

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Em todas as instalações industriais, a medição da temperatura é de extrema importância, permite a medição de níveis de energia térmica, conhecer a eficiência dos equipamentos térmicos e assim poder corrigir as suas condições de funcionamento, bem como conhecer a eficiência de ciclos termodinâmicos. Galileu Galilei é considerado o primeiro inventor de um termômetro, em 1592. Depois dele, vários modelos foram desenvolvidos. Santorio Santorre criou o termoscópio à base de ar e equipado com uma escala para leitura, em 1612. Só em 1714, um fabricante holandês de instrumentos de precisão chamado Gabriel Fahrenheit desenvolveu os primeiros termômetros de mercúrio precisos e repetitivos. Em 1821, Thomas Seebeck descobriu o termopar, mais importante sensor industrial de temperatura.

A bordo das embarcações este controle de temperatura torna-se de vital importância para gerenciamento dos equipamentos, visto que as embarcações estão com tripulação reduzida, necessitando cada vez mais de um controle total de todos os equipamentos, centralizando-os em um único local. Dentre os controles de temperatura existentes, os termopares permitem um controle a distância, podendo centralizá-los em um único local, facilitando o gerenciamento dos equipamentos. O maior objetivo da monitoração de variáveis e controle em processos industriais é obter produtos de alta qualidade, com melhores condições de rendimento e segurança, com custos de produção compatíveis com a grande competitividade do mercado globalizado.

Eles cobrem uma faixa bastante extensa de temperatura que vai de  $-200$  a  $1000^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, com uma boa precisão e repetição aceitável, tudo isto a um custo que se comparado com outros tipos de sensores de temperatura são mais econômicos. São bem utilizados em processos que exigem respostas rápidas.

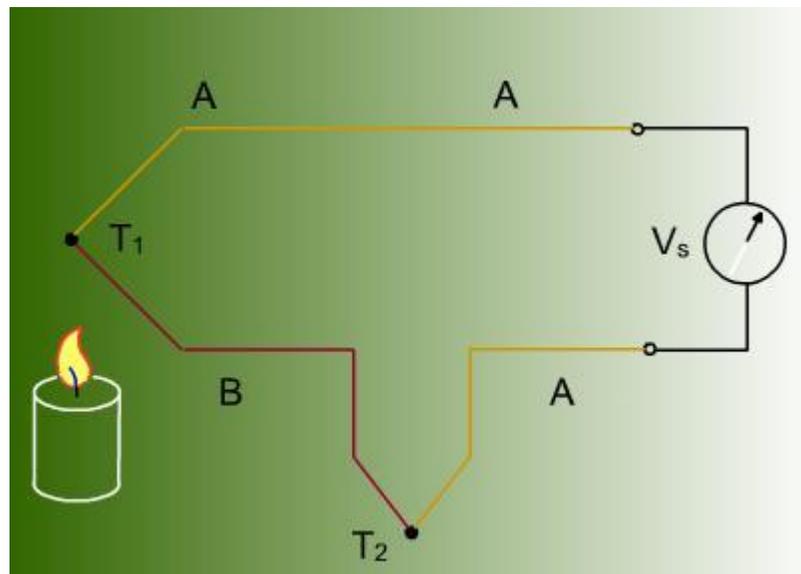
É um dos dispositivos mais simples destinados a medição de temperatura por alterações elétricas. Basicamente, consiste em um par de condutores metálicos de naturezas diferentes, ligados pelas suas extremidades, formando a junção quente ou de medição, e na outra extremidade, formando a chamada junção fria ou de referência, na qual fica conectada a um

instrumento de medição elétrica, como um milivoltímetro ou a um circuito de compensação da mesma, onde normalmente esta junta encontra-se localizada ou instalada em uma sala de controle para monitoração e controle a distância, possibilitando assim um bom nível de automação e controle através de CLP e outros sistemas de controle e supervisão das variáveis.

## CAPÍTULO 2

### 2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A medição de temperatura através de termopares parte do princípio de que dois condutores metálicos diferentes: A & B, unidos em uma das suas extremidades, e esta exposta a uma variação de temperatura, gera uma força eletromotriz (F.E.M.) que é uma função das temperaturas de suas extremidades  $T_1$  e  $T_2$  (junta de medida e junta de referência) e dos metais dos condutores X e Y. Baseado neste princípio criou-se as tabelas de correlação que relaciona a FEM, gerada em função da temperatura, supondo-se a junta de referência a  $0^\circ\text{C}$ .



Princípio de funcionamento do Termopar 1

A temperatura da junção de referência para termopares foi fixada em  $0^\circ\text{C}$  para simplificar as equações matemáticas usadas que descrevem o comportamento dos termopares. Como consequência, as tabelas de referência dos termopares pressupõem uma junção de referência em  $0^\circ\text{C}$ . Para realizar medições corretas o usuário deverá assegurar-se que essa condição está sendo atendida, seja por meios físicos (banho de gelo) ou por meios eletrônicos (compensação automática realizada pelo instrumento de leitura).

Quando dois metais são unidos em suas extremidades e estas mantidas a diferentes temperaturas, três fenômenos ocorrem simultaneamente que são:

### 2.1.1 EFEITO SEEBECK:

Um circuito fechado formado por dois fios de metais diferentes ocorre uma circulação de corrente enquanto existir uma diferença de temperatura entre suas junções, gerando uma diferença de potencial (tensão elétrica) entre suas junções e que sua intensidade é proporcional à diferença de temperatura e à natureza dos metais utilizados. Em 1887, Le Chatelier (físico Francês), utilizou pela primeira vez na prática essa descoberta ao construir um termopar a partir de fios de platina e platina-ródio a 10% para medir temperatura. Esse termopar é ainda hoje utilizado, em muitos laboratórios, como padrão de referência.

Isto ocorre devido aos elétrons de um metal tender a migrar de um condutor para o outro, gerando uma diferença de potencial elétrico num efeito semelhante a uma pilha eletroquímica.

A força eletromotriz gerada é:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT$$

Onde  $S_A$  e  $S_B$  são os coeficientes de Seebeck dos metais A e B,  $T_1$  e  $T_2$  representam a diferença de temperatura na junção dos materiais. Os coeficientes de Seebeck são não-lineares e dependem da temperatura absoluta, material, e da estrutura molecular. Se os coeficientes de Seebeck podem ser considerados efetivamente constantes numa certa gama de temperatura, a fórmula acima pode ser aproximada por:

$$E = (S_B - S_A) \cdot (T_2 - T_1)$$

Desse modo é possível gerar energia elétrica usando-se uma fonte de calor.

Outra aplicação deste mesmo efeito é a construção de pilhas atômicas (gerador termoelétrico de radioisótopos) para produzir pequenas potências.

A maior desvantagem da utilização da geração termelétrica direta é a baixa potência. Isto obriga a construção de milhares de células termelétricas para a obtenção de alguns Watts de potência.

### **2.1.2 EFEITO PELTIER:**

Em 1834, Peltier descobriu que, dado um par termoelétrico com ambas as junções à mesma temperatura, se, mediante uma fonte externa, produz-se uma corrente no termopar, as temperaturas das junções variam em uma quantidade não inteiramente linear devido ao efeito Joule<sup>1</sup>. A esse acréscimo de temperatura foi denominado efeito Peltier. O coeficiente Peltier depende da temperatura e dos metais que formam uma junção e não depende da temperatura de outra junção. O efeito Peltier não tem aplicação prática nos termopares e sim na área de refrigeração com a utilização de semicondutores especiais.

1. Lei de Joule (Efeito Joule): é uma lei física que expressa à relação entre o calor gerado e a corrente elétrica que percorre um condutor em determinado tempo. O nome é dividido a James Prescott Joule (1818-1889) que estudou o fenômeno em 1840.

A produção de um gradiente de temperatura em duas junções de dois condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando submetidos a uma tensão elétrica em um circuito fechado (conseqüentemente, percorrido por uma corrente elétrica). É também conhecido como *Força eletromotriz de Peltier* e é o reverso do efeito Seebeck em que ocorre produção de diferença de potencial devido à diferença de temperatura neste mesmo tipo de circuito. Estes dois efeitos podem ser também considerados como um só e denominado de *efeito Peltier-Seebeck* ou *efeito termelétrico*. Na verdade, são dois efeitos que podem ser considerados como diferentes manifestações do mesmo fenômeno físico. O *efeito Peltier* foi observado em 1834 por Jean Charles Athanase Peltier, 13 anos após o físico Thomas Johann Seebeck ter descoberto o efeito Seebeck em 1821.

### 2.1.3 EFEITO THOMSON:

O efeito Thomson se inspirou numa abordagem teórica de unificação dos efeitos Seebeck (1821) e Peltier (1834). O efeito Thomson foi previsto teoricamente e subsequenteemente observado experimentalmente em 1851. Ele descreve a capacidade generalizada de um metal submetido a uma corrente elétrica e um gradiente de temperatura em produzir frio ou calor.

Qualquer condutor submetido a uma corrente elétrica (com exceção de supercondutores), com uma diferença de temperatura em suas extremidades, pode emitir ou absorver calor, dependendo da diferença de temperatura e da intensidade e direção da corrente elétrica.

Se uma corrente elétrica de densidade  $J$  flui por um condutor homogêneo, o calor produzido por unidade de volume é:

$$q = \rho J^2 - \mu J \frac{dT}{dx}$$

Onde

$\rho$  é a resistividade do condutor

$dT/dx$  é o gradiente de temperatura ao longo do condutor

$\mu$  é o coeficiente de Thomson.

O primeiro termo  $\rho J^2$  é simplesmente o aquecimento da Lei de Joule, que não é reversível.

O segundo termo é o calor de Thomson, que muda de sinal quando  $J$  muda de direção.

Em metais como zinco e cobre, com o terminal "quente" conectado a um potencial elétrico maior e o terminal "frio" conectado a um potencial elétrico menor, onde a corrente

elétrica flui do terminal quente para o frio, a corrente elétrica está fluindo de um ponto alto potencial térmico para um potencial térmico menor. Nessa condição há evolução no calor. É chamado de *efeito positivo de Thomson*.

Em metais como cobalto, níquel, e ferro, com o terminal "frio" conectado a um potencial elétrico maior e o terminal "quente" conectado a um potencial elétrico menor, onde a corrente elétrica flui do terminal frio para o quente, a corrente elétrica está fluindo de um ponto baixo potencial térmico para um ponto de potencial térmico maior. Nessa condição há absorção do calor. É chamado de *efeito negativo de Thomson*.

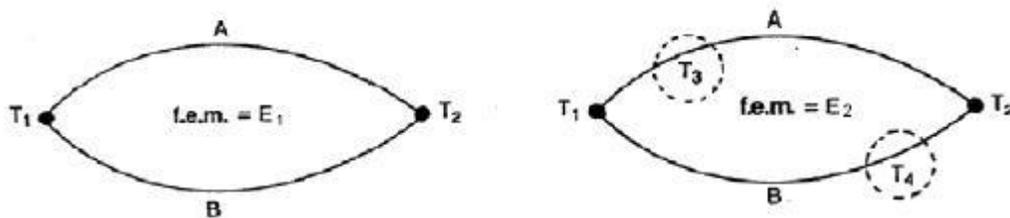
## CAPÍTULO 3

### 3.1 LEIS FUNDAMENTAS DOS CIRCUITOS TERMOELÉTRICOS

A base da teoria termoelétrica nas medições de temperatura com termopares está fundamentada em três leis que garantem a compreensão dos fenômenos que ocorrem ao se utilizar os sensores tipo termopares na obtenção de valores instantâneos de temperatura em um processo industrial específico.

#### 3.1.1 LEI DO CIRCUITO HOMOGÊNEO

A força eletromotriz (f.e.m.) termal desenvolvida em um circuito termoelétrico formado por dois metais homogêneos, mas de naturezas diferentes, depende única e exclusivamente da diferença de temperatura entre as junções e de suas composições químicas, não sendo assim interferida pelo gradiente de temperatura e nem de sua distribuição ao longo dos fios.

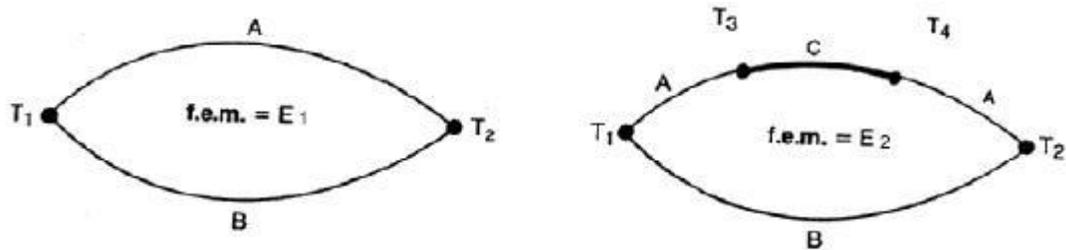


Lei do Circuito Homogêneo.

### 3.1.2 LEI DOS METAIS INTERMEDIÁRIOS

Num circuito constituído por condutores de vários metais diferentes, a força termo eletromotriz total será zero (0) se todo o circuito estiver à mesma temperatura.

Quando um circuito formado de dois fios de natureza diferente com suas junções em temperaturas diferentes, corta-se um dos fios e introduz-se em terceiro fio de outra natureza, a f.e.m. criada originalmente não é modificada, desde que as duas junções criadas pelo terceiro fio estejam à mesma temperatura.



Lei dos Metais Intermediários

Onde se conclui que:

Se:

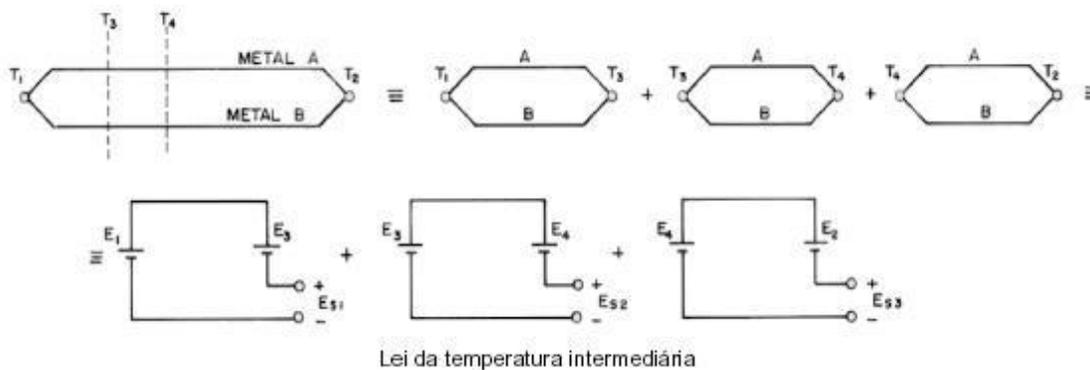
$$T_3 = T_4 \Rightarrow E_1 = E_2$$

$$T_3 \neq T_4 \Rightarrow E_1 \neq E_2$$

Um exemplo de aplicação prática desta lei é a utilização de contatos de latão ou cobre, para interligação do termopar ao cabo de extensão no cabeçote.

### 3.1.3 LEI DA DA TEMPERATURA INTERMEDIÁRIA

A f.e.m. gerada num termopar de metais homogêneos, com suas junções a temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ , é igual à soma algébrica da f.e.m. do termopar com uma junção na temperatura  $T_1$  e a outra numa temperatura qualquer  $T$  com a f.e.m. do mesmo termopar com suas junções a  $T$  e  $T_2$ . Assim, a f.e.m. gerada depende somente da diferença entre a junta fria, independente de qualquer temperatura intermediária f.e.m.



## CAPÍTULO 4

### 4.1 TIPOS DE TERMOPARES

Os termopares disponíveis no mercado têm os mais diversos formatos, desde os modelos com a junção a descoberto que têm baixo custo e proporcionam tempos de resposta rápidos, até aos modelos que estão incorporados em sondas. Está disponível uma grande variedade de sondas, adequadas para diferentes aplicações (industriais, científicas, investigação médica, etc...).

Quando se procede à escolha de um termopar deve-se ponderar qual o mais adequado para a aplicação desejada, segundo as características de cada tipo de termopar, tais como a gama de temperaturas suportada, a exatidão e a confiabilidade das leituras, entre outras. Em seguida fornecem-se os diferentes tipos de termopares:

#### 4.1.1 Tipo K (*Cromel / Alumel*)

O fio positivo *níquel - cromo* é conhecido comercialmente como Cromel e o negativo níquel - alumínio é conhecido como Alumel. O alumel é uma liga de níquel, alumínio, manganês e silício.

O termopar tipo K é um termopar de uso genérico. Tem um baixo custo e, devido à sua popularidade estão disponíveis variadas sondas. Cobrem temperaturas entre os -200 e os 1200 °C, tendo uma sensibilidade de aproximadamente 41µV/°C.



Termo elemento positivo (KP): Ni90%Cr10% (Cromel)

Termo elemento negativo (KN): Ni95%Mn2%Si1%Al2% (Alumel)

Faixa de utilização: -270 °C a 1200 °C

f.e.m. produzida: -6,458 mV a 48,838 mV

Recomendável em atmosferas oxidantes ou inertes. Ocasionalmente, podem ser usados abaixo de zero grau. Não devem ser utilizados em atmosferas sulfurosas. Seu uso no vácuo é por curto período de tempo.

#### 4.1.2 Tipo E (*Cromel / Constantan*)

Este termopar tem uma elevada sensibilidade ( $68 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) que o torna adequado para baixas temperaturas. O negativo *cobre - níquel* é conhecido como **Constantan**.



Termo elemento positivo (EP): Ni90%Cr10% (Cromel)

Termo elemento negativo (EN): Cu55%Ni45% (Constantan)

Faixa de utilização: -270 °C a 1000 °C

f.e.m. produzida: -9,835 mV a 76,373 mV

Podem ser usados em atmosferas oxidantes e inertes. Em ambientes redutores ou vácuos perdem suas características termoelétricas. Adequado para uso em temperaturas abaixo de zero grau. Apresentam baixa estabilidade em atmosfera.

### 4.1.3 Tipo J (*Ferro / Constantan*)

A sua gama limitada (-40 a 750 °C) é a responsável pela sua menor popularidade em relação ao tipo K. Aplica-se, sobretudo com equipamento já velho que não é compatível com termopares mais ‘modernos’. A utilização do tipo J acima dos 760 °C leva a uma transformação magnética abrupta que lhe estraga a calibração.



Termo elemento positivo (JP): Fe99,5%

Termo elemento negativo (JN): Cu55%Ni45% (Constantan)

Faixa de utilização: -210 °C a 760 °C

f.e.m. produzida: -8,096 mV a 42,919 mV

Podem ser usados em atmosferas oxidantes, redutoras, inertes e no vácuo. Não devem ser usados em atmosfera sulfurosa e não se recomenda o uso em temperaturas abaixo de zero grau. Apresenta baixo custo.

### 4.1.4 Tipo N (*Nicrosil / Nisil*)

Nicrosil: Níquel, cromo e silício; Nisil: Níquel e silício.

A sua elevada estabilidade e resistência à oxidação a altas temperaturas tornam o tipo N adequado para medições a temperaturas elevadas, sem recorrer aos termopares que incorporam platina na sua constituição (tipos B, R e S). Foi desenhado para ser uma “evolução” do tipo K.



Excelente resistência a oxidação até 1200°C. Curva FEM x temp. similar ao tipo K, porém possui menor potência termoelétrica.

Apresenta maior estabilidade e menor drift x tempo. Apresenta melhor desempenho na forma de termopar de isolamento mineral.

#### 4.1.5 Tipo B (*Platina / Ródio-Platina*)

Os termopares tipo B, R e S apresentam características semelhantes. São dos termopares mais estáveis, contudo, devido à sua reduzida sensibilidade (da ordem dos  $10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ), utilizam-se apenas para medir temperaturas acima dos  $300^\circ\text{C}$ . Note-se que devido à reduzida sensibilidade destes termopares, a sua resolução de medida é também reduzida. Adequado para medição de temperaturas até aos  $1800^\circ\text{C}$ .

Contra aquilo que é habitual nos outros termopares, este origina a mesma tensão na saída a  $0$  e a  $42^\circ\text{C}$ , o que impede a sua utilização abaixo dos  $50^\circ\text{C}$ . Em compensação, utiliza cabos de extensão de cobre comum desde que a sua conexão com o termopar esteja neste intervalo ( $0^\circ\text{C}$  a  $50^\circ\text{C}$ ). Os demais termopares necessitam de cabos de ligação com o mesmo material do termopar, sob o risco de formarem com o cobre um "outro termopar", se a conexão estiver a temperatura diferente do instrumento de processamento do sinal (p.ex. transmissor).



Termo elemento positivo (BP): Pt70, 4%Rh29, 6% (Ródio-Platina)

Termo elemento negativo (BN): Pt93, 9%Rh6, 1% (Ródio-Platina)

Faixa de utilização:  $0^\circ\text{C}$  a  $1820^\circ\text{C}$

f.e.m. produzida:  $0,000 \text{ mV}$  a  $13,820 \text{ mV}$

Recomendável em atmosferas oxidantes ou inertes. Não devem ser usados no vácuo, em atmosferas com vapores metálicos. Mais adequados para altas temperaturas que os tipos S/R.

#### 4.1.6 Tipo R (*Platina / Ródio-Platina*)

Adequado para medição de temperaturas até aos 1600 °C. Reduzida sensibilidade (10  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) e custo elevado.



Termo elemento positivo (RP): Pt87%Rh13% (Ródio-Platina)

Termo elemento negativo (RN): Pt100%

Faixa de utilização: -50 °C a 1768 °C

f.e.m. produzida: -0,226 mV a 21,101 mV

Recomendável em atmosferas oxidantes ou inertes. Não devem ser usados abaixo de zero grau no vácuo, em atmosferas redutoras ou atmosferas com vapores metálicos. Apresenta boa precisão em temperaturas elevadas. É vulnerável a contaminação em atmosfera.

#### 4.1.7 Tipo S (*Platina / Ródio-Platina*)

Adequado para medição de temperaturas até aos 1600 °C. Reduzida sensibilidade (10  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ), elevada estabilidade e custo elevado.



Termo elemento positivo (SP): Pt90%Rh10% (Ródio-Platina)

Termo elemento negativo (SN): Pt100%

Faixa de utilização:  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $1768\text{ }^{\circ}\text{C}$

f.e.m. produzida:  $-0,236\text{ mV}$  a  $18,693\text{ mV}$

Recomendável em atmosferas oxidantes ou inertes. Não devem ser usados abaixo de zero grau no vácuo, em atmosferas redutoras ou atmosferas com vapores metálicos. Apresenta boa precisão em temperaturas elevadas.

#### 4.1.8 Tipo T (*Cobre / Constantan*)

É dos termopares mais indicados para medições na gama dos  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Termo elemento positivo (TP): Cu100%

Termo elemento negativo (TN): Cu55%Ni45% (Constantan)

Faixa de utilização:  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$

f.e.m. produzida:  $-6,258\text{ mV}$  a  $20,872\text{ mV}$

Podem ser usados em atmosferas oxidantes, redutoras, inertes e no vácuo. Adequado para medições abaixo de zero grau. Apresenta boa precisão na sua faixa de utilização. Acima de  $310^{\circ}\text{C}$  ocorre à oxidação do cobre.

Segue abaixo a tabela dos tipos de termopares, com a faixa de temperatura usual, além das vantagens e desvantagens:

Tipo	Elemento Positivo	Elemento Negativo	Faixa de temp. usual	Vantagens	Restrições
T	Cobre	Constantan	- 184 a 370°C	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Resiste a atmosfera corrosiva.</li> <li>2) Aplicável em atmosfera redutora ou oxidante abaixo de 310°C.</li> <li>3) Sua estabilidade o torna útil em temperaturas abaixo de 0°C.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Oxidação do cobre acima de 310°C.</li> </ol>
J	Ferro	Constantan	0 a 760°C	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Baixo Custo.</li> <li>2) Indicado para serviços contínuos até 760°C em atmosfera neutra ou redutora.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Limite máximo de utilização em atmosfera oxidante de 760°C devido à rápida oxidação do ferro.</li> <li>2) Utilizar tubo de proteção acima de 480°C.</li> </ol>
E	Chromel	Constantan	0 a 870°C	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Alta potência termoeétrica.</li> <li>2) Os elementos são altamente resistentes à corrosão, permitindo o uso em atmosfera oxidante.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Baixa estabilidade em atmosfera redutora.</li> </ol>
K	Chromel	Alumel	0 a 1260°C	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Indicado para atmosfera oxidante.</li> <li>2) Para faixa de temperatura mais elevada fornece rigidez mecânica melhor do que os tipos S ou R e vida mais longa do que o tipo J.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Vulnerável em atmosferas redutoras, sulfurosas e gases como SO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, requerendo substancial proteção quando utilizado nestas condições.</li> </ol>
S	Platina 10% Rhodio	Platina	0 a 1480°C	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Indicado para atmosferas oxidantes.</li> <li>2) Apresenta boa precisão a altas temperaturas.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Vulnerável à contaminação em atmosferas que não sejam oxidante.</li> <li>2) Para altas temperaturas, utilizar isoladores e tubos de proteção de alta alumina.</li> </ol>
R	Platina 13% Rhodio	Platina			
B	Platina 30% Rhodio	Platina 6% Rhodio	870 a 1705°C	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Melhor estabilidade do que os tipos S ou R.</li> <li>2) Melhor resistência mecânica.</li> <li>3) Mais adequado para altas temperaturas do que os tipos S ou R.</li> <li>4) Não necessita de compensação de junta de referência, se a temperatura de seus terminais não exceder 50°C.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Vulnerável a contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes.</li> <li>2) Utilizar isoladores e tubos de proteção de alta alumina.</li> </ol>

## CAPÍTULO 5

### 5.1 CONVERSÃO DE TENSÃO PARA TEMPERATURA

Com relação a *F.E.M. x temperatura* de um termopar não é linear, o instrumento indicador deve de algum modo linearizar o sinal gerado pelo sensor.

No caso de alguns instrumentos analógicos (como registradores), a escala gráfica do instrumento não é linear acompanhando a curva do termopar; e em instrumentos digitais usa-se ou a tabela de correlação *F.E.M. x temperatura*, armazenada em memória ou uma equação matemática que descreve a curva do sensor. Esta equação é um polinômio, que a depender da precisão requerida pode alcançar uma ordem de até 9º grau.

A equação matemática genérica de um termopar:

$$T = a_0 + a_1.X^1 + a_2.X^2 + a_3.X^3 + \dots + a_n.X^n$$

onde: T: a temperatura  
 a: o coeficiente de cada termopar  
 X: a milivoltagem gerada  
 n: a ordem do polinômio

Listamos abaixo os coeficientes de vários tipos de termopar:

	<b>Tipo E</b>	<b>Tipo J</b>	<b>Tipo K</b>	<b>Tipo R</b>	<b>Tipo S</b>	<b>Tipo T</b>
	Níquel-Cromo(+) Versus Cobre-Níquel(-)	Ferro(+) Versus Cobre-Níquel(-)	Níquel-Cromo(+) Versus Níquel-Alumínio(-)	Platina - 13% Ródio(+) Versus Platina(-)	Platina - 10% Ródio(+) Versus Platina(-)	Cobre (+) Versus Cobre-Níquel(-)
	-100°C a 1000°C ±0,5°C 9º ordem	0°C a 760°C ±0,1°C 5º ordem	0°C a 1370°C ±0,7°C 8º ordem	0°C a 1000°C ±0,5°C 8º ordem	0°C a 1750°C ±1°C 9º ordem	-160°C a 400°C ±0,5°C 7º ordem
$a_0$	0,104967248	-0,048868252	0,226584602	0,263632917	0,927763167	0,100860910
$a_1$	17189,45282	19873,14503	24152,10900	179075,491	169526,5150	25727,94369
$a_2$	-282639,0850	-218614,5353	67233,4248	-48840341,37	-31568363,94	-767345,8295
$a_3$	12695339,5	11569199,78	2210340,682	1,90002E + 10	8990730663	78025595,81
$a_4$	-448703084,6	-264917531,4	-860963914,9	-4,82704E + 12	-1,63565E + 12	-9247486589
$a_5$	1,10866E + 10	2018441314	4,83506E + 10	7,62091E + 14	1,88027E + 14	6,97688E + 11
$a_6$	-1,76807E + 11		-1,18452E + 12	-7,20026E + 16	-1,37241E + 16	-2,66192E + 13
$a_7$	1,71842E + 12		1,38690E + 13	3,71496E + 18	6,17501E + 17	3,94078E + 14
$a_8$	-9,19278E + 12		-6,33708E + 13	-8,03104E + 19	-1,56105E + 19	
$a_9$	2,06132E + 13				1,69535E + 20	

## 5.2 MONTAGEM

### 5.2.1 CONVENCIONAL

São montados de forma simples, através de Isoladores e Blocos de Ligação Cerâmicos. Os termopares desta série requerem uma proteção adicional e são normalmente elementos de reposição utilizados nas montagens com tubo de proteção e cabeçote. Possuem boa durabilidade pela construção mais robusta, porem baixo tempo de resposta e diâmetro mínimo normalmente limitado em 15 mm.

Termopar convencional Básico.



Os termopares desta série requerem uma proteção adicional e são normalmente elementos de reposição utilizados nas montagens com tubo de proteção e cabeçote, sendo também compatíveis para uso em conjuntos de outros fabricantes.

### Termopar Convencional Cerâmico.



### Termopar Convencional Metálico.



Termopares com tubos de proteção metálica possuem um custo relativamente baixo e são utilizados em medição em meio líquido e gases, em média e alta temperatura.

## 5.2.2 ISOLAÇÃO MINERAL

Conhecido também como TIM (Termopar de Isolação Mineral) as características do mesmo o tornam ideal para uma grande variedade de aplicações no processo industrial de medição de temperatura. É constituído de uma bainha de proteção metálica em que os condutores são altamente compactados com óxido de magnésio proporcionando uma ótima isolação elétrica, ficando os condutores completamente isolados das condições ambientais.

A bainha pode ser fabricada a partir de uma grande variedade de materiais (ex. aço inox 304, 316, 310, Inconel) e diâmetros (ex. Ø1, 0/Ø1, 5/Ø3, 0/Ø4, 5/Ø6, 0).

Os termopares de isolação mineral devido às suas propriedades proporcionam grande estabilidade, longevidade, facilidade de instalação (podem ser dobrados, torcidos ou achatados), resistência mecânica, tempo de resposta rápida, diâmetros reduzidos e podem ser fabricados em grandes comprimentos. Os fios dos termopares com bitolas menores proporcionam tempo de resposta mais rápido e menor vida útil e bitolas maiores proporcionam maior vida útil, porém, tempo de resposta maior.

Termopar de Isolação Mineral.



Termopar de Isolação Mineral com Tubo de Proteção Metálica.



Termopar de Isolação Mineral com poço de Proteção.



### 5.2.3 FLEXÍVEIS

Ideais para a utilização na indústria de transformação de plástico ou em aplicações onde são necessários: facilidade de instalação, fácil remoção e rápido tempo de resposta.

São sensores de baixo custo e podem ser fornecidos com conexões tipo baioneta de fácil e rápida instalação e com a opção rosqueada sobre a mola, permite ajuste no comprimento de inserção.

Principais aplicações em máquinas de injetoras de plástico, extrusoras, Shell molding, máquinas de embalagens, etc.

São confeccionados a partir de cabos de extensão flexíveis, isolados com fibra de vidro, envolvidos por uma trança metálica ou um tubo flexível, que servem como proteção mecânica e blindagem eletrostática. Podem operar em uso contínuo de -25 a +250°C.

Termopar Flexível.



TERMOPAR FLEXIVEL SERIE TFM. Ideais para a utilização na indústria de transformação de plástico ou em aplicações onde são necessários: facilidade de instalação, fácil remoção e rápido.

Também podemos encontrar:



Conectores compensados: são ideais para a conexão entre o termopar e o fio ou cabo de extensão ou compensação, fornece uma conexão confiável, rápida e fácil instalação.



Tubos de Proteção Cerâmicos: têm a finalidade de proteger o termopar do ambiente de instalação, evitando a contaminação, corrosão ou danos mecânicos dos termo elementos e assim aumentando a vida útil do sensor.



Tubos de Proteção Metálicos.

## **CAPITULO 6**

### **6.1 APLICAÇÃO NOS NAVIOS MERCANTES**

A escolha de um termopar para uma determinada aplicação deve ser feita considerando-se todas as características e normas exigidas pelo processo como:

- Faixa de Temperatura
- Precisão
- Estabilidade
- Repetibilidade
- Condições de Trabalho
- Velocidade de Resposta
- Potência Termoelétrica
- Custo

Existem vários tipos de montagens para os termopares, que se aplicam em tipos de processos bastante específicos. Estas montagens têm como objetivo obter uma melhor eficiência em termos de tempo de resposta, precisão e vida útil.

Torna-se bastante utilizado em navios devido ao baixo custo, fácil instalação e devido às adversidades encontradas nas praças de máquinas e plataformas com ambientes com alta temperatura, algumas vezes com gases explosivos ou tóxicos, vibrações entre outros. Podem ser colocados nos motores principais e auxiliares, nos serviços de automação, apresentando boa resposta e eficiência.

## 6.2 CALIBRAÇÃO



ADT 221A

No mercado existem diversos instrumentos para efetuar a calibração dos termopares e diversos fabricantes. Este modelo é resistente e inclui funções de fonte e simulação, o ADT 221<sup>a</sup> mede temperatura e sinais elétricos, sendo dotado de interface e *menu* do tipo de *smartphone*, para operação mais simples e fácil. É um dispositivo manual, indicado para calibração. No processo de calibração, inserem-se os termopares e um termo resistor de platina (Pt100 com precisão de  $\pm 0,025^{\circ}\text{C}$ )

em um banho termostático. Para o cálculo das incertezas associadas às medições e determinação da curva de calibração são adotados os procedimentos sugeridos por Abernethy e Thompson. Inicialmente o operador fornece ao programa a faixa de temperaturas e os intervalos de calibração. A temperatura do banho termostático bem como sua variação é controlada através de uma porta serial (RS232). Durante a calibração ocorre a elevação gradual da temperatura até um máximo seguido de sua redução até o valor inicial. Este procedimento objetiva incorporar ao processo de determinação das incertezas efeitos de não linearidade e histerese relacionados à efetuação da medida. Durante esse procedimento, uma vez atingida pelo banho uma temperatura dentro de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  do valor fornecido pelo intervalo de calibração aguarda-se o estabelecimento da temperatura especificada por um período de 30 minutos ao final do qual as temperaturas do Pt100 e dos termopares são gravadas. Repete-se este procedimento cinco vezes consecutivo.

Com os resultados indicados pelo termo resistor de platina (temperatura adotada como real) e os termopares, polinômios de calibração são gerados pelo programa utilizando o método dos mínimos quadrados. O programa tem ainda como dado de entrada a ordem do polinômio desejado e o número de algarismos significativos dos seus coeficientes. O programa fornece um arquivo texto com os coeficientes da curva de ajuste. Este arquivo é utilizado posteriormente pelo programa de aquisição de dados da bancada de ensaios correspondente ao sistema calibrado. O

programa em *LabView* também fornece a incerteza das medidas de temperatura com uma confiabilidade de 95%.

Desenvolveu-se uma ferramenta que permite a calibração automática das medidas de temperatura e determinação de suas incertezas. A automatização da calibração permite sua realização sem a necessidade de supervisão do pesquisador/operador, podendo assim ser efetuada em períodos noturnos e com frequência superior. Tal fato tem como consequência imediata a possibilidade de verificação e redução dos erros de medida.

Podemos ver na tabela abaixo um gráfico da temperatura em relação à tensão gerada no termopar para avaliar sua linearidade de dois termopares e a resposta, podendo variar de acordo com o modelo:

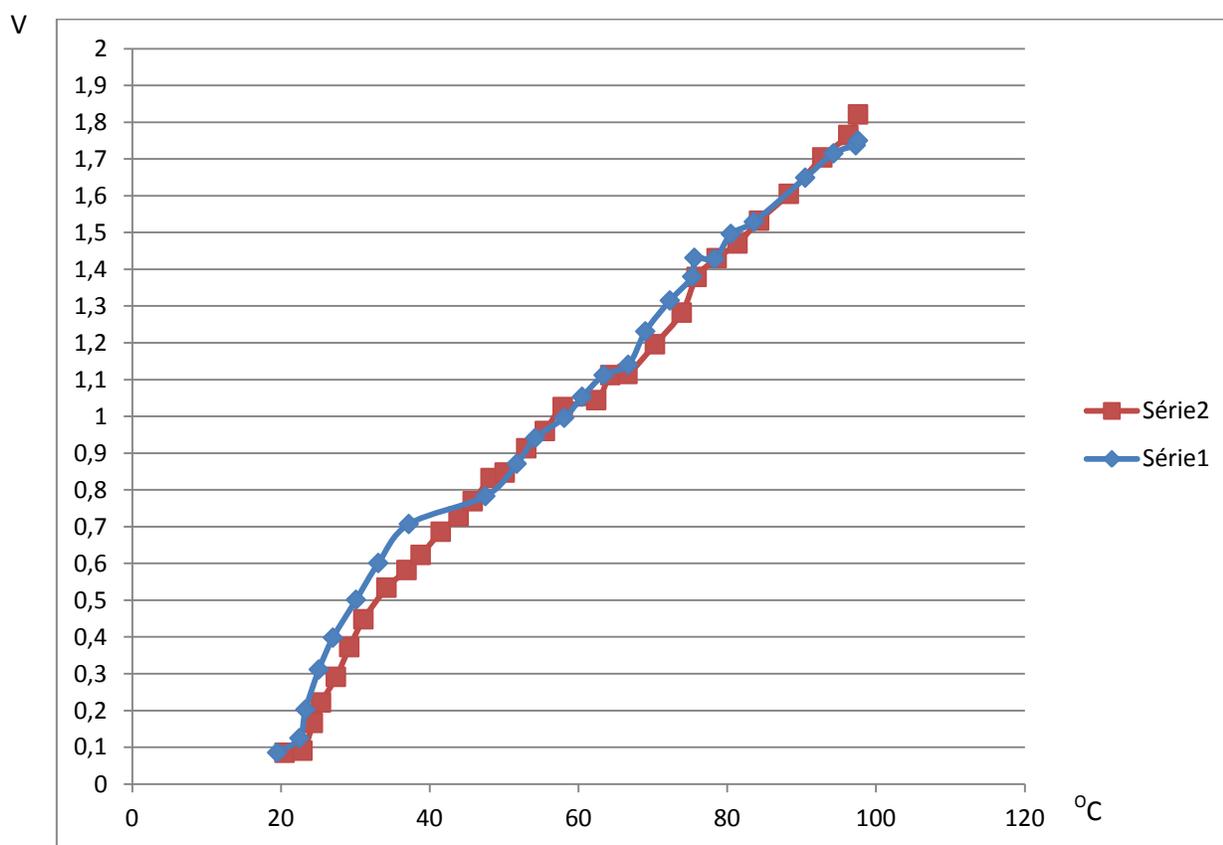


Figura 1: Mostra dois modelos de termopar em teste de laboratório.

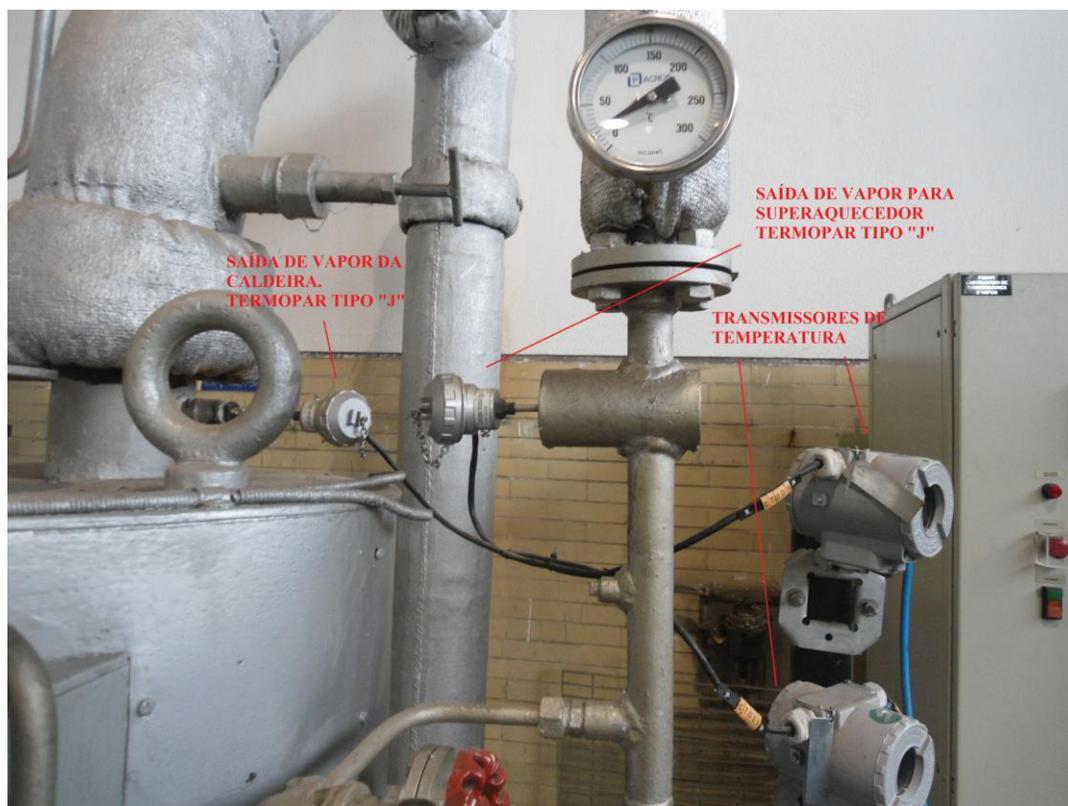
Na tabela acima se verificou uma resposta próxima da linear, ou seja, a tensão de saída do amplificador de instrumentação variando de maneira proporcional à temperatura. Apenas em alguns pontos pôde-se verificar a não linearidade. Tal fato se deve a condições não ideais de medição, já que o sensor termopar em geral apresenta alta sensibilidade. Ou seja, fatores como correntes de ar e variações de temperatura ambiente tornaram as amostras imperfeitas. Outro fator causador de imperfeições nas medidas adquiridas em laboratório é a falta de um recurso ideal de canalização do vapor gerado pela caldeira. Como dito anteriormente, o objeto gerador de calor, a caldeira, consiste num protótipo em miniatura. Tal fato tornou difícil a canalização do vapor, evidenciando, em determinados momentos, grandes variações de temperaturas medidas, já que vapor muitas vezes não se distribui uniformemente. Com o intuito de obter-se uma função de transferência para o sensor termopar, aproveitando o fato que este apresentou uma resposta quase que linear, foi ajustada uma reta baseada nas amostras retiradas dos sensores. Para tal foram utilizados 57 valores ou amostras e a técnica de regressão linear.

## 6.3 APLICAÇÃO EM CALDEIRA

### LABORATÓRIO DO CIAGA



FOTO DE TERMOPAR NO LABORATÓRIO DA CALDEIRA DO CIAGA



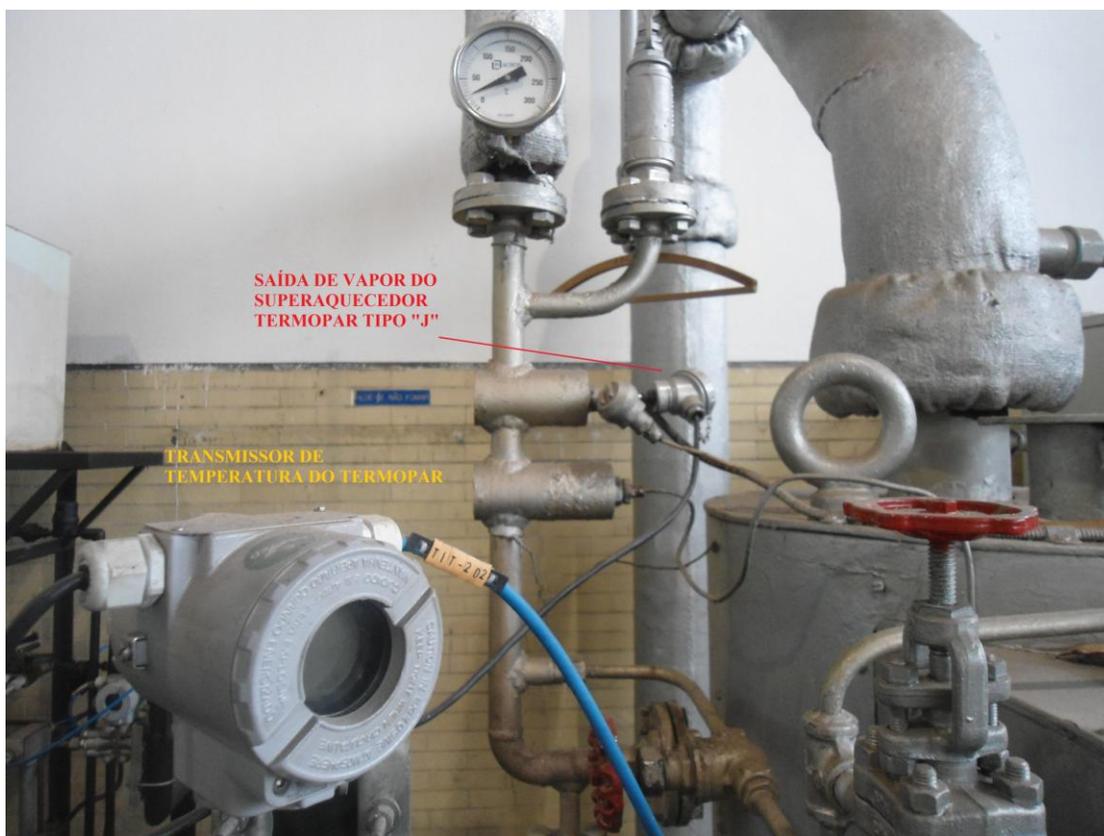


FOTO DE TERMOPAR NO LABORATÓRIO DAS CALDEIRAS DO CIAGA

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em todas as instalações industriais, a medição da temperatura é de extrema importância, permite a medição de níveis de energia térmica, conhecer a eficiência dos equipamentos térmicos e assim poder corrigir as suas condições de funcionamento, bem como conhecer a eficiência de ciclos termodinâmicos. Em 1821, Thomas Seebeck descobriu o termopar, mais importante sensor industrial de temperatura. Dentre os controles de temperatura existentes, os termopares permitem um controle a distância, podendo centralizá-los em um único local, facilitando o gerenciamento dos equipamentos. Eles cobrem uma faixa bastante extensa de temperatura que vai de  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $1000^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, com uma boa precisão e repetição aceitável, tudo isto a um custo que se comparado com outros tipos de sensores de temperatura são mais econômicos. São bem utilizados em processos que exigem respostas rápidas. É um dos dispositivos mais simples destinados a medição de temperatura por alterações elétricas.

Com o seu baixo custo e sua grande variedade com diversos materiais permite uma vasta aplicação e utilização. Nas fotos apresentadas pode-se ver os termopares ligados a transmissores de temperatura que amplificam o sinal recebido e transmite para as CLPs para a monitoração e controle da temperatura das variáveis do sistema em monitoração. Estes sensores são bastante usados atualmente com fácil montagem e substituição.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARGENTA, Fábio; Zimmermann, Rudinei; Colombo, Walter. **Termômetro com sensor termopar tipo J**. Trabalho final de instrumentação. Fundação Universidade de Caxias, Caxias do Sul, 2004.

BRUNETTO, João Roberto; BARBOSA, Luiz Ricardo Ribeiro. **Relatório técnico final sistema de controle de temperatura de caldeiras**. Disponível em:

<http://www.lami.pucpr.br/engcomp/projetos/ finais/SistemaControleTemperaturaCaldeira.pdf>.

Acesso em: out 2013.

Calibrador de Termopares. Disponível em:

<http://www.nei.com.br/produto/2012/09/calibrador+de+termopar+rtd+additel+corp.html>.

Acesso em: OUT 2013.

EFEITO Seebeck. Disponível em: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito\\_seebeck](http://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_seebeck). Acesso em: OUT 2013.

EFEITO Peltier. Disponível em: [http://pt.wikipedia.org/wiki/efeito\\_peltier](http://pt.wikipedia.org/wiki/efeito_peltier). Acesso em: OUT 2013.

QUEIROZ FILHO, Raimundo H. M.; NASCIMENTO, Francisco J.; RIBATSKI, Gherhardt. Sistema de Calibração automático de termopares. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP. Disponível em:

<https://uspdigital.usp.br/siicusp/cdOnlineTrabalhoVisualizarResumo?numeroInscricaoTrabalho=834&numeroEdicao=17>. Acesso em: OUT 2013.

TERMOPAR. Disponível em: [http://www.iope.com.br/3ia3\\_termopares.htm](http://www.iope.com.br/3ia3_termopares.htm). Acesso em: OUT 2013.

TERMOPAR. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/termopar>. Acesso em: OUT 2013.

TEMPERATURA. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/temperatura>. Acesso em: OUT 2013.