	32 a 662	± 1.0 °C ou 0.75%	± 0.5 °C ou 4%
J	0 a 750	32 a 1382	± 2.2 °C ou 0.75%	± 1.1 °C ou 4%
E	0 a 900	32 a 1652	± 1.7 °C ou 0.5 %	± 1.0 °C ou 4%
K	0 a 1250	32 a 2282	± 2.2 °C ou 0.75%	± 1.1 °C ou 4%
R, S	0 a 1450	32 a 2642	± 1.5 °C ou 0.25%	± 0.6 °C ou 1%
B	800 a 1700	1472 a 3092	± 0.5%	---
T	-200 a 0	-328 a 32	± 1.0 °C ou 1.5%	---
E	-200 a 0	-328 a 32	± 1.7 °C ou 1.0%	---
K	-200 a 0	-328 a 32	± 2.2 °C ou 2.0%	---

# Gama de medida

Os termopares são usados numa vasta gama de temperaturas. Nas secções relativas aos [fabricantes](#), [construção/materiais](#) e [características estáticas](#) temos diversos exemplos e tabelas que podem elucidar sobre a gama de medida coberta pelos termopares.

# Calibração

A calibração de um termopar, como a de qualquer termómetro, é feita colocando-o a diversas temperaturas bem conhecidas e registando os valores das forças electromotrizes. Uma das formas de realizar esta calibração é colocar a junção fria numa dada temperatura conhecida e mantê-la constante (normalmente um banho de gelo e água que está a 0°C). Quanto à junção quente, aquela que se quer medir, coloca-se a uma temperatura mais elevada e mede-se esta com outro termómetro. De seguida, faz-se variar esta temperatura, registando-se o valor da f.e.m. para vários valores de temperatura com a ajuda de um voltímetro. Com estes valores experimentais pode construir-se um gráfico da f.e.m. em função da temperatura, traçando-se de seguida uma curva de calibração. Este gráfico permite encontrar os valores da temperatura para uma dada f.e.m. entretanto medida.

Para verificar os erros deste método, determinam-se as várias temperaturas medidas através dos valores da f.e.m. encontrados, comparando-se de seguida estas com as reais, ou seja, com aquelas que foram medidas através do outro termómetro.



O grau de precisão exigido para a calibração determina o tipo de equipamento a utilizar. Assim, se for exigida uma precisão elevada será necessário recorrer a padrões primários que produzem os pontos da Escala Internacional de Temperaturas, enquanto que para uma calibração de rotina num laboratório de uma indústria será suficiente a utilização de calibradores que utilizem banhos com controlo de temperaturas. Um destes exemplos foi referido anteriormente, sendo muito usado nos laboratórios.

Em qualquer tipo de calibração é importante a elaboração de um documento que certifique qual o tipo de calibração efectuada e a data em que foi feita.

# Seleccção

Para de efectuar a seleccção do tipo de termopar mais adequado a uma determinada aplicação industrial é necessário ter em conta as características de cada um, como a gama de medida, precisão, sensibilidade, linearidade, fiabilidade e a sua resposta dinâmica.

Devemos ter em consideração também outros factores, como a agressividade do meio em que vai ser instalado, a sua facilidade de instalação e manutenção, a normalização na fábrica e a sua simplicidade de utilização, de modo a ver se um determinado tipo de termopar garante todas os requisitos para ser o escolhido. É ainda muito importante na seleccção deste instrumento, como de qualquer outro, as experiências de instalações anteriores e o seu preço de aquisição, tendo este último aspecto muita importância, sendo muitas vezes determinante na escolha efectuada.



Embora alguns destes factores sejam independentes uns dos outros, existem alguns intimamente relacionados. Por exemplo, se um termopar for bem protegido do ataque de agentes corrosivos, a sua gama de medida é reduzida. Por outro lado, uma gama de medida elevada conduz a uma diminuição da linearidade. Termopares com excelentes características como a fiabilidade e a precisão têm um preço elevado.

No que diz respeito à seleccção dos materiais a utilizar na construção dos termopares, esta deve obedecer a alguns critérios dentro da gama de temperaturas desejada. Estes critérios são: uma sensibilidade elevada, linearidade e estabilidade alta e um custo baixo, entre outros.

Para se efectuar a especificação e, conseqüentemente, a seleccção dos termopares é pois preciso ponderar os vários aspectos aqui focados, estabelecendo um critério de seleccção adequado ao processo em causa.

# Custos e fabricantes

No que diz respeito aos preços dos termopares, estes variam consoante o tipo de materiais utilizados na sua construção, variando também de fabricante para fabricante. Dentro do mesmo tipo de termopar existem ainda vários modelos diferentes. Estes preços variam conforme a sua qualidade, podendo ir os mais comuns até cerca dos \$150.



Nos termopares do tipo K (Cromel – Alumel), podemos encontrar o CIE TPK – 01 que custa aproximadamente \$20, o CIE TPK – 03 que custa \$85, o CIE 305 e o CIE 307 que custam \$119 e \$149, respectivamente.

Quanto aos outros tipos de termopares mais comuns como os do tipo T, J, E, N, S, R G, entre outros, os preços não são muito diferentes, sendo o seu valor dependente das várias características que estes instrumentos podem apresentar. Normalmente situa-se cerca de \$100. Existem ainda outros tipos de termopares, como os TICK Series (Thermocouple Instrumentation Calibration Kit) que são bastante caros, chegando a custar cerca de \$7500.

Os preços obtidos para os diversos tipos de termopares a partir do catálogo da *OMEGA* foram:

## A nível industrial

Tipo	Junção Soldado	Junção Livre	Junção Exposta
J	\$19 a \$28	\$20 a \$31	\$19 a \$27
K	\$19 a \$28	\$20 a \$31	\$19 a \$28
E	\$19 a \$28	\$20 a \$31	\$19 a \$28
T	\$19 a \$28	\$20 a \$31	\$19 a \$28

## A nível laboratorial

Tipo	Junção Soldado	Junção Livre	Junção Exposta
J	\$28 a \$48	\$26 a \$68	\$24 a \$48
K	\$24 a \$48	\$26 a \$68	\$24 a \$48
E	\$24 a \$48	\$26 a \$68	\$24 a \$48
T	\$24 a \$28	\$26 a \$30	\$24 a \$28

Contudo, os custos aqui apresentados tratam-se apenas de uma estimativa aproximada, uma vez que

estes variam de acordo com o fabricante e com o modelo. Os tipos de termopares apresentados são apenas alguns dos muitos modelos existentes para cada fabricante.

# Vantagens e desvantagens

## Vantagens

- Diâmetro e comprimento do fio do termopar não influem no potencial gerado;
- A junção dos termopares dá resposta rápida. Em segundos caso não tenha bainha, ou em alguns minutos caso tenha;
- Não necessita de fonte de energia;
- Simples e de fácil montagem;
- Tamanho pequeno e pouco dispendioso;
- Existe uma vasta variedade;
- Gammas de temperatura variadas;



## Desvantagens

- Sofre corrosão especialmente quando expostos à temperatura próxima da temperatura-limite-superior;
- Não é linear;
- Baixa voltagem;
- É necessária uma temperatura de referência;
- Moderadamente instável;
- Pouco sensível;
- Susceptíveis a ruídos eléctricos;
- Variações na junção fria pode afectar a calibração.