

3. Confiabilidade Metrológica

A Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML) elabora recomendações metrológicas sobre as quais, em geral, se baseiam as regulamentações técnicas metrológicas (RTM) elaboradas pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). A RTM tem por finalidade colocar sob controle do Estado, diferentes categorias de instrumentos de medição, fixando requisitos técnicos e metrológicos para utilização e verificação (Costa Monteiro, 2007).

As exigências das RTM conduzem ao controle metrológico dos instrumentos de uma forma mais ampla, tanto antes da entrada do produto médico no mercado, através da aprovação de modelo e verificação inicial, quanto durante o período da vida útil do mesmo, através da verificação periódica e eventual. As recomendações Internacionais da OIML para a área de saúde são:

- R7 – Termômetros Clínicos de vidro, de mercúrio, com dispositivo de máxima;
- R16 – Esfigmomanômetro – parte 1 e Parte 2;
- R26 – Seringas Médicas;
- R78 – Pipetas westergren para medição da velocidade de sedimentação das hemácias;
- R89 – Eletroencefalógrafos;
- R90 – Eletrocardiógrafos;
- R93 – Tocômetros;
- R114 – Termômetros Clínicos, elétricos, com medição contínua (CTI);
- R115 – Termômetros Clínicos, elétricos, com dispositivo de máxima;
- R122 – Aparelhos para audiometria vocal;
- R128 – Bicicleta ergométrica;
- R135 – Espectrofotômetro para laboratórios médicos.

A Inglaterra e a Alemanha são os países que incorporaram o maior número de recomendações OIML para a área de saúde. Atualmente o Brasil possui duas

RTMs na área de saúde (Termômetro Clínico de mercúrio em vidro e o esfigmomanômetro mecânico de medição não-invasiva do tipo aneróide), e grupos de trabalho no INMETRO estão atuando para adaptar outras recomendações para a área de saúde, ou mesmo atualizá-las, referentes aos instrumentos de medição que se encontram listados a seguir:

- Esfigmomanômetros digitais;
- Esfigmomanômetros de coluna de mercúrio;
- Termômetros clínicos de mercúrio em vidro;
- Termômetros clínicos digitais;
- Eletrocardiógrafos;
- Eletroencefalógrafos.

O modelo adotado para garantir a segurança sanitária dos EEM (Autorização de Modelo) foi estabelecido pela resolução nº 444 de 31 de agosto de 1999 da ANVISA, adotando as normas técnicas da série NBR IEC 60.601-1:Equipamento Eletromédico. Parte 1 – Prescrições Gerais para Segurança; e Normas Técnicas particulares da série NBR IEC 60.601-2.

Os equipamentos biomédicos no Brasil, conforme sua classificação quanto ao potencial de risco à saúde de seus usuários (pacientes e/ou operadores), necessitam de registro na Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) para que os fabricantes o lancem no mercado consumidor. A exigência do registro na ANVISA implica em uma prévia certificação de conformidade e normas técnicas específicas, emitida por Organismos de Certificação de Produtos (OCP) acreditados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). A certificação de conformidade resulta não somente na proteção da integridade física dos usuários, como também na implementação de um ciclo virtuoso entre os sistemas regulador e produtivo. A adaptação dos equipamentos e de seus fabricantes aos regulamentos técnicos estimula melhorias qualitativas nos produtos e processos de fabricação (Costa Monteiro e Lessa, 2005).

No Brasil, assim como nos outros países do mundo, uma atenção especial é dedicada à certificação de produtos para a saúde antes da comercialização. Tal fato denota uma preocupação especial com a qualidade de tais produtos no momento prévio ao lançamento no mercado consumidor.

Após a comercialização dos produtos médicos, com a exceção apenas do termômetro clínico de mercúrio em vidro e do esfigmomanômetro mecânico de medição não- invasiva do tipo aneróide, que possuem regulamentação do INMETRO, além dos Equipamentos Eletromédicos (EEM) envolvendo a utilização de radiações ionizantes, não existe nenhuma lei ou regulamentação que torne compulsório o controle dos outros instrumentos biomédicos para a garantia da confiabilidade metrológica, com calibrações rastreadas durante o tempo de vida em uso.

Muitos trabalhos recentes vêm demonstrando a grande necessidade de avaliação dos equipamentos biomédicos em uso. Tais estudos expuseram resultados preocupantes com relação às medições realizadas nos dispositivos biomédicos em uso nos EAS (Costa Monteiro, 2007).

Diante dos resultados dos estudos sobre confiabilidade de dispositivos biomédicos em uso, pode-se concluir que iniciativas legislativas que tornem compulsório o controle metrológico destes equipamentos para a saúde durante sua vida útil nos EAS são extremamente urgentes, mas um desafio se evidencia: ainda não existe disponível uma rede de laboratórios capacitados para a calibração destes equipamentos biomédicos que seja suficiente para atender às demandas no país.

Como pode ser constatado, não só a OIML, como também o INMETRO, não possuem nenhuma recomendação quanto à validação de autoclaves, sendo a única norma disponível, a NBR ISO 11134/2001, não havendo lei que torne compulsória a conformidade a esta norma nem mesmo ao se lançar a autoclave no mercado consumidor. A exemplo dos demais EEM, as autoclaves necessitam também de avaliação ao longo de sua vida útil (Van Doornmalen e Dankert, 2005).

3.1. NBR ISO 11134 – Esterilização de produtos hospitalares – Requisitos para validação e controle de rotina - Esterilização por calor úmido

A NBR ISO 11134 estabelece que um produto estéril é aquele que está livre de organismos viáveis. Artigos produzidos sob controle das condições de fabricação podem, previamente à esterilização, possuir microorganismos. Tais produtos são, por definição, não estéreis. O propósito do processo de esterilização é destruir os contaminantes microbiológicos desses produtos não estéreis.

A destruição de microorganismos por agentes físicos e químicos acompanha uma lei exponencial. Por conseguinte, pode-se calcular uma probabilidade finita de microorganismos independente da dose ou tratamento de esterilização.

O resultado da esterilidade em um artigo individual numa população de produtos esterilizados não pode ser garantido no sentido absoluto. A probabilidade de não esterilidade em cada unidade individual do produto é deduzida matematicamente. Por exemplo, com uma probabilidade de 10^{-6} , a probabilidade de não esterilização de uma unidade é menor ou igual a um em um milhão.

A norma especifica requisitos para o uso do calor úmido no desenvolvimento do processo de esterilização, na validação do processo de esterilização e no controle da rotina de esterilização.

Em seu Anexo A, mais precisamente no item A.6.2, a NBR ISO 11134 estabelece que:

1. A taxa de destruição microbiológica, associada com os componentes e dispositivos esterilizados por calor úmido, pode ser influenciada pela temperatura do vapor, pela pressão da câmara durante a esterilização, pela permeabilidade do material de embalagem ao vapor e ao ar, pela capacidade de penetração do dispositivo ou do componente ao vapor e ao ar ao estado fisiológico da carga microbiana associada com o produto.

2. Técnicas matemáticas e métodos gráficos têm sido desenvolvidos, pelos quais a letalidade do processo (frequentemente expressa como F – físico) pode ser calculada a partir dos dados de temperatura do produto. O cálculo de um valor de F derivado a partir de parâmetros de um processo físico é explicado em publicações pela “nacional Canners Association”, “Parenteral Drug Association” e I.J.PFUG. Definições do valor F , F_0 , D e Z são dadas na seção 3. Tanto o valor D quanto o Z são necessários para selecionar o valor F .

3. Quanto maior o valor de D , mais resistente é o microorganismo à destruição térmica. O valor pode ser obtido traçando graficamente o logaritmo do número de sobreviventes microbiológicos contra o tempo de exposição à esterilização; O tempo correspondendo em número a uma redução de um logaritmo pode então ser diretamente medido.

4. O uso de F_0 para expressar a letalidade do ciclo assume uma temperatura de referência de $121,1^\circ\text{C}$ e um valor de Z de 10 K. Os dados de temperatura do produto, acumulados ao longo de todo o processo (aquecimento, exposição, resfriamento) são convertidos à letalidade equivalente em $121,1^\circ\text{C}$ e integrados matematicamente ou graficamente para obter um valor de letalidade física expresso com os equivalentes em minutos da exposição em $121,1^\circ\text{C}$. Por exemplo, cada minuto em $114,0^\circ\text{C}$ tem uma taxa de letalidade equivalente a 0,2 min em $121,1^\circ\text{C}$, se $Z= 10$ K. Alguns programas podem calcular o valor de F do processo continuamente durante o ciclo de esterilização, usando a introdução de um ou mais sensores de temperatura no produto.

5. A estimativa precisa de um valor F físico requer que o sistema de medição de temperatura esteja adequadamente calibrado. Fatores de correção necessitam ser aplicados a leituras individuais antes de calcular a letalidade do ciclo. A validade do valor F físico é baseada na suposição que as espécies resistentes na carga microbiana do produto tenham um valor de Z de aproximadamente 10 K. A validação depende, primeiramente, da cinética de morte e da presença de um ambiente de vapor saturado.

Ainda da NBR ISO 11134, no anexo A, item A.6.3, temos que:

1. Dois enfoques podem ser usados no desenvolvimento e uso dos ciclos de esterilização a vapor efetivos: o método de sobremorte (*overkill*) e o método da carga microbiana.

2. O método de sobremorte (*overkill*) tradicionalmente tem sido usado para estabelecer ciclos de esterilização a vapor. Esta abordagem é baseada na premissa de que o processo de esterilização inativará um alto desafio microbiológico, o qual não é necessariamente relacionado à carga microbiana de pré-esterilização. Este método é chamado de sobremorte (*overkill*) porque se recomenda que as condições estabelecidas do ciclo para a morte do desafio microbiológico, com um fator de segurança adicional, sejam muito mais severas do que aquelas requeridas para inativação da carga microbiana do produto.

3. O método de carga microbiana apresenta duas abordagens distintas: Uma metodologia é descrita como o método de carga microbiana total, e a outra se refere como um método combinado indicador biológico/carga microbiana.

4. O método da contagem microbiana total envolve uma análise do produto para microorganismo termoresistente; por exemplo, para usar uma carga microbiana isolada (recuperada com o objetivo de desafiar a esterilização do produto), que é representativa da carga microbiana da população de maior resistência. A carga microbiana isolada pode ser propagada, inoculada sobre ou dentro do produto e usada em estudos de desafios da esterilização de produtos para demonstrar diretamente a probabilidade desejada de sobreviventes para a carga microbiana do produto. A contagem das cargas microbianas características utilizadas no cálculo é obtida a partir da média da contagem microbiana mais três vezes o desvio-padrão.

5. No método combinado indicador biológico/carga microbiana, o desafio microbiológico da esterilização do produto pode necessitar da inativação da concentração inicial do inóculo para um nível logarítmico estabelecido. Recomenda-se que a população e a resistência relativas do inóculo do desafio inicial microbiológico sejam comparadas com o valor médio e a resistência

térmica da carga microbiana tipicamente associados com o produto. Recomenda-se que a comparação demonstre que a inativação de uma carga microbiana predeterminada de desafio microbiológico garante que a probabilidade desejada de uma carga microbiana de sobreviventes seja atingida. Este método é baseado na contagem microbiana, embora a carga microbiana deva ser quantificada e a resistência determinada conforme o método de carga microbiana total.

No item A.6.4, a norma indica que cepas de microorganismos que demonstram uma alta resistência ao calor úmido com respeito à carga microbiana são *Clostridium sporogenes*, *Bacillus coagulans*, *B. subtilis* e *B. stearothermophilus*.

O método de sobremorte (*overkill*) é baseado na concepção de que o processo de esterilização inativará o desafio microbiológico com um fator adicional de segurança. O desafio microbiológico consistirá em um número selecionado (exemplo: entre 10^3 e 10^6) de esporos resistentes ao calor úmido (vapor). A população desafio não está necessariamente relacionada com a carga microbiana. Se condições de calor seco (umidade relativa menor do que 100%) existem no produto, recomenda-se que um microorganismo tal como o *B. subtilis* 5230 ou *B. Subtilis* subesp. Níger (ATCC 9372) também seja usado. As condições de ciclo estabelecidas para eliminar o desafio microbiológico através do método de *overkill* são mais severas do que aquelas requeridas para eliminar a carga microbiana.

Indicadores biológicos têm sido amplamente utilizados para avaliar a letalidade de diversas combinações de parâmetros de processo, produtos e embalagem. Um sistema de desafio microbiológico de resistência conhecida mede diretamente a letalidade alcançada de certo ponto de um produto como um resultado de uma variável empregada.

Os indicadores biológicos utilizados na produção são geralmente mais resistentes à esterilização do que cargas microbianas características. Entretanto, como parte do desenvolvimento do ciclo, recomenda-se que estudos sejam conduzidos para demonstrar esta resistência. Procedimentos que podem ser

aplicados incluem isolamento, propagação e avaliação da resistência dos microorganismos da carga microbiana recuperada ou exposição do produto com carga microbiana característica para pequenos ciclos junto com o ensaio de esterilidade de produto.

A avaliação da esterilidade é baseada na demonstração da ausência de crescimento após o teste de esterilidade. A performance do teste de esterilidade nem sempre é uma garantia da esterilidade de um produto. Desta forma, dois métodos foram desenvolvidos para medir, controlar e demonstrar a eficiência de um processo de esterilização. Estes dois métodos, na verdade, podem ser encarados como: abordagem biológica e abordagem matemática. (B.M. Boca, E. Pretorius, R. Chapoullie, e Z. Apostolides).

3.2. Abordagem Biológica

A abordagem biológica, também conhecida como abordagem Latina, determina a menor probabilidade de detecção de uma unidade não estéril na carga, utilizando para tal Indicadores Biológicos ou BIs, sendo estes, soluções padronizadas contendo microorganismos, específicos para o tipo de esterilização a ser estudada. A maioria dos BIs consistem em uma população de esporos bacterianos, consideradas as mais resistentes formas para o princípio de esterilização utilizado.

Na microbiologia da esterilização, o Valor D é mais utilizado do que o valor k, visando à medição da taxa de morte microbiana. A equação abaixo expressa uma probabilidade finita da existência de organismos sobreviventes:

$$N_t = N_0^{-kt}$$

A equação acima pode ser expressa, em formato logarítmico, da seguinte forma:

$$\log \frac{N_0}{N_t} = \frac{kt}{2.303} = \frac{t}{D}$$

O valor D representa o coeficiente de temperatura para o processo letal e vem a ser o tempo de exposição necessário, após o processo atingir as condições predefinidas, para causar uma redução de 1-log ou 90 % na população de um determinado microorganismo. A resistência de um organismo varia com a temperatura, de forma que, quanto menor o valor D, maior a sensibilidade do microorganismo ao agente letal.

O valor Z é definido como o número de graus de temperatura necessários à mudança de 1-log no valor D e ambos são significativos apenas sob condições experimentais precisamente definidas, sendo utilizados para soluções aquosas.

No caso da esterilização por vapor saturado, é recomendada a utilização de um BI contendo esporos de *Bacillus Stearothermophilus* com um valor D maior do que 1.5 min, um valor Z de 10°C e uma população superior 5×10^5 . O *Bacillus Stearothermophilus* é considerado o organismo de referência para a esterilização por vapor saturado tendo em vista o conhecimento de sua elevada resistência ao agente letal, quando comparado aos organismos contidos no bioburden.

Para um ciclo padrão é recomendado que não seja registrado nenhum crescimento para o BI depois de um tempo de exposição de 15 minutos a 121 ± 1 °C e um período de incubação pós-estudo.

Para a esterilização por vapor saturado, é recomendado um BI contendo esporos de *B. stearothermophillus* (ATTC 7953) com um valor D superior a 1.5 min, um valor Z de 10°C, e uma população superior a 5×10^5 . *B. stearothermophillus* é considerado o organismo de referência para a esterilização por vapor saturado uma vez que é conhecido por sua grande resistência ao agente letal, quando comparado com organismos contidos no bioburden. (4). Para um ciclo padrão, segundo recomendação da BP (British Pharmacopea), não deve ser registrado nenhum crescimento para o BI após um tempo de exposição de 15 min a 121 ± 1 °Ce um estudo após o período de incubação.

Para a obtenção de resultados significativos devem ser utilizados pelo menos 20 BIs por ciclo, visando demonstrar as condições de homogeneidade no interior da câmara do autoclave.

Apesar da abordagem biológica apresentar dificuldades do ponto de vista estatístico, este permite a determinação da letalidade no interior das cargas onde, por vezes, existe a dificuldade ou impossibilidade de colocação de sensores de temperatura, como por exemplo, dentro de ampolas.

3.3. Abordagem Matemática

O valor F é a medida da capacidade de inativação microbiana de um processo de esterilização por calor (NBR ISO 11134/2001).. O valor F vem a ser o intervalo de tempo de aquecimento necessário, à temperatura de referência constante, para se obter o nível de destruição pré-estabelecido. equivalente, em minutos, a 121,1 °C, de todo o calor considerado com respeito a sua capacidade de destruir esporos ou células vegetativas de um organismo particular, permitindo a comparação dos efeitos letais a várias temperaturas. Os parâmetros do ciclo de esterilização podem ser encontrados usando temperaturas diferentes de 121,1 °C com o auxílio do conceito de F_0 . A temperatura de 121,1 °C representa a temperatura do vapor saturado a aproximadamente 100 kPa. O valor F permite a comparação de efeitos de letalidade em várias temperaturas.

O valor total de F no processo pode ser calculado pela integração das taxas de letalidades com relação ao tempo em intervalos discretos de temperatura. Integrando a constante de letalidade $10^{(T-T_0)/Z}$ entre dois pontos t_0 e t_n obtemos a área sob a curva indicada na figura 9, repetida abaixo.

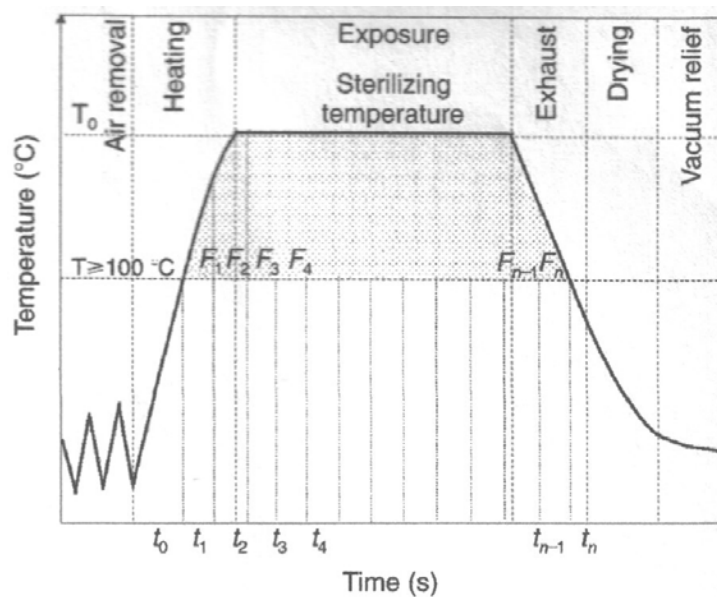


Figura 9: Ciclo de esterilização típico com retirada forçada de ar. Perfil da temperatura em relação ao tempo [B. M. Boca, E. Pretorius, R. Chapoullie, e Z. Apostolides. *NA overview of the validation approach for moist heat Sterilization, part I. Pharmaceutical Technology, 2002*].

Quando o valor F é calculado com a temperatura de referência = $121,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($250\text{ }^{\circ}\text{F}$), o valor $Z = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e valor D de 1 min , é chamado de F_0 . A abordagem matemática, também conhecida como abordagem anglo-saxônica, utiliza o valor F_0 como a unidade referência de letalidade. O valor F_0 pode ser calculado utilizando a equação abaixo. As informações de temperatura acumuladas ao longo de todo o processo são convertidas à letalidade equivalente a $121,1^{\circ}\text{C}$. Para fins práticos, temperaturas acima de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ são levadas em conta no cálculo (Boca e col., 2002). Deve-se dar ênfase à necessidade de o valor F_0 ser calculado a $121,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, e não a $121\text{ }^{\circ}\text{C}$, uma vez que a diferença de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ introduzir um erro de $2,4\%$ no valor final de F_0 .

$$F_0 = \int_{t_0}^{t_n} 10^{\left(\frac{t-121,1}{z}\right)} dt$$

A letalidade do processo de esterilização é influenciada pela efetividade da penetração de calor nos artigos e o tempo de esterilização. Pfeiffer, em BP 1983, indica que o processo de esterilização por calor precisa ser suficiente para produzir um valor equivalente de F_0 , de pelo menos 8 minutos. Isto significa que o ponto mais frio no interior da autoclave precisa ser exposto a um tempo equivalente de pelo menos 8 minutos a uma temperatura de $121,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta

representa a estimativa mais conservativa da letalidade e, desta forma, as condições mais seguras para a determinação do tempo dos ciclos.

Um F_0 equivalente a 8 minutos é considerado um valor mínimo real, tendo em vista o fato de a maioria dos microorganismos formadores de esporos ter um valor D entre 30 s e 1 min a 121,1 °C. Quando do estabelecimento de um ciclo, pode-se introduzir um fator de segurança adicional que leve em consideração o tempo extra necessário para que o vapor penetre em certos contêineres no meio e nos locais mais frios da câmara. Na prática os ciclos devem ser projetados com um valor de F_0 equivalente a 12 min.

Dependendo da natureza da carga podem ser utilizadas condições diferentes dos padrões normalmente encontrados, sendo necessária a obtenção de um nível de morte equivalente para estas condições. Uma elevada energia de ativação necessária para a morte de esporos pode ocasionar alterações, especialmente em preparados aquosos (18). A fim de se evitar a degradação de produtos é recomendado um ciclo mais longo, a temperaturas menores. Para outros produtos, tais como vitaminas, que podem sofrer processos de decomposição decorrentes de um tratamento prolongado a temperaturas menores, é mais vantajoso a aplicação de um tempo de exposição mais curto, a temperaturas maiores (Boca e col., 2002). Para avaliar o efeito de processos realizados a temperaturas diferentes de 121,1 °C, pode ser utilizada a equação a seguir, visando o cálculo do fator de letalidade F_T :

$$F_T^z = \frac{F_0}{10^{(T-121,1)/Z}} \text{ (min)}$$

Os valores D e Z são conhecidos para um determinado microorganismo, e F é a efetividade de morte à temperatura especificada para o processo, T (°C).

Como mencionado anteriormente, os dados de temperatura do produto, acumulados ao longo de todo o processo (aquecimento, exposição, resfriamento) são convertidos à letalidade equivalente em 121,1°C e integrados matematicamente ou graficamente para obter um valor de letalidade física expresso com os equivalentes em minutos da exposição em 121,1°C. Por exemplo,

cada minuto em $114,0^{\circ}\text{C}$ tem uma taxa de letalidade equivalente a 0,2 min em $121,1^{\circ}\text{C}$, se $Z=10$ K. Alguns programas podem calcular o valor de F do processo continuamente durante o ciclo de esterilização, usando a introdução de um ou mais sensores de temperatura no produto.

Este método para cálculo de F é conhecido também como método trapezoidal de PATASHNIK e só pode ser utilizado quando o intervalo de tempo entre duas leituras sucessivas de temperatura for constante e inferior a 2 minutos. Para este método, o número de medidas de temperatura do tempo de tratamento deverá ser o máximo possível, a fim de que o valor F seja muito próximo ao real (Penna e Machoshvili, 1997).

A abordagem biológica e matemática são complementares. A letalidade através de informações físicas do processo deve ser determinada em conjunto com estudos microbiológicos apropriados.

3.4. Termopares

Os *Termopares* podem ser considerados os mais simples de todos os sensores, consistindo de dois fios de metais distintos (termoelementos) unidos eletricamente próximo ao ponto de medição, formando um circuito. As junções dos dois fios, quando expostas a temperaturas diferentes geram uma força eletromotriz (*fem*). Este fenômeno foi descoberto em 1821, por Thomas Seebeck.

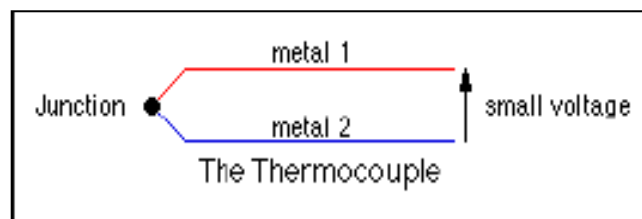


Figura 10: Esquemático de um termopar.

Em 1834 *Peltier* descobriu outro fenômeno termoelétrico, que hoje é conhecido pelo seu nome, *efeito Peltier*. Este fenômeno consiste na troca de calor que ocorre entre a junção do termopar e sua vizinhança (a junção absorve ou cede calor) com a passagem de uma corrente elétrica, troca esta que é revertida com a reversão do sentido da corrente.

Em 1854 *William Thomson* (Lord Kelvin) estabeleceu as relações matemáticas entre estes fenômenos e a temperatura através dos princípios da termodinâmica que estavam sendo criados.

A termoeletricidade é uma propriedade do material, isto é, do metal do fio condutor de eletricidade análogo à condutividade térmica. A corrente elétrica que surge no circuito da figura 11 quando as junções são expostas às temperaturas T_1 e T_2 não é devido a uma propriedade da junção, mas sim do gradiente de temperatura a que os fios do circuito ficam sujeitos. A explicação mais simples para este fenômeno é que o metal é formado por átomos em que alguns elétrons livres podem se mover, como as moléculas de um gás, na medida em que são influenciados por um campo elétrico, campo magnético ou por um gradiente de temperatura afetando o fio.

Em condições normais o número de elétrons se movendo em ambos os sentidos é igual e a corrente é nula. Quando sujeitos a um gradiente térmico, os elétrons livres na extremidade quente aumentam sua energia, aumentando a energia cinética, apresentando uma tendência a se difundir para a extremidade mais fria, cedendo sua energia cinética para a estrutura cristalina. Desta forma se dá o processo de condução térmica e o estabelecimento de um potencial elétrico. Os elétrons na extremidade fria com menor energia cinética se difundem então para a extremidade quente sob o efeito do potencial elétrico, produzindo assim, no fim, um equilíbrio dinâmico.

Na prática a *Tensão de Seebeck* é resultado da soma de dois componentes: a *Tensão de Peltier*, gerada nas junções, mais a *Tensão de Thomson* gerada nos fios pelo gradiente de temperatura.

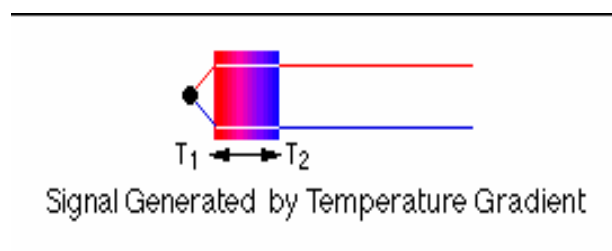


Figura 11: Sinal gerado pelo Gradiente de Temperatura.

A tensão de *Peltier* é proporcional à temperatura de cada junção enquanto que a tensão de *Thomson* é proporcional ao quadrado da diferença de temperatura entre as duas junções. Desta forma, é a tensão de *Thomson* a maior responsável pela tensão observada e pela não linearidade na resposta do termopar.

Cada termopar tem sua curva de tensão de *Seebeck* característica. A curva depende dos metais, de sua pureza, sua homogeneidade e de sua estrutura cristalina. No caso de ligas metálicas, a razão dos constituintes e sua distribuição no fio também são importantes. Estas potenciais características não homogêneas explicam o fato dos termopares com fios de pequena espessura serem mais precisos em aplicações em altas temperaturas, uma vez que os metais e suas impurezas adquirem mais mobilidades por difusão.

A fem termoelétrica ou tensão de *Seebeck*, E , que surge no circuito formado pela união dos condutores A e B, expostos a um gradiente térmico como na figura anterior, é matematicamente expressa pela fórmula:

$$E = \int_{T_2}^{T_1} S_A dT + \int_{T_1}^{T_2} S_B dT$$

Onde S_A e S_B são os coeficientes de Seebeck ou potência termoelétrica dos fios A e B e T_1 e T_2 as temperaturas das junções quente e fria.

Esta equação nos diz que a fem térmica líquida é o somatório da força eletromotriz desenvolvida ao longo dos fios A e B do circuito e que as junções só são necessárias para formar o circuito. Em outras palavras, a *fem termoelétrica* é gerada ao longo das regiões dos fios sujeitas a um gradiente de temperatura. Pode ser visto também que os coeficientes S_A e S_B são propriedades dos materiais dos fios que devem, portanto, ser os mais homogêneos possíveis, sob pena de produzirem erros significativos na medida.

Verifica-se também que as junções constituem regiões de péssima homogeneidade, devendo as mesmas ser tão pequenas quanto possível, além de serem mantidas em regiões isotérmicas para não gerarem *fem's* térmicas indesejáveis.

A convenção estabelecida é de que o fio A é positivo em relação ao fio B se na junção mais fria dentre os dois fios a corrente flui de A para B. A inversão da polaridade pode ser observada quando um termopar mede uma temperatura negativa, em que o condutor que era positivo torna-se negativo e vice-versa.

Como o termopar é um transdutor (uma pilha) que opera sempre quando submetido a duas temperaturas diferentes, isto é, ele mede uma diferença de temperatura, se convencionou usar uma das junções como de referência e sua temperatura é denominada temperatura de referência. A outra junção é denominada junção de medição porque é a ponta que é colocada no local cuja temperatura se quer medir.

A temperatura de referência nas tabelas dos termopares e geralmente usada em laboratórios é 0°C . Este é um ponto fixo de temperatura de fácil realização com altíssima exatidão para o propósito de termometria termoelétrica. Na prática dos laboratórios de calibração a temperatura da junção de referência é estabelecida através da realização do ponto do gelo. O circuito do termopar é aberto nesta junção para a ligação de fios de cobre que ligam o termopar ao dispositivo de leitura, ficando estas ligações, isoladas uma da outra, mersas no banho de gelo como na figura abaixo.

Na figura 11, verificamos que a junção de medição está numa temperatura desconhecida T_1 e a junção de referência na temperatura T_2 . Cada junção tem suas próprias características que dependem de fatores como:

- Material;
- Método de junção;
- Montagem;
- Histórico da junção;
- Outros.

O dispositivo de leitura pode ser um voltímetro que leia a *fem* em mV ou μV , um potenciômetro, ou um indicador digital pré-programado para converter a *fem* gerada diretamente em temperatura.

Mais de 300 tipos diferentes de termopares já foram estudados, mas apenas um pequeno número é utilizado de forma ampla. Os metais mais utilizados para sua construção são: liga de cromo e níquel (cromel), liga de cromo e alumínio (alumel), liga de cobre e níquel (constantan), cobre, níquel, ferro, liga de platina e ródio e platina pura, agrupados dois a dois conforme a temperatura em que vai operar e a natureza do sistema. Os termopares mais usuais são designados por tipos representados por letras originalmente atribuídas pela ISA, “Instrument Society of América” e atualmente adotados internacionalmente.

Devido às características físicas, os termopares são o método preferido de medição de temperatura em muitas aplicações. OS termopares podem ser muito rústicos, imunes a choques e vibrações, são utilizáveis em uma larga faixa de temperatura, são simples de serem fabricados, não necessitam de excitação, não são sujeitos a auto aquecimento e podem ser construídos muito pequenos. Nenhum outro sensor oferece tamanha versatilidade.

Por outro lado, os termopares produzem um *senal de saída relativamente baixo e não linear*. Estas características demandam um dispositivo de medição sensível e estável, capaz de oferecer uma compensação de junção de referência e linearização. Ainda com relação ao baixo sinal de saída, é necessário cuidado na instalação, a fim de se minimizar fontes de ruídos em potencial. O hardware de medição necessita de uma boa capacidade de rejeição de ruído.

Tipos de Termopares

A tabela abaixo apresenta as combinações de metais e ligas de termopares mais usadas e as faixas de temperatura nas quais são destinadas. A temperatura limite máxima a que um termopar pode ser exposto varia com o diâmetro do fio e a proteção dos mesmos. Na descrição dos fios consta a composição da liga conforme a norma ASTM E230 (98), ASTM E988-96 e ASTM E1751-00. Os sinais (+) e (-) designam respectivamente os termoelementos positivo e negativo. Quando não constar a letra que designa o tipo do termopar é porque ela ainda não foi atribuída.

| Tipo | Fio ou Liga | Faixa de Temperatura |
|-------------|---|-----------------------------|
| B | Platina – 30% ródio (+) X Platina + 6% ródio (-) | 0°C a 1820°C |
| E | Níquel – 10% cromo (+) X cobre + 45% níquel (constantan)(-) | -270°C a 1000°C |
| J | Ferro (+) X cobre – 45% níquel (constantan) (-) | -270°C a 1200°C |
| K | Níquel – 10% cromo X níquel – 5% alumínio (-) | -270°C a 1372°C |
| N | Níquel – 14% cromo X níquel – 5% alumínio (-) | -270°C a 1300°C |
| R | Platina – 13% ródio (+) X platina (-) | -50°C a 1768°C |
| S | Platina – 10% ródio (+) X platina (-) | -50°C a 1768°C |
| T | Cobre (+) X cobre – 45% Níquel (constantan0 (-) | -270°C a 400°C |
| - | Írídio-40% ródio (+) X irídio (-) | 0°C a 2210°C |
| - | Níquel -1 8% molibidênio (+) X níquel – 0,8% cobalto (-) | -50°C a 1410°C |
| - | Ouro (+) X platina (-) | 0°C a 1000°C |
| - | Platina (+) X paládio (-) | 0°C a 1500°C |
| - | Platina – 5% molibidênio (+) X platina – 0,1% molibidênio (-) | 0°C a 1600°C |
| - | Platina – 40% ródio (+) X platina – 20% ródio (-) | 0°C a 1888°C |
| - | Tungstênio (+) X tungstênio – 25% rênio (-) | 0°C a 2315°C |
| - | Tungstênio – 3% rênio (+) X tungstênio – 25% rênio (-) | 0°C a 2315°C |
| - | Tungstênio – 5% rênio (+) X tungstênio – 26% rênio (-) | 0°C a 2315°C |

Tabela 3: Tipos de Termopares.

Montagem de um Termopar

Existem diversos modos de se montar um termopar conforme a necessidade de uso, a temperatura e o ambiente em que ele será utilizado. Atenção especial deve ser dada às junções de medição e de referência, a utilização ou não de fios de extensão ou compensação, a isolamento e conectores.

Os fios de metais nobres devem ser tratados termicamente antes de serem montados para aumentar a estabilidade da *fem*. O tratamento é feito por recozimento dos fios. A função do recozimento é remover ou equilibrar defeitos físicos introduzidos, tensões originadas pelo trabalho a frio nos fios, remover contaminantes dos mesmos e equilibrar a estrutura cristalina dos átomos. Existem diferentes procedimentos para recozimento.

No que diz respeito à Isolação dos fios, existem vários modos, dependendo da aplicação do termopar. O tipo de isolação mineral é aquele em que os fios são montados isolados dentro de um tubo de proteção metálica por meio de uma cerâmica em pó compactada (por exemplo óxido de magnésio refratário). Esse tipo de montagem requer mais trabalho mas apresenta as seguintes vantagens:

- Redução da deriva de calibração ao longo do tempo
- Diminuição dos problemas com a temperatura em relação ao diâmetro dos fios, pois os fios ficam firmemente protegidos dentro da bainha possibilitando que fios de diâmetros menores sejam usados em temperaturas mais altas e por tempo maior com menor desgaste.
- Boa isolação dos fios mesmo em altas temperaturas.

Outros materiais usados para isolação dos fios são:

- PVC;
- Teflon;
- Fibra de vidro;
- Miçangas de cerâmica;
- Barras de cerâmica com 2 ou mais furos.

As junções devem ser escolhidas considerando o tamanho delas e o diâmetro dos fios com a necessidade de uso. Deve-se ter em mente que a junção é uma zona de pequena homogeneidade e é importante que ela seja mantida em uma região de temperatura uniforme para que a não-homogeneidade existente produza

uma *fem* espúria introduzindo erros na medição. Quanto maior a junção, maior precisa ser a imersão.

As junções podem ser preparadas soldando-se as pontas dos fios, torcendo-as ou mantendo-as unidas através de grampos. Quando utilizada solda, devem-se tomar as devidas precauções quanto ao tipo de solda e fluxo. Nos termopares com tubo de proteção metálica a junção pode ser aterrada, isto é, soldada no tubo de proteção, ou não aterrada, isolada do tubo de proteção.

Fios e cabos de extensão ou de compensação são meios usados para conectar os fios dos termopares à junção de referência ou outra parte do circuito que possuem grosseiramente as mesmas propriedades termoelétricas que os fios dos termopares correspondentes. Os fios ou cabos de extensão são fabricados com o mesmo material dos termopares aos quais se conectam. Estes cabos ou fios têm, portanto, a mesma curva característica *fem* x temperatura do termopar em questão, embora suas limitações de uso sejam maiores do que as destes últimos, decorrente da homogeneidade inferior de seus fios. Os termopares de metais dos tipos básicos: E, J, K e T utilizam-se de fios ou cabos de extensão.

Os fios e cabos de compensação são fabricados de materiais diferentes dos termopares, mas apresentam a mesma curva característica *fem* x temperatura são usados principalmente com os termopares de metais nobres (platina), tipo S e R.

O uso de fios ou cabos de extensão ou compensação é recomendado desde a temperatura ambiente até cerca de 100⁰C, pois nesta faixa, mesmo com qualidade inferior em relação ao fio do termopar, eles não comprometem a exatidão da medição além das tolerâncias a eles embutidas. Seu uso acima desta temperatura poderá introduzir erros significativos para o processo cuja temperatura se precisa medir. Eles devem se usados quando as junções de medição e de referência ficam muito afastadas, por exemplo, quando o sinal do termopar precisa ser levado para uma sala de controle afastada do equipamento onde o termopar está instalado. Em medições de alta exatidão não é recomendável usar fios ou cabos de extensão u compensação. A faixa de temperatura mais ampla

que estes tipos de fios ou cabos de extensão u de compensação podem ser usados se estende de -40°C até 200°C .

Principais Fontes de Erro com Termopares

Dada a amplitude de uso, as fontes de erro com termopares são muitas e difíceis de serem determinadas com exatidão. Em uma análise deve ser levada em conta a agressividade do meio onde é instalado, as condições em que opera, a influência das interferências eletromagnéticas sobre o circuito do termopar, a junção de referência, a condução do calor, a estabilidade do termopar, de modo que, todo o conhecimento prévio e experiência do operador são importantes na tarefa.

Erro de Imersão

Todo termopar conduz calor através dele mesmo, de dentro do corpo para fora quando a temperatura do corpo é maior do que a do ambiente externo ou vice-versa. Assim, é importante verificar se o instrumento está adequadamente imerso de modo a não sofrer interferência do meio externo.

Um bom modo de se determinar a imersão mínima de um termopar é testar o mesmo em uma temperatura de referência que se saiba ser bem estável imergindo o termopar a cada 2 cm e tomando as leituras da fem quando estabilizada, até que se verifique que uma imersão de mais 2 cm não muda significativamente a resposta do instrumento.

Como o laboratório de calibração deve ter feito este estudo para calibrar o instrumento e a imersão usada na calibração deve ser declarada no certificado de calibração, o usuário deve usar a mesma profundidade de calibração. Um termopar é muito sensível a homogeneidade do material dos fios e assim para medir uma imersão diferente da de calibração o operador deve investigar o erro que pode advir desta fonte.

Erro de Homogeneidade

Mesmo sendo uma das principais fontes de erro com termopares, não há um procedimento normalizado para sua determinação. Sabe-se que as mudanças são algumas vezes reversíveis e em outras irreversíveis, produzindo deriva e histerese na resposta do instrumento. Quando o operador precisar realmente conhecer a homogeneidade ele deve avaliá-la em um meio térmico de alta homogeneidade, isto é, um meio com uma uniformidade térmica pelo menos 20 vezes maior do que a homogeneidade esperada para o seu instrumento. No caso de só precisar de uma estimativa da influência da homogeneidade para a incerteza, ele pode considerar um percentual da tolerância da pior classe como uma contribuição do tipo B.

Um teste de homogeneidade pode ser realizado facilmente colocando-se ambas as junções do termopar em um banho de gelo. Conecta-se o termopar a um sistema de aquisição de dados ou um registrador gráfico. Este dispositivo deve ser capaz de realizar leituras próximas do zero. Pode ser necessário para isso utilizar um amplificador de sinal. Um dispositivo como um aquecedor elétrico, uma lâmpada ou mesmo um secador de cabelo é deslocado ao longo do comprimento do fio em uma velocidade suficientemente baixa para permitir o equilíbrio térmico entre o aquecedor e a parte do termopar sendo testada. Este movimento de translação do dispositivo de aquecimento pode ser realizado por um motor de passo ou um dispositivo mecânico que possibilite um deslocamento lento e constante do aquecedor. Se os fios forem homogêneos a saída do termopar será sempre 0 μV . Um sinal diferente de zero significa uma não homogeneidade no fio do termopar.

Em uma calibração uma zona de não homogeneidade de um termopar pode estar localizada completamente em uma região isotérmica e não produzir qualquer influência no resultado da calibração. Porém, quando em uso, se o termopar for colocado em um profundidade de imersão diferente daquela da calibração, de forma que a zona de não-homogeneidade se situe em uma região de gradiente de temperatura, poderão ocorrer sérios erros na medição da temperatura. Por essa

razão nos certificados de calibração de termopares sempre deve ser citada a profundidade de imersão usada em cada ponto de calibração.

Erro devido à resistência dos fios

A resistência do circuito do termopar tem um determinado valor geralmente baixo. Como o termopar funciona como uma pilha, o dispositivo de leitura precisa ser um instrumento de alta impedância, isto é, sua resistência interna deve ser muito maior que a resistência do circuito (como em um potenciômetro ou em um bom voltímetro digital), sob pena do dispositivo de leitura drenar corrente alta do circuito e a indicação da *fem* gerada ser afetada pela resistência do circuito.

Erro devido à Junção de Referência

A temperatura da junção de referência deve ser bem conhecida, isto é, devem ser estabelecidos seu valor e sua incerteza. Também aqui o cuidado com aprofundidade de imersão deve ser tomado. É preciso ter em mente que o instrumento precisa de um tempo para entrar em equilíbrio com o meio. O ponto de gelo feito de água destilada possibilita uma incerteza tão baixa quanto $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ ou ainda menor, enquanto uma junta de compensação eletrônica pode contribuir com até $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Calibração de Termopar

A calibração de um termopar consiste na determinação de sua fem em um número suficiente de temperaturas conhecidas que possibilite com algum procedimento de interpolação conhecer a resposta do instrumento em toda a faixa de temperatura da calibração. A calibração pode ser realizada através da comparação com outro termômetro padrão calibrado, ou realizada em pontos fixos de temperatura. Neste trabalho abordaremos o primeiro método.

Calibração de Termopares por Comparação.

A calibração de um termopar por comparação com um termômetro padrão calibrado pode ser executada convenientemente pela maioria dos laboratórios. Quando realizada com cuidado é suficiente para atender a maioria das necessidades industriais. O sucesso deste método depende da habilidade em manter o termopar e o termômetro padrão à mesma temperatura, dentro dos limites necessários para se atingir a incerteza requerida. Devem ser tomados cuidados na escolha do meio e das condições sob as quais as comparações são realizadas.

A escolha do termômetro padrão deve ser feita segundo a incerteza e a faixa de temperatura para calibração. Há várias possibilidades: quando se requer a menor incerteza possível, o padrão deve ser um termopar do tipo S, R ou B se a faixa se estender de 0°C até acima de 1000°C; ou um termômetro padrão de resistência de alta temperatura (TPRAT) se a faixa de calibração não ultrapassar a temperatura de 960°C, ou um termômetro de resistência de platina de 25Ω se a faixa de calibração se estender de -200°C a 660°C, ou um termopar de Au-Pt se a faixa for entre 0°C e 1000°C. Para incertezas maiores pode ser um TRP de 100 Ω industrial na faixa entre -200°C e 650°C, etc.

A calibração pode ser feita em banhos comparadores de líquido agitado. Tanto os fornos como os banhos devem, antes de ser usados na calibração, serem avaliados quanto à homogeneidade da temperatura na zona de trabalho. Isso deve ser realizado com pelo menos dois padrões de forma a se conhecer os gradientes de temperatura axiais e radiais na zona onde se localizam os sensores.

Na faixa de até 550°C a melhor incerteza de calibração é obtida quando:

- O padrão é um termômetro de resistência de platina;
- A calibração é feita em banho de líquido agitado;
- Intervalo entre os pontos de calibração é de 50 graus em toda a faixa. Acima de 550°C há pouca alternativa à utilização de um forno para se realizar a calibração. Nestes casos é altamente recomendável o uso de um

forno com um bloco de equalização de temperatura na região onde se situam os sensores dos termômetros a serem comparados.

Na calibração em fornos a comparação é realizada dentro de um bloco de equalização de temperatura), aquecido em um forno. O bloco de equalização é um cilindro de aço ou cerâmica com poços para inserção dos termômetros a serem comparados. Fornos para calibração devem sempre trabalhar com blocos de equalização, de modo que a folga entre a bainha dos termômetros e a parede dos poços ou furos seja mínima para evitar desequilíbrio de temperatura.

Um bloco pode conter um ou vários orifícios; pode ter um central e outros em círculos, igualmente espaçados um do outro e equidistantes do centro, ou outra configuração. Depois de introduzidos os sensores nos poços, o espaço vazio até a boca do forno é preenchido com fibra cerâmica ou outro material isolante adequado, a fim de evitar perdas de calor, que piorem a equalização da temperatura no interior do bloco. Quando houver um orifício central, o termômetro padrão é colocado nele e os demais sensores nos outros. As leituras devem ser realizadas quando for verificado que há estabilidade nas indicações de temperatura.

Um terceiro metal pode ser introduzido em um circuito de termopar e não oferecer nenhum impacto, desde que ambas as extremidades estejam a mesma temperatura. Isto significa que a junção de medição do termopar pode ser soldada, fundida etc, sem afetar a calibração do termopar, enquanto não houver gradiente de temperatura no terceiro metal. Além disso, se o circuito metálico de medição, normalmente cobre, for diferente do termopar, se a temperatura dos dois terminais de conexão for a mesma e conhecida, a leitura não será afetada pela presença do cobre.

A saída do termopar é gerada pelo gradiente de temperatura ao longo dos fios a não nas junções como é comum ouvirmos. Assim, é importante que a qualidade do fio seja mantida onde existir gradiente de temperatura. A qualidade do fio pode ser comprometida por contaminação oriunda do ambiente de operação

e do material de isolamento. Para temperaturas abaixo de 400°C , a contaminação de fios isolados não é geralmente um problema. Em temperaturas acima de 1000°C , a escolha dos materiais de isolamento e proteção, bem como a espessura do fio, tornam-se fatores críticos para a estabilidade da calibração do termopar.

A tensão gerada por um termopar é uma função da diferença de temperatura entre as junções de medição e de referência. Tradicionalmente a junção de referência era mantida a 0°C por meio de uma banho de gelo.

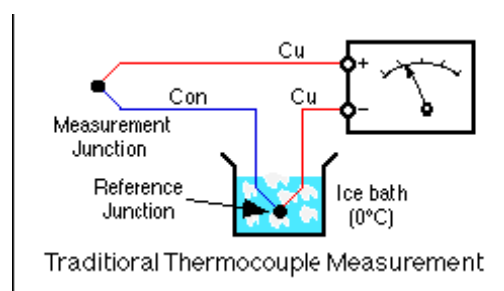


Figura 12: Medição Tradicional de um Termopar.

O banho de gelo não é mais considerado prático, sendo substituído por um arranjo de compensação da junção de referência. Esta compensação pode ser obtida através da medição da temperatura da junção de referência com um sensor de temperatura alternativo (tipicamente um RTD ou Thermistor) e aplicando-se uma tensão de correção à tensão do termopar medida.

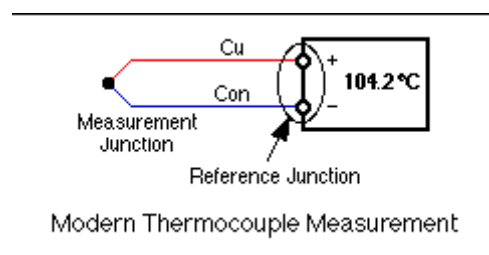


Figura 13: Medição moderna de um Termopar.

A correção pode ser feita eletricamente no hardware ou matematicamente através do software. A correção via software é a mais adotada uma vez que é universal para todos os tipos de termopares e permite a correção de pequenas não-linearidades dentro da faixa de temperatura.

O baixo nível de saída dos termopares (tipicamente 50 mV) requer cuidados especiais a fim de evitarmos interferências elétricas provenientes de motores, cabos de força e transformadores. Enrolando o par de fios, 1 volta a cada 10 cm, pode-se reduzir grandemente interferências de campos magnéticos. Utilizando-se cabos blindados ou enrolado estes em tubos metálicos pode-se reduzir enormemente as interferências oriundas de campos elétricos. O instrumento de medição deve oferecer filtragem de sinal, seja através de hardware ou software, com alta rejeição da frequência de linha (50/60 Hz) e seus harmônicos.

O ambiente de operação do termopares precisa ser considerado. A exposição a atmosferas oxidantes ou redutoras em temperaturas elevadas pode degradar de forma significativa alguns termopares. Termopares contendo Rhodium (tipos B, R e S) não são adequados sob radiação de nêutrons.

Precisão dos Termopares

Os termopares são capazes de funcionar em uma ampla faixa de temperatura, indo do zero absoluto ao seu ponto de fusão. No entanto, são caracterizados apenas dentro da sua faixa de estabilidade. Precisão de termopares é um assunto difícil devido a vários fatores. Em primeiro lugar e na prática, um termopar pode obter excelentes resultados (melhor do que a tabela acima indica) se calibrado, usado bem abaixo de limite superior de temperatura e se bem protegido contra ambientes desfavoráveis. Em altas temperaturas, é sempre melhor utilizar um fio mais duro a fim de manter a estabilidade.

Como mencionado anteriormente, as escalas de temperatura e tensão foram redefinidas em 1990. Os oito principais tipos de termopares (B, E, J, K, N, R, S e T) foram recharacterizados em 1993 a fim de refletir as alterações nas escalas. Os tipos remanescentes – C, D, G, L, M, O e U – parecem ter sido recharacterizados informalmente.

Compensação e Linearização de Termopares

Para medirmos a tensão de Seebeck de um termopar não podemos simplesmente conectar o termopar a um voltímetro ou outro sistema de medição qualquer, uma vez que ao conectarmos os fios de um termopar a um sistema de medição estamos criando circuitos termoelétricos adicionais.

Considere o circuito abaixo, no qual um termopar do tipo J está na chama de uma vela cuja temperatura se que medir. Os dois fios do termopar são conectados a fios de cobre. A partir daí podemos notar que o circuito apresenta 3 (três) junções (J1, J2 e J3). A junção J1, a junção do termopar, gera uma tensão de *Seebeck* proporcional a temperatura da chama da vela. J2 e J3, cada uma, tem seu próprio coeficiente de *Seebeck* e geram suas próprias tensões termoelétricas proporcionais às temperaturas dos terminais. A fim de terminar a contribuição de tensão da junção J1 é necessário saber as temperaturas das junções J2 e J3, bem como as relações Tensão x Temperatura destas junções. Após isso, pode-se subtrair as contribuições dos termopares parasitas em J2 e J3 da tensão medida.

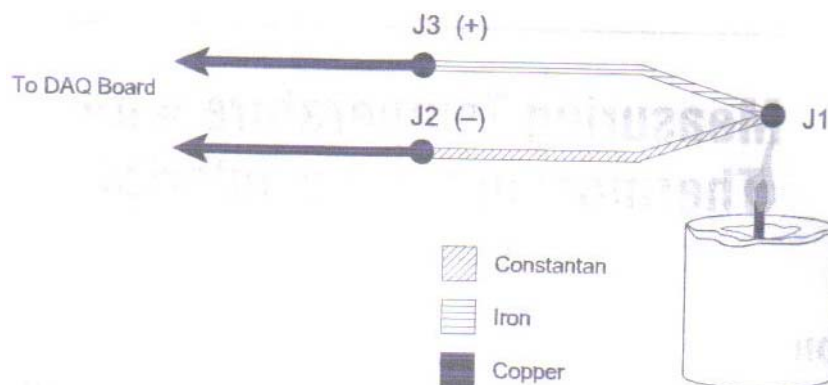


Figura 14: Contribuições de junções de Temperatura.

Compensação da junção Fria

Os termopares necessitam de alguma temperatura de referência para compensar os indesejáveis termopares parasitas. O termo junção fria vem da

prática tradicional de mantermos a junção de referência a 0 °C em um banho de gelo. As tabelas de referência de termopares do NIST são criadas com este arranjo, conforme ilustrado na figura abaixo.

Como pode ser verificado na figura 14, a tensão medida depende da diferença de temperatura entre T_1 e T_{ref} . Neste caso T_{ref} é 0 °C. Perceba que devido ao fato das conexões do multímetro estarem na mesma temperatura, ou isotérmica, as tensões geradas nestes dois pontos são iguais e opostas.

Sob estas condições, se a temperatura de medição estiver acima de 0 °C o termopar tem uma saída positiva, no caso de estar abaixo de 0 °C, a saída é negativa. Quando a junção de referência e a junção de medição estão a mesma temperatura, a tensão de rede é zero.

Ainda que um banho de gelo de referência seja preciso, não é muito prático. Uma abordagem mais prática é medir a temperatura da junção de referência com um sensor de temperatura de leitura direta e subtrair as contribuições de tensão dos termopares parasitas. Este processo é chamado compensação de junção fria, que pode ser simplificada a través das características dos termopares.

Utilizando a lei dos metais intermediários dos termopares e fazendo algumas suposições, podemos concluir que a tensão medida depende apenas do tipo de termopar, da tensão do termopar e da temperatura da junção fria. A tensão medida é de fato independente da composição das pontas de medição e das junções frias J2 e J3.

De acordo com a Lei dos metais intermediários dos termopares, ilustrada na figura abaixo, inserindo qualquer tipo de fio em um circuito de termopar, não é verificado nenhum efeito sobre a saída sempre que as temperaturas em ambos os terminais dos fios estiverem a mesma temperatura ou isotérmicos.

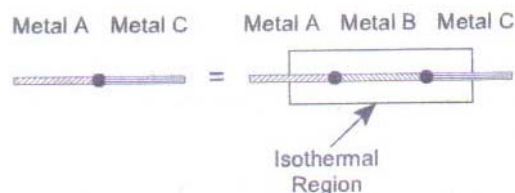


Figura 15: Lei dos Metais Intermediários.

Considere o circuito da figura 16. Esta figura é similar a mostrada anteriormente, com a diferença que foi introduzido um pequeno comprimento de fio de constantan próximo à junção J3, considerando que as junções estão a mesma temperatura. Assumindo que as junções J3 e J4 estão a mesma temperatura, a Lei dos metais intermediários dos termopares indica que o circuito na figura abaixo é eletricamente equivalente ao circuito anteriormente apresentada. Conseqüentemente, qualquer resultado obtido do circuito abaixo se aplica ao circuito apresentado anteriormente.

Na, as junções J2 e J4 são do mesmo tipo, cobre-constantan. Como ambas estão em uma região isotérmica, J2 e J4 estão também na mesma temperatura. As junções ocorrem em direções opostas, sendo a contribuição total igual a zero. As junções J1 e J3 são ambas ferro-constantan, também em direções opostas, podendo estar em temperaturas diferentes. Assim, as junções J1 e J3 são as únicas junções com saídas que apresentam algum efeito sobre a tensão total medida.

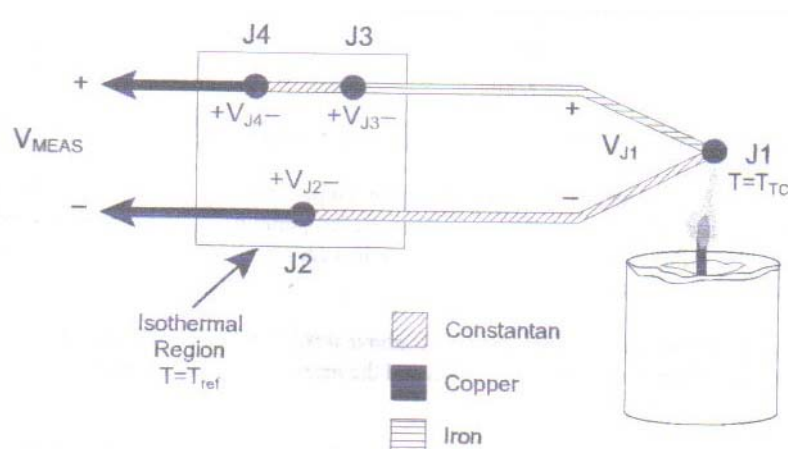


Figura 16: Cálculo da Tensão medida pelo dispositivo.

Utilizando a notação $V_{Jx}(T_y)$ para indicar a tensão gerada pela Junção J_x a temperatura T_y , o probel geral dos termopares é reduzido a seguinte equação:

$$V_{MEAS} = V_{J1}(T_{TC}) + V_{J3}(T_{REF}) \quad (2)$$

Onde:

V_{MEAS} – Tensão medida pelo dispositivo

T_{TC} – Temperatura do termopar em J1

T_{REF} – Temperatura da Junção de Referência

Note que na equação (2), $V_{Jx}(T_y)$ é a tensão gerada a temperatura T_y com referência a alguma temperatura. Sendo ambas as tensões V_{J1} e V_{J3} funções da temperatura relativa a mesma temperatura de referência, esta equação é válida. Como mencionado anteriormente, as tabelas de referência pra termopares do NIST são geradas com a junção de referência a 0°C .

Como a junção J3 é do mesmo tipo que J1, mas em direção oposta, $V_{J3}(T_{ref}) = -V_{J1}(T_{ref})$. Como V_{J1} é a tensão que o tipo de termopar sob teste gera, pode ser renomeada V_{TC} . Assim, a equação (2) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$V_{MEAS} = V_{TC}(T_{TC}) - V_{TC}(T_{REF}) \quad (3)$$

Desta forma, medindo-se V_{MEAS} e T_{ref} , e conhecendo a relação tensão x temperatura do termopar, pode-se determinar a temperatura do termopar.

Existem 2 (duas) técnicas para implementar a compensação da junção fria: compensação por hardware e software. Ambas as técnicas exigem que a temperatura da junção de referência seja medida com um sensor de leitura direta. Um sensor de leitura direta tem uma saída que depende apenas da temperatura do ponto de medição. Semicondutores, RTD's ou termistores são normalmente utilizados para medir a temperatura da junção de referência.

Compensação por Hardware

Na compensação por hardware, uma fonte de tensão variável é inserida no circuito a fim de cancelar a contribuição da tensão termoelétrica parasita. A fonte de tensão variável gera uma tensão de compensação de acordo com a temperatura ambiente, adicionando assim a correta tensão para cancelar o sinal termoelétrico indesejável. Quando estes sinais parasitas são cancelados, o único sinal medido pelo instrumento de medição é a tensão da junção de medição. Com a compensação por hardware, a temperatura dos terminais do instrumento de medição é irrelevante uma vez que as tensões termoelétricas parasitas são canceladas. A maior desvantagem da compensação por hardware é que para cada tipo de termopar é necessário um determinado circuito de compensação que possa adicionar a tensão de compensação correta, tornando o circuito muito caro, bem como é menos precisa do que a compensação por software.

Compensação por Software

Uma alternativa é a utilização da compensação da junção fria por software. Depois do sensor de leitura direta medir a temperatura da junção de referência, o software pode adicionar o valor de tensão apropriado à tensão medida a fim de eliminar os efeitos termoelétricos parasitas.

Existem dois processos para determinar a temperatura de um termopar quando dadas a tensão medida (V_{MEAS}) e a temperatura da junção de referência (T_{REF}). O primeiro método é mais preciso, mas o segundo requer poucos passos computacionais.

Processo 1 – Método da Adição Direta de Tensão para a Compensação de junção Fria

O método de compensação mais preciso utiliza dois passos para a conversão Tensão x Temperatura.

Da equação (3) é possível sabermos a tensão de circuito aberto que o termopar produziria com a junção de referência a 0 °C, conforme segue:

$$V_{TC}(T_{TC}) = V_{MEAS} + V_{TC}(T_{REF}) \quad (4)$$

Os passos necessários são:

1. Medir a temperatura da junção de referência, T_{REF}
2. Converta esta temperatura na tensão equivalente para o termopar sob teste, $V_{TC}(T_{REF})$. Podem ser utilizadas as tabelas de referência do NIST ou polinômios que assumam a temperatura da junção de referência a 0°C.
3. Some esta tensão equivalente à tensão medida, V_{MEAS} a fim de obter a verdadeira tensão de circuito aberto que o termopar produziria com a temperatura da junção de referência a 0 °C, $V_{TC}(T_{TC})$
4. Converter a tensão resultante em temperatura. Este valor é a temperatura do termopar, T_{TC} .

Este método de compensação exige a transformação da temperatura da junção em tensão do termopar, seguida de uma transformação da nova tensão em temperatura. Cada um destes passos de transformação exige uma aplicação polinomial ou uma consulta à tabela. No entanto, é mais preciso do que o método seguinte.

Processo 2 – Método da Adição de Temperatura para a Compensação de junção Fria

Uma segunda abordagem através da compensação por software, mais simples, utiliza o fato da tensão de saída dos termopares ser aproximadamente linear em pequenos desvios de temperatura. Desta forma, para pequenos desvios de temperatura, podemos utilizar a seguinte equação:

$$V_{TC}(T_1) - V_{TC}(T_2) = V_{TC}(T_1 - T_2) \quad (5)$$

Esta consideração é verdadeira se T_1 for próxima de T_2 tendo em vista o fato da curva Tensão x Temperatura do termopar ser aproximadamente linear para pequenas variações de temperatura. Se considerarmos que a temperatura do termopar é relativamente próxima a temperatura de referência, podemos reescrever a equação (3) da seguinte forma:

$$V_{MEAS} = V_{TC}(T_{TC} - T_{REF}) \quad (6)$$

Lembre-se de que se você estiver utilizando as tabelas de referência dos termopares do NIST ou equações, a tensão V_{TC} é uma função da temperatura relativa à tensão de referência de 0 °C. Considerando a linearidade e utilizando a equação (6), considere que a curva Tensão x Temperatura com temperatura de referência 0 °C é idêntica à curva com a temperatura de referência T_{REF} . Desta forma, podemos converter a tensão medida em temperatura utilizando as tabelas de referência do NIST. Esta temperatura é a diferença entre as temperaturas T_{TC} e T_{REF} . Assim, o método segue os seguintes passos:

1. Medir a temperatura da junção de referência, T_{REF}
2. Converter a tensão medida V_{MEAS} em temperatura utilizando a relação Tensão x Temperatura do termopar. Esta temperatura é aproximadamente a diferença entre as temperaturas do termopar e da junção de referência, $T_{TC} - T_{REF}$
3. Some a temperatura da junção de referência, T_{REF} a este valor. Esta é a temperatura do termopar.

Este método economiza um passo em relação ao método anterior, mas é menos preciso.

Linearização dos dados

A tensão de saída de um termopar é altamente não linear. O coeficiente de Seebeck varia com um fator de 3 ou mais dentro da faixa de temperatura de alguns termopares. Com isso, torna-se necessária a linearização da curva Tensão x Temperatura utilizando polinômios ou utilizar uma tabela de consulta.

$$T = a_0 + a_1V + a_2V^2 + \dots + a_nV^n \quad (7)$$

V – Tensão do termopar em Volts

T – Temperatura em graus Celsius

A_i – Coeficientes específicos para cada tipo de termopar

Os erros apresentados na tabela acima aplicam-se apenas no cálculo polinomial, e não leva em conta os erros introduzidos pelo sistema de medição ou pelo próprio termopar.

O procedimento 1 para compensação de junção fria por software também exige a conversão da temperatura de junção fria através da curva Tensão X Temperatura na tensão equivalente para o tipo específico de termopar. Novamente, é possível a utilização das tabelas referenciais de termopares, ou aproximação da curva através de um polinômio. O NIST também especifica um conjunto de polinômios para a tensão do termopar como uma função da temperatura.

$$V = c_0 + c_1T + c_2T^2 + \dots + c_nT^n \quad (8)$$

Onde C_i são os coeficientes específicos para cada um dos tipos de termopares.

O termopar selecionado para o trabalho proposto foi o termopar do tipo T, na bitola de 24 AWG, com ponteira hermeticamente fechada em Teflon fundido e cabo em teflon 5000 mm.