

## Scientific Electronic Archives

Issue ID: Sci. Elec. Arch. Vol. 10 (2)

April 2017

Article link

<http://www.seasinop.com.br/revista/index.php?journal=SEA&page=article&op=view&path%5B%5D=253&path%5B%5D=pdf>

Included in DOAJ, AGRIS, Latindex, Journal TOCs, CORE, Discoursio Open Science, Science Gate, GFAR, CIARDRING, Academic Journals Database and NTHRYS Technologies, Portal de Periódicos CAPES.



## Análise das características estáticas e dinâmicas dos termopares tipo J e K

### General principles of temperature measurement: study of J and K type thermocouples calibration

A. L. F. Coelho, C. C. O. Vieira, J.C. C. Campos

Universidade Federal de Viçosa

Author for correspondence: [julio.campos@ufv.br](mailto:julio.campos@ufv.br)

**Resumo:** O presente trabalho tem como objetivo determinar e analisar as curvas de calibração e histerese dos termopares tipo J e K. A partir destes estudos obteve-se as características dinâmicas dos termopares em estudo. Para determinar as curvas de calibração e histerese submeteu-se os termopares a diferentes temperaturas, lendo a tensão gerada em cada caso. A partir da curva tensão em função da temperatura obtida pode-se constatar que a voltagem gerada pelo termopar é linearmente proporcional a diferença de temperatura entre as junções quente e de referência. Então, obteve-se a inclinação da curva que caracteriza o coeficiente Seebeck do termopar, tendo valores iguais a  $50,4 \pm 1,1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  e  $39,2 \pm 1,0 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  para o tipo J e K, respectivamente. Obteve-se no experimento erros de histerese máximos de 3,71% para o tipo J e 3,04% para o tipo K. Analisando as curvas de histerese constatou-se que esse é um erro aleatório, uma vez que está sempre presente, por mais cuidado que se tome na experimentação. Submetendo o termopar tipo K a uma excitação em degrau obteve-se um curva temperatura lida em função do tempo. A partir dessa curva determinou-se a constante de tempo do termopar, obtendo valor igual a 27,6s. Matematicamente, a partir de um balanço de energia, determinou-se que o termopar tipo J apresenta constante de tempo com valor igual a 21,8 s, e o tipo K 27,1 s. O que induziu afirmar que o termopar tipo J responde mais rapidamente a uma variação de temperatura.

**Palavras-chave:** medição de temperatura, termopar, curva de calibração, constante de tempo, erro de histerese.

**Abstract:** This study aims to determine and analyze the calibration and hysteresis curves of K and J type thermocouples. From these studies were obtained the dynamic characteristics of the analyzed thermocouples. To determine the calibration and hysteresis curves the thermocouples were submitted to different temperatures in order to obtain the respective tension values. From the obtained voltage versus temperature curve it was possible to see that the generated voltage is linearly proportional to the difference of temperature between the hot and reference junctions. Then, the curve's slope was obtained in order to determine the thermocouple's Seebeck coefficient. The obtained values were  $50.4 \pm 1.1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  and  $39.2 \pm 1.0 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  for K and J type, respectively. Maximum hysteresis error of 3.71 % for J type and 3.04% for K type were obtained. Analyzing the hysteresis curves it was possible to conclude that this was a random error, since it is always present despite the experimenter's level of caution. Submitting the K type thermocouple to a step temperature excitation it was possible to obtain a temperature versus time curve. From this curve the thermocouple's time constant was determined to be 27.6 s. Mathematically, from an energy balance, it was determined that the J type thermocouple has a time constant of 21.8 s and the K type 27.1 s, that is, the J type thermocouple responds faster to temperature change.

**Keywords:** temperature measurement, thermocouple, calibration curve, time constant, hysteresis error

### Introdução

A noção inicial de temperatura de um sistema pode ser estabelecida a partir da sensação térmica que o tato proporciona, como por exemplo, frio, quente ou gelado. No entanto, para fins científicos, esse método de medição de temperatura é vago e impreciso, pois depende da pessoa e das

condições nas quais a mesma se encontrava anteriormente. Além de ser um instrumento diferencial (uma vez que só consegue distinguir entre quente e frio, em relação a sua própria temperatura), o corpo induz facilmente o observador a erro, dado que é sensível a outras grandezas, como por exemplo, a condutividade térmica (uma

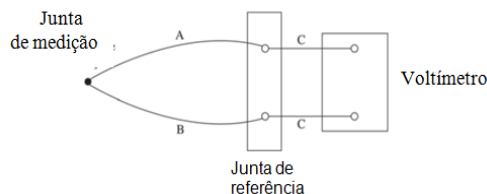
maçaneta metálica parece mais fria ao tato do que a madeira da porta, apesar de ambas estarem na mesma temperatura) (Pires et al, 2006).

Nesse sentido, verifica-se a necessidade de estabelecer um instrumento padronizado para medição de temperatura que independa do tato. O termômetro, instrumento usado para esse fim, faz uso de comparações entre a variação de propriedades das substâncias, como volume, pressão, resistência elétrica, variação de cor, para relacioná-las com a variação de temperatura. Sendo os instrumentos que produzem sinais elétricos (tensão ou corrente) os mais adequados para monitoramento automático de temperatura, uma vez que é possível a conexão desses instrumentos em sistemas de aquisição de dados (Neto e Zolnier, 2006).

Hiraka et al (2008) classifica os medidores de temperatura em duas categorias: os medidores com contato, como os termopares, e os medidores sem contato, como os termômetros de radiação. Os primeiros têm a vantagem de medições estáveis em casos de contato térmico apropriado, apesar de serem incertos na medição de temperatura de superfícies móveis e poderem deteriorar com o tempo. Já os medidores sem contato têm a grande vantagem da resposta rápida, mas no caso dos termômetros de radiação, a variação de emissividade do objeto causa incerteza na medição de temperatura.

Segundo vários autores, entre eles Ribeiro et al (2002), os termopares são largamente usados em pesquisas científicas e na indústria. Isso devido ao monitoramento automático de temperatura e, principalmente, à sua alta confiabilidade e baixo custo.

Na prática, a medição de temperatura usando termopares é feita usando circuitos abertos com duas junções, sendo uma delas, a junta de referência, mantida a uma temperatura constante (geralmente imersa em fusão de água, hélio líquido ou nitrogênio líquido). E a outra, a junta quente, colocada onde se deseja medir a temperatura, conforme indicado na Fig.(1).



**Figura 1.** Conexão do termopar ao multímetro (Moreira, 2002).

#### *Características dinâmicas dos termopares*

Quando as variáveis físicas de um sistema de medição estão em constante mudança, a medição dessas variáveis é geralmente mais difícil que no caso estático, sendo necessário definir novos métodos para garantir a exatidão da medição. A análise do modelo matemático a ser usado nesse caso é semelhante à usada para análise de vibração, análise de circuitos, no estudo de sistemas de controle automático, entre outros. Este modelo é representado por uma equação diferencial ordinária linear com coeficientes constantes, ou um conjunto dessas equações. Sendo em alguns casos, difícil a resolução analítica dessas equações. Assim, a relação entre entrada e saída de um sistema de medição pode ser descrita pela Eq. (1) (Wheeler e Ganji, 2009):

$$\frac{d^n q_o}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} q_o}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d q_o}{dt} + a_0 q_o = b_m \frac{d^m q_i}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} q_i}{dt^{m-1}} + b_1 \frac{d q_i}{dt} + b_0 q_i \quad (1)$$

Onde  $q_o$  é a quantidade de saída,  $q_i$  quantidade de entrada, a e b, combinação de parâmetros de sistemas físicos, assumidos constantes e t o tempo.

Para obter uma equação desse tipo em um sistema de medição específico, devem-se aplicar leis físicas apropriadas e fazer as considerações de simplificação próprias. Para checar a exatidão dinâmica em qualquer medição específica de quantidade de entrada que varia com o tempo, deve-se expressar essa variação de tempo como uma função matemática e inseri-la dentro do lado direito da Eq.(1). Então, resolve-se a equação diferencial para determinar a resposta do instrumento  $q_o$  como uma função do tempo conhecida. Pela superposição de um gráfico  $q_o$  em  $q_i$  podemos facilmente ver se medição é exata em todo tempo.

Quando o modelo geral da Eq.(1) permite o tratamento de sistemas de medição de qualquer complexidade, vários problemas práticos são adequadamente resolvidos pelo uso de um dos três casos especiais simples, ou a partir do da combinação desses três casos. São esses: os instrumentos de ordem zero, de primeira ordem e de segunda ordem (Doebelin, 1990). Nos estudos realizados, experimentalmente, evidenciou-se os termopares como um instrumento de primeira ordem. Motivo pelo qual discutiremos apenas essa classe de instrumentos.

#### *Instrumentos de Primeira Ordem*

Quando um sistema não pode ser tratado como sendo de ordem zero, ou seja, muitos erros dinâmicos presentes não podem ser ignorados, deve-se considerar o sistema, então, como de primeira ordem. Assim, a equação geral de um

sistema de primeira ordem, obtida a partir da Eq.(1), é mostrada na Eq. (2):

$$a_1 \frac{dq_0}{dt} + a_0 q_0 = b_0 q_i \quad (2)$$

$$\tau \frac{dq_0}{dt} + q_0 = Kq_i \quad (3)$$

Há dois valores numéricos, a sensibilidade estática  $K$  e a constante de tempo  $\tau$ , na Eq.(3) que especificam completamente um instrumento de primeira ordem. A sensibilidade estática sempre apresenta, em qualquer ordem de instrumento, o mesmo significado. Para o estado fixo após um passo de entrada, a saída sempre será  $K$  vezes a entrada. Para um instrumento de primeira ordem, a constante de tempo determina a velocidade de resposta do instrumento, quanto menor seu valor, mais rápido a resposta para qualquer classe de entrada (Wheeler e Ganji, 2009).

Resolvendo a Eq.(3) obtém-se a Eq. (4):

$$q_0 = Kq_{is} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (4)$$

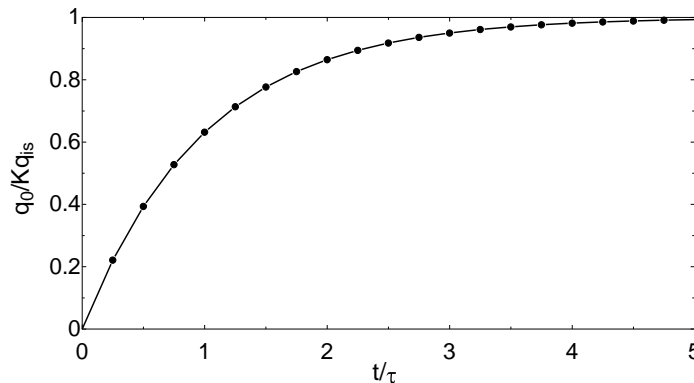


Figura 2. Taxa de resposta a um estímulo em degrau, em função do tempo.

Quando se faz uma análise física para qualquer instrumento de primeira ordem específico, obtém-se uma equação relacionado  $\tau$  com os parâmetros físicos do equipamento. Esta equação permite projetar ou usar o instrumento de forma a minimizar  $\tau$  e assim, obter a resposta em menor tempo possível (Holman, 2003).

Em termopares, a constante de tempo pode ser determinada através do balanço de energia na junta quente. Assumindo apenas transferência de calor por convecção, a junta quente sem gradiente de temperatura, com massa  $m$ , calor específico  $c$ , volume  $\forall$  e área superficial  $A$ , o balanço de energia é dado pela Eq. (5):

$$h \cdot A(T_{\infty} - T) = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} = \rho \forall c \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

Sendo  $T$  a temperatura da junta e  $T_{\infty}$  a temperatura ambiente. Resolvendo a Eq. (5), usando as hipóteses das Eq. (6) e (7) obtém-se a Eq. (8):

$$\theta = T_{\infty} - T \quad (6)$$

Simplificando, obtém-se a Eq. (3),

Plotando um gráfico do termo  $q_0/Kq_{is}$  em função de  $t/\tau$ , referente à Eq.(4), como apresentado na Fig.(2), obtém-se o comportamento da resposta de um instrumento de primeira ordem quando submetido a uma excitação em degrau. Em uma constante de tempo, a curva atinge 63,2% da resposta final. Para duas constantes de tempo, a resposta atinge a 86,5% da resposta final. Do mesmo modo, quando  $t = 3\tau$ ,  $t = 4\tau$ ,  $t = 5\tau$ , a resposta alcança 95%, 98,2% e 99,3% do valor final, respectivamente. Contudo, ela consome um comprimento de tempo infinito para alcançar o valor final por causa do comportamento assintótico. Portanto, um tempo útil para qualquer instrumento é o tempo para o sinal de saída alcançar e fixar dentro dos 5% do valor final, ou seja, três constantes de tempo (Ogata, 2003).

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

$$\int_{\theta_i}^{\theta} \frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dt} dt = \int_0^t \frac{hA}{\rho c} dT \quad (8)$$

A solução é mostrada na Eq. (9)

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho \forall c} t\right) \quad (9)$$

$$\frac{\rho \forall c_p}{h \cdot A} = \tau \quad (10)$$

A Equação (10) define a resposta dinâmica de um termopar, isto é, a constante de tempo térmica (Hiraka et al, 2008; Incropera et al, 2008).

Doebelin (2003) afirma que para minimizar a constante de tempo, precisamos minimizar o produto  $\rho \forall c_p$  e maximizar  $hA$ . Todos os parâmetros, exceto o coeficiente de transferência de calor por convecção  $h$  são fixos. Essa variável depende do tipo e da velocidade do fluido no qual o termopar está imerso. Assim, não se tem um valor fixo para a

constante de tempo neste caso, seu valor depende de onde o termopar está sendo usado. De acordo com Jorge et al (2003), o fato de que como  $\tau$  é inversamente proporcional a  $h$ , o aumento de  $h$  acarreta a diminuição do valor de  $\tau$ . Em regime transiente, a inércia térmica é considerada um agente complicador que pode levar as medições a condições não reais.

A inércia térmica é um fenômeno presente em qualquer termopar, que pode ser caracterizada pela constante de tempo, sendo que quanto maior a constante de tempo, maior a inércia térmica (Jorge et al, 2003).

Martínez e Azuaga (1997) afirmam que a constante de tempo tem grande importância devido ao fato de parte dos erros de medição que surgem

durante a calibração ser devido aos diferentes tempos de resposta dos instrumentos usados.

Fazendo uma análise da função transferência em instrumentos de primeira ordem, sendo definido, inicialmente, o operador diferencial  $D$  como indicado Eq. (11):

$$D = \frac{d}{dt} = \text{derivada do tempo} \tag{11}$$

Assim, a Eq. (1) pode ser reescrita na forma da Eq. (12). Tratando a Eq.(12) como equação algébrica, a relação da saída com a entrada é dada pela Eq. (13):

$$(a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_1 D + a_0) q_o = (b_m D^m + b_{m-1} D^{m-1} + \dots + b_1 D + b_0) q_i \tag{12}$$

$$\frac{q_o(D)}{q_i} = \frac{b_m D^m + b_{m-1} D^{m-1} + \dots + b_1 D + b_0}{a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_1 D + a_0} = \text{operacional função transferência} \tag{13}$$

Na Eq.(13) o operador  $D$  não assume valor numérico, então a função transferência não é uma relação numérica  $q_o/q_i$ , como no caso especial de instrumentos de ordem zero. Mais propriamente, a função transferência é justamente um caminho de especificação da equação diferencial relacionando as duas quantidades. Para se lembrar do significado próprio escreve-se a função transferência como  $q_o/q_i(D)$  e não  $q_o/q_i$ .

Aplicando esses conceitos, obtém-se o operacional da função transferência para instrumentos de primeira ordem, como mostrado na Eq. (14).

$$\frac{q_o(D)}{q_i} = \frac{K}{\tau D + 1} \tag{14}$$

Verifica-se pela análise da Eq.(14), a importância do conhecimento da constante de tempo para a caracterização da função transferência.

Outra forma de determinar a constante de tempo é usando as regras de Ziegler-Nichols. Estas regras foram propostas por Ziegler e Nichols para sintonia de controles PID baseados na resposta

experimental a uma excitação em degrau, sendo essas regras úteis quando o modelo matemático do sistema é conhecido ou não.

Segundo o primeiro método da regra de Ziegler-Nichols, ao obtermos experimentalmente a resposta de um sistema a uma excitação em degrau unitário, a curva de resposta ao degrau unitário poderá ter o aspecto de uma curva em S, conforme ilustrado na Fig.3.

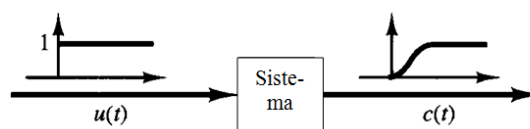


Figura 3. Resposta de um sistema a um degrau unitário (Ogata, 2003).

Se a curva de resposta ao degrau tiver a aspecto de uma curva em S, pode-se determinar a partir destas duas constantes, o atraso  $L$  e a constante de tempo  $\tau$ , como evidenciado na Fig.(4) (Ogata, 2003).

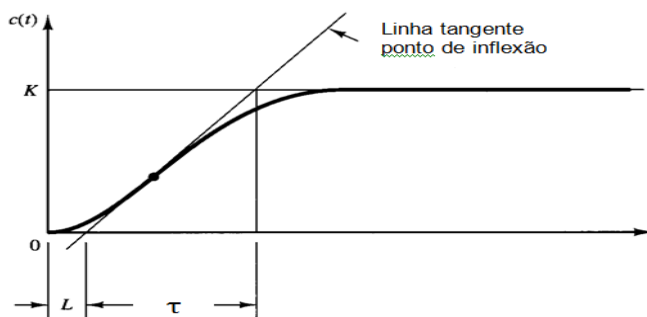
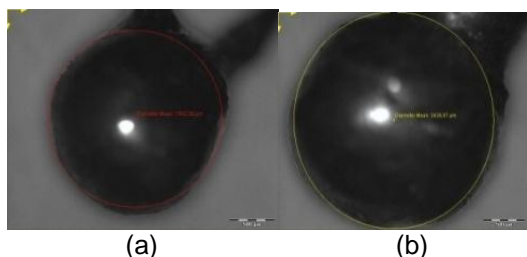


Figura 4. Curva de resposta de um sistema a uma excitação em degrau (Ogata, 2003).

### Aparato experimental

Utilizou-se para os experimentos fios termopares tipo J com bitola 28 AWG e tipo K com bitola 22 AWG, sendo as juntas quentes e de referência construídas no próprio laboratório usando solda a base de estanho (60 %Sn-40%Pb).

As juntas quentes dos termopares tipo K e J têm diâmetros, 2,429 mm e 1,952 mm, respectivamente. Esses diâmetros foram medidos utilizando um microscópio óptico conectado a um computador com o software AnalisisFIVE<sup>®</sup>, conforme evidenciado nas Fig. (5) (a) e (b).



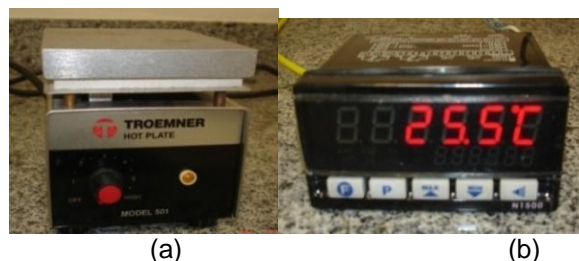
**Figura 5.** Junta quente dos termopares: (a) Tipo J, (b) Tipo K.

Para medir a tensão gerada pelo termopar, esse foi conectado a um multímetro digital modelo ET-2042C Minipa. Como os termopares não podem ser conectados diretamente ao multímetro, em cada terminal do termopar foi soldado fios de cobre, que por sua vez são conectados aos terminais do multímetro. Para a faixa de tensão em que o multímetro digital foi usado, 200 mV, a resolução do instrumento é de 0,1 mV. Sendo a impedância de entrada igual a 10M $\Omega$  e a taxa de amostragem de aproximadamente três vezes por segundo. Para

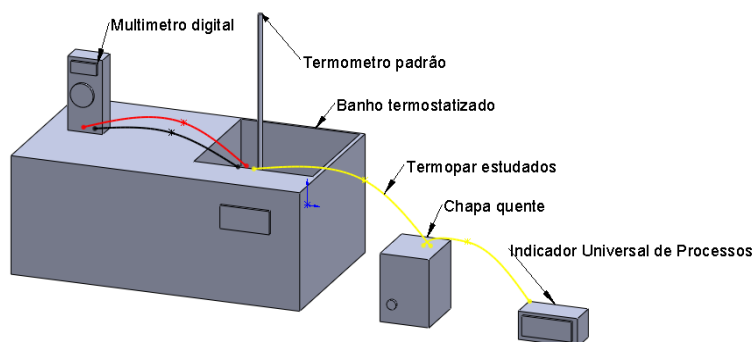
manter a temperatura da junta de referência constante utilizou-se um banho termostatzado.

Com auxílio do banho termostatzado foi possível manter a temperatura do fluido entre -10 e 100 °C, sendo essa temperatura controlada por um sensor Pt 100, com precisão de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  e uniformidade de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ , conforme fabricante. A temperatura da água no banho termostatzado foi monitorada, também, por um termômetro de mercúrio modelo 5005 Incoterm, na faixa de medição de -10 a 210°C e incerteza de 0,5°C.

Uma fonte de calor foi utilizada para medir diferentes valores de temperatura. Optou-se em usar uma chapa quente Modelo 501 Troemner, na qual é possível variar a temperatura da chapa através de uma chave seletora, conforme Fig. (6) (a). Para controlar a temperatura da chapa quente foi utilizado um indicador universal de processos modelo N1500 Novus, mostrado na Fig.(6) (b). Esse instrumento possui compensação automática da junta de referência, com erro de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  na compensação e resolução de 0,1 °C.



**Figura 6.** Instrumento de medição: (a) Chapa quente, (b) indicador universal de processo.



**Figura 7.** Representação do aparato experimental.

Para realização dos experimentos de determinação de constante de tempo usou-se um aparato experimental diferente. Conectou-se o termopar tipo K a um circuito eletrônico de compensação automática da junta fria, onde a compensação automática é feita pelo chip AD595. Sendo este circuito conectado a uma placa de aquisição de dados USB-6009. A partir desta

montagem utilizou-se o software LabView para aquisição de dados. A placa de aquisição de dados possui, para as entradas analógicas, resolução de 14 bits e exatidão absoluta de 2,21 mV para uma faixa de medição de -2 a 2 V (a 25°C).

### Procedimento experimental

Os experimentos realizados foram classificados em dois grupos: experimentos do estudo estático e experimentos do estudo dinâmico. Sendo os experimentos do primeiro grupo para determinação das curvas de calibração e curvas de histerese e os do segundo grupo para determinação experimental da constante de tempo.

#### Experimentos do Estudo Estático

Para a obtenção das curvas de calibração, variou-se a temperatura da chapa quente de 27 a 127°C, de 5 em 5°C para o Tipo K, e de 17,4 a 113,4°C de 6 em 6°C para o tipo J, em sentido ascendente (aquecimento). A escolha por submeter os termopares tipo K e J à variação de temperatura de 5 em 5 °C e de 6 em 6°C, respectivamente, tem por finalidade gerar valores de voltagem com dois algarismos significativos, uma vez que o multímetro usado apresenta resolução de 0,1 mV. Para cada temperatura da chapa quente leu-se, no multímetro, a correspondente tensão gerada pelo termopar. Os dados coletados foram plotados em gráfico tensão gerada em função da temperatura da chapa, o que possibilitou determinar os coeficientes Seebeck e as equações de calibração dos termopares em estudo.

A seguir, para determinação das curvas de histerese realizou-se experimento semelhante ao experimento descrito anteriormente. Além de variar a temperatura da chapa em sentido ascendente, variou-se a temperatura também em sentido descendente (resfriamento). Com os dados coletados no aquecimento e resfriamento da chapa gerou-se um gráfico tensão em função da

temperatura da chapa, sendo possível verificar e analisar o erro de histerese presente nos termopares tipo K e J.

#### Experimentos do Estudo Dinâmico.

Para determinar a constante de tempo do termopar tipo K, submeteu-se o termopar a uma excitação de temperatura em degrau, de 30 a 127 °C em um curto intervalo de tempo, através da chapa quente aquecida previamente. Com auxílio da placa de aquisição de dados e o software, leu-se a voltagem gerada pelo termopar a cada 0,001 s. Usando o software LabView, os valores da tensão lidos foram filtrados para eliminação de ruído e transformados em temperatura, usando a curva de calibração do termopar. A partir destes dados gerou-se um gráfico temperatura em função do tempo.

### Resultados e discussão

#### Curva de Calibração e Erro de Histerese.

Os experimentos de calibração dos termopares tipo K e J foram realizados nos dias 20 de março de 2009 e 24 de junho de 2009, respectivamente. Durante o experimento a temperatura de referência permaneceu em  $25,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$  para o tipo K e  $18 \pm 0,5^\circ\text{C}$  para o tipo J. As curvas de calibração, bem como as barras de erro (indicando o erro do multímetro) para tensão e as equações de calibração são mostradas na Fig. (8). Não é apresentada a barra de erro referente à temperatura, uma vez que esta é pequena e torna-se imperceptível no gráfico.

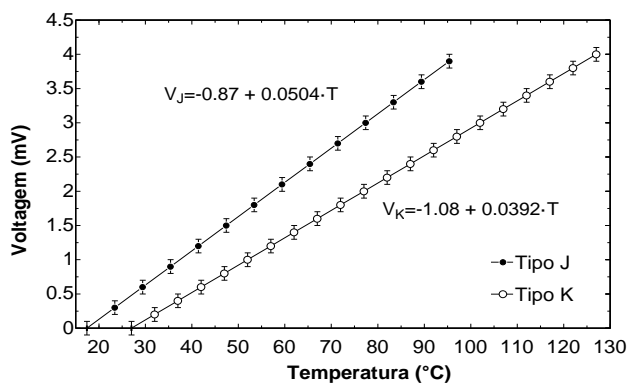


Figura 8. Voltagem gerada em função da temperatura da junta quente

Verifica-se na Fig. (8) que a voltagem Seebeck é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre as juntas quente e fria. Através dos coeficientes angulares da equação da curva de calibração nota-se que o coeficiente Seebeck é  $39,2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  para o tipo K e  $50,4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  para o tipo J, valores compatíveis com os valores citados nas literaturas.

Na figura (9) (a), verifica-se que o coeficiente Seebeck tende a se tornar constante, ou seja, torna-se independente da temperatura. A parte inicial que apresenta grande inclinação caracteriza a inércia térmica, isto é, o tempo requerido para o termopar responder a uma mudança do meio no qual está inserido.

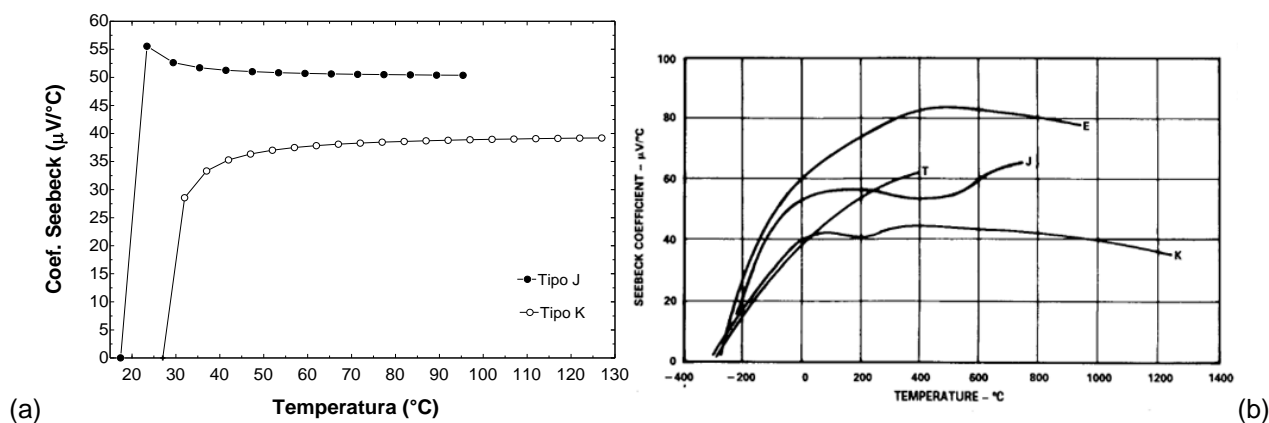


Figura 9. Coeficiente Seebeck em função da temperatura: (a) experimental, (b) teórica.

A Figura (9) (b) evidencia a curva teórica do coeficiente Seebeck em função da temperatura para todos os termopares. Comparando, qualitativamente, as curvas da Fig. (9) (a) e (b), verifica-se que para a faixa de temperatura em estudo o coeficiente Steinbeck se mantém praticamente constante, validando as curvas obtidas experimentalmente.

Os erros de histerese presentes nos termopares tipo J e K são apresentados na Fig.(10), onde esse erro é representado pela diferença entre os pontos nas curvas de resfriamento, quando comparadas com a curva de aquecimento.

Verifica-se, analisando a Fig.11 (a), que o erro de histerese absoluto máximo encontrado no tipo K é de 1,3 °C, ocorridos nos pontos com

temperatura compreendida entre 42,0 e 52,0 °C e em 67,0 °C. Verifica-se, então, que o termopar tipo K apresenta erro de histerese relativo máximo de 3,04%.

Analogamente, analisando a Fig.11 (b), verifica-se que o termopar tipo J apresenta erro de histerese absoluto máximo de 2,0°C, ocorrido nos pontos com temperatura compreendida entre 53,4 e 59,4°C e entre 71,4 e 95,4°C. Concluindo que o termopar tipo J apresenta erro de histerese relativo máximo de 3,71%. Comparando os erros de histerese presente em ambos os tipos de termopares estudados verifica-se que esse tipo de erro é mais relevante no termopar tipo J.

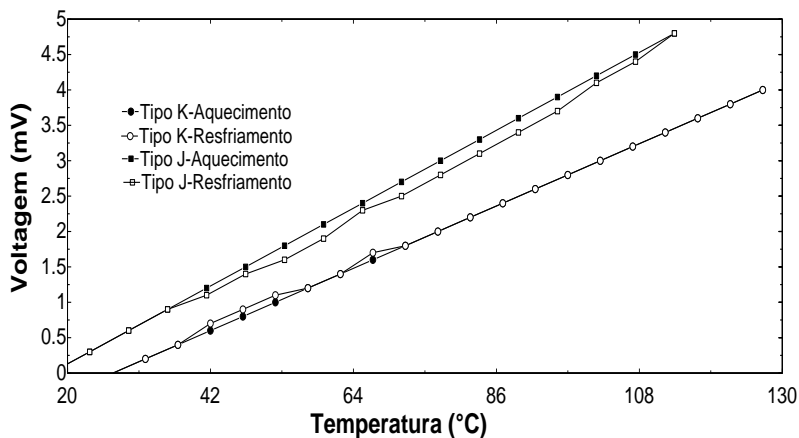


Figura 10. Curvas de histerese obtidas experimentalmente com os termopares tipo J e K.

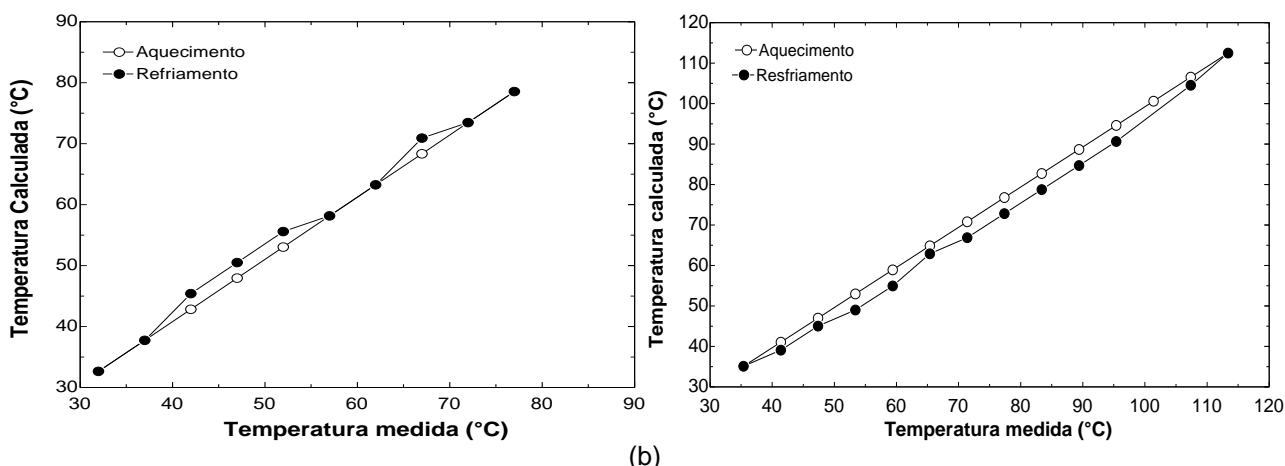


Figura 11. Curvas de histerese: (a) tipo K, (b) tipo J.

**Características Dinâmicas dos Termopares**

Considerando a junta quente do termopar como uma esfera de diâmetro  $d$ , determinou-se a constante de tempo dos termopares, usando a Eq.(10).

As propriedades físicas, massa específica  $\rho$  e calor específico  $c$ , da junta quente foram calculadas a partir da média ponderada das propriedades físicas dos metais que compõe a junta, onde os pesos dessa média ponderada são as porcentagens de composição do metal na junta. Quanto ao coeficiente de transferência de calor por convecção  $h$ , utilizou-se o valor para convecção natural de gases,  $h=25 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

O termopar tipo K tem as seguintes propriedades: massa específica a  $8923 \text{ Kg/m}^3$  e calor específico a  $187,6 \text{ J/Kg}$ . K. Admitindo a junta quente como esfera com diâmetro  $2,429\text{mm}$ , obtém-se o valor de  $27,1 \text{ s}$  para a constante de tempo do termopar tipo K.

Usando mesmo raciocínio para o termopar tipo J, onde a massa específica é  $9326 \text{ Kg/m}^3$  e calor específico a  $177,9\text{J/Kg}$ . K. Assim, para uma junta com diâmetro de  $1,952\text{mm}$ , certifica-se que o termopar tipo J apresenta constante de tempo igual a  $21,8 \text{ s}$ .

Comparando a constante de tempo dos dois termopares verificou-se que o tipo J apresenta valor inferior ao tipo K, isso significa que o termopar tipo J responde mais rapidamente a uma variação de temperatura do meio.

Como enfatizado por Debelem (2003) e Jorge et al (2003), verifica-se na Fig.(12) a relevância do coeficiente de transferência de calor por convecção em relação a constante de tempo. A constante de tempo varia inversamente proporcional ao coeficiente de transferência de calor por convecção, isto é, o tempo de resposta diminui com o aumento do valor do coeficiente de transferência de calor por convecção.

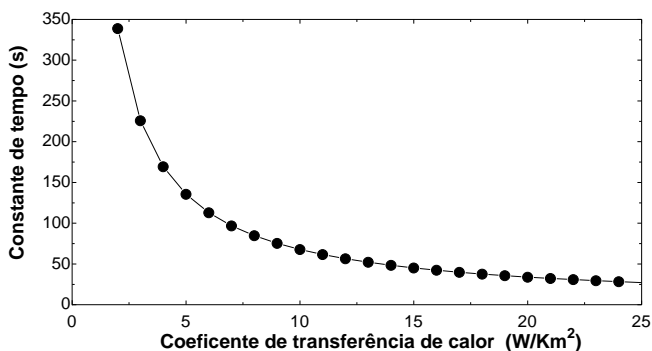


Figura 12. Influência do coeficiente de transferência de calor  $h$  na constante de tempo do termopar tipo K.

Usando a curva de reposta a uma excitação em degrau obtida experimentalmente e o primeiro método da regra de Ziegler-Nichos determinou-se a constante de tempo do termopar tipo K. Assim, através de uma análise gráfica da Fig.(13), e usando o primeiro método da regra de Ziegler-Nichos obtém-se o valor da constante de tempo  $\tau$  em torno de  $27,6 \text{ s}$ .

Uma vez que o valor da constate de tempo do termopar tipo K, obtido matematicamente, é de

$27,1 \text{ s}$ , há um erro relativo de  $1,85 \%$  entre o valor obtido matematicamente e experimentalmente.

Ainda, usando o primeiro método da regra de Ziegler-Nichos, pode ser determinado, também, o atraso  $L$  que assume valor igual há  $2,4 \text{ s}$ , indicando o tempo necessário para instrumento iniciar a resposta ao estímulo.



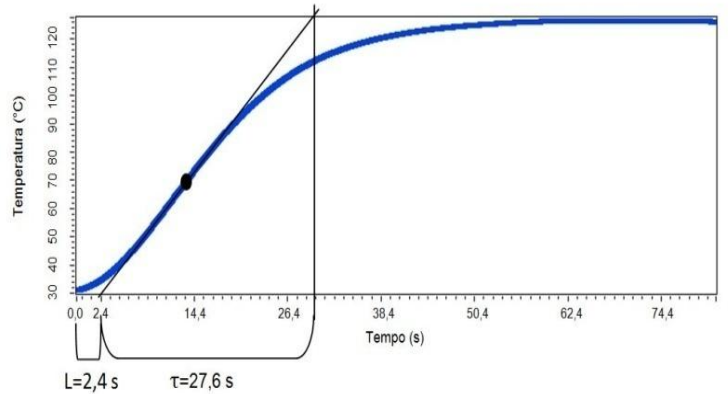


Figura 13. Curva de resposta a uma excitação em degrau, obtida experimentalmente.

Para enfatizar os termopares como instrumento de primeira ordem pode ser feita uma comparação qualitativa entre as Fig.(2) e (13). Verifica-se que a curva de resposta do termopar a uma excitação em degrau obtida experimentalmente é semelhante à curva teórica apresentada na Fig.(2), portanto, os termopares podem ser tratados como instrumentos de primeira ordem.

**Análise de Incerteza**

É plausível que cada instrumento de medição usado nos experimentos: multímetro, indicador universal, termômetro padrão e o microscópio ótico, não fornecem valores de medição exatos, isto é, há uma incerteza associada à medição. Assim, ao determinar os valores dos coeficientes Steinbeck ou a constante de tempo dos termopares haverá uma propagação de incerteza ao calcular esses valores.

Há uma expressão genérica que permite estimar essa propagação de incerteza, ou incerteza padrão combinada, para o caso geral onde apenas grandezas de entrada estaticamente independentes se relacionam através de uma expressão matemática. Seja, por exemplo, uma grandeza A calculada em função de diversas grandezas de entrada relacionadas por  $A = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ . A propagação de incerteza da variável A pode ser estimada por conforme a Eq. (15):

$$U^2(A) = \sum_i \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot U(x_i) \right)^2 \quad (15)$$

Onde U (A) é a propagação de incerteza da grandeza A e U (x<sub>i</sub>) é a incerteza de cada variável x<sub>i</sub>.

Admitindo o coeficiente Seebeck S dos termopares como uma função dos parâmetros: temperatura da junta quente, temperatura da junta fria e voltagem, ou seja,  $S = S(T_j, T_{REF}, V)$ , calculou-se a propagação de incerteza em S usando o método descrito na Eq.(15). Os cálculos foram realizados através de o software Engineering Equation Solver (EES), sendo a incerteza de cada parâmetro apresentada na Tab.(1).

Tabela 1. Valores das incertezas dos instrumentos usados na calibração

Instrumento	Variável	Unidade	Incerteza Absoluta
Indicador Universal	T <sub>j</sub>	°C	0,1
Termômetro de Mercúrio	T <sub>ref</sub>	°C	0,5
Multímetro Digital	V	mV	0,1

Obteve-se a incerteza do coeficiente Seebeck na ordem de 39,2±1,0 μV/°C para o tipo K e 50,4±1,1 μV/°C para o tipo J.

Analogamente, determinou-se, também, a propagação de incerteza na grandeza constante de tempo. Admitindo-se a constante de tempo como função do diâmetro da junta,  $\tau = \tau(d)$ , uma vez que os outros parâmetros são propriedades físicas com valores conhecidos e constantes, determinou-se a propagação de incerteza na grandeza constante de tempo usando o software Engineering Equation Solver (EES). Obteve-se, portanto, uma constante de tempo igual a 27,10±0,0001 s para tipo K e igual a 21,79±0,0001 s para o tipo J.

**Conclusão**

A partir da análise dos resultados ficou evidenciada, para as faixas de temperatura estudadas, uma linearidade entre a tensão gerada e o gradiente de temperatura das juntas quente e fria.

Analisando as curvas de calibração obtidas e as respectivas equações de calibração pode-se constatar que o termopar tipo K apresenta coeficiente Seebeck igual a 39,2±1,0 μV/°C, enquanto que do tipo J é 50,4±1,1 μV/°C. Isso significa que para uma dada temperatura entre as juntas quentes e de referência, o termopar tipo J gera uma tensão maior que o tipo K.

Com relação aos erros de histerese, nota-se que esse tipo de erro está sempre presente nos sistemas de medição. Ou seja, trata-se de um erro aleatório, e não pode ser evitado por maior cuidado que se tome na experimentação. Nos experimentos realizados verificou-se que o termopar tipo K apresenta erro de histerese de 3,71%%, enquanto

que o tipo J apresenta erro de histerese igual a 3,04%.

Nos estudos dinâmicos, verificou-se, matematicamente, que o termopar tipo K apresenta constante de tempo igual a 27,1 s enquanto que o tipo J apresenta constante de tempo igual a 21,8 s, para um coeficiente de transferência de calor por convecção natural do ar de  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Isso significa que o termopar tipo J responde mais rapidamente a uma excitação de temperatura do que o termopar tipo K.

Experimentalmente, pode-se constatar que o tipo K apresenta uma constante de tempo igual a 27,6 s. Portanto, apresentando um erro relativo de 1,85% em relação ao valor obtido matematicamente.

Outro ponto a ser enfatizado foi à determinação do tempo de atraso para o termopar. O valor de tempo de 2,4 s encontrado experimentalmente indica que o termopar só começa responder a excitação de temperatura após a esse período de tempo.

Concluindo, verifica-se que os dados obtidos experimentalmente para o estudo dinâmico concordam qualitativamente com as regras de Nichols-Ziegler. Devido ao fato da curva de resposta a uma excitação em degrau obtida experimentalmente apresentar formato de S, formato exigido para que essas regras sejam utilizadas. Portanto, os resultados experimentais estão de acordo com essa teoria.

### Agradecimentos

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica- PROBIC/FAPEMIG/UFV e ao Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica-DEP/UFV

### Referências

Doebelin, Ernest, 2003, "Measurements Systems: Application and Design", Ed. Mcgraw-Hill, 5ª Edição.

Hiraka, K. et al, 2008, "Rapid Response Hybrid Type Surface Temperature Sensor".

Holman, J.P., 2003, "Experimental Methods for Engineers", Ed. McgrawHill.

Incropera, Frank P. et al, 2008, "Fundamentos de transferência de calor e massa", 6ª edição, Ed. LTC.

Jorge, Luiz Mariode Matos et al, 2003, "Determinação e análise das constantes de tempo de um sensor anelar de temperatura em leito fixo", Acta Scientiarum Technology.

Martínez, Patricia; Azuaga, Marcelo, 1997, "Calibración de una termocupla de Chromel – Alumel", Departamento de Física, Universidade de Buenos Aires.

Moreira, Lúcia, 2002, "Medição de temperatura usando-se termopar", Cerâmica Industrial.

Neto, Antonio J. Steidle; Zolnier, Sérgio, 2006, "Avaliação de circuito eletrônico para medição de temperatura em instalações agrícolas por meio da porta paralela de um computador", Eng. Agrícola, Jaboticabal.

Ogata, K. , 2003, "Engenharia de Controle Moderno", 4ª Edição, Ed. Pearson.

Pires, Denise Prazeres Lopes et al, 2006, "A Termometria nos séculos XIX e XX", Revista Brasileira de Ensino de Física, v.28.

Ribeiro, Antonio de Assis Bento et al, 2002, "Construção de um sistema eletrônico de medição usando termopar".

Wheeler, A. J. e Ganji, A. R., 2009, "Introduction to Engineering Experimentation", 3ª edição, Ed. Pearson.