

5. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

O conceito de temperatura vem do desejo de quantificar as sensações de quente e frio. As primeiras referências a uma escala de temperatura vem do grego Galen (130 – 200 DC) que identificou oito níveis de *temperamentum* que ele usava para avaliar o *temperamento* ou estado de saúde de seus pacientes. Ele também definiu a chamada temperatura neutra que resultava da mistura em partes iguais de água fervente e gelo. Ele não dispunha de um instrumento para medir temperatura e, aparentemente, usava suas mãos para avaliar a temperatura. No final do século XVI surgiram os primeiros instrumentos para a medição de *grau de calor*, chamados de *termoscópios*. O desenvolvimento destes instrumentos, como o apresentado na Figura 4.1 abaixo, é atribuído a Galileu.

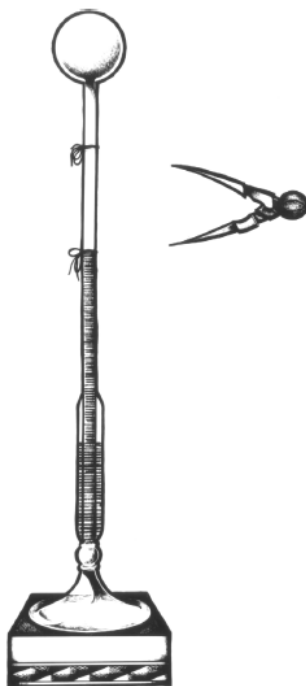


Figura 4.1 – Termômetro de ar ou *termoscópio* do século XVI. O instrumento é formado por um bulbo de vidro ligado a um longo tubo capilar imerso em água ou óleo. Com o aumento da temperatura, o ar no bulbo expande-se forçando o nível do fluido a baixar. Os pontos máximo e mínimo da escala eram marcados com uma linha amarrada e a leitura interpolada com o auxílio de um compasso.

Ferdinando II da Toscana construiu em 1641 o primeiro instrumento que veio a ser considerado como um termômetro. Era um instrumento selado, o que tornava as medidas de temperatura imunes a variações da pressão atmosférica e evitava a evaporação do fluido, geralmente o vinho. O instrumento também possuía escala gravada na coluna de vidro.

A sensação de *quente e frio* é insuficiente quando medidas quantitativas e reprodutibilidade de temperatura são requisitos importantes, como é o caso da maioria das aplicações da ciência, engenharia e do comércio. Caso desejássemos comparar a *quentura* de dois blocos de ferro, poderíamos usar as mãos. Mas este seria um método subjetivo. Uma alternativa seria colocar em contato com cada bloco uma barra metálica. A variação do comprimento da barra após o equilíbrio térmico ter sido

atingido seria uma indicação da *quentura*, pois sabemos que o comprimento da barra varia com o aquecimento ou resfriamento. Se os blocos forem colocados em contato uma observação cuidadosa da barra mostrará que o comprimento da barra não mais se altera quando a barra é colocada em contato com qualquer dos blocos. Este estado é definido como *estado de igualdade de temperatura* e a barra é um termômetro.

A generalização do processo descrito acima é conhecido como a *lei zero da Termodinâmica*, e é a base para todas as medições de temperatura:

Dois corpos em igualdade de temperatura com um terceiro estão em igualdade de temperatura entre si

Voltando à barra metálica, poderíamos ser tentados a colocar uma escala numérica ao longo do comprimento da barra, obtendo assim uma escala de temperatura reprodutível. A seleção do tipo e magnitude da escala escolhida é totalmente arbitrária. Por exemplo, sabemos que quando a barra é colocada em um banho com água e gelo fundente ou água e vapor d'água, o comprimento da barra não muda, mas é maior no ponto do vapor do que no do gelo. Podemos então arbitrar um número para o ponto do gelo e outro mais alto para o ponto do vapor (poderia ser o contrário). Podemos então construir uma escala:

- Primeiro passo: selecionamos um instrumento, por exemplo, uma barra de platina.
- Segundo passo: selecionamos dois pontos reprodutíveis e damos valores a estes pontos. Por exemplo, ponto do gelo, 0, e ponto do vapor, 100.
- Terceiro passo: escolhemos a magnitude do grau unitário e da função que relaciona o deslocamento da barra com a temperatura. Estas são também escolhas arbitrárias.

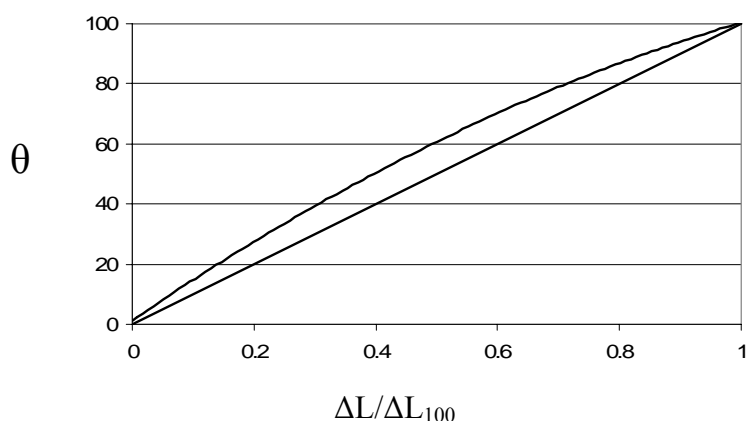


Figura 4.2 – Duas possíveis funções para relacionar deslocamentos da barra com temperatura: linear e parabólica.

Caso escolhêssemos a função linear, teríamos a escala linear do termômetro da barra de platina. Denominando os graus desta escala de θ , teríamos:

$$\frac{\Delta L}{\Delta L_{100}} = \frac{\theta}{100}$$

Uma questão importante que pode ser colocada é se a escala que acabamos de construir é uma escala fundamental, ou se mudarmos o material da barra a escala muda? A resposta é que diferentes valores para a temperatura serão obtidos para diferentes materiais da barra. Assim, por exemplo, um mesmo estado termodinâmico vai ser descrito como estando a 55° na escala da barra linear de platina e 60° na escala linear do cobre. Este era o estado da termometria até 1968 no que se referia a medidas de temperatura abaixo de 90K. Nesta faixa de temperatura não havia na época qualquer padrão aceitável mundialmente e cada país possuía sua própria escala.

4.1 – Escala Termodinâmica de Temperatura (escala absoluta):

Seria conveniente termos uma escala de temperatura que não dependesse do material escolhido. Em 1848 Lord Kelvin demonstrou a existência de uma escala independente da substância termométrica utilizada. A demonstração é baseada no ciclo reversível de Carnot e será brevemente descrita a seguir.

Considere as máquinas térmicas reversíveis abaixo operando entre três reservatórios de temperatura T_1 , T_2 e T_3 .

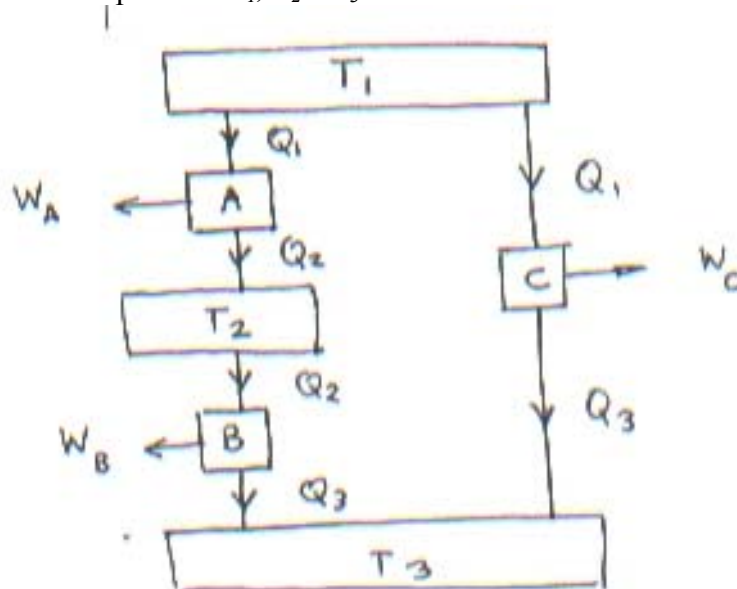


Figura 4.3 - Representação de máquinas térmicas reversíveis

Como o rendimento do ciclo de Carnot é função somente da temperatura, podemos escrever,

$$\eta_T = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = \varphi(T_L, T_H)$$

escrevendo para os três ciclos,

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \varphi(T_1, T_2)$$

$$\frac{Q_2}{Q_3} = \varphi(T_2, T_3)$$

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \varphi(T_1, T_3)$$

mas,

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \frac{Q_1}{Q_2} \cdot \frac{Q_2}{Q_3} \quad \text{ou}$$

$$\varphi(T_1, T_3) = \varphi(T_1, T_2) \times \varphi(T_2, T_3)$$

O lado esquerdo da equação acima não é função de T_2 . Assim, T_2 deve cancelar do lado direito. Isto pode ser obtido com,

$$\varphi(T_1, T_2) = \frac{f(T_1)}{f(T_2)} \quad \text{e} \quad \varphi(T_2, T_3) = \frac{f(T_2)}{f(T_3)}$$

então,

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \frac{f(T_1)}{f(T_3)} \quad \text{ou, de uma forma mais geral,}$$

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{f(T_H)}{f(T_L)}$$

Existe um número infinito de funções que satisfazem a relação acima. Quando uma forma é escolhida, teremos uma escala que é independente da substância termométrica. O motor reversível de Carnot é nosso termômetro. Kelvin propôs $f(T)=T$, onde T é a chamada temperatura absoluta dada em Kelvin (K). Então,

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

Temos agora que selecionar um número para um determinado ponto fixo. Assim a escala ficará completamente definida. Em 1954 o ponto escolhido foi o ponto triplo da água devido à sua excelente reprodutibilidade. O número dado a este ponto foi 273,16 K, pois desta forma o intervalo entre o ponto do gelo (273,15 K) e o ponto do vapor torna-se igual a 100 K. Isto é conveniente pois coincide com a escala Celsius.

4.2 – Escala Absoluta de Temperatura – Gás Perfeito:

A escala absoluta de Kelvin é a ideal, uma vez que não depende da substância termométrica. No entanto, sua implementação seria impossível pois requer um ciclo reversível de Carnot. Necessitamos de um modo para reproduzir a escala termodinâmica de temperatura.

Pode-se mostrar (ver livros de termodinâmica clássica) que uma escala de temperatura definida por um termômetro de volume constante ou pressão constante usando gás ideal é idêntica à escala termodinâmica. Para um gás perfeito,

$$pV = R\theta$$

A figura abaixo mostra de maneira esquemática um termômetro de volume constante, que é o padrão primário usado para definir a escala termodinâmica.

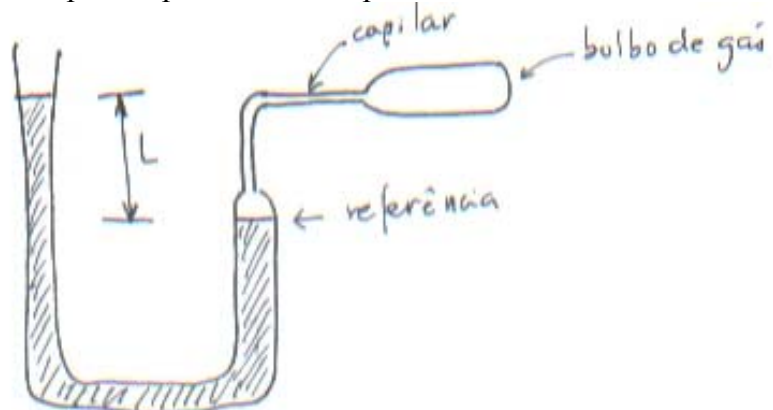


Figura 4.4 – Termômetro a gás de volume constante.

O termômetro a gás de pressão constante construído por Kelvin é mostrado na figura abaixo.

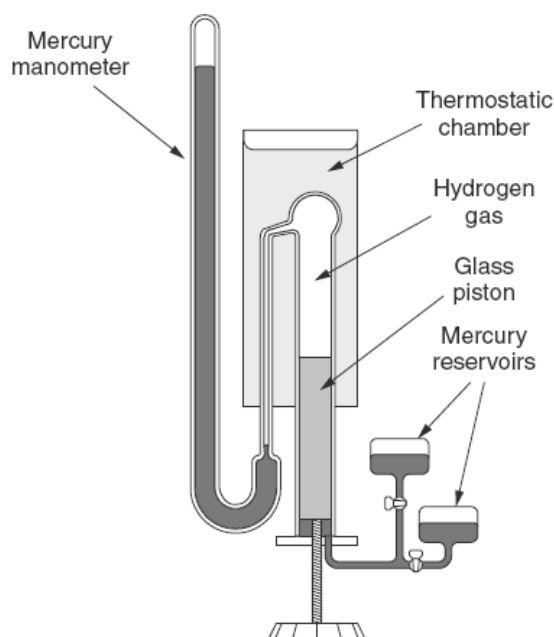


Figura 4.5 – Termômetro de hidrogênio de Kelvin. No termômetro projetado por Kelvin, o pistão de vidro é ajustado de modo a manter a pressão do hidrogênio constante. A posição do pistão é uma indicação do volume do gás e, portanto, da temperatura. O mercúrio dos reservatórios é usado para selar o gás.

Na realidade nenhum gás segue a lei dos gases perfeitos. No entanto sabe-se que o comportamento de gases reais aproxima-se dos gases perfeitos à medida que a pressão tende a zero. Assim, toma-se várias medidas do termômetro a gás, diminuindo-se a massa de gás e extrapolando-se o resultado obtido para a pressão zero. A figura abaixo indica de modo esquemático como a pressão do gás medida no ponto do vapor d'água tende a um valor único independente do gás, à medida que a pressão tende a zero.

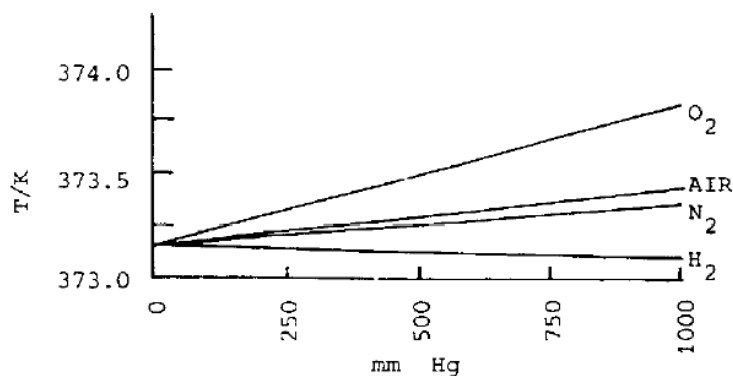


Figura 4.6 – Extrapolação da pressão do ponto de vapor para pressão zero, para diferentes tipos de gases.

Assim, a escala de temperatura do termômetro de gás pode ser escrita como,

$$\frac{T}{T_{PT}} = \frac{p}{p_{PT}}$$

onde T_{PT} e p_{PT} são, respectivamente, a temperatura e pressão do ponto triplo da água. Usando o valor convencional para a temperatura do ponto triplo da água, tem-se finalmente,

$$T = 273,16 \frac{p}{p_{PT}}$$

Este tipo de termômetro não é prático e sua utilização consome muito tempo. Este fato motivou a aceitação em 1927 da *International Temperature Scale (ITS)*. Esta escala define padrões secundários de temperatura e pontos fixos que sejam reprodutíveis e fáceis de operar. O termômetro de gás continua sendo o padrão primário para determinar a escala absoluta, definindo a temperatura dos pontos fixos e calibrando os termômetros secundários. Em 1968 algumas melhorias foram introduzidas na ITS-1927, que passou a ser chamada de *International Practical Temperature Scale, IPTS-68*. Em 1990, novas melhorias foram introduzidas e a escala passou a ser chamada de *International Temperature Scale, ITS-90*.

4.3 – *International Practical Temperature Scale, IPTS-68:*

A *IPTS-68* é baseada em valores atribuídos (usando-se o termômetro a gás) a números de estados de equilíbrio reprodutíveis (pontos fixos) e na definição de instrumentos padrão de interpolação calibrados nestas temperaturas. As fórmulas de

interpolação relacionando a saída dos instrumentos padrão e a temperatura *IPTS*, também são fornecidas. A *IPTS-68* também fornece informações suplementares tais como, requisitos básicos para os instrumentos padrão e para a obtenção dos diversos pontos fixos.

A seguir são apresentados os pontos fixo definidos pela *IPTS-68*.

	Definição	T₆₈(K)	T₆₈(°C)
1	Equilíbrio entre as fases sólido, líquido e vapor do hidrogênio (ponto triplo)	13,81	-259,34
2	Equilíbrio entre as fase líquido e vapor do hidrogênio a 33.330,6 Pa	17,042	-256,108
3	Equilíbrio entre as fases líquido e vapor do hidrogênio (ponto de ebulição do hidrogênio)	20,28	-252,87
4	Equilíbrio entre as fases líquido e vapor do Néon (ponto de ebulição do Neon)	27,102	-246,048
5	Equilíbrio entre as fases sólido, líquido e vapor do oxigênio (ponto triplo)	54,361	-218,789
6	Equilíbrio entre as fases líquido e vapor do oxigênio (ponto de ebulição)	90,188	-182,962
7	Equilíbrio entre as fases sólido, líquido e vapor da água (ponto triplo)	273,16	0.01
8	Equilíbrio entre as fases líquido e vapor da água (ponto de ebulição)	373,16	100
9	Equilíbrio entre as fases sólido e líquido do Zinco (ponto de solidificação)	629,73	419,58
10	Equilíbrio entre as fases sólido e líquido do Zinco (ponto de solidificação)	1235,08	961,93
11	Equilíbrio entre as fases sólido e líquido do Zinco (ponto de solidificação)	1337,58	1064,43

- Nota 1: com exceção dos pontos triplos e de um ponto de equilíbrio do hidrogênio (17,042 K), todos os estados são definidos a 1 atmosfera padrão (101.325 Pa)
- Nota 2: foram também definidos na *IPTS-68*, 27 pontos fixos secundários

A *IPTS-68* definiu os seguintes instrumentos de interpolação da temperatura entre os pontos fixos:

- Para a faixa de 13,81 K a 630,74 °C, o instrumento de interpolação é o termômetro de platina padrão.
- Para a faixa de 630,74 °C a 1064,43 °C, o instrumento de interpolação é o termopar platina-10% ródio/platina
- Acima de 1064,43 °C, a escala determina o uso de um pirômetro ótico e a equação de Planck para determinar as temperaturas.

4.4 – *International Temperature Scale, ITS-90:*

O texto da *ITS-90* pode ser encontrado na página do *Bureau International de Poids et Mesures*, no endereço www.bipm.fr/en/publications/its-90.html. Uma versão do texto encontra-se na página do nosso curso.

A tabela abaixo apresenta um resumo dos pontos fixos da *ITS-90*.

Substância	T₉₀/K	t₉₀/°C	Estado
Hidrogênio	13.8033	-259.3467	Triplo
Neônio	24.5561	-248.5939	Triplo
Oxigênio	54.3584	-218.7916	Triplo
Argônio	83.8058	-189.3442	Triplo
Mercúrio	234.3156	-38.8344	Triplo
Água	273.16	0.01	Triplo
Gálio	302.9146	29.7646	Fusão
Índio	429.7485	156.5985	Solidificação
Latão	505.078	231.928	Solidificação
Zinco	692.677	419.527	Solidificação
Alumínio	933.473	660.323	Solidificação
Prata	1234.93	961.78	Solidificação
Ouro	1337.33	1064.18	Solidificação
Cobre	1357.77	1084.62	Solidificação

4.5– Medidores de Temperatura:

Em princípio qualquer propriedade sensível à temperatura pode ser usada como um transdutor de temperatura. A seguir são mencionados os mais comumente usados.

4.5.1 – Termômetro de Expansão com Lâminas Bi-Metálicas: os termômetros de expansão utilizam lâminas bi-metálicas com diferentes coeficientes de térmica. As lâminas são coladas ou fixadas por meios mecânicos. Normalmente uma das lâminas é feita de *Invar*, pois este material apresenta um coeficiente de expansão térmica muito baixo (cerca de $1,7 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). As outras lâminas são fabricadas normalmente de latão ($2,02 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), Inconel ($1,25 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) e aço inox ($1,6 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

As principais características das lâminas bi-metálicas são:

- baixo custo
- resistência mecânica
- exatidão típica: 0,5 a 1% do fundo de escala

Lâminas bi-metálicas são muito utilizadas no controle de sistemas térmicos (termostatos). Existem também lâminas bi-metálicas helicoidais usadas com termômetros industriais.

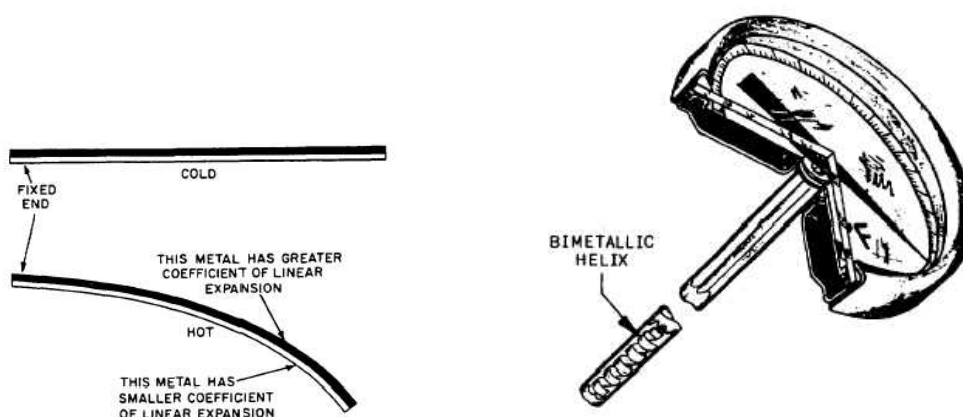


Figura 4.7 – Lâminas bi-metálicas planas e helicoidais.

4.5.2 – Termômetro de Expansão de Fluido:

Termômetro de Líquido em Vidro: este tipo de termômetro é bastante versátil. Variando-se o líquido contido no vidro consegue-se uma larga faixa de aplicação. Os líquidos mais usados são o mercúrio e o álcool. Normalmente a faixa de utilização do termômetro de mercúrio é de -38°C , ponto de congelamento do mercúrio, até 300°C . Termômetros especiais contendo gás inerte na câmara de expansão podem ir até 550°C . No caso do álcool, a faixa de utilização é de -70 a 65°C . Termômetros de líquido em vidro podem ser construídos para proporcionar

resoluções de leitura da ordem de mK, apesar da faixa de temperatura ficar restrita a poucos graus.

Um termômetro de líquido em vidro é composto de bulbo, haste, tubo capilar, escalas principal e auxiliar e câmaras de contração e expansão.

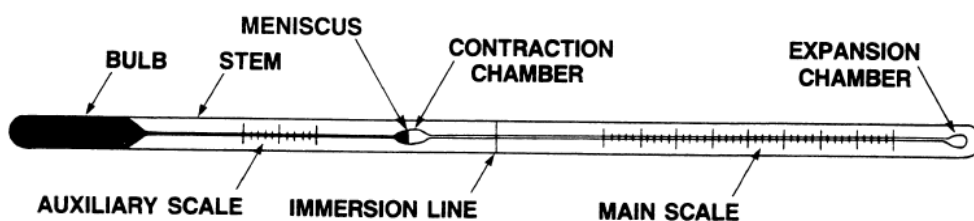


Figura 4.8 – Termômetro de líquido em vidro.

A leitura de um termômetro de líquido em vidro depende da expansão relativa do líquido e do vidro. Portanto, a temperatura do meio externo afeta a leitura do termômetro. Os termômetros são fabricados em três tipos:

- *Imersão parcial*: o termômetro é aferido com o bulbo e parte da coluna de líquido imersos no fluido. A porção exposta da coluna deve estar a uma temperatura conhecida.
- *Imersão total*: o bulbo e a coluna de líquido estão imersos no fluido
- *Imersão completa*: todo o termômetro é imerso no ambiente a ser medido

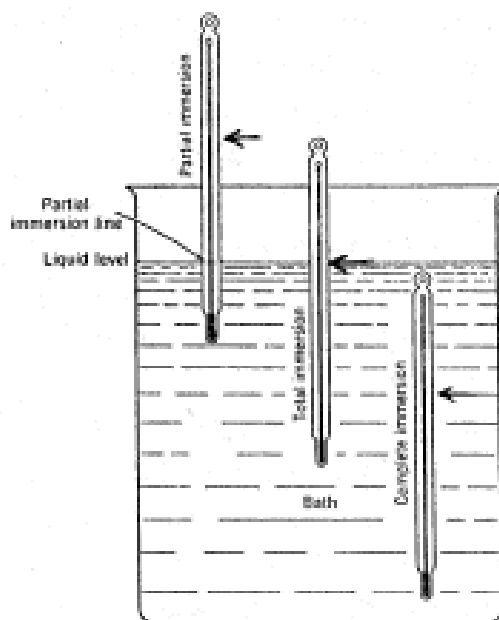


Figura 4.9 – Tipos de termômetros de líquido em vidro.

A maioria dos termômetros de líquido em vidro é do tipo imersão total. Quando estes termômetros são usados em imersão parcial, torna-se necessário realizar uma correção de leitura, normalmente dada na seguinte forma,

$$C_L = kN(T_b - T_e)$$

onde,

C_L : correção, em graus, a ser adicionada algebricamente à temperatura indicada

k : coeficiente de expansão diferencial entre o fluido termométrico e o vidro. Por exemplo, para o mercúrio, $k=0,00016$ para a escala Celsius e $k=0,00009$ para a escala Fahrenheit.

N : comprimento da coluna emergente dado em graus da escala.

T_b : temperatura do bulbo. Como não é um valor conhecido, usa-se um processo iterativo. Como primeira aproximação usa-se a temperatura indicada na coluna.

T_e : temperatura média da coluna emergente. Pode ser estimada com um termômetro auxiliar preso à coluna.

A expressão de correção acima também é usada na correção da leitura de termômetros de imersão parcial que estejam sendo usados em ambientes com temperaturas médias de coluna emergente diferentes daquelas empregadas na calibração. Neste caso,

T_b : temperatura média da coluna emergente durante a calibração.

T_e : temperatura média da coluna emergente em serviço, medida por um termômetro auxiliar.

Exemplo 1: Um termômetro de imersão total indica $100,00^\circ\text{C}$ quando a coluna de mercúrio está imersa até a marca de 80° na escala. A temperatura média da coluna emergente é de 60°C . Qual a temperatura correta do bulbo?

$$C_L = (0,00016) \cdot (100 - 80) \cdot (100 - 60) = 0,13^\circ\text{C}$$

A temperatura correta do bulbo é $T = 100,00 + 0,13 = 100,13^\circ\text{C}$

Exemplo 2: Um termômetro de imersão parcial indica $250,0^\circ\text{F}$ quando usado indevidamente como termômetro de imersão total. O comprimento da coluna submersa é de 110° (medido da marca de imersão ao topo da coluna de mercúrio). A temperatura especificada da coluna emergente é de 75°F , enquanto a temperatura aproximada da haste é 250°F . Qual a temperatura correta do bulbo?

$$C_L = (0,00009) \cdot (110) \cdot (75 - 250) = -1,7^\circ\text{F}$$

a temperatura correta é $T = 250,0 - 1,7 = 248,3^\circ\text{F}$

Termômetro de Pressão: É um dos termômetros mais econômicos e versáteis, sendo bastante usado na indústria. Consiste em um bulbo contendo líquido, gás ou vapor, um tubo capilar e um medidor de pressão, normalmente do tipo Bourdoun. Para medições remotas, capilares de até 60 metros são usados.



Figura 4.10 – Termômetro de pressão

4.5.2 – Medida de Temperatura por Efeitos Elétricos:

Os termômetros baseados em efeitos elétricos são divididos em três tipos:

- Termômetros de resistência: condutores ou semi-condutores
- Termômetro por efeito termo-elétrico
- Termômetro de quartzo

Termômetros de Resistência: Esta técnica de medição baseia-se no fato que a resistência elétrica de vários materiais varia com a temperatura de uma forma bastante reprodutível. Os materiais utilizados dividem-se em duas classes: *condutores* (metais) e *semicondutores*.

Historicamente, sensores feitos de materiais condutores apareceram primeiro. São denominados termômetros de resistência. Mais recentemente, surgiram os sensores de semicondutores que receberam o nome genérico de *termistores*.

Os registros históricos indicam que em 1821 Sir Humphrey Davy verificou que a resistência elétrica de metais variava com a temperatura. Em 1861, Carl Siemens usou pela primeira vez esta propriedade para medir temperatura. A relação resistência-temperatura foi proposta como sendo parabólica por Callendar. A construção clássica dos sensores de resistência utilizada até os dias de hoje foi proposta por Meyers em 1932. Esta construção baseia-se em um sensor (normalmente um fio de pequeno diâmetro), um suporte para o sensor, um escudo protetor para o sensor e um instrumento para a medição da resistência (normalmente uma ponte). A

figura 4.12 apresenta a construção de Meyers onde um fio de platina é enrolado sobre um suporte de mica.

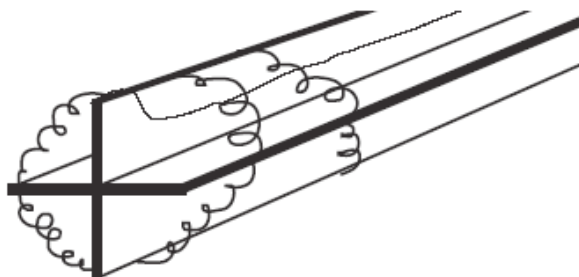


Figura 4.11 – Sensor de resistência de platina de Meyers.

Os sensores de resistência metálicos são chamados comumente de RTD (*Resistance Temperature Detectors*) Existem diversos tipos de sensores. Normalmente são elementos formados por condutores sólidos na forma de fios, sendo os mais comuns a platina, o níquel e o cobre. Tungstênio é às vezes utilizado para altas temperaturas, mas é bastante frágil. Fios de cobre e níquel são materiais baratos, mas apresentam desvantagens: o níquel é bastante não linear, com um limite de temperatura de 480°C. O cobre é bem linear mas é limitado a 150°C. É muito importante que o fio enrolado sobre o suporte esteja livre de tensões mecânicas de modo a não produzir variações de resistência elétrica devido às deformações mecânicas.

A platina é o material mais empregado pelas seguintes razões:

- é estável, resiste à corrosão e ataque químico
- é facilmente trabalhável, podendo ser produzida na forma de fios de pequeno diâmetro
- possui alto ponto de fusão
- pode ser obtida com alto grau de pureza, o que implica em propriedades químicas e elétricas bem reprodutíveis
- apresenta relação simples entre resistência e temperatura

Quando um termômetro de platina é usado como padrão da escala internacional de temperatura, *ITS-90*, várias exigências construtivas são impostas (ver por exemplo, *Platinum Resistance Thermometry*, Riddle, Furukawa and Plumb, em *Measurements in Heat Transfer*, ed. Goldstein and Eckert, Hemisphere-McGraw Hill, 1976). Algumas destas exigências são:

- o sensor deve ser recozido
- $R(100)/R(0)$ deve ser maior que 1,3925
- os fios de conexão devem ser 4
- o sensor deve ser colocado em um escudo protetor, evacuado e depois preenchido com ar seco a 0,5 atm e hermeticamente selado
- discos de mica devem separar os fios de conexão
- $R(0) \approx 25,5$

A ponte de Mueller é usada para medir a resistência de sensores de resistência. É basicamente uma ponte de Wheatstone que permite a reversão dos contatos, de maneira que a média de duas leituras independe da resistência dos fios de conexão.

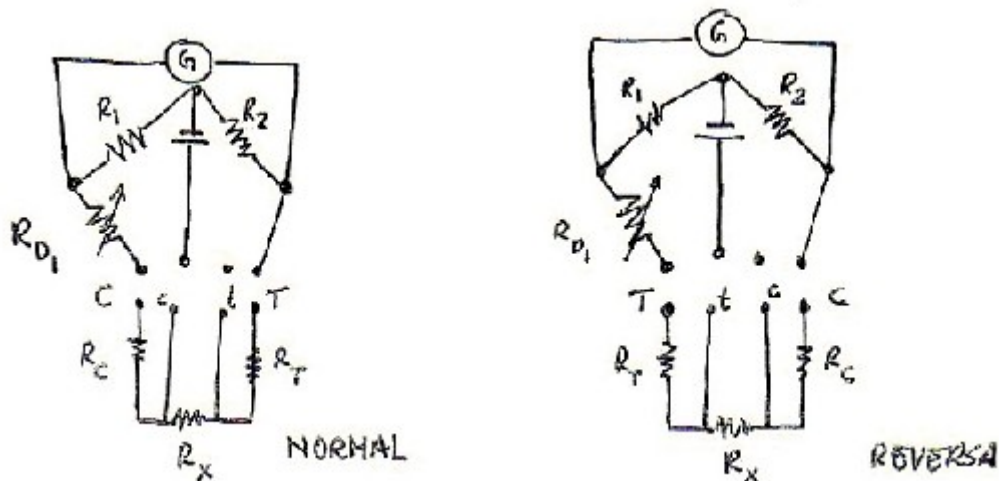


Figura 4.12 – Ponte de Mueller para medição da resistência.

Na posição normal, o balanceamento da ponte produz:

$$R_{D1} + R_C = R_x + R_T$$

Na posição reversa:

$$R_{D2} + R_T = R_x + R_C$$

Somando-se as duas equações e assumindo (não é necessário) que $R_{C1}=R_{C2}$ e $R_{T1}=R_{T2}$, tem-se,

$$R_x = \frac{R_{D1} + R_{D2}}{2}$$

Recentemente sensores de platina passaram a ser fabricados a partir da deposição de filmes de platina sobre uma base cerâmica. As dimensões conseguidas são bastante reduzidas e as resistências elevadas. Apresentam bom tempo de respostas, mas não são tão estáveis como os sensores de construção tradicional. Tanto os sensores tradicionais como os de filme podem ser fabricados de acordo com normas aceitas internacionalmente. Uma construção bastante utilizada é aquela que segue uma determinada equação entre resistência e temperatura e possui a resistência a 0°C igual a 100Ω. São os chamados PT-100.

A seguir são apresentadas algumas imagens obtidas da página da Omega Engineering Co., www.omega.com. Esta é uma boa fonte para consulta sobre sensores de temperatura de qualquer tipo.



Figura 4.13 – Exemplos de sensores de resistência de fios de platina (fonte www.omega.com).

Dimensions in millimeters (1 mm = 0.03937")	Nominal Resistance (ohms)	Temperature Range, °C (°F)	Model Number	Price	Self-Heating Error in C°/mW Flowing Air V = 1 m/sec	Response Time in Seconds			
						Flowing Water V = 0.4 m/sec		Moving Air V = 1 m/sec	
						50% Response	90% Response	50% Response	90% Response
	1 x 100	-220 to 400 (-365 to 750)	1PT100GX0518	\$45	0.36	0.2	0.8	8.0	30.0
	1 x 100	-220 to 400 (-365 to 750)	1PT100GX1013	45	0.39	0.2	0.5	4.0	12.0
	1 x 100	-220 to 400 (-365 to 750)	1PT100GX1510	51	0.36	0.2	0.4	2.0	7.0
	2 x 100	-220 to 400 (-365 to 750)	*2PT100GX1528	84	0.20	0.3	1.0	12.0	45.0
	1 x 100	-220 to 400 (-365 to 750)	1PT100GO1020	41	0.26	0.14	0.35	7.0	21.0
	1 x 100	-220 to 400 (-365 to 750)	1PT100GO1327	25	0.11	0.40	1.30	13.0	25.0
	1 x 100	-220 to 400 (-365 to 750)	1PT100GO1545	26	0.09	0.80	2.40	16.0	40.0

Ordering Example: 1PT100GX0518, 1 x 100 Ω glass wire-wound Pt RTD element, \$45.

* Dual element.

Figura 4.14 – Dados sobre sensores de resistência de fios de platina (fonte: www.omega.com).

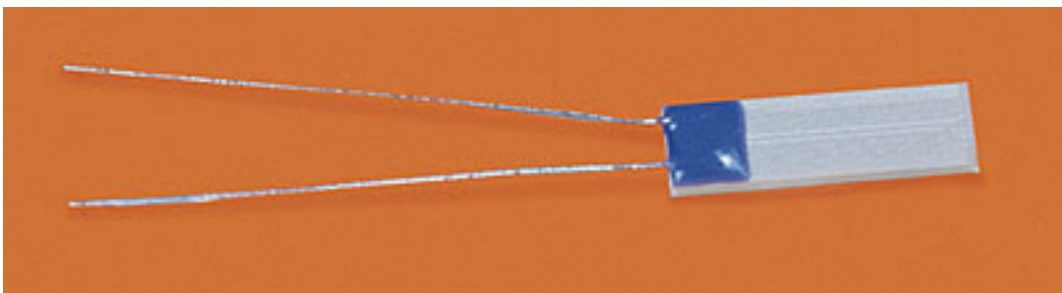
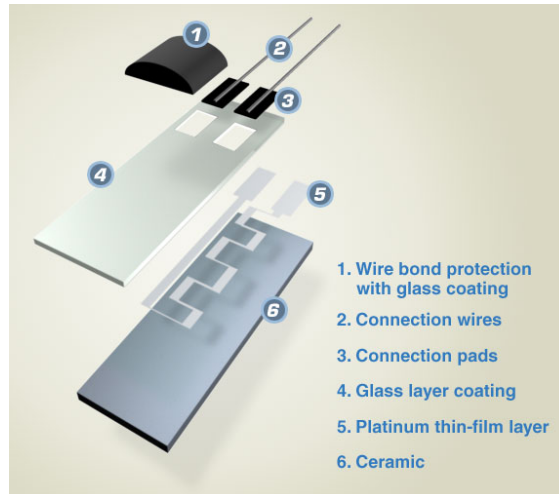


Figura 4.15 - Sensores de resistência de platina fabricados por deposição de filme (fonte: www.omega.com).

Termistores: São sensores resistivos fabricados de material semicondutor que apresentam elevados coeficientes negativos de resistência. Se podemos caracterizar os RTD como estáveis, termopares como versáteis, a palavra que caracteriza o termistor é sensibilidade. Estes sensores são altamente não lineares e seguem leis do tipo,

$$R = \alpha e^{b/T}$$

Tipicamente, a resistência de um termistor varia de 50000 Ω a 40°C para 200 Ω a 250°C. Valores típicos para os coeficientes na expressão acima são $\alpha = 0,06 \Omega$ e $b = 4500 \text{ K}$.

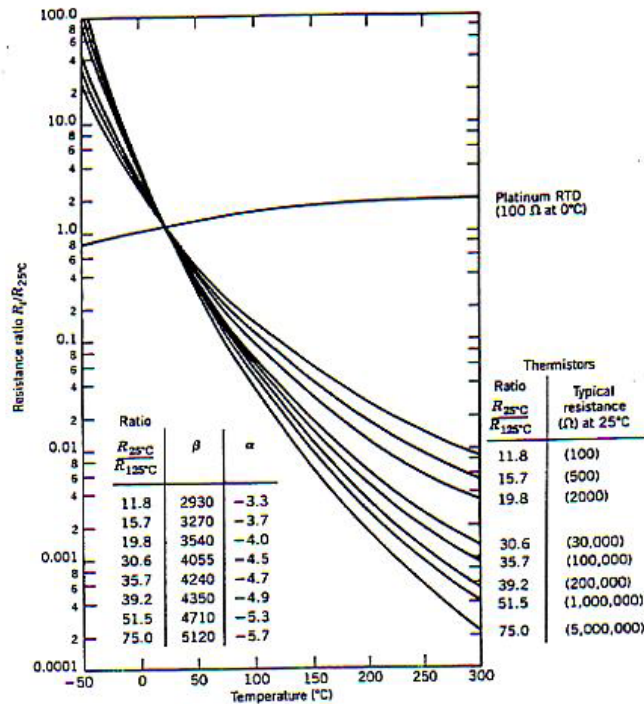


Figura 4.16 – Curva típica de resistência para termistor.

Termopares: Termopares são sensores muito utilizados na indústria e no laboratório. Duas excelentes referências sobre termopares são recomendadas:

- *Manual on the use of thermocouples in temperature measurements, ASTM Special Technical Publication 470A*
- *Fundamentals on temperature, pressure and flow measurements, Robert P. Benedict, John Wiley, 1984.*

Em 1821 Johan Seebeck mostrou que quando as junções de dois materiais diferentes formando um circuito fechado são expostas a temperaturas diferentes, uma força eletromotriz é gerada induzindo um corrente elétrica no circuito.

A chamada tensão de Seebeck refere-se à força eletromotriz líquida gerada em um circuito aberto (corrente nula). A tensão Seebeck depende dos materiais que formam o par termoelétrico e da temperatura das junções.

Para um par formado por materiais A e B,

$$dE_S = \alpha_{AB}dT$$

onde, α_{AB} é coeficiente de Seebeck. O coeficiente de Seebeck pode ser obtido de duas formas:

- 1) pela soma algébrica de coeficientes Seebeck relativos α_{AR} e α_{BR} . Para uma dada diferença de temperatura e um dado nível de temperatura, as fem de A e B são obtidas em relação a um material de referência.
- 2) diferenciando-se os valores tabelados para E_S versus T . para uma dada temperatura de referência.

- Leis de Circuitos Termoelétricos: Algumas leis estabelecidas de maneira experimental ajudam na montagem de circuitos envolvendo termopares.

1) Lei dos Materiais Homogêneos: Uma corrente termoelétrica não pode ser mantida em um circuito de um único material somente com fornecimento de calor.

As conseqüências desta lei são:

- dois materiais diferentes são necessários para um circuito de termopar
- não homogeneidades dos fios pode gerar força eletromotriz (se houver gradiente de temperatura)

2) Lei dos Materiais Intermediários: A soma algébrica das forças eletromotrizas em um circuito composto de qualquer número de materiais distintos é nula, se todo o circuito estiver à temperatura uniforme.

As conseqüências desta lei são:

- um terceiro material homogêneo pode ser sempre adicionado a um circuito sem alterar a fem do mesmo, desde que suas extremidades estejam à mesma temperatura. Esta lei permite a utilização de, por exemplo, um voltímetro no meio do circuito desde que seus terminais estejam à temperatura constante.

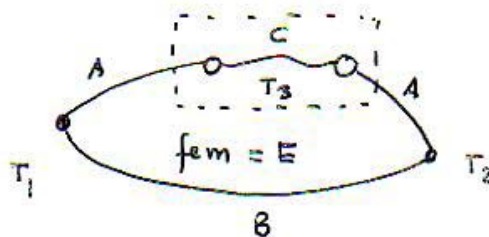


Figura 4.17 – Lei do terceiro material.

- se as fem de dois materiais com relação a um material de referência são conhecidas, a fem da combinação dos dois materiais é a soma algébrica das fem's em relação ao material de referência.

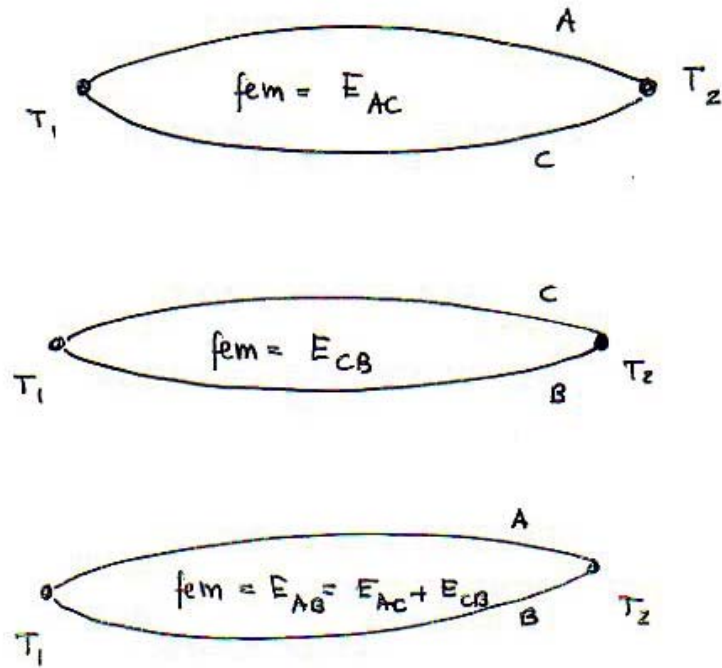


Figura 4.18 – Lei do terceiro material.

- 3) **Lei das Temperaturas Intermediárias:** Se dois materiais diferentes produzem a fem E_1 quando as junções estão a T_1 e T_2 , e a fem E_2 quando as junções estão a T_2 e T_3 , então a fem gerada quando as junções estão a T_1 e T_3 será $E_1 + E_2$.

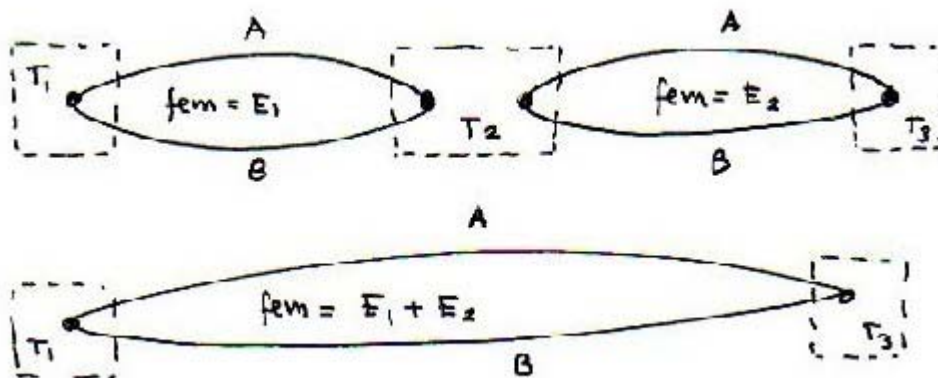


Figura 4.19 – Lei das temperaturas intermediárias.

A consequência desta lei é:

- um termopar calibrado para uma dada temperatura de referência seja usado em qualquer outra temperatura de referência através do uso da correção adequada. .

- **Termopares Normalmente Utilizados**

Os termopares comumente utilizados são identificados por letras, de acordo com a *Instrument Society of America (ISA)*.

Tipo B: Platina - 30% Ródio (+)/Platina - 6% Ródio (-)

Tipo E: Níquel - 10% Cromo (+)/Constantan (-)

Tipo J: Ferro (+)/Constantan (-)

Tipo K: Níquel - 10% Cromo (+)/Níquel - 5% Alumínio (-)

Tipo R: Platina - 13% (+)/Platina (-)

Tipo S: Platina - 10% (+)/Platina (-)

Tipo T: Cobre (+)/Constantan (-)

As aplicações específicas de cada termopar podem ser encontradas nas referências citadas.

Thermoelectric Thermometry

TABLE 7.1 Thermoelectric Series for Selected Metals and Alloys

100°C	500°C	900°C
Antimony	Chromel	Chromel
Chromel	Nichrome	Nichrome
Iron	Copper	Silver
Nichrome	Silver	Gold
Copper	Gold	Iron
Silver	Iron	90 Pt-10 Rh
90 Pt-10 Rh	90 Pt-10 Rh	Platinum
Platinum	Platinum	Cobalt
Palladium	Cobalt	Alumel
Cobalt	Palladium	Nickel
Alumel	Alumel	Palladium
Nickel	Nickel	Constantan (Adams)
Constantan (Adams)	Constantan (Adams)	
Copel	Copel	
Bismuth		

TABLE 7.2 Nominal Seebeck Coefficients (Thermoelectric Power) of Various Thermoelements with Respect to Platinum 67

Temperature (°C)	Thermoelement Type (Seebeck Coefficient) ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)					
	JP	JN	TP	TN, EN	KP, EP	KN
0	17.9	32.5	5.9	32.9	25.8	13.6
100	17.2	37.2	9.4	37.4	30.1	11.2
200	14.6	40.9	11.9	41.3	32.8	7.2
300	11.7	43.7	14.3	43.8	34.1	7.3
400	9.7	45.4	16.3	45.5	34.5	7.7
500	9.6	46.4	—	46.6	34.3	8.3
600	11.7	46.8	—	46.9	33.7	8.8
700	15.4	46.9	—	46.8	33.0	8.8
800	—	—	—	46.3	32.2	8.8
900	—	—	—	45.3	31.4	8.5
1000	—	—	—	44.2	30.8	8.2

E—chromel(+) constantan(-); J—iron(+) constantan(-); K—chromel(+) alumel(-);
T—copper(+) constantan(-); P—(positive(+)); N—negative(-).

Source: From NBS Monograph 125 [39].

TABLE 7.3 Nominal Seebeck Coefficients (Thermoelectric Power) of Various Thermocouple Types

Temperature (°C)	Thermocouple Type (Seebeck Coefficient), ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)					
	E	J	K	R	S	T
-200	25.1	21.9	15.3	—	—	15.7
-100	45.2	41.1	30.5	—	—	28.4
0	58.7	50.4	39.5	5.3	5.4	38.7
100	67.5	54.3	41.4	7.5	7.3	46.8
200	74.0	55.5	40.0	8.8	8.5	53.1
300	77.9	55.4	41.4	9.7	9.1	58.1
400	80.0	55.1	42.2	10.4	9.6	61.8
500	80.9	56.0	42.6	10.9	9.9	—
600	80.7	58.5	42.5	11.3	10.2	—
700	79.8	62.2	41.9	11.8	10.5	—
800	78.4	—	41.0	12.3	10.9	—
900	76.7	—	40.0	12.8	11.2	—
1000	74.9	—	38.9	13.2	11.5	—

E—chromel(+) constantan(-); J—iron(+) constantan(-); K—chromel(+) alumel(-);
R—platinum-13% rhodium(+) platinum(-); S—platinum-10% rhodium(+); platinum(-);
T—copper(+) constantan(-).

Source: From NBS Monograph 125 [39].

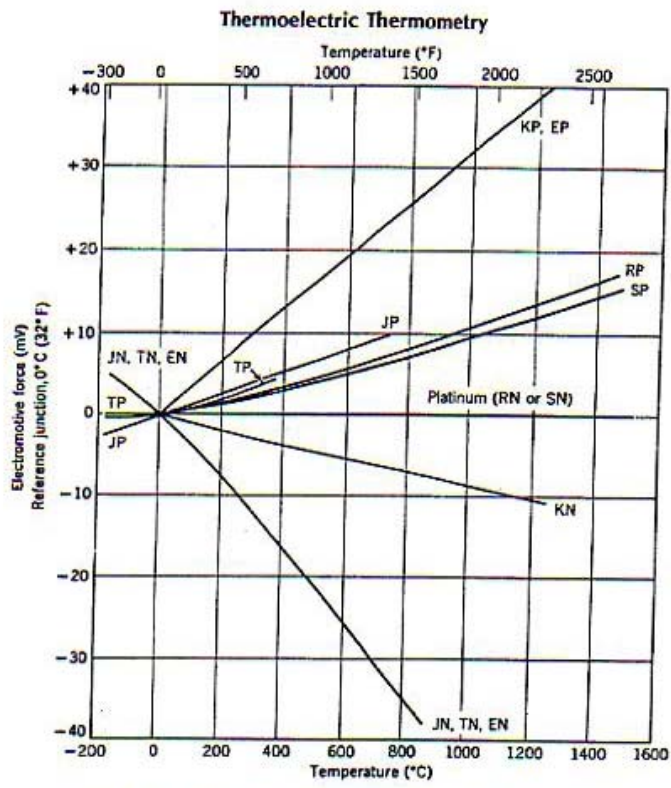


FIGURE 7.18 Thermal emf of thermocouples relative to platinum.

TABLE 7.4 Power Series Expansions for Base-Metal Thermocouples

Temperature Range (°C)	Exact Reference Voltage (mV) E	Reference Temperature T
<i>(a) Type T Thermocouples</i>		
<u>Within $\pm 0.2^\circ\text{C}$</u>		
0 to 400	$(+3.8740773840 \times 10 \times T$ $+3.3190198092 \times 10^{-2} \times T^2$ $+2.0714183645 \times 10^{-4} \times T^3$ $-2.1945834823 \times 10^{-6} \times T^4$ $-1.1031900550 \times 10^{-8} \times T^5$ $-3.0927581898 \times 10^{-11} \times T^6$ $+4.5653337165 \times 10^{-14} \times T^7$ $-2.7616878040 \times 10^{-17} \times T^8) \times 10^{-3}$	$+2.5661297 \times 10 \times E$ $-6.1954869 \times 10^{-1} \times E^2$ $+2.2181644 \times 10^{-2} \times E^3$ $-3.550000 \times 10^{-4} \times E^4$
<i>(b) Type J Thermocouples</i>		
<u>Within $\pm 0.1^\circ\text{C}$</u>		
0 to 400	$(+5.0372753027 \times 10 \times T$ $+3.0425491284 \times 10^{-2} \times T^2$ $-8.5669750464 \times 10^{-5} \times T^3$ $+1.3348825735 \times 10^{-7} \times T^4$ $-1.7022405966 \times 10^{-10} \times T^5$ $+1.9416091001 \times 10^{-13} \times T^6$ $-9.6391844859 \times 10^{-17} \times T^7) \times 10^{-3}$ (applies to both ranges of temperature)	$+1.9750953 \times 10 \times E$ $-1.8542600 \times 10^{-1} \times E^2$ $+8.3683958 \times 10^{-3} \times E^3$ $-1.3280568 \times 10^{-4} \times E^4$
400 to 760	$+9.2808351 \times 10$ $+5.4463817 \times E$ $+6.5254537 \times 10^{-1} \times E^2$ $-1.3987013 \times 10^{-2} \times E^3$ $+9.9364476 \times 10^{-5} \times E^4$	
<i>(c) Type E Thermocouples</i>		
<u>Within $\pm 0.1^\circ\text{C}$</u>		
0 to 400	$(+5.8595857799 \times 10 \times T$ $+4.3110945462 \times 10^{-3} \times T^2$ $+5.7220358202 \times 10^{-5} \times T^3$ $-5.4020668085 \times 10^{-7} \times T^4$ $+1.5425922111 \times 10^{-9} \times T^5$ $-2.4850089136 \times 10^{-12} \times T^6$ $+2.3389721459 \times 10^{-15} \times T^7$ $-1.1946296815 \times 10^{-18} \times T^8$ $+2.5561127497 \times 10^{-22} \times T^9) \times 10^{-3}$ (applies to both ranges of temperature)	$+1.7022525 \times 10 \times E$ $-2.2097240 \times 10^{-1} \times E^2$ $+5.4809314 \times 10^{-3} \times E^3$ $-5.7669892 \times 10^{-5} \times E^4$
400 to 1000	-2.9347907×10 $+1.3385134 \times 10 \times E$ $-2.5669218 \times 10^{-2} \times E^2$ $+2.3383779 \times 10^{-4} \times E^3$	

7.8 Thermoelectric Reference Tables

TABLE 7.4 (Continued)

Temperature Range (°C)	Exact Reference Voltage (mV) E	Reference Temperature T
<i>(d) Type K Thermocouples</i>		
0 to 400	$(-1.8533063273 \times 10$ $+3.8918344612 \times 10 \times T$ $+1.6645154356 \times 10^{-2} \times T^2$ $-7.8702374448 \times 10^{-5} \times T^3$	<i>Within $\pm 0.02^\circ\text{C}$</i> No inverse equation available to a reasonable degree of accuracy
400 to 1100	$+2.2835785557 \times 10^{-7} \times T^4$ $-3.5700231258 \times 10^{-10} \times T^5$ $+2.9932909136 \times 10^{-13} \times T^6$ $-1.2849848789 \times 10^{-16} \times T^7$ $+2.2239974336 \times 10^{-20} \times T^8$ $+125 \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\frac{T-127}{65}\right]^2\right) \times 10^{-3}$	-2.4707112×10 $+2.9465633 \times 10 \times E$ $-3.1332620 \times 10^{-1} \times E^2$ $+6.5075717 \times 10^{-3} \times E^3$ $-3.9663834 \times 10^{-5} \times E^4$
(applies to both ranges of temperature)		

TABLE 7.5 Power Series Expansions for Noble-Metal Thermocouples

Temperature Range (°C)	Exact Reference Voltage (mV) E
<i>(a) Type B Thermocouples</i>	
0 to 1820	$(-2.4674601620 \times 10^{-1} \times T$ $+5.9102111169 \times 10^{-3} \times T^2$ $-1.4307123430 \times 10^{-6} \times T^3$ $+2.1509149750 \times 10^{-9} \times T^4$ $-3.1757800720 \times 10^{-12} \times T^5$ $+2.4010367459 \times 10^{-15} \times T^6$ $-9.0928148159 \times 10^{-19} \times T^7$ $+1.3299505137 \times 10^{-22} \times T^8) \times 10^{-3}$
<i>(b) Type R Thermocouples</i>	
630 to 1064	$(-2.6418007025 \times 10^2$ $+8.0468680747 \times 10^0 \times T$ $+2.9892293723 \times 10^{-3} \times T^2$ $-2.6876058617 \times 10^{-7} \times T^3) \times 10^{-3}$
1064 to 1665	$(+1.4901702702 \times 10^3$ $+2.8639867552 \times 10^0 \times T$ $+8.0823631189 \times 10^{-3} \times T^2$ $-1.9338477638 \times 10^{-6} \times T^3) \times 10^{-3}$
<i>(c) Type S Thermocouples</i>	
630 to 1064	$(-2.9824481615 \times 10^2$ $+8.2375528221 \times 10^0 \times T$ $+1.6453909942 \times 10^{-3} \times T^2) \times 10^{-3}$
1064 to 1665	$(+1.2766292175 \times 10^3$ $+3.4970908041 \times 10^0 \times T$ $+6.3824648666 \times 10^{-3} \times T^2$ $-1.5722424599 \times 10^{-6} \times T^3) \times 10^{-3}$

- Circuitos Básicos para Termopares

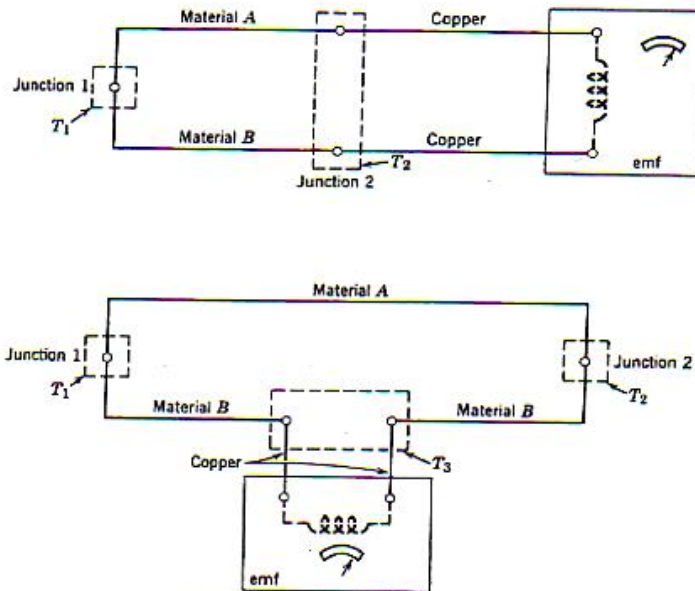


FIGURE 7.7 Basic thermocouple circuits.

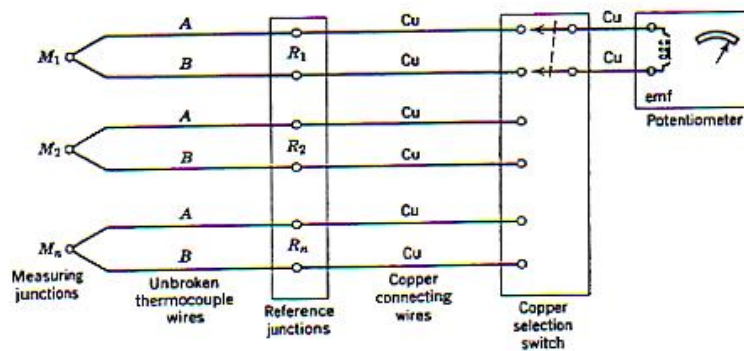


FIGURE 7.8 Ideal circuit when more than one thermocouple is involved.

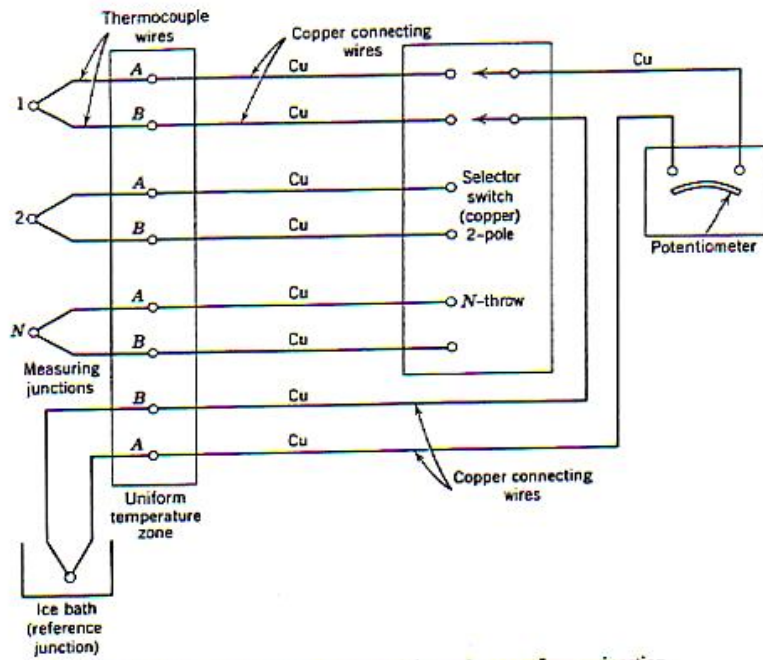
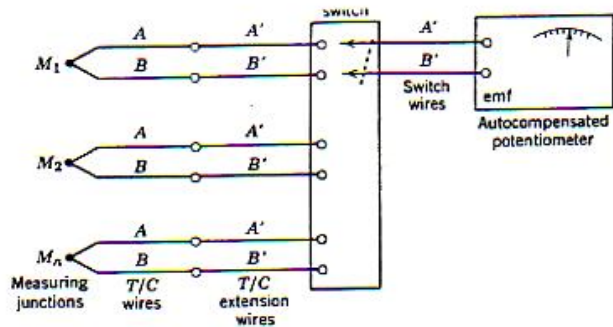
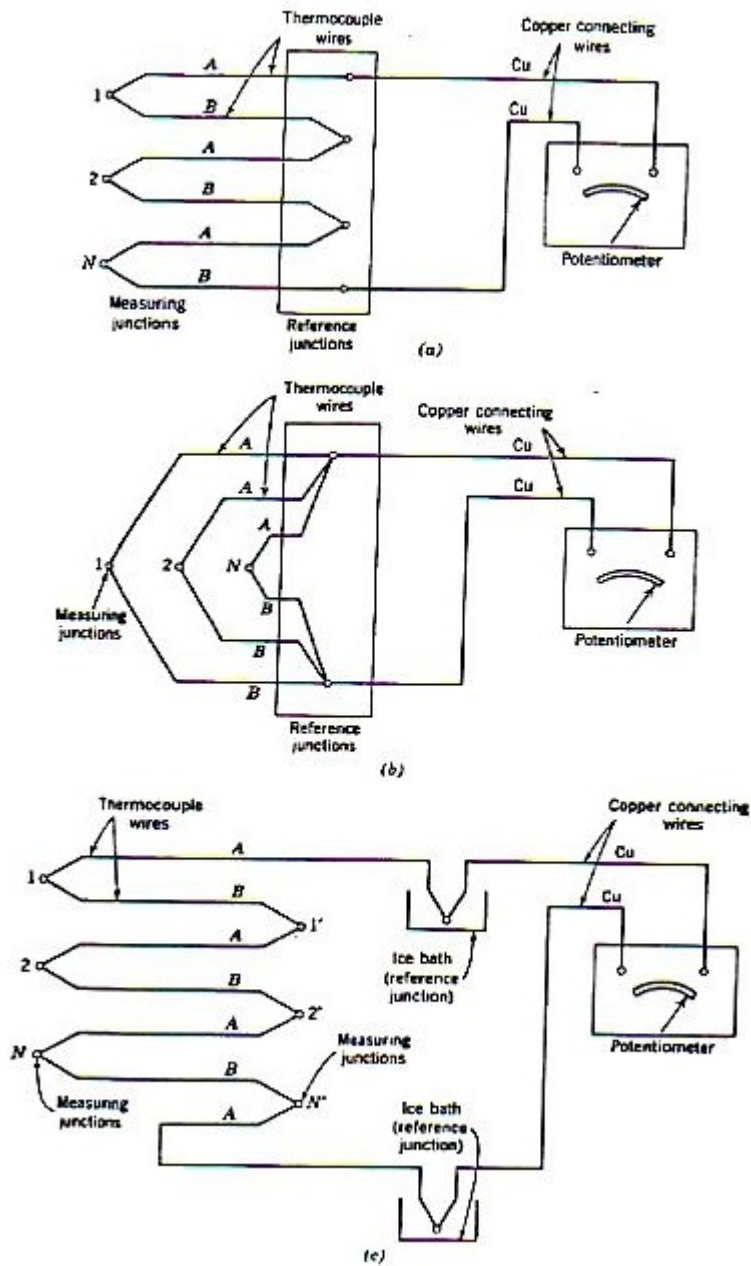


FIGURE 7.9 A zone-box circuit involving only one reference junction.





Termopilha: ligação de várias junções em série. Aumenta a saída do sinal de um valor igual ao número de junções, permitindo a detecção de uma menor diferença de temperatura. Note que a informação sobre a distribuição espacial de temperatura é perdida. A ligação em paralelo das junções fornece a temperatura média das junções.

- Junções de Referência

Como junção de referência é usado o ponto triplo da água, no caso de desejar-se um nível elevado de exatidão. Normalmente utiliza-se um ponto de gelo, conforme apresentado na figura abaixo.

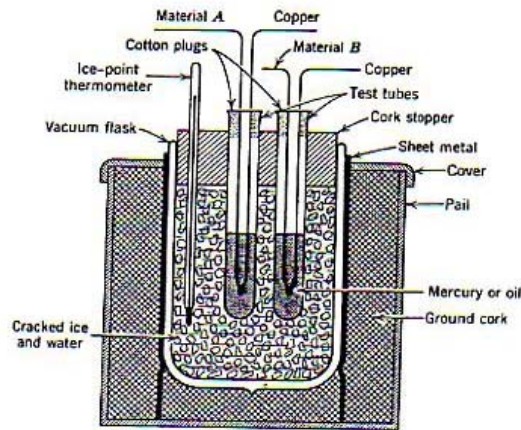


FIGURE 7.12 Typical ice bath for reference junctions.

Também são usados pontos de gelo automáticos com refrigeração termoelétrica e compensação eletrônica.

- Junções de Referência



Figura 4.20 – Tipos de junções de termopares

- Junções de Referência

- Não homogeneidade
- Trabalho a fio
- Geração galvânica de fem

- Interferência Elétrica

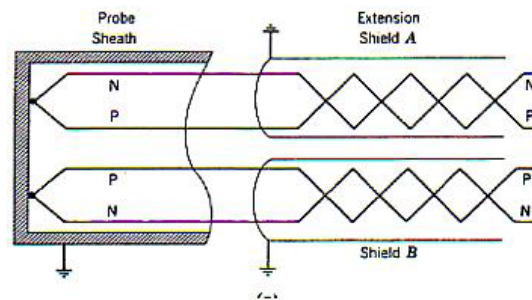
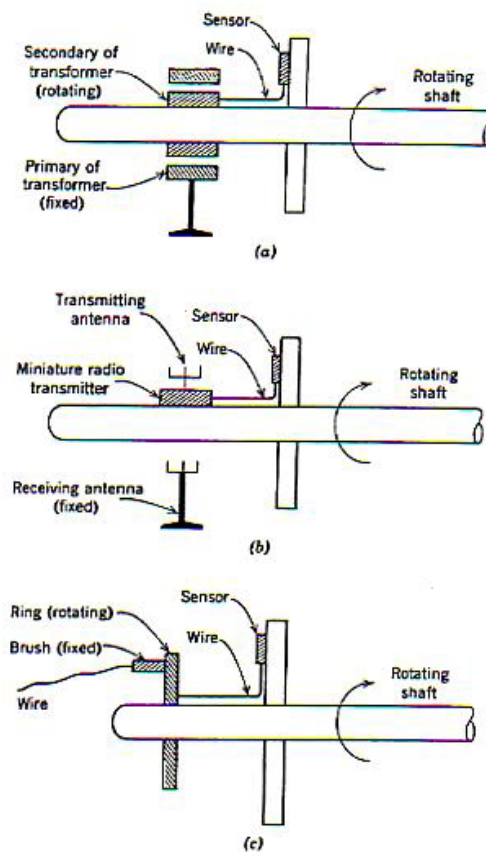


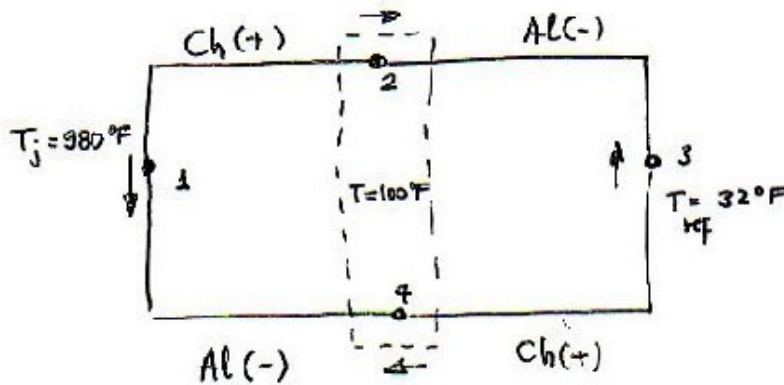
Figura 4.21 – Blindagem de termopares.

- Uso de termopares em partes girantes



Exemplo: Os fios de extensão de um termopar Chromel-alumel foram trocados por engano. A temperatura real da junção era $T_j = 980^\circ\text{F}$. A temperatura da junção de referência era $T_r = 32^\circ\text{F}$ e a temperatura das junções com o fio de extensão era de 100°F . Qual o erro na medida?

Solução: desenhando o circuito equivalente:



$$E_{Liq} = E_1 - E_2 + E_3 - E_4$$

onde

$$E_1 = (Ch - Al)_{980} = 21.777\text{mV}$$

$$E_2 = (Ch - Al)_{100} = 1.520\text{mV}$$

$$E_3 = (Ch - Al)_{32} = 0\text{mV}$$

$$E_4 = (Ch - Al)_{100} = 1.520\text{mV}$$

$$E_{Liq} = 21.777 - 1.520 + 0 - 1.520 = 18.737\text{mV}$$

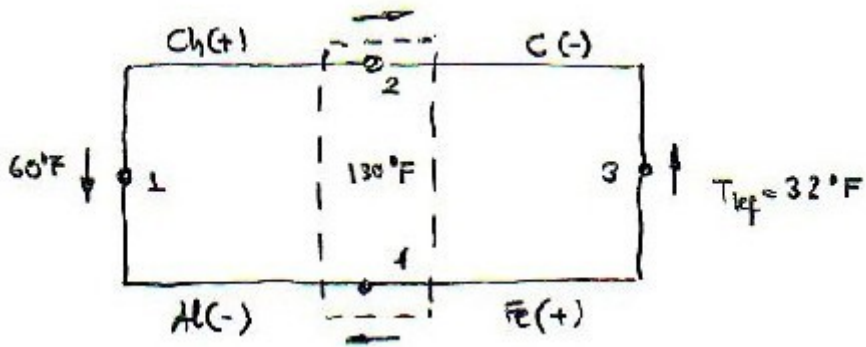
O erro na tensão é:

$$E_{correcto} = (Ch - Al)_{980} - (Ch - Al)_{32} = 21.777\text{mV}$$

$$\text{erro: } 21.777 - 18.737 = 3.040\text{ mV}$$

$$\text{erro na temp: } 980 - 851.5 = 128.5\text{ }^\circ\text{F}$$

Exemplo: Um termopar chromel-alumel foi conectado por engano a fios de extensão ferro-constantan. A temperatura real da junção era 60°F , a da referência 32°F e a da união com os fios da extensão 130°F . Qual o erro na medida?



$$E_{Liq} = -E_1 + E_2 - E_3 + E_4$$

onde

$$E_1 = (Ch - Al)_{60} = 0.619 \text{ mV}$$

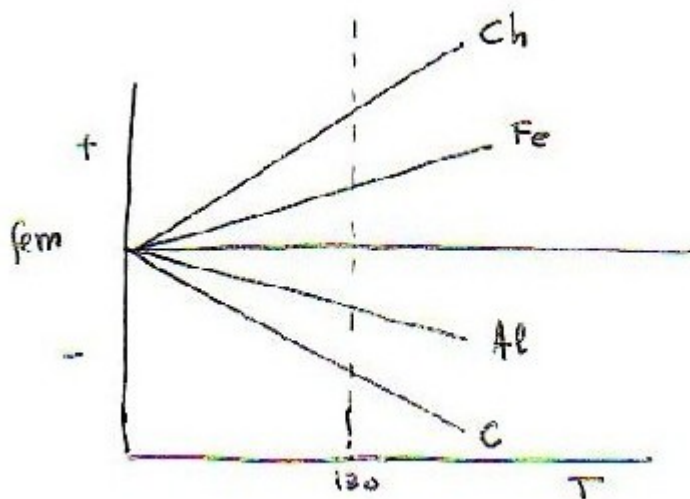
$$E_2 = (Ch - C)_{130} = 8.329 \text{ mV}$$

$$E_3 = (Fe - C)_{32} = 0 \text{ mV}$$

$$E_4 = (Fe - Al)_{130} = (Ch - Al)_{130} - (Ch - C)_{130} + (Fe - C)_{130}$$

$$= 2.206 - 3.329 + 2.820 \text{ mV} = 1.697 \text{ mV}$$

assim: $E_{Liq} = -0.619 + 3.329 - 0 + 1.697 = 4.407 \text{ mV}$



a fem correta teria sido: $E = (Ch - Al)_{60} - (Ch - Al)_{32} = 0,619 \text{ mV}$

erro: $4,407 - 0,619 = 3,788 \text{ mV}$

ou: $225 - 60 = 165 \text{ }^\circ\text{F}$