

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



**RELATÓRIO FINAL DE INSTRUMENTAÇÃO I
F-530**

**CONSTRUÇÃO DE SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE
POTÊNCIA DE LASER**



Aluno: Rubens Granguelli Antoniazi – RA: 009849

Professor Orientador: Yoshikazo Ernesto Nagai

RESUMO:

O trabalho realizado consistiu na construção de um equipamento que realizasse a medição da potência de um laser com potencia máxima de até 500mW utilizando-se principalmente das propriedades de um termopar para a realização desta medida.

INTRODUÇÃO:

Sistemas laser são empregados nos dias de hoje nas mais diversas atividades, por isso torna-se de extrema importância caracterizar esses sistemas, sendo a potência do laser uma de suas características mais importantes.

O laser tem as letras de seu nome correspondendo às iniciais de “light amplification by stimulated emission of radiation”, o que significa amplificação luminosa estimulada pela emissão de radiação. A emissão estimulada consiste basicamente num fóton interagindo com um átomo em seu estado de energia mais elevado com um espectro contínuo de radiação. O que acontece é que depois da interação com o fóton, o átomo vai para um estado de energia mais baixa e emite um fóton, de forma que no fim das contas temos dois fótons ao invés de apenas um. O fóton emitido é idêntico ao fóton estimulado, possuindo as mesmas características, como direção, energia, fase e polarização. A luz do laser é produzida então a partir do efeito de emissão estimulada em cadeia.

Apesar do conceito de emissão estimulada ser conhecido desde 1917 quando Einstein o introduziu, apenas na década de 60 é que foram obtidos resultados experimentais que permitiram o surgimento do laser.

Uma das principais características do laser é sua precisão cromática. O laser atinge uma precisão de cerca de uma parte em 10^{15} na emissão de luz monocromática, o que é extremamente útil quando se deseja fazer experimentos que requeiram a utilização de luz monocromática. O laser também é extremamente coerente quando comparado a outros tipos de fontes luminosas, por exemplo: Franjas de interferência resultantes da interferência entre dois lasers podem ser obtidas quando a distância entre as fontes é da ordem de quilômetros, enquanto no caso de uma lâmpada comum utilizada em casa, esta distância cai para cerca de 1 metro. O laser é altamente colimado, ou seja, o único desvio que o laser sofre ocorre através de difração quando ele sai pela fenda de seu emissor. Uma das mais importantes características do laser é também sua capacidade de ser focalizado. Isto permite a transferência de energia e momento através de grandes distâncias e concentradas em apenas um ponto.

Existem vários tipos de laser que são gerados por elementos diferentes, como: o laser He-Ne, ou hélio-neônio, que é um laser vermelho gerado por gás muito utilizado em laboratórios universitários, miras de armas, etc. O laser GaAs (gálio-arsênio) é o laser invisível de semicondutor utilizado na leitura de CD's e na transferência de informação por fibras ópticas. O laser CO₂ (dióxido de carbono), que se localiza na faixa do infra-vermelho e tem suas aplicações associadas a potências elevadas. O laser de argônio e o de ArF (argônio-flúor) são mais utilizados na medicina.

Alem do laser, outro elemento de grande importância no trabalho realizado são os termopares. Um termopar surge quando são unidas as extremidades de dois metais diferentes “x” e “y” (Figura 1) e submetendo as junções “a” e “b” a temperaturas diferentes

T_1 e T_2 , surge uma f.e.m. (força eletromotriz, normalmente da ordem de mV) entre os pontos a e b, denominada “tensão termoelétrica”.

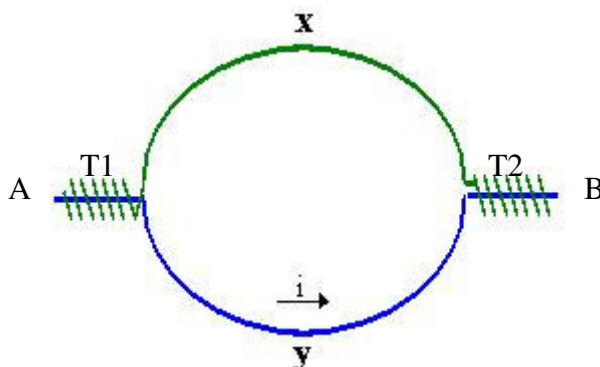


Figura 1- Dois metais diferentes, “x” e “y” com as extremidades unidas e mantidas a temperaturas diferentes

Este fenômeno é conhecido por "Efeito Seebeck". Em outras palavras, ao se conectar dois metais diferentes (ou ligas metálicas) do modo mostrado na Figura 1, tem-se um circuito tal que, se as junções “a” e “b” forem mantidas em temperaturas diferentes T_1 e T_2 , surgirá uma f.e.m. termoelétrica e uma corrente elétrica “i” circulará pelo chamado "par termoelétrico" ou "termopar". Qualquer ponto deste circuito poderá ser aberto e nele inserido o instrumento para medir a f.e.m. como mostra a figura 2.

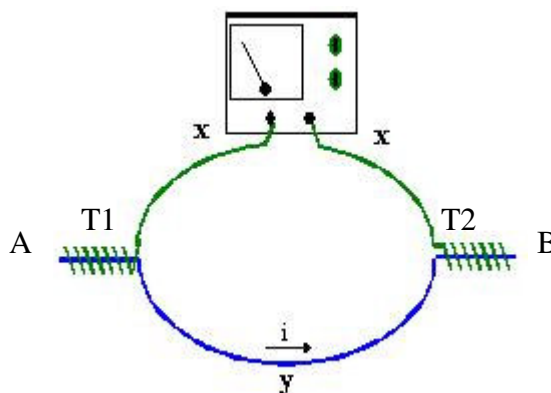


Figura 2 - Abrindo o circuito em qualquer ponto e inserindo um instrumento adequado, tem-se o valor da f.e.m.

Uma consequência imediata do efeito Seebeck é o fato de que, conhecida a temperatura de uma das junções pode-se, através da f.e.m. produzida, saber a temperatura da outra junção. As medições de temperatura são, na realidade, a maior aplicação do termopar (que também pode ser usado como conversor termoelétrico, embora apresente baixo rendimento), bastando para isso que se conheça a relação f.e.m. versus a variação de temperatura na junção do termopar. Esta relação pode ser conseguida através de uma “calibração”, ou seja, uma comparação com um padrão.

A força eletromotriz "e" de um termopar depende somente da natureza dos condutores e da diferença de temperatura entre as junções de contato. Uma outra propriedade é que a f.e.m. do termopar não será afetada se em qualquer ponto do circuito for inserido um terceiro metal, desde que suas junções sejam mantidas a mesma temperatura.

A Figura 3 mostra um termopar usado para medir a temperatura T_1 ; o instrumento indicará uma voltagem proporcional a diferença $(T_1 - T_2)$ sendo que T_2 pode ser medida com um termômetro convencional.

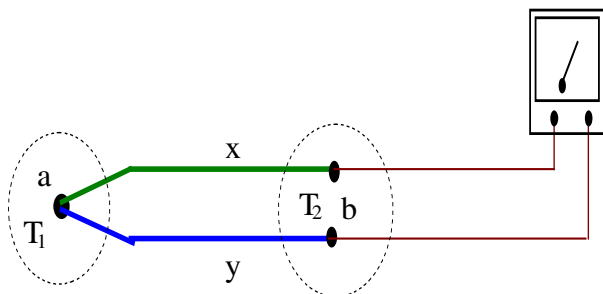


Figura 3 - Medição de temperatura com termopar.

Na Figura 4 pode-se notar que o voltímetro somente irá informar a f.e.m. (ϵ) se $R_v \gg R_r$, uma vez que a tensão V lida no voltímetro, pode ser escrita como:

$$V = \epsilon(R_v/R_v+R_r) \quad (1)$$

Assim sendo, se R_r for desprezível frente a R_v , V tenderá a ϵ . Desta forma, a escolha do instrumento adequado, requer um grande cuidado.

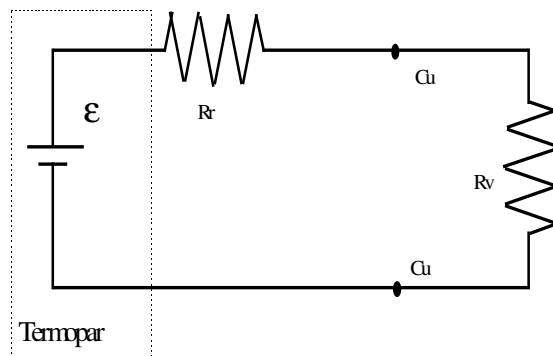


Figura 4 - Circuito equivalente, R_v é a resistência interna do voltímetro. R_r é a resistência dos fios do termopar acrescida a dos fios de cobre que levam o sinal ao instrumento.

Ao se medir a f.e.m. termoelétrica de um par termoelétrico em função da temperatura, obtém-se, em geral, uma relação do tipo mostrado na Figura 5. A curva mostrada na Figura 5 é denominada de curva de calibração do par termoelétrico.

A relação da f.e.m. termoeétrica com a temperatura, normalmente, não é linear, mas para algumas faixas de temperatura, pode ser considerada como se o fosse (veja a reta 1 da Figura 5).

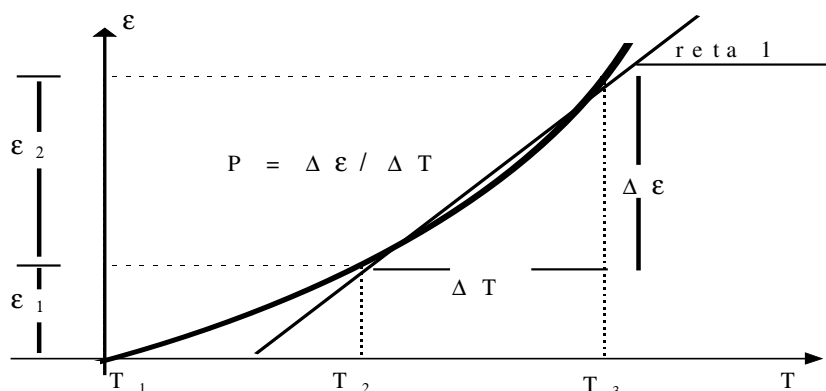


Figura 5 - Curva de calibração de um par termoeétrico.

A partir do gráfico da Figura 5 pode-se definir uma grandeza denominada de **potência termoeétrica** do termopar, dada por:

$$P = d\epsilon/dT \quad (2)$$

ou para um intervalo de temperatura

$$P = \Delta\epsilon/\Delta T \quad (3)$$

A potência termoeétrica representa a sensibilidade de resposta ($\Delta\epsilon$) do par termoeétrico com a variação de temperatura (ΔT). Assim, se existem dois termopares, o primeiro com uma potência termoeétrica de $50 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ e o segundo com $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, para uma mesma faixa de temperatura, prevalece a opção pelo primeiro, uma vez que este apresenta uma variação maior de ϵ para cada 1°C , o que torna a medição mais fácil e, eventualmente, mais precisa.

Os termopares podem ser associados em série, formando assim o que chamamos de termo-pilha (Figura 6). Quando essa associação é feita a f.e.m. lida no instrumento é $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$, ou seja, equivale a soma das f.e.m. dos diversos termopares que a constituem. A associação em série é principalmente usada nas medições de pequenas diferenças de temperaturas, ou quando se pretende usar os termopares como "conversores termoeétricos".

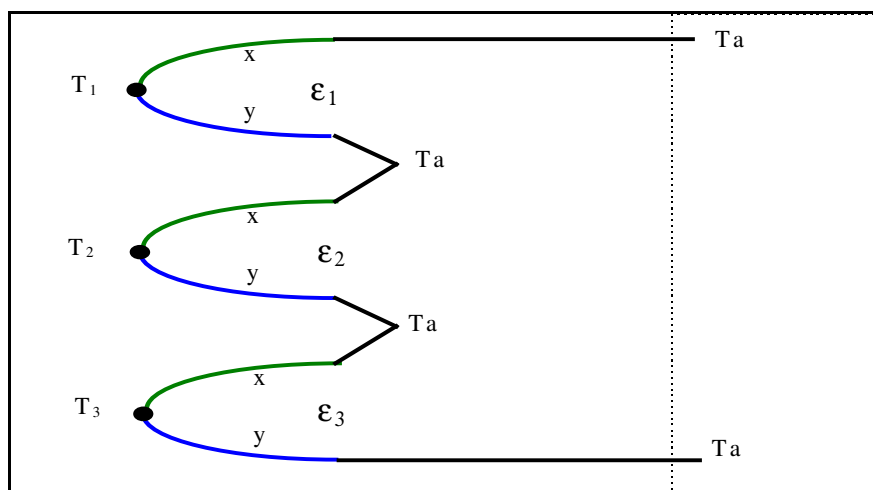


Figura 6 - Associação em série de termopares ou termo-pilha

Quando se está interessado em diferenças de temperatura e não nos valores absolutos, é usual efetuar a montagem do chamado "termopar diferencial" (Figura 7).

O nome do *termopar diferencial* é uma redundância, pois todo o termopar mede diferença de temperatura; neste caso tem-se apenas uma montagem um pouco diferente do termopar convencional.

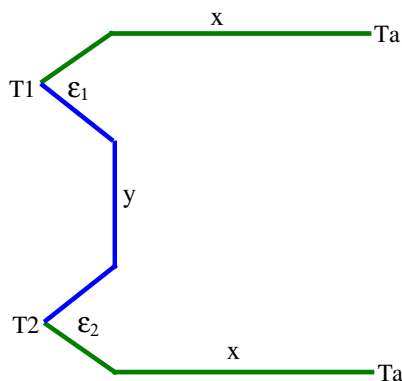


Figura 7 - Termopar diferencial

Na tabela 1 podemos verificar algumas propriedades de alguns dos tipos mais comuns de termopares, sendo estas o material do qual é formado o termopar e a faixa de temperaturas que ele pode medir com seus respectivos erros.

É importante lembrar que o erro na medida de uma certa temperatura não depende apenas do erro do termopar, mas também do erro dos outros elementos envolvidos no sistema de medição como por exemplo o instrumento de medida da tensão do termopar.

TIPO	FAIXA (°C)	TERMOPARES STANDARD
K cromel, alumel	0 a 277	2,2 °C
	277 a 1260	0,75%
R e S	-18 a 540	1,4 °C
	540 a 1540	0,25%
J ferro, constantã	0 a 277	2,2 °C
	277 a 760	0,75%
T cobre, constantã	-101 a -59	2%
	-59 a 93	0,8 °C
	93 a 371	0,75%

Tabela 1 – Material, faixa de temperatura e tolerância nos termopares

RESULTADOS ATINGIDOS:

O esquema da montagem final do experimento ficou conforme apresentado na figura 8.

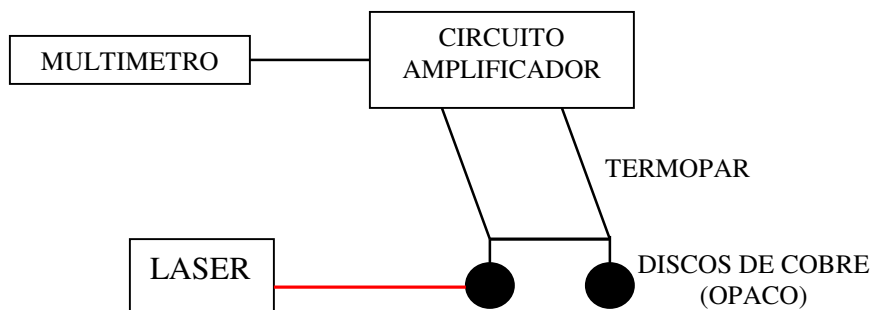


Figura 8 – Esquema da montagem final do experimento

O material onde deve ser apontado o feixe de laser cuja potencia deverá ser medida é um disco de cobre com 10mm de diâmetro e espessura de 0,15mm. A este disco está presa uma das junções de um termopar do tipo K (Alumel-Kromel), configurado na forma diferencial conforme exemplificado na figura 7. A outra junção do termopar está presa a outro disco semelhante ao primeiro, servindo assim de referencia para a medida da diferença de temperatura. A montagem final do conjunto termopar com discos de cobre e apresentada na figura 9.



Figura 9 – Termopar com discos de cobre

Este termopar terá em suas extremidades uma diferença de potencial proporcional à diferença de temperatura entre a temperatura do disco de cobre onde o laser incide e a temperatura do outro disco (ambiente). A partir desta diferença de potencial e com o auxílio de um circuito amplificador corretamente calibrado é possível mostrar em um multímetro um valor de tensão numericamente igual à potência do laser aplicado no disco de cobre.

O circuito amplificador foi construído a partir de um CI comercial de 8 pinos, sendo este o amplificador operacional 741. A figura 10 mostra o modelo esquemático de um circuito amplificador básico que pode ser montado a partir do amplificador operacional 741. Neste modelo V_0 representa a tensão do termopar e V_s a tensão que será medida no multímetro.

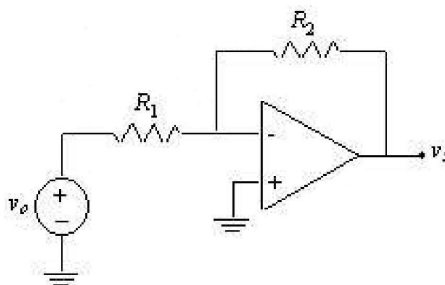


Figura 10 – Modelo esquemático de um circuito amplificador básico

A relação entre as tensões de entrada e saída é dada por:

$$\frac{v_e}{v_s} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

Portanto pode-se variar o fator de amplificação do circuito, apenas variando o valor dos resistores R_1 e R_2 .

A partir deste princípio foi elaborado o circuito apresentado esquematicamente na figura 11. O ganho deste circuito é dado pela equação 4, sendo que neste caso o valor de R_1 deve ser substituído pelo valor de $R_1 + POT$, onde R_1 tem valor de $4,7K\Omega$ e POT é um potenciômetro com valor máximo de $10K\Omega$. R_2 tem valor de $1M\Omega$.

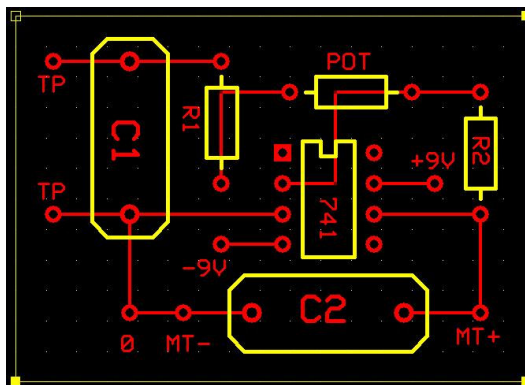


Figura 11 – Modelo esquemático do circuito amplificador montado

Os capacitores C1 e C2 servem para diminuir as pequenas oscilações existentes no sinal recebido do termopar, sendo que este sinal é inserido no circuito nas terminações indicadas por TP. O sinal que vai para o multímetro é retirado nas terminações indicadas por MT. Todo o circuito é alimentado por duas baterias de 9V, ligadas de forma que forneçam tensões de +9V e -9V.

Além dos componentes que aparecem no modelo da figura 11, também existe no circuito final um trimpot que está ligado a alimentação de -9V e aos terminais 1 e 5 do 741, sendo este utilizado para ajustar a tensão de off-set do circuito, ou em outras palavras, ele é utilizado para zerar a tensão de saída quando não existe sinal de entrada. O circuito final montado é apresentado na figura 12.

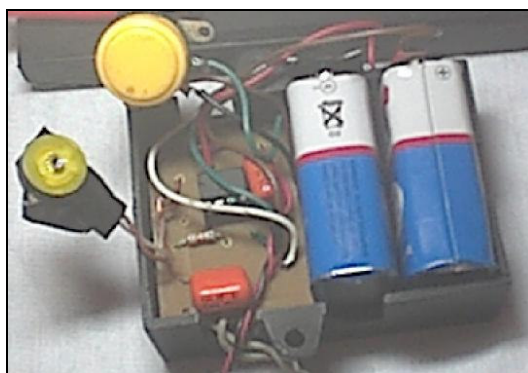


Figura 12 – Circuito amplificador montado

Para realizar a calibração do circuito amplificador foi colado a um disco de cobre de 20mm de diâmetro um fio com uma resistência de aproximadamente 15ohms (figura 13), sendo que ao serem aplicadas diferentes tensões a este fio são geradas por ele diferentes potências, que são diretamente aplicadas ao disco de cobre, fazendo com que a temperatura deste se eleve e seja medida uma diferença de potencial no termopar.

A partir deste método podemos aplicar no disco potências muito bem definidas e assim gerar com grande facilidade os dados necessários para a calibração do circuito amplificador.



Figura 13 – Disco de cobre com termopar e resistor

Para a realização de algumas medidas preliminares foi construído um circuito amplificador com ganho de 100 vezes, e com o auxílio deste foram medidas as diferenças de potencial no termopar para algumas potências aplicadas no disco, como mostrado na tabela 2.

Tensão Resistor(V)	Potência Resistor/Disco(W)	Tensão Multimetro(mV)	Tensão Termopar(mV)
0,0	0,0000	0	0,00
0,2	0,0027	1,0	0,01
0,8	0,0427	5,0	0,05
1,0	0,0667	13,0	0,13
1,1	0,0807	12,0	0,12
1,2	0,0960	14,0	0,14
1,3	0,1127	23,0	0,23
1,4	0,1307	25,0	0,25
1,5	0,1500	30,0	0,30
1,7	0,1927	40,0	0,40
1,9	0,2407	44,0	0,44
2,0	0,2667	52,0	0,52
2,2	0,3227	65,0	0,65
2,5	0,4167	87,0	0,87
2,7	0,4860	99,0	0,99
2,8	0,5227	104,0	1,04
2,9	0,5607	109,0	1,09
3,0	0,6000	120,0	1,20

Tabela 2 – Tabela de dados preliminares

A partir destes dados foi construído o gráfico da figura 14. Neste gráfico podemos observar a linearidade na relação entre a potencia aplicada no disco e a tensão medida no termopar, o que é de grande importância na calibração do circuito amplificador.

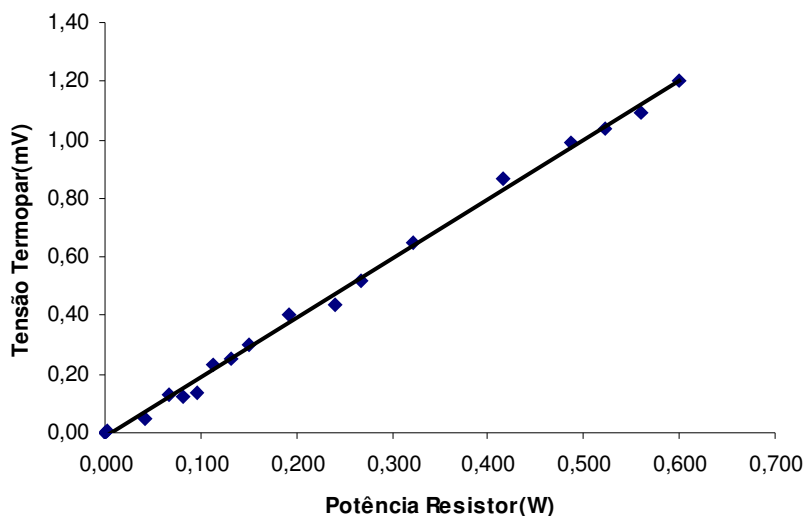


Figura 14 – Gráfico construído a partir da tabela 2

A partir da verificação da linearidade entre a potencia aplicada no disco e a tensão medida no termopar, determina-se que para calibrar o equipamento montado basta aplicar no mesmo um feixe laser de potencia conhecida e a partir deste regular o ganho do circuito, através da variação do potenciômetro, até que um valor numericamente igual a potencia em watts do laser seja apresentado no visor do multímetro acoplado ao circuito de medição. Devem ser aplicados ao equipamento outros feixes de laser de potencia conhecida, apenas para confirmar a calibração.

O formato final do equipamento montado é apresentado na figura 15.



Figura 15 – Formato final do equipamento montado

REFERÊNCIAS:

<http://www.temperatures.com/tcs.html>

Página em inglês, com grande quantidade de informações técnicas sobre termopares.

<http://www.ufrgs.br/lmm/mec017/termopar2.htm>

Página com excelente informação sobre os princípios básicos dos termopares.

<http://www.ifi.unicamp.br/~accosta/>

Página muito completa com diversas informações sobre óptica em geral.

REFERÊNCIAS DA INTERNET

- <http://www.temperatures.com/tcs.html>

Visit the new
temperature
community web
site based at:
tempsensor.net



Thermocouple Temperature Sensors

Thermocouples are among the easiest temperature sensors to use and obtain and are widely used in science and industry. They are based on the Seebeck effect that occurs in electrical conductors that experience a temperature gradient along their length. Have a read through, click on the key topics below to get more detail about the thermocouple, how it works, color codes, recommended use limits and thermocouple standards. There is a link to an excellent article on how they work and notes on using thermocouples from a well-known expert on them.

Don't forget to check our [temperature references pages](#) for the many additional publications that provide a wealth of information on the theory and application of these very popular and rugged temperature sensors.

Thanks for visiting.

[Home](#)
[Applications](#)
[Calibration](#)
[TC + RTD Tables](#)
[E-Trail](#)
[Links](#)
[Meetings](#)
[References](#)
[Selecting](#)
[Standards](#)
[Types of Sensors](#)
[Thermocouples](#)
[Thermistors](#)
[Resistance \(RTDs\)](#)
[IR Thermometers](#)
[Optical Pyrometers](#)
[Radiation](#)
[Thermometers](#)
[\(Pyrometers\)](#)
[Thermal Imagers](#)
[Fiberoptic](#)
[Semiconductor](#)
[Glass](#)
[Thermometers](#)
[Filled Systems](#)
[Phase Change](#)
[Devices](#)
[\(Paints, Crayons,](#)
[Labels\)](#)
[Bimetallic](#)
[Thermowells](#)
[Other](#)

[Sensor Vendors](#)
[Thermocouples](#)

[Displays &](#)
[Electronics](#)
[Meters](#)
[Transmitters](#)
[Recorders,](#)
[Controllers](#)
[Data Acquisition](#)

Thermocouples are pairs of dissimilar metal wires joined at least at one end, which generate a net thermoelectric voltage between the the open pair according to the size of the temperature difference between the ends, the relative Seebeck coefficient of the wire pair and the uniformity of the wire-pair relative Seebeck coefficient.

- [Thermocouple Types, Letter Designations, Construction](#) The [ISA](#) in the USA started the standards on Thermocouple nomenclature that includes the letter conventions used to describe certain alloy wire pairs. This is now carried on around the World and [ASTM](#) Committee E20 on Temperature provides the standard ([ASTM E 230](#)) that is now the [American National Standard](#) for the letter designation, the calibration tables, the color coding and recommended use limits of the most common types of thermocouple wire pairs.
- [Calibration Tables-Downloadable](#) **Courtesy of Pyromation in Fort Wayne, Indiana USA**
- [Calibration Tables-The NIST Manual for ITS-90 Calibration Tables](#) **From the NIST website.**
- [Recommended Use Limits and Tolerances](#)
- [Thermocouple Wire Color Codes: USA and Others](#) **Courtesy of ISE, Instrument Service & Equipment, Cleveland Ohio, USA.**
- [Standards for thermocouples](#) and [other temperature sensors.](#)
- [Calibration & Traceability](#) Includes links to vendors of calibration equipment and services.
- [How thermocouples work and notes on using them](#) **A great article by Prof. Moffat of Stanford University courtesy of Electronics Cooling Magazine.**
- [Training Courses and Other Resources](#)
- [Thermocouple Vendors](#) **A growing list of TC vendors around the world.**
- [Miscellaneous Information](#)
- [Thermocouple Applications](#)

[Subscribe today.](#)

[Home](#) [Applications](#) [Sensors Vendors](#) [Displays & Electronics](#) [Calibration](#) [E-Missivity](#) [Links](#) [References](#) [Meetings](#)

[Add A link](#) [Advertise](#)

Copyright© [Temperatures.com](#) 1996-2003. All rights reserved.

The URL for this page is: <http://www.temperatures.com/tcs.html>

- <http://www.ufrgs.br/lmm/mec017/termopar2.htm>

MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

TERMOPARES

Fundamentos Teóricos. Leis Termoelétricas. Circuitos de Termopares e Medições de f.e.m. Potência Termoelétrica. Termopares Comerciais. Fios de Compensação. Circuitos Especiais. Considerações Gerais. Experimentos diversos: (a) confecção de termopares com bainha de inox e termopares avulsos com missangas; (b) reconhecimento de termopares; (c) Resfriamento de barras metálicas; (d) Diagramas de fase.

MEDIÇÃO DE TEMPERATURA COM TERMOPARES

1 - Fundamentos Teóricos

Em 1821, o físico alemão Thomas Johann Seebeck observou que, unindo as extremidades de dois metais diferentes “x” e “y” (ver Figura 1) e submetendo as junções “a” e “b” a temperaturas diferentes T_1 e T_2 , surge uma f.e.m. (força eletromotriz, normalmente da ordem de mV) entre os pontos a e b, denominada “tensão termoelétrica”.

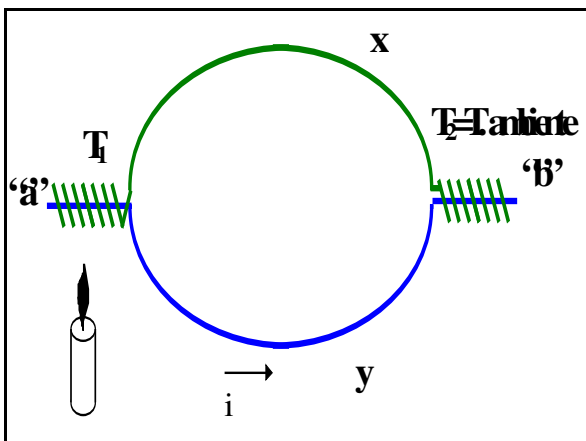


Fig. 1 - Dois metais diferentes, "x" e "y" com as extremidades unidas e mantidas a temperaturas diferentes

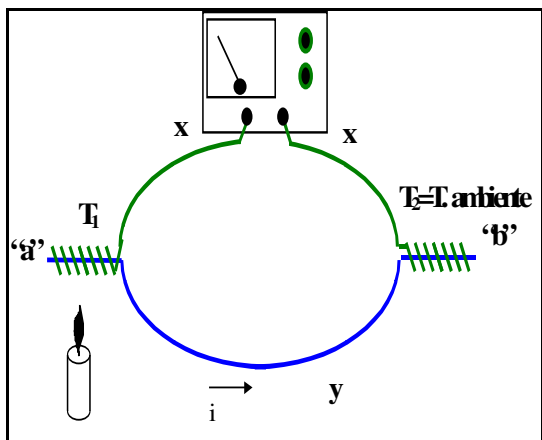


Fig. 2 - Abrindo o circuito em qualquer ponto e inserindo um instrumento adequado, tem-se o valor da f.e.m.

Este fenômeno é conhecido por "Efeito Seebeck". Em outras palavras, ao se conectar dois metais diferentes (ou ligas metálicas) do modo mostrado na Figura 1, tem-se um circuito tal que, se as junções "a" e "b" forem mantidas em temperaturas diferentes T_1 e T_2 , surgirá uma f.e.m. termoeletrica e uma corrente elétrica "i" circulará pelo chamado "par termoeletrico" ou "termopar". Qualquer ponto deste circuito poderá ser aberto e nele inserido o instrumento para medir a f.e.m. (Figura 2).

Uma conseqüência imediata do efeito Seebeck e o fato de que, conhecida a temperatura de uma das junções pode-se, através da f.e.m. produzida, saber a temperatura da outra junção. As medições de temperatura são, na realidade, a maior aplicação do termopar (que também pode ser usado como conversor termoeletrico, embora apresente baixo rendimento), bastando para isso que se conheça a relação f.e.m. versus a variação de temperatura na junção do termopar.

Esta relação pode ser conseguida através de uma “calibração”, ou seja, uma comparação com um padrão.

2 - Leis Termoelétricas

1ª Lei Termoelétrica: a força eletromotriz "e" de um termopar depende somente da natureza dos condutores e da diferença de temperatura entre as junções de contato. Algumas conseqüências importantes desta 1ª Lei:

- a) - se as junções estiverem a mesma temperatura, a f.e.m. gerada pelo termopar é nula.
- b) - a f.e.m. gerada pelo termopar independe do ponto escolhido para medir o sinal. Por isso, ao confeccionar o termopar, numa das junções não é realizada a solda, introduzindo-se ali o instrumento.
- c) - a f.e.m. do termopar não será afetada se em qualquer ponto do circuito for inserido um terceiro metal, desde que suas junções sejam mantidas a mesma temperatura. Esta propriedade é chamada, por alguns autores, de "Lei dos Metais Intermediários".

Deve-se ter um cuidado todo especial com a junta de referência (chamado por muitos autores, de junta fria), uma vez que a flutuação de sua temperatura pode acarretar erros nas aplicações práticas dos termopares. Assim sendo, procura-se manter a junta de referência em locais onde ocorrem pequenas flutuações de temperatura, usando-se, então, como referência, a própria temperatura ambiente.

2ª Lei Termoelétrica ou Lei das Temperaturas Sucessivas: estabelece a relação entre as f.e.m. obtidas pelas diferentes temperaturas de referência, conforme mostram as Figuras 3 e 4.

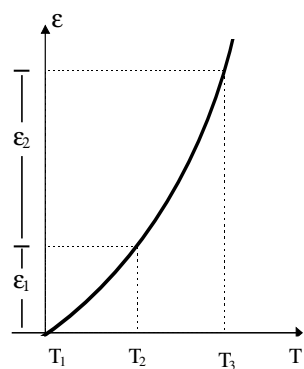


Fig. 4 - Lei das Temperaturas Sucessivas.. A relação *f.e.m.* versus temperatura não é linear.

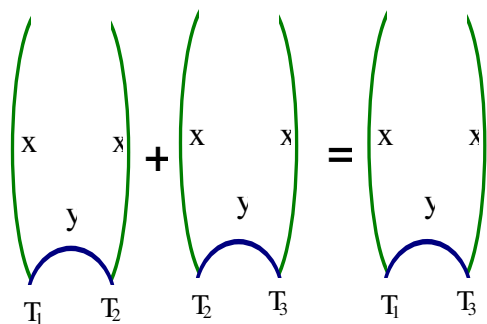


Fig 3 - Lei das Temperaturas Sucessivas

3 - Circuitos de Termopares e Medições de f.e.m.

A Figura 5 mostra um termopar usado para medir a temperatura T_1 ; o instrumento indicara uma voltagem proporcional a diferença $(T_1 - T_2)$. T_2 pode ser medida com um termômetro convencional.

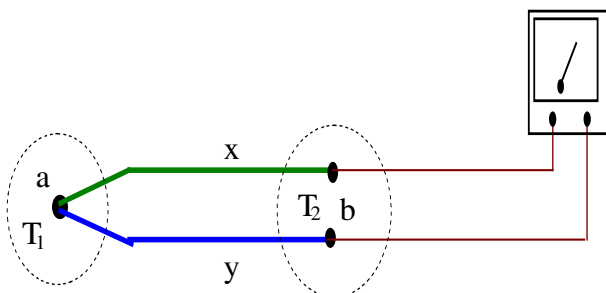


Fig. 5-a- Medição de temperatura com termopar.

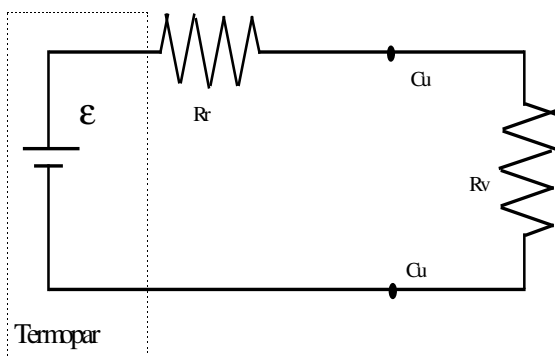


Fig. 5-b -Circuito equivalente, R_v é a resistência interna do voltímetro. R_r é a resistência dos fios do termopar acrescido dos fios de cobre que levam o sinal ao instrumento.

Na Figura 5-b pode-se notar que o voltímetro somente irá informar a f.e.m. (ϵ) se $R_V \gg R_T$, uma vez que a tensão V lida no voltímetro, pode ser escrita como:

$$V = \epsilon(R_V/R_V+R_T)$$

Assim sendo, se R_T for desprezível frente a R_V , V tenderá a ϵ . Desta forma, a escolha do instrumento adequado, requer um grande cuidado.

4 - Potência Termoelétrica

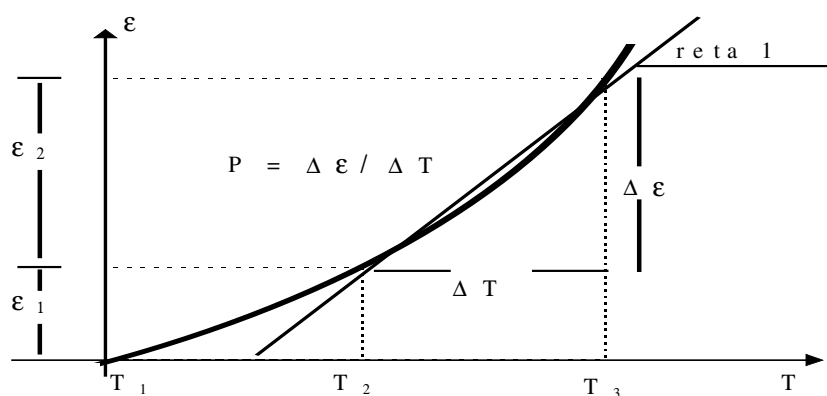


Fig. 6 - Curva de calibração de um par termoelétrico.

Ao se medir a f.e.m. termoelétrica de um par termoelétrico em função da temperatura, obtém-se, em geral, uma relação do tipo mostrado na Figura 6. A curva mostrada na Figura 6 é denominada de curva de calibração do par termoelétrico.

A relação da f.e.m. termoelétrica com a temperatura, normalmente, não é linear, mas para algumas faixas de temperatura, pode ser considerada como se o fosse (veja a reta 1 da Figura 6).

A partir do gráfico da Figura 6 pode-se definir uma grandeza denominada de **potência termoelétrica** do termopar, dada por:

$$P = d\epsilon/dT$$

ou para um intervalo de temperatura

$$P = \Delta\epsilon/\Delta T$$

A potência termoelétrica representa a sensibilidade de resposta ($\Delta\epsilon$) do par termoelétrico com a variação de temperatura (ΔT). Assim, se existem dois termopares, o primeiro com uma potência termoelétrica de 50 mV/°C e o segundo com 10 mV/°C, para uma mesma faixa de temperatura, prevalece a opção pelo primeiro, uma vez que este apresenta uma variação maior de ϵ para cada 1 °C, o que torna a medição mais fácil e, eventualmente, mais precisa.

5 - Termopares Comerciais

A princípio, um termopar pode ser confeccionado com dois metais diferentes quaisquer; entretanto, devido a uma série de fatores (contaminação, custos, repetibilidade, ponto de fusão, homogeneidade, facilidade de produção, fácil soldagem, etc.), são oferecidas poucas combinações no comércio. Dentre os termopares comerciais pode-se citar:

Termopar: Faixa de uso aconselhada	Algumas Aplicações	Vantagens	Desvantagens
J ferro, constantã -190 a 870 °C	1) têmperas 2) recozimento 3) fornos elétricos	1) baixo custo	1) devem ser usados tubos de proteção para T > 480 °C
K cromel, alumel -18 a 1370 °C	1) tratamento térmico 2) fornos 3) fundição 4) banhos	1) adequado para atmosferas oxidantes 2) boa resistência mecânica em altas	1) vulnerável a atmosferas redutoras

		temperaturas	
T cobre, constantã -190 a 370 °C	1)estufas 2)banhos 3)fornos elétricos p/ baixa temperatura	1) resiste a atmosferas corrosivas 2) resiste a atmosferas redutoras e oxidantes 3) utilizável em temperaturas negativas	2) oxidação do cobre acima de 315 °C
R - Pt - Pt 13% Rh S - Pt - Pt 10% Rh -18 a 1540 °C	1)vidros 2)fornos (T>1300 °C) 3) fundição 4) alto-forno	1) pode operar em atmosfera oxidante 2) opera numa faixa maior que o tipo K.	1) contamina facilmente em atmosfera não oxidante 2) fragiliza em altas temperaturas

6 - Fios de compensação

Na maioria dos casos, sobretudo em aplicações industriais, o instrumento de medida e o termopar necessitam estar relativamente afastados. Desta forma, os terminais do termopar poderão ser conectados a uma espécie de cabeçote, e, a partir deste cabeçote são adaptados fios de compensação (praticamente com as mesmas características dos fios do termopar, porém mais baratos) até o instrumento, conforme mostra a Figuras 7.

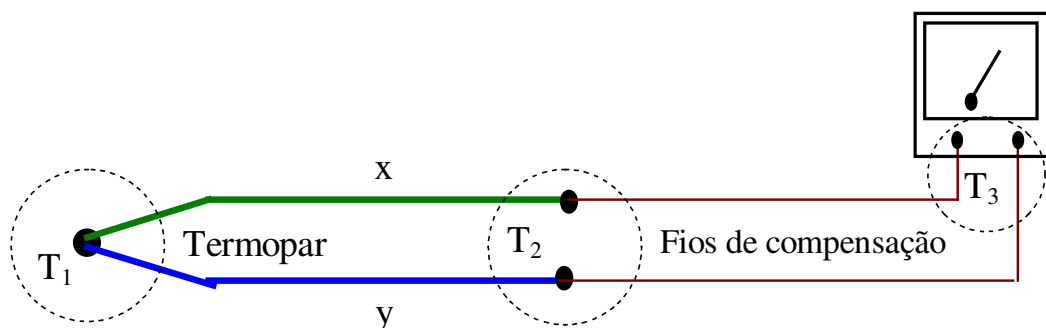


Fig. 7 - Termopar com fios de compensação

Na montagem apresentada na Figuras 7, o sinal lido no instrumento é proporcional a $(T_1 - T_3)$, já que os fios de compensação possuem as mesmas características do termopar (é como se existisse um único termopar). Note que, se os fios fossem de cobre (fios comuns) o sinal lido pelo instrumento seria proporcional a $(T_1 - T_2)$

Tendo em vista que os fios de compensação possuem praticamente as mesmas características dos fios do termopar é fundamental não trocá-los (em termos de polaridade) na hora de montar o termopar, nem trocar os fios no terminal do instrumento. Caso você tenha dúvidas a respeito da polaridade dos fios de compensação basta seguir as especificações do fabricante (normalmente obedecem um código de cores) ou então conectar uma de suas extremidades e aquecer a união, observando no instrumento a polaridade do sinal, como se fosse um termopar.

7 - Circuitos Especiais

7.1- Associação em Série

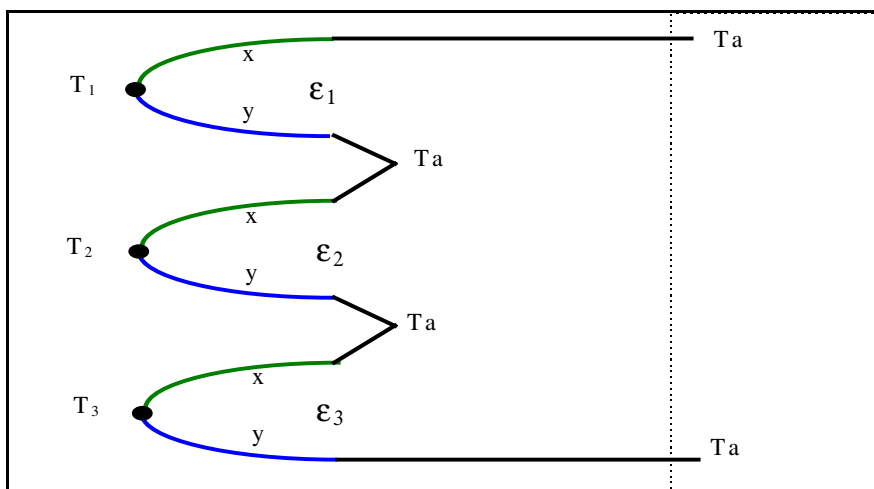


Fig. 8 - Termopilha (associações em série de termopares)

Na termopilha, ou associação em série de termopares (ver Figura 8) a f.e.m. lida no instrumento é $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$, ou seja, equivale a soma das f.e.m. dos diversos termopares que a constituem. A associação em série é principalmente usada nas medições de pequenas diferenças de temperaturas (ou quando se pretende usar os termo pares como "conversores termo-elétricos").

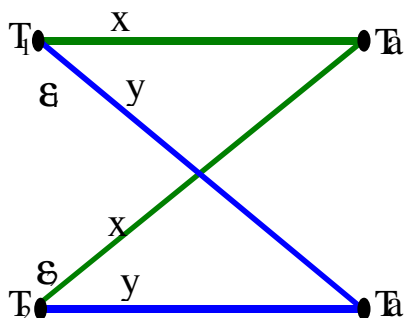


Fig 9 - Associação em paralelo de termopares

7.2 - Associação em Paralelo

Quando se deseja medir a temperatura média (associação em paralelo de fontes de tensão CC - na realidade esse é um valor aproximado, o cálculo correto é mais complexo) de um circuito usa-se a associação em paralelo de termopares, conforme mostra a Figura 9. Neste caso:

$$\varepsilon = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2$$

7.3 - Termopar Diferencial

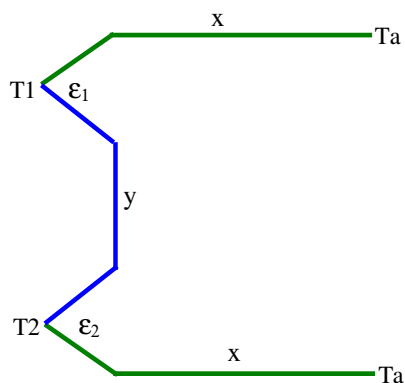


Fig. 11 - Termopar diferencial

Quando se está interessado em diferenças de temperatura e não nos valores absolutos (por exemplo, as diferenças de temperatura existentes na câmara de um forno) , é usual efetuar a montagem do chamado "termopar diferencial" (ver Figura 11).

O nome do **termopar diferencial** é uma redundância, pois todo o termopar mede diferença de temperatura; neste caso tem-se apenas uma montagem um pouco diferente do termopar convencional.