



Coordenação Geral de Acreditação

ORIENTAÇÕES PARA A CALIBRAÇÃO DE TERMÔMETROS DE INFRAVERMELHO (PIRÔMETROS)

Documento de caráter orientativo

DOQ-CGCRE-054

Revisão 01 – ABR/2020



SUMÁRIO

1 Objetivo

2 Campo de Aplicação

3 Responsabilidade

4 Histórico das Revisões

5 Documentos de Referência

6 Siglas

7 Tradução Brasileira do MSL Guia Técnico 2: Ponto de Gelo na Termometria de Radiação

8 Tradução Brasileira do MSL Guia Técnico 22: Calibração de Termômetros de Infravermelho (pirômetros) de baixa temperatura

1 OBJETIVO

O presente documento reúne a tradução brasileira, mediante autorização, de três documentos sobre a calibração de termômetros de infravermelho (pirômetros). Ele foi desenvolvido com o objetivo de harmonizar as práticas de calibração pelos laboratórios acreditados pela Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro (Cgcre) para esse serviço.

Este documento foi elaborado de acordo com as normativas nacionais e internacionais e contém aplicações sobre os requisitos da acreditação. Caso o laboratório siga estas orientações, atende aos respectivos requisitos; caso contrário, o laboratório deve demonstrar como é assegurado o seu atendimento. As não conformidades constatadas em uma avaliação são registradas contra o requisito da acreditação e não contra este documento orientativo, porém as orientações deste documento serão consideradas pelos avaliadores e especialistas.

2 CAMPO DE APLICAÇÃO

Este documento aplica-se à Dicla, aos laboratórios de calibração acreditados e postulantes à acreditação na área de Temperatura e Umidade e aos avaliadores e especialistas da Cgcre nesta área.

3 RESPONSABILIDADE

A responsabilidade pela aprovação de qualquer revisão deste documento é da Dicla/Cgcre.

4 HISTÓRICO DAS REVISÕES

Revisão	Data	Itens revisados
0	MAR/2014	- Documento inicial.
1	ABR/2020	- Revisão do DOQ para uniformizar a formatação dos Documentos Orientativos da Cgcre.



5 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

Para referências, devem ser utilizadas as últimas edições dos documentos a seguir, incluindo eventuais emendas:

ABNT NBR 17025	ISO/IEC	Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração.
Blackbody spreadsheet	correction	http://msl.irl.cri.nz/sites/all/files/training-manuals/tg22-blackbodycorrections.xls
DOQ-Cgcre-009		Orientação para a acreditação de laboratórios para o grupo de serviços de calibração em Temperatura e Umidade
MSL Technical Guide 2		Infrared Thermometry: Ice Point http://msl.irl.cri.nz .
MSL Technical Guide 22		Calibration of Low-Temperature Infrared Thermometers http://msl.irl.cri.nz
NIT-Dicla-012		Relação padronizada de serviços acreditados para laboratórios de calibração

6 SIGLAS

Cgcre	Coordenação Geral de Acreditação
CT-11	Comissão Técnica de Assessoramento às Atividades de Acreditação da Cgcre na Área de Temperatura e Umidade
Dicla	Divisão de Acreditação de Laboratórios
DOQ	Documento Orientativo da Qualidade
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MSL	<i>Measurement Standards Lab (Laboratório de Normas de Medição)</i>

7 TRADUÇÃO BRASILEIRA DO MSL GUIA TÉCNICO 2: PONTO DE GELO NA TERMOMETRIA DE RADIAÇÃO

7.1 Introdução e Escopo

Nos últimos anos, os termômetros de radiação tornaram-se amplamente utilizados em processos, manutenção de instalações e indústrias de alimentos. Sua capacidade de medir temperatura sem contato apresenta vantagens óbvias nos casos em que os materiais do processo estão em movimento, ou em que se deve evitar contaminação. Como todos os instrumentos de medição, os termômetros de radiação são propensos a erros decorrentes de deriva com o tempo e danos acumulados. Onde for necessário que as medições satisfaçam regulamentos de segurança e de saúde, tais erros podem implicar em graves consequências para a saúde, a segurança ou a economia. Este guia técnico descreve como realizar a temperatura de referência 0 °C utilizando gelo e assegurar que o termômetro de radiação esteja funcionando corretamente.

A verificação no ponto de gelo é um método simples e eficaz para avaliar o funcionamento de qualquer termômetro projetado para trabalhar próximo de 0 °C. Deve ser efetuada e registrada regularmente; uma súbita mudança ou deriva persistente no ponto de gelo é frequentemente a primeira indicação de uma falha no instrumento.



7.2 Emissividade e corpos negros

Todos os objetos emitem radiação infravermelha caracterizada por intensidade e comprimento de onda, ambos dependentes da temperatura. A maioria dos termômetros de radiação portáteis de baixa temperatura opera ao longo de uma banda única, tipicamente próximo a $4\ \mu\text{m}$ ou na faixa de $8\text{-}14\ \mu\text{m}$. A temperatura de um objeto é obtida medindo-se a intensidade da radiação emitida pelo objeto nesse comprimento de onda.

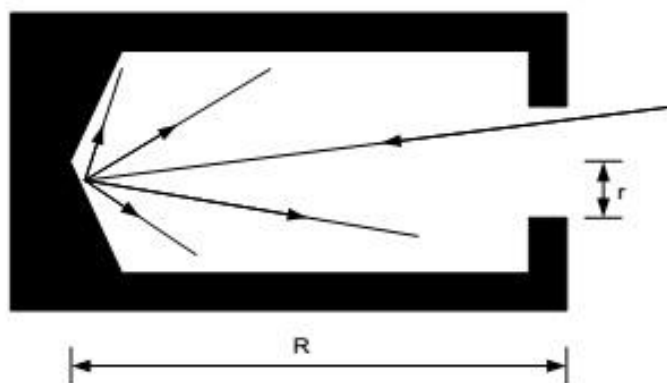
A capacidade de objetos de emitir e absorver a radiação (infravermelha ou visível) é descrita através de uma propriedade denominada emissividade; muitos termômetros de radiação possuem ajuste para compensar a emissividade da superfície. Os valores de emissividade variam de zero para superfícies más emissoras, aproximando-se de 1,0 para objetos bons emissores de radiação.

Emissividade e refletividade são propriedades complementares. As superfícies com baixa emissividade são boas refletoras de radiação e vice-versa. Para objetos opacos (não transparentes), a soma da emissividade com a refletividade é igual a 1,0. Um objeto com emissividade 0,9 tem uma refletividade de 0,1 e, portanto, reflete 0,1 (10%) de toda a radiação que incide sobre sua superfície.

Uma boa temperatura de referência para termômetros de radiação requer uma superfície com emissividade elevada (baixa refletividade), mantida em temperatura controlada. O ponto de fusão do gelo possui ambas as propriedades.

Embora o gelo seja transparente nos comprimentos de onda visíveis, nos comprimentos de onda infravermelho maiores que cerca de $2\ \mu\text{m}$, gelo e água tornam-se cada vez mais opacos. Para estes comprimentos de onda, a água possui emissividade aproximada de 0,96. Em outras palavras, se pudéssemos enxergar no infravermelho, o gelo pareceria preto.

Figura 1. Representação simples de uma cavidade de corpo negro. Quanto maior a relação entre o tamanho da cavidade, R , e a abertura, r , maior a emissividade da cavidade.



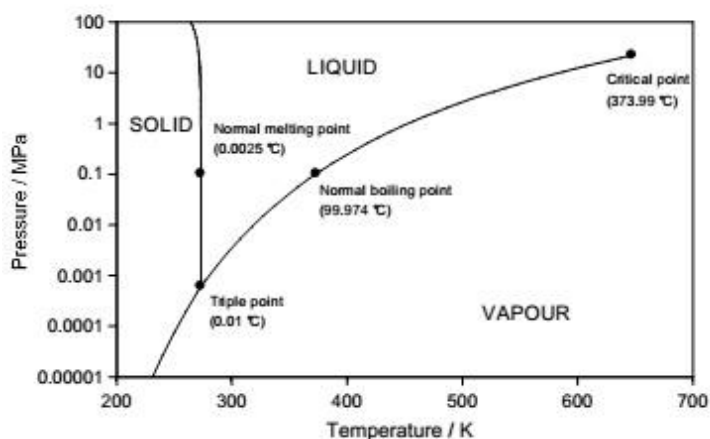
Podemos melhorar a emissividade de objetos construindo as assim chamadas “cavidades de corpo negro”, conforme mostrado na Figura 1. O princípio é certificar-se de que qualquer radiação que entre na cavidade seja absorvida; uma vez que não há reflexões, a emissividade da cavidade deve ser 1,0. A cavidade do corpo negro ideal é um emissor e absorvedor de radiação perfeito.

7.3 O Ponto de gelo

A Figura 2 mostra o diagrama de fases da água; ele ilustra as diferentes temperaturas e pressões em que a água existe como gelo, líquido ou vapor d'água. Notavelmente, o ponto de fusão do gelo (a fronteira entre as fases sólida e líquida) é muito próximo de 0 °C para todas as pressões atmosféricas normais.

Na verdade, para a faixa normal de pressão atmosférica, o ponto de fusão do gelo puro é muito próximo de 0,0025 °C. Um "erro" adicional causado por gás dissolvido na água e no gelo faz com que o ponto de fusão fique muito próximo de 0 °C. Historicamente, o ponto de gelo foi o ponto de definição de muitas escalas de temperatura, até o desenvolvimento das células do ponto triplo da água (0,01 °C), mais precisas. Entretanto, o ponto de gelo ainda tem um papel importante na termometria, uma vez que é um ponto fixo facilmente obtido por qualquer laboratório, com o mínimo dispêndio de recursos. Desde que os princípios básicos aqui descritos sejam seguidos, é relativamente simples realizar a temperatura de referência 0 °C, com uma exatidão de $\pm 0,1$ °C ou melhor.

Figura 2. O diagrama de fases da água pura mostra as diferentes temperaturas e pressões nas quais a água existe como líquido, sólido (gelo) e vapor.



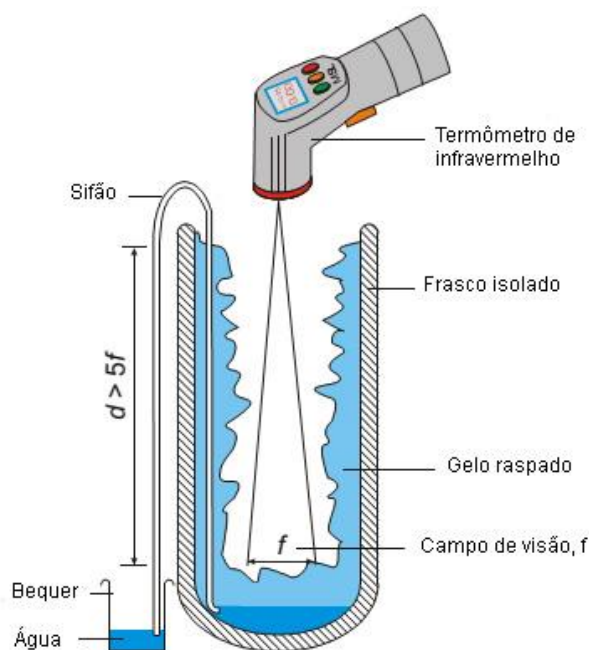
7.4 O Equipamento

Para montar um ponto de gelo para termômetros de radiação, você vai precisar de:

- 1) Um **recipiente isolado**, por exemplo, por vácuo (um *dewar* ou garrafa térmica), de poliestireno expandido ou frasco para fabricação de iogurte, com cerca de 120 mm a 140 mm de diâmetro. O frasco deve ser suficientemente profundo para que se possa fazer um buraco no gelo com profundidade de aproximadamente cinco vezes o diâmetro do campo de visão do termômetro de IV (ver Figura 6.3). Deve haver uma profundidade extra de 50 mm a 100 mm, prevendo-se o acúmulo de gelo fundido (água).
- 2) Um **sifão**, o qual será colocado no frasco (ver Figura 6.3) para permitir a remoção do excesso de água, que deverá ser mantido em nível mínimo, à medida que o gelo derrete. É necessário assegurar que o nível de água não suba acima do fundo da cavidade, caso contrário a temperatura do fundo da cavidade pode ser superior a 0 °C.

- 3) **Gelo limpo, raspado**, livre de impurezas e, idealmente, obtido a partir de água destilada ou deionizada. Pelo fato de o congelamento ser também um processo de purificação, o gelo de qualidade alimentar, produzido em congeladores que empregam um processo de lavagem, também é satisfatório. A água da torneira limpa é muitas vezes satisfatória, mas deve ser evitada, já que poderá estar contaminada ou carregar uma elevada concentração de aditivos oriundos do processo de tratamento de água. O gelo deve ser raspado ou triturado, de preferência em pequenas lâminas, utilizando-se um triturador de gelo comercial. Uma alternativa de baixo custo, satisfatória para uso não frequente, é um processador de alimentos com um disco ralador. Observe que os discos com lâminas ou facas não são adequados, porque não cortam o gelo de forma eficaz e o processador será rapidamente danificado.
- 4) Aproximadamente **300 mL de água fria** e limpa. A água destilada ou deionizada é a ideal, assim como a água que se fundiu a partir do gelo.

Figura 6.3. Corpo negro do ponto de gelo



7.5 O Procedimento

Primeiramente, encha um terço do recipiente com água limpa. O gelo que acabou de ser raspado é muitas vezes mais frio do que 0 °C; molhar o gelo, entretanto, assegura que entrará em fusão. A diferença na condição do gelo é facilmente visível, já que o gelo frio congela o vapor d'água da atmosfera, dando-lhe uma aparência branca. O gelo úmido tem uma aparência translúcida clara.

Com auxílio do sifão, drene o excesso de água e compacte o gelo para formar uma pasta compactada. Em seguida, molde uma cavidade no restante do gelo, assegurando que a parte inferior da cavidade de gelo seja suficientemente larga para preencher todo o campo de visão do termômetro. As paredes da cavidade de gelo devem ser ásperas, de modo que a radiação se disperse aleatoriamente no interior da cavidade, para assegurar a uniformidade.



Leia o termômetro várias vezes com intervalos de poucos minutos, para ter certeza de que as paredes do frasco atingiram o equilíbrio com o gelo. Note que para termômetros de radiação cuja emissividade seja inferior a 1,00 (por exemplo, muitos termômetros têm uma configuração fixa de emissividade em 0,95), não se espera que, quando medindo o ponto de gelo, a indicação seja 0,0 °C, porém um pouco menor. Ver MSL Guia Técnico 22: “Calibração de Termômetros de Infravermelho de Baixa Temperatura” para uma discussão sobre este assunto, assim como métodos e gráficos para se determinar a indicação esperada para um dado valor de emissividade.

7.6 Referências

J V Nicholas e D R White, Traceable Temperatures — Segunda Edição, John Wiley and Sons, Chichester, 2001.

MSL Guia Técnico 1: “O ponto de gelo”, — <http://msl.irl.cri.nz>

MSL Guia Técnico 22: “Calibração de termômetros de infravermelho de baixa temperatura”,— <http://msl.irl.cri.nz>

Elaborado por M Bart, P Saunders e D R White, maio de 2004.

O MSL é o instituto nacional de metrologia da Nova Zelândia e opera na *Industrial Research Limited*, pela autoridade do *New Zealand Measurement Standards Act 1992*.

8 TRADUÇÃO BRASILEIRA DO MSL GUIA TÉCNICO 22: CALIBRAÇÃO DE TERMÔMETROS DE INFRAVERMELHO (PIRÔMETROS) DE BAIXA TEMPERATURA

8.1 Introdução

O advento de termômetros de infravermelho (IV) portáteis, de baixo custo, levou à proliferação de medições de temperatura sem contato nas indústrias alimentícia, de construção e de processamento em baixas temperaturas. No entanto, esses instrumentos não são tão simples de usar como aparentam, devido a efeitos sistemáticos presentes em quase todas as medições.

Este guia técnico fornece informação relacionada à calibração de termômetros de IV de “baixa temperatura”, que tipicamente medem temperaturas na faixa de -50 °C a 500 °C (ver Figura 7.1). Esses termômetros costumam usar detetores tipo termopilha não resfriados, que detectam radiação na faixa espectral de 8 μm a 14 μm (ou similar). Pelo fato de esses detetores não serem resfriados, a radiação emitida pelo próprio detetor deve ser considerada no processo de calibração. O ajuste de emissividade do termômetro, o qual é frequentemente fixado no valor de 0,95, e qualquer radiação refletida do ambiente, devem igualmente ser considerados.

Como consequência desses efeitos sistemáticos, os métodos de calibração são mais complexos do que para termômetros de contato ou termômetros de radiação de alta temperatura. A indicação esperada, mesmo em um termômetro de IV perfeito, não corresponde necessariamente à indicação do termômetro de referência. Este guia indica os procedimentos para determinar as correções necessárias.



Figura 8.1. Termômetro de infravermelho portátil de baixa temperatura típico



Fonte: cortesia da Fluke Corporation, reproduzida com permissão

Este guia começa com uma breve descrição dos princípios da termometria de infravermelho, fornecendo detalhes dos processos de medição utilizados no interior dos próprios pirômetros. Por necessidade, há algum detalhe matemático que não pode ser evitado por qualquer laboratório que deseje estabelecer os procedimentos de calibração para termômetros de IV. No entanto, uma vez compreendida, a matemática pode ser facilmente implementada em uma planilha eletrônica. Um exemplo de planilha Excel está disponível para download com este guia.

8.2 Como os Termômetros de IV medem temperatura

8.2.1 Espectro eletromagnético

Todos os objetos emitem radiação na forma de ondas eletromagnéticas. Essa radiação é distribuída em todo o espectro eletromagnético, desde as ondas de rádio, passando por micro-ondas, radiação infravermelha, luz visível, luz ultravioleta, raios-x e raios gama. A distribuição real e a intensidade da radiação emitida por um objeto específico é principalmente determinada pela temperatura do objeto. Para objetos em temperaturas próximas à temperatura ambiente, quase toda a radiação emitida está contida na parte infravermelha do espectro, em comprimentos de onda próximos a 10 micra ($10 \mu\text{m}$). Para objetos com temperatura próxima de $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, a radiação está centralizada próxima do comprimento de onda mais curto, de $2 \mu\text{m}$.

Através da medição da radiação em um comprimento de onda fixo, ou mais corretamente ao longo de um intervalo de comprimento de onda fixo, um termômetro de IV pode determinar a temperatura de um objeto a partir da intensidade do sinal medido na saída do seu detetor de radiação; quanto maior o sinal, mais elevada será a temperatura. Muitos termômetros de IV são projetados para medir radiação na faixa de comprimento de onda de $8\text{-}14 \mu\text{m}$; esses instrumentos são adequados para medir as temperaturas na faixa de $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ a $500 \text{ }^\circ\text{C}$ e, em alguns casos, acima disso. Para temperaturas fora deste intervalo, os termômetros que operam em diferentes comprimentos de onda são mais adequados.



8.2.2 Função Resposta do Pirômetro

O sinal medido é geralmente a corrente ou a tensão na saída do detetor do termômetro de IV. Normalmente, isso não é de grande utilidade para o usuário, que deseja conhecer a que temperatura corresponde este sinal. Acontece que o sinal varia de forma altamente não linear, como função da temperatura do objeto alvo. Essa não linearidade significa, por exemplo, que dobrar o sinal não corresponde a dobrar a temperatura. A relação entre o sinal do detetor e a temperatura é dada por uma função de resposta do pirômetro, a qual é bem aproximada pela equação:

$$S(T) = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT+B}\right) - 1} \quad (7.1)$$

onde A, B e C são constantes relacionadas às propriedades do termômetro de IV e c_2 é uma constante universal com o valor de 14.388 $\mu\text{m.K}$. Observe que o valor de T na equação (7.1) apresenta unidade em kelvin, a qual se relaciona com a mais comumente usada unidades em graus Celsius da forma:

$$T/K = t/^{\circ}\text{C} + 273,15 \quad (7.2)$$

Assim, uma temperatura ambiente de 20 $^{\circ}\text{C}$ corresponde a uma temperatura na escala Kelvin de 293,15 K.

A relação representada pela equação (7.1) é determinada pelo fabricante de um termômetro de IV sendo processada eletronicamente no interior do termômetro para produzir uma indicação em graus Celsius no visor do pirômetro. Esta conversão do sinal para temperatura é, portanto, oculta ao usuário e usualmente não é de grande interesse para ele.

No entanto, para calibrar um termômetro de IV, o laboratório de calibração necessita ter conhecimento dos detalhes desse processo de conversão. (Isso também é verdade em muitas situações de medição, mas o uso de termômetros de IV em campo não é abrangido por este guia.) A conversão do sinal para temperatura pode ser representada pelo inverso da equação (7.1):

$$T = \frac{c_2}{A \ln\left(\frac{C}{S} + 1\right)} - \frac{B}{A} \quad (7.3)$$

A solução das equações (7.1) e (7.3) requer apenas o conhecimento dos parâmetros A e B do termômetro. Pelo fato de a calibração de um termômetro de IV envolver a determinação de correções de temperatura, verifica-se que o valor de C não é importante, contanto que seja sempre utilizado o mesmo valor para todos os cálculos. Portanto, podemos simplesmente atribuir $C = 1$, na solução das equações (7.1) e (7.3). A e B estão ambos relacionados ao comprimento de onda no qual o termômetro de IV opera:

$$A = \lambda_0 \left(1 - \frac{\Delta\lambda^2}{2\lambda_0^2}\right) \quad (7.4)$$

$$B = \frac{c_2 \Delta\lambda^2}{24\lambda_0^2} \quad (7.5)$$

onde λ_0 é o comprimento de onda central da faixa e $\Delta\lambda$ é a largura da faixa de comprimento de onda. Assim, para um termômetro de IV que opere na faixa de 8-14 μm , obtemos $\lambda_0 = 11 \mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 6 \mu\text{m}$ e as equações (4) e (5) fornecem $A = 9,36 \mu\text{m}$ e $B = 178 \mu\text{m.K}$, respectivamente.

Podemos ilustrar a conversão de temperatura para sinal usando esses valores (em conjunto com $C = 1$) na equação (7.1). Por exemplo, para uma temperatura de 50 $^{\circ}\text{C}$ (323,15 K), a equação (7.1) dá $S = 0,01132$. (A conversão de sinal para temperatura pode, então, ser verificada ao se usar esse valor de S na equação (7.3) para recalculer o valor de $T = 323,15 \text{ K}$).



Enquanto muitos termômetros de IV de baixa temperatura operam acima desta faixa de comprimento de onda de 8-14 μm , existem muitas outras faixas também em uso, tal como 8-13 μm e 7-18 μm . É importante verificar as especificações para determinar o intervalo de comprimento de onda real utilizado.

8.3 Influências nas Indicações dos Termômetros de IV

8.3.1 Emissividade

A intensidade da radiação emitida por um objeto depende não só da sua temperatura, mas também de uma propriedade chamada emissividade. Emissividade é um número que varia de 0 a 1, que caracteriza o quão bem um objeto emite radiação. Um objeto com uma emissividade de 1 é chamado de corpo negro (um emissor perfeito). Um objeto com uma emissividade de 0,8 emite 80% da radiação emitida por um corpo negro; um objeto com uma emissividade de 0,5 emite 50% da radiação emitida por um corpo negro e assim por diante.

8.3.2 Emissividade Instrumental

Devido à influência da emissividade, objetos diferentes à mesma temperatura produzirão diferentes sinais de termômetro de IV e fornecerão indicações correspondentemente diferentes. Para dar tratamento a esse fato, os termômetros de IV possuem o que se chama de ajuste da "emissividade instrumental", o qual deve ser feito pelo usuário para o valor da emissividade da superfície do objeto alvo. Em alguns modelos de termômetros, a emissividade instrumental não pode ser ajustada, mas é fixa em um valor de, geralmente, 0,95 e, algumas vezes, 0,97. Esses instrumentos possuem aplicação limitada.

8.3.3 Radiação refletida

Uma complicação adicional nas medições de termometria de IV é que os objetos que não são corpos negros, porém são refletores parciais de radiação. Para qualquer objeto opaco, a emissividade e refletividade sempre somam 1. Assim, um objeto com uma emissividade de 0,8 apresenta uma refletividade de 0,2. Isto significa que 20% de toda a radiação emitida a partir de objetos circundantes e que atinge o objeto alvo, será refletida. Essa radiação refletida será detectada pelo termômetro de IV e adicionada à radiação emitida pelo objeto alvo. Assim, a indicação do pirômetro não depende apenas da temperatura do alvo, mas também da temperatura dos seus arredores. Objetos bons emissores (que apresentam emissividade próxima de 1) tendem a ser pretos; quanto maior a emissividade de uma superfície, menor a refletividade e, portanto, menor o efeito dos arredores na indicação do termômetro.

8.3.4 Detetor de radiação

Finalmente, o próprio detetor também emite radiação. O sinal na saída do detetor corresponde à diferença entre a radiação que chega a partir do alvo (incluindo a radiação refletida) e a radiação emitida pelo próprio detetor. Todos os termômetros de IV de baixo custo utilizam detetores não resfriados; assim, o detetor estará à temperatura ambiente ou um pouco acima dela. Se o alvo estiver abaixo de 200 °C, a radiação emitida pelo detetor será uma fração significativa da radiação incidente e deve ser considerada. Alguns termômetros de IV utilizam dispositivos termoelétricos para resfriar o detetor bem abaixo da temperatura ambiente. Nesses modelos mais caros, a radiação do detetor pode ser normalmente desprezada para a maioria das temperaturas do alvo, porém esses instrumentos não são abordados neste guia.



8.3.5 Equação de medição

A inclusão de todos estes efeitos - a emissividade do alvo, a radiação refletida e a radiação emitida pelo detetor - resulta num sinal medido, S_{meas} , na saída do detetor, dada por uma equação de medição que consiste na soma de três termos:

$$S_{meas} = \varepsilon_s S(T_s) + (1 - \varepsilon_s)S(T_w) - S(T_d) \quad (7.6)$$

onde T_s é a temperatura do alvo (a grandeza de interesse), T_w é a temperatura dos arredores (geralmente as paredes da sala), T_d é a temperatura do detetor, ε_s é a emissividade da superfície do alvo e $1 - \varepsilon_s$ é a sua refletividade. Cada um dos três termos no lado direito da equação (7.6) corresponde a um componente diferente de radiação: o primeiro, $\varepsilon_s S(T_s)$, corresponde à radiação emitida pelo alvo; o segundo, $(1 - \varepsilon_s) S(T_w)$, à radiação refletida pelos arredores; e o terceiro, $S(T_d)$, à radiação emitida pelo detetor. Cada uma das funções $S(T)$ pode ser calculada através da inserção do valor de temperatura apropriado na equação (7.1), lembrando de antes converter as temperaturas de graus Celsius para kelvin.

8.4 Processamento do sinal medido

Se o sinal medido, S_{meas} , dado pela equação (7.6) for substituído na equação (7.3) de conversão de sinal para temperatura, o resultado não será a temperatura alvo T_s devido às influências da emissividade do alvo, da temperatura dos arredores e da temperatura do detetor (ε_s , T_w e T_d). A fim de produzir uma indicação que melhor represente a temperatura alvo, o termómetro de IV pré-processa o sinal medido antes da conversão para a temperatura, de forma a aplicar correções para as influências acima. Para fazer isso de forma confiável, o termómetro deve, de alguma forma, obter valores para as três variáveis de influência (ε_s , T_w e T_d).

A temperatura do detetor, T_d , pode ser precisamente determinada utilizando-se um sensor de temperatura interno montado diretamente no detetor. Sua medição ocorre automaticamente como parte do processo de medição do pirómetro IV e é completamente inacessível ao usuário.

Para termómetros de IV com emissividade instrumental ajustável, ε_{instr} , o usuário pode informar ao termómetro o valor da emissividade do alvo, ajustando adequadamente ε_{instr} . Para instrumentos de emissividade fixa, o fabricante projeta o termómetro para realizar medições apenas em objetos específicos (ou seja, objetos que têm aquele valor de emissividade). Muitos produtos alimentares, plásticos, materiais feitos a partir de compostos orgânicos (por exemplo, papel, madeira e pele) e a maioria das tintas tem emissividades próximas a 0,95 na faixa de 8-14 μm (isto é, eles são quase negros), por isso 0,95 é frequentemente escolhido como o valor da emissividade instrumental fixa.

Finalmente, a temperatura dos arredores, T_w , dependerá da situação da medição e irá variar de medição para medição. Para essa variável de influência, a maioria dos fabricantes de termómetros de IV supõem que T_w será aproximadamente a mesma da temperatura do detetor, T_d . Em outras palavras, assumem que todas as medições serão realizadas à temperatura ambiente. De modo geral, essa suposição é boa durante a calibração em um laboratório bem controlado, mas pode ser muito enganadora em outras situações de medição. Estas incluem armazenagem refrigerada, na qual a temperatura do ambiente se situa muito abaixo da temperatura do termómetro e situações em que os produtos a serem medidos estão rodeados por objetos quentes, tais como aquecedores, os quais estão bem acima da temperatura do termómetro.



Munido dessa informação, o termômetro de IV processa o sinal medido como se segue: primeiro o sinal medido é dividido pelo ajuste de emissividade instrumental; em seguida um valor correspondente ao sinal da temperatura do detetor é adicionado (isto é, um valor dado pela equação (7.1) com $T = T_d$ informada); finalmente, o valor do sinal resultante é convertido para o valor de uma temperatura medida, T_{meas} .

Isso é representado matematicamente como:

$$S(T_{meas}) = \frac{S_{meas}}{\epsilon_{instr}} + S(T_d) \quad (7.7)$$

8.5 Erros de medição

Quais são as consequências desse processamento de sinal? Para responder, primeiro substituímos S_{meas} da equação (7.6) na equação (7.7):

$$S(T_{meas}) = \frac{\epsilon_s S(T_s) + (1 - \epsilon_s) S(T_w) - (1 - \epsilon_{instr}) S(T_d)}{\epsilon_{instr}} \quad (7.8)$$

Podemos reescrever como a soma de três termos:

$$S(T_{meas}) = S(T_s) + \left[\frac{(1 - \epsilon_{instr})}{\epsilon_{instr}} S(T_w) - S(T_d) \right] + \left[\frac{(\epsilon_s - \epsilon_{instr})}{\epsilon_{instr}} [S(T_s) - S(T_w)] \right] \quad (7.9)$$

Se o segundo e terceiro termos desta equação forem ambos zero, então, a equação fica simplesmente $S(T_{meas}) = S(T_s)$. Isso implica que $T_{meas} = T_s$, ou seja, que a temperatura medida é igual à temperatura do alvo, que é o que se deseja. No entanto, quando a segunda ou a terceira linha da equação não forem zero, elas representarão erros. Nesse caso, a temperatura medida não é mais igual à temperatura do alvo.

O segundo termo é zero quando $\epsilon_{instr} = 1$ ou $T_w = T_d$. A condição $T_w = T_d$ é uma suposição dos fabricantes, mencionada acima. A equação (7.9) nos permite quantificar o erro quando essa condição não é satisfeita. Ajustar $\epsilon_{instr} = 1$ (se possível) é frequentemente uma boa estratégia, porque então a temperatura medida, T_{meas} fica independente de T_d , como pode ser visto a partir das equações (7.8) e (7.9). No entanto, isso pode introduzir erro por meio da terceira linha da equação (7.9).

O terceiro termo é zero quando $\epsilon_{instr} = \epsilon_s$ ou $T_s = T_w$, ou seja, quando a emissividade instrumental corresponder à emissividade do alvo, ou a temperatura alvo for a mesma da dos arredores. O ajuste incorreto da emissividade instrumental leva a um erro que aumenta à medida que a diferença entre essas duas temperaturas aumenta. O usuário não tem nenhum controle sobre esse erro para instrumentos com emissividade fixa, a menos que a condição $T_s = T_w$ se verifique.

Para resumir, apenas quando $T_w = T_d$ e $\epsilon_{instr} = \epsilon_s$ é que a indicação de um termômetro de IV será igual à temperatura verdadeira do alvo. Se qualquer uma dessas condições não se verificar, então, a indicação do termômetro apresentará erro. A única exceção é quando o alvo for um corpo negro ($\epsilon_{instr} = 1$) ou quando prevalecerem condições de corpo negro ($T_s = T_w$) e a emissividade instrumental também tiver sido ajustada para 1, caso em que a indicação não dependerá de T_w nem de T_d .



8.6 Calibração

Os erros discutidos acima ocorrem em quase todas as medições com termômetros de IV e cuidados devem ser tomados para garantir que esses erros não sejam excessivos. Eles também podem ocorrer durante a calibração, porque as condições para as quais os erros são zero ($T_W = T_d$ e $\varepsilon_{instr} = \varepsilon_s$) raramente são verificadas. Então, como calibrar um termômetro de IV quando são esperados erros nas indicações, mesmo para um termômetro perfeito? A resposta é que devemos primeiramente calcular as indicações previstas para um dispositivo ideal nas condições de calibração, e verificar quão próximas as indicações reais estão das esperadas. Ou, de outra forma, já que invariavelmente usamos corpos negros para calibrar termômetros IV, precisamos calcular as "correções de corpo negro", que se aplicam às indicações do nosso termômetro de referência, antes de compará-las com as indicações do instrumento em calibração.

Corpos negros convencionais são feitos a partir de cavidades, de modo a que a sua emissividade efetiva seja muito próxima de 1 (ver Figura 7.2). Essas cavidades de corpo negro incluem fornos especialmente construídos e insertos em calibradores com bloco. Pode-se estimar a emissividade efetiva de uma cavidade, ε_{bb} , a partir do seu comprimento L , do raio da sua abertura, r e da emissividade do material de que é fabricado, ε_s :

$$\varepsilon_{bb} = 1 - (1 - \varepsilon_s) \left(\frac{r}{L}\right)^2 \quad (7.10)$$

Por exemplo, uma cavidade construída com um material de emissividade 0,9 (aço inoxidável oxidado), cujo comprimento é 150 mm e cuja abertura possui um raio de 25 mm, apresenta uma emissividade efetiva de:

$$\varepsilon_{bb} = 1 - (1 - 0,9) \left(\frac{25}{150}\right)^2 = 0,997$$

Os calibradores de placa plana também são utilizados como fontes de corpo negro (ver Figura 7.3). No entanto, sua emissividade é usualmente próxima a 0,95, de modo que não são corpos negros verdadeiros. Para a finalidade deste guia, porém, ambos os tipos de fontes de radiação serão referidos como corpos negros, sendo distinguidos por suas emissividades efetivas.

Figura 8.2. Uma cavidade de corpo negro de comprimento L e raio de abertura r , cujas paredes têm uma emissividade ε_s . A emissividade efetiva da cavidade é dada pela equação (7.10). Em uso, a cavidade é aquecida uniformemente em um forno ou calibrador de bloco seco.

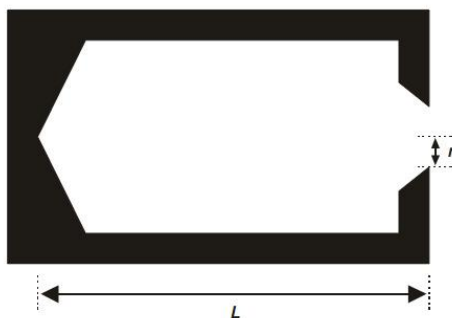


Figura 8.3. Calibrador de placa plana sendo focalizado por um termômetro de IV



Fonte: cortesia da Fluke Corporation, Divisão Hart Scientific, reproduzido com permissão

8.6.1 Termômetro de contato como referência

Quando um termômetro de contato é utilizado como referência, é importante que fique posicionado de forma a medir a temperatura verdadeira do corpo negro. Isso é especialmente importante para os calibradores de placa plana, nos quais os gradientes de temperatura podem conduzir a diferenças entre a temperatura da placa, para a qual o termômetro de IV em calibração é apontado e a temperatura no local do termômetro de referência (geralmente por trás da superfície da placa).

Em um laboratório de calibração, a temperatura dos arredores é geralmente igual à temperatura ambiente, T_{amb} . Assim, podemos reescrever a equação (7.8) para a indicação do termômetro esperada, T_{exp} , como:

$$S(T_{exp}) = \frac{\varepsilon_{bb}S(T_{ref}) + (1 - \varepsilon_{bb})S(T_{amb}) - (1 - \varepsilon_{instr})S(T_d)}{\varepsilon_{instr}} \quad (7.11)$$

onde ε_{bb} é a emissividade efetiva do corpo negro e T_{ref} é a temperatura verdadeira do corpo negro, conforme determinada pelo termômetro de referência. O segundo termo no numerador da equação (7.11) corresponde à radiação ambiente que entra na cavidade do corpo negro a partir dos arredores e encontra o seu caminho de volta, ou a radiação que é refletida pela placa plana. Para o caso da cavidade, cuja emissividade efetiva é, geralmente, muito próxima de 1, esse termo será muito pequeno.

Para um dado conjunto de condições, a temperatura esperada pode ser calculada por meio da solução do lado direito da equação (7.11) [com ajuda da equação (7.1) para determinar $S(T_{ref})$, $S(T_{amb})$ e $S(T_d)$], fornecendo assim $S(T_{exp})$, de modo que a equação (7.3) pode ser usada para extrair T_{exp} a partir de $S(T_{exp})$. A "correção de corpo negro", ΔT_{bb} , é a diferença entre a indicação esperada e a indicação do termômetro de referência:

$$\Delta T_{bb} = T_{exp} - T_{ref} \quad (7.12)$$



Esta correção de corpo negro pode ser adicionada à indicação do termômetro de referência para se obter a indicação esperada do termômetro de IV. Estes cálculos são facilmente realizados em uma planilha Excel (ver <http://msl.irl.cri.nz/sites/all/files/training-manuals/tg22-blackbodycorrections.xls> - acesso em 24/01/2014).

Um exemplo de cálculo é dado na Tabela 8.1, para a calibração de um termômetro de IV de 8-14 μm , cuja emissividade instrumental é fixada em 0,95, usando-se uma cavidade de corpo negro com uma emissividade efetiva de 0,997. No exemplo, a temperatura ambiente é 20 °C e a temperatura do detetor é 21 °C. Note-se que a temperatura do detetor não é geralmente conhecida, uma vez que não é exibida no dispositivo, portanto o seu valor tem de ser aproximado ou estimado para se calcular as correções de corpo negro. Os valores da Tabela 7.1 fornecem um meio para você verificar se suas planilhas estão corretas.

A Figura 7.4 ilustra as correções de corpo negro para toda a faixa de temperatura de corpo negro, de -50 °C a 500 °C. Também é mostrado o efeito de diferentes temperaturas do detetor. A temperatura do detetor pode diferir da temperatura ambiente, caso o pirômetro tenha sido armazenado numa sala a uma temperatura diferente daquela do laboratório de calibração e não tiver transcorrido tempo suficiente para ambientação, antes de se realizarem as medições. O detetor pode também tornar-se mais quente do que o ambiente se colocado na frente de um corpo negro quente por certo período de tempo. Como a Figura 7.4 mostra, existe apenas uma fraca dependência da correção do corpo negro em relação à temperatura do detetor, especialmente em temperaturas mais baixas. A maior parte da correção é devida ao fato de que $\epsilon_{instr} \neq \epsilon_{bb}$.

Se a emissividade instrumental não for fixa, então ajustá-la para 1 elimina qualquer dependência da indicação em relação à temperatura do detetor [ver equação (7.11)]. Quando a calibração for realizada utilizando-se uma cavidade de corpo negro com emissividade efetiva próxima a 1 deve-se esperar que as correções de corpo negro sejam muito menores do que as ilustradas na Figura 7.4, porque agora $\epsilon_{instr} \approx \epsilon_{bb}$. Este é o caso mostrado pela linha sólida na Figura 7.5. No entanto, se o corpo negro for um calibrador de placa plana com emissividade de 0,95, devem ser aplicadas correções de corpo negro maiores, conforme ilustra a tracejada na Figura 7.5. Para um corpo negro de placa plana, as correções de corpo negro serão menores se a emissividade instrumental for ajustada para corresponder à ϵ_{bb} , ou seja, $\epsilon_{instr} = 0,95$. Essas correções são mostradas na Figura 7.6. Quando a temperatura do detetor também coincide com a do ambiente, as correções são todas zero, independentemente da temperatura do corpo negro.

Tabela 8.1. Cálculo das correções de corpo negro para três valores de T_{ref} para um termômetro de IV de 8-14 μm ($A = 9,36 \mu\text{m}$, $B = 178 \mu\text{m.K}$) com $\epsilon_{instr} = 0,95$, $\epsilon_{bb} = 0,997$, $T_{amb} = 20 \text{ °C}$ e $T_d = 21 \text{ °C}$.

T_{ref} (°C)	$S(T_{ref})$ [eq.(1)]	$S(T_{amb})$ [eq.(1)]	$S(T_d)$ [eq.(1)]	$S(T_{exp})$ [eq.(11)]	T_{exp} (°C) [eq.(3)]	ΔT_{bb} (°C) [eq.(12)]
-50	0,00175	0,00732	0,00744	0,00147	-56,5	-6,5
100	0,02025	0,00732	0,00744	0,02088	103,0	3,0
500	0,16773	0,00732	0,00744	0,17566	516,4	16,4



Figura 8.4. Correções para a temperatura de uma fonte de corpo negro, cuja emissividade efetiva é $\epsilon_{bb} = 0,997$, para dar indicação esperada para um termômetro de IV de 8-14 μm , pirômetro com uma emissividade fixa de $\epsilon_{instr} = 0.95$. A temperatura ambiente é assumida como $T_{amb} = 20\text{ }^\circ\text{C}$ e a temperatura do detetor é conforme indicada no gráfico.

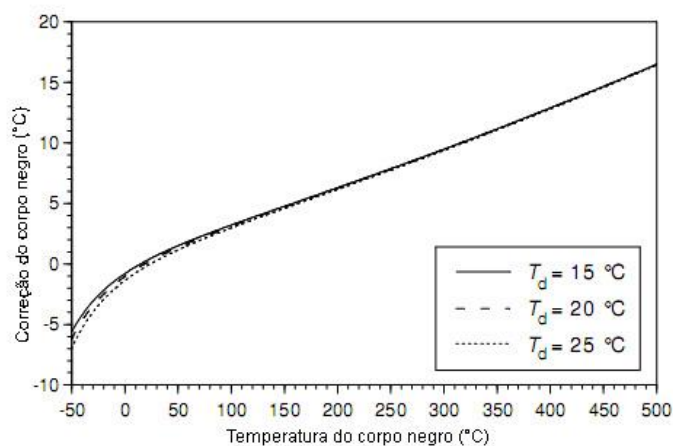


Figura 8.5. A linha sólida refere-se às mesmas condições da Figura 7.4, exceto o ajuste de emissividade no termômetro de IV, que é $\epsilon_{instr} = 1$. A linha tracejada refere-se a um calibrador de placa plana com emissividade $\epsilon_{bb} = 0.95$ e novamente para $\epsilon_{instr} = 1$. Para ambas as curvas, as correções de corpo negro são independentes da temperatura do detetor.

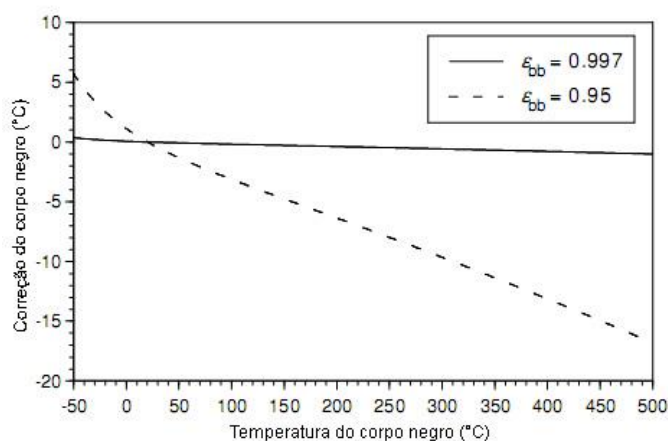
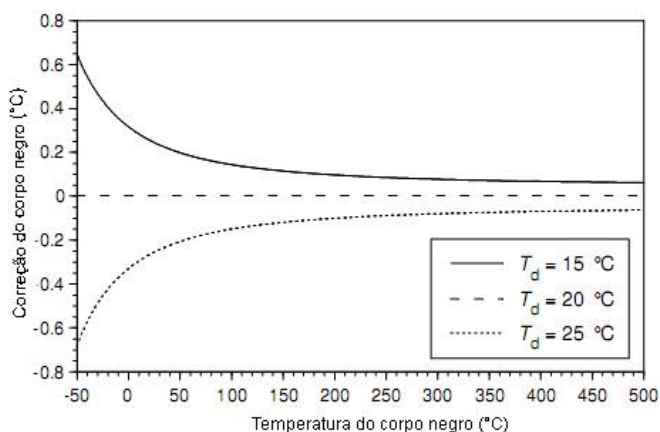




Figura 8.6. As mesmas condições da Figura 7.4, mas para um termômetro de IV, com emissividade $\varepsilon_{instr} = 0.95$, medindo-se a temperatura de um calibrador placa plana, com emissividade $\varepsilon_{bb} = 0.95$. Quando $T_d = T_{amb} = 20\text{ }^\circ\text{C}$, as correções de corpo negro são zero para todas as temperaturas.



O processo de calibração é resumido nos seguintes passos:

1. Determinar os comprimentos de onda de mínimo e máximo para a faixa de comprimento de onda de operação do instrumento em calibração. Estes devem estar declarados nas especificações do pirômetro em "resposta espectral".
2. Usando estes valores nas equações (4) e (5), calcular os coeficientes A e B da função de resposta termômetro.
3. Determinar a emissividade do corpo negro, ε_{bb} , seja como um valor efetivo a partir da equação (7.10) para uma cavidade, ou diretamente das especificações para um calibrador de placa plana.
4. Ajustar a emissividade instrumental, ε_{instr} , tão próxima quanto possível de ε_{bb} (a menos que o cliente tenha solicitado diferentemente), ou, se a emissividade instrumental for fixa, determinar o seu valor a partir de especificações do termômetro.
5. Medir a temperatura ambiente, T_{amb} , com uma sonda para temperatura do ar.
6. Estimar a temperatura do detector, T_d . É provável que ela seja igual à temperatura ambiente, desde que o termômetro de IV tenha tido tempo suficiente para entrar em equilíbrio térmico com o ambiente do laboratório de calibração, e se o termômetro de IV não tiver sido excessivamente aquecido pela radiação do corpo negro. Se a emissividade instrumental for ajustada para 1, o valor de T_d não é necessário.
7. Para cada ponto de calibração, ler o termômetro de referência, T_{ref} e calcular a indicação esperada para o termômetro de IV, T_{exp} , utilizando a equação (7.11). Comparar a indicação real no termômetro IV com o valor de T_{exp} . A diferença entre a temperatura esperada e a indicação real é a correção a ser relatada no certificado de calibração.

8.6.2 Termômetro de IV como referência

Em alguns casos, um termômetro de IV é usado como dispositivo de referência para medir a temperatura da fonte de corpo negro. Este termômetro de IV de referência já deve ter sido calibrado. As correções de corpo negro para este método de calibração são diferentes das apresentadas na seção anterior.



Alguns calibradores de placa plana têm sua indicação digital de temperatura ajustada pelo fabricante, utilizando um termômetro de IV como referência. Isso é muitas vezes referenciado como "calibração radiométrica" do mostrador. Esse método leva em conta a emissividade da placa, as reflexões do ambiente e o ajuste de emissividade instrumental do instrumento em calibração (por meio de um ajuste no controlador da placa plana). Com efeito, esse tipo de calibrador aplica automaticamente as correções discutidas na seção anterior e o mostrador fornece a indicação esperada pelo instrumento em calibração. No entanto, deve-se tomar cuidado quando se utiliza essa indicação como a temperatura de referência, uma vez que as condições em que foi calibrado podem ser diferentes daquelas presentes quando a placa é usada como uma fonte de calibração. Em particular, a temperatura ambiente pode não ser a mesma (fazendo com que a radiação refletida seja diferente), a temperatura do detetor do instrumento em calibração pode ser diferente da ambiente e a faixa de comprimento de onda do termômetro de referência pode ser distinta da do instrumento em calibração. Normalmente, a incerteza especificada para o calibrador incluirá um componente que leve em conta pequenas variações entre a temperatura ambiente e a do detetor. O usuário deve verificar se as faixas de comprimento de onda de operação são concordantes.

Nesta seção, supõe-se que as medições do termômetro de IV de referência são feitas ao mesmo tempo que as medições do instrumento em calibração, de modo que as condições ambientais durante uma sequência de medições sejam idênticas. Também se supõe que o ajuste de emissividade instrumental no termômetro de referência seja 1, de maneira que as indicações sejam independentes da temperatura do seu detetor. Finalmente, também é suposto que a faixa de comprimento de onda de operação do termômetro de referência é a mesma que a do dispositivo em calibração (os valores de A e B são os mesmos para ambos os instrumentos). Se essa última condição não for verdadeira, então o cálculo das correções do corpo negro é mais complexo e demandará informações adicionais.

Aplicando-se a equação (7.8) para ambos os termômetros de referência e em calibração, e determinando-se a diferença entre os sinais medidos, obtém-se:

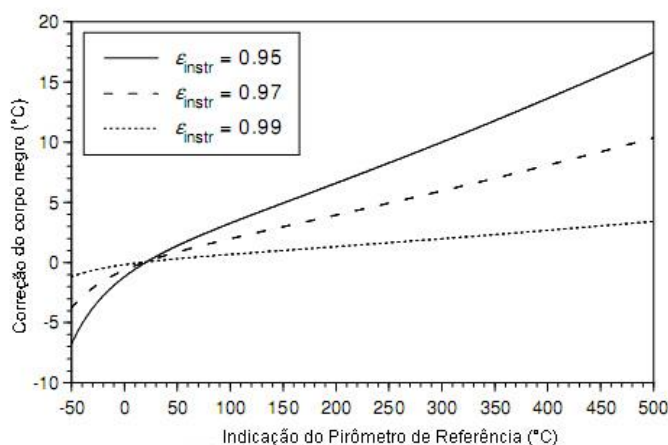
$$S(T_{exp}) = S(T_{ref}) + \frac{(1 - \epsilon_{instr})}{\epsilon_{instr}} [S(T_{ref}) - S(T_d)] \quad (7.13)$$

Como anteriormente, T_{exp} é a indicação esperada para o instrumento em calibração, ϵ_{instr} é seu ajuste de emissividade instrumental, e T_d é a temperatura do seu detetor. T_{ref} é a indicação do pirômetro de referência (geralmente não igual à temperatura do corpo negro, em especial quando se utiliza uma placa plana). As correções de corpo negro são, mais uma vez, dadas por $\Delta T_{bb} = T_{exp} - T_{ref}$. Note-se que a equação (7.13) não depende da temperatura real do corpo negro ou do valor de sua emissividade efetiva, ou da temperatura ambiente. O fato de esses valores não precisarem ser conhecidos é a maior vantagem deste método. Além disso, quando $\epsilon_{instr} = 1$, as correções de corpo negro são zero para todas as temperaturas. Isso contrasta com a equação (7.11), na qual, sob essa condição, as correções de corpo negro ainda dependem da temperatura ambiente e da emissividade efetiva do corpo negro.

A Figura 7.7 apresenta as correções de corpo negro para este método, para uma faixa de valores de emissividade instrumental no instrumento em calibração, como função da indicação do pirômetro de referência. A temperatura do detetor do instrumento em calibração é assumida como $T_d = 20$ °C. Embora não seja mostrada, a variação das correções com as mudanças na temperatura do detetor é aproximadamente a mesma indicada na Figura 7.4.



Figura 7.7. Correções necessárias para as indicações de um termômetro de IV de referência quando focalizando uma fonte de corpo negro, ao calibrar um termômetro de IV de 8-14 μm , com temperatura do detetor de $T_d = 20\text{ }^\circ\text{C}$ e emissividade instrumental conforme mostrada no gráfico. O termômetro de referência também opera em 8-14 μm e sua emissividade instrumental é ajustada para 1.



O procedimento de calibração quando um termômetro de IV é usado como a referência é resumido a seguir:

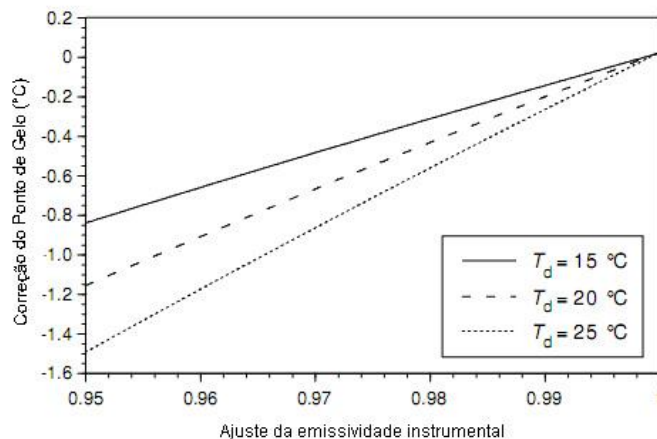
1. Determinar os comprimentos de onda mínimo e máximo para a faixa de comprimento de onda de operação do instrumento em calibração. Estes devem estar declarados nas especificações do termômetro em "resposta espectral".
2. Verificar se esses comprimentos de onda máximo e mínimo são os mesmos do termômetro de IV de referência.
3. Usando estes valores nas equações (4) e (5), calcular os coeficientes A e B da função de resposta do termômetro (os quais se aplicam a ambos os termômetros).
4. Ajustar a emissividade instrumental ϵ_{instr} , no instrumento em calibração tão próximo de 1 quanto possível (a menos que outro valor seja requerido pelo cliente), ou, se a emissividade instrumental for fixa, determinar seu valor a partir das especificações do termômetro.
5. Ajustar a emissividade instrumental no termômetro de IV de referência como 1.
6. Estimar a temperatura do detetor, T_d , para o instrumento em calibração. É provável que esta seja igual à temperatura ambiente, desde que o instrumento em calibração tenha tido tempo suficiente para entrar em equilíbrio com o laboratório de calibração e se o instrumento em calibração não tiver sido excessivamente aquecido pela radiação emitida pelo corpo negro. Se sua emissividade instrumental for ajustada para 1, o valor de T_d não é necessário.
7. Para cada ponto de calibração, leia a indicação do termômetro de IV referência, T_{ref} e calcule a indicação esperada, T_{exp} , para o artefato em calibração usando a equação (7.13). Compare a indicação do dispositivo em calibração com o valor de T_{exp} . A diferença entre a temperatura esperada e a indicação real é a correção que deve ser relatada no certificado de calibração.



8.6.3 Ponto do Gelo como Referência

O ponto do gelo é uma temperatura de referência precisa e confiável, adequada para a verificação ao longo do tempo da exatidão e deriva de termômetros de IV. Uma vez que a emissividade de gelo é $\epsilon_s = 0,96$ na parte infravermelha do espectro, uma boa cavidade de corpo negro, com emissividade efetiva muito próxima de 1 [de acordo com a equação (7.10)], pode facilmente ser construída fazendo uso de gelo moído (ver [1]). Pelo fato de a temperatura de um ponto de gelo bem construído ser definida precisamente em 0 °C , não é exigido um termômetro de referência para a calibração nessa temperatura.

Figura 7.8. Indicação esperada para um termômetro de IV de $8\text{-}14\text{ }\mu\text{m}$ em função do ajuste de emissividade instrumental, ao focalizar uma cavidade de corpo negro de ponto do gelo com emissividade efetiva de $\epsilon_{bb} = 0,999$. A temperatura ambiente é $T_{amb} = 20\text{ °C}$.



Para determinar a indicação esperada para um termômetro de IV quando focalizando um corpo negro de ponto de gelo, podemos inserir o valor $T_{ref} = 0\text{ °C}$ na equação (7.11). Nesse caso, a correção de corpo negro é a mesma da indicação prevista expressa em graus Celsius. A Figura 7.8 mostra a correção de corpo negro como uma função do ajuste da emissividade instrumental no instrumento em calibração para três temperaturas de detectores diferentes, supondo-se que a temperatura ambiente seja $T_{amb} = 20\text{ °C}$ e a emissividade efetiva da cavidade de corpo negro de ponto de gelo $\epsilon_{bb} = 0,999$.

O procedimento de calibração para o ponto de gelo é idêntico àquele para termômetro de contato como referência, com exceção do passo 7, no qual não há termômetro padrão para ler; ao invés disso, uma única temperatura de referência $T_{ref} = 0\text{ °C}$ é usada na equação (7.11).

8.7 Temperatura do detector

Um ponto de dificuldade ao longo deste guia é que o valor de T_d não é conhecido pelo usuário. Ele é medido internamente pelo instrumento, mas não é apresentado no mostrador. A melhor hipótese é que T_d seja igual ou próxima da temperatura ambiente e isto pode requerer algum condicionamento do instrumento antes do uso. No entanto, há algumas situações em que não é razoável assegurar que $T_d = T_{amb}$. Uma delas é quando o termômetro de IV é utilizado durante um longo período em frente a uma fonte quente (por exemplo, durante a calibração em temperaturas elevadas), na qual a radiação da fonte pode aquecer o detector acima da temperatura ambiente. A segunda é quando o termômetro de IV é usado dentro de uma câmara frigorífica, onde a temperatura ambiente está bem abaixo da temperatura de operação especificada para o termômetro. Neste caso, o termômetro ainda pode ser utilizado com sucesso, mas o detector precisa, geralmente, ser mantido acima de 0 °C .



A dependência da temperatura do detetor é removida se a emissividade instrumental estiver ajustada para 1 (isto não é possível em instrumentos com emissividade fixa). Por outro lado, os erros relativamente grandes na estimativa da temperatura do detetor geralmente podem ser tolerados, sem implicar erro significativo da indicação.

Para instrumentos com emissividade ajustável, a temperatura do detetor pode ser deduzida a partir de duas medições do mesmo alvo, usando-se dois ajustes de emissividade instrumental diferentes. A temperatura e emissividade do alvo, e a temperatura ambiente não precisam ser conhecidas. Tudo que é necessário é que estes valores sejam constantes durante as duas medições. A temperatura do detetor, T_d , pode ser calculada a partir da equação:

$$S(T_d) = \frac{\varepsilon_{instr1}S(T_{meas1}) - \varepsilon_{instr2}S(T_{meas2})}{\varepsilon_{instr1} - \varepsilon_{instr2}} \quad (7.14)$$

onde T_{meas1} e T_{meas2} são as duas indicações do termômetro de IV quando a emissividade instrumental foi ajustada para ε_{instr1} e ε_{instr2} , respectivamente. A exatidão dos cálculos feitos com a equação (7.14) é melhor quando ε_{instr1} e ε_{instr2} são bem espaçadas; valores de 0,5 e 1 são geralmente adequados. Por exemplo, duas indicações de um corpo negro utilizando um termômetro de 8-14 μm podem ser $T_{meas1} = 141,8 \text{ }^\circ\text{C}$ quando a emissividade instrumental é ajustada para $\varepsilon_{instr1} = 1$, e $T_{meas2} = 219,4 \text{ }^\circ\text{C}$ quando $\varepsilon_{instr2} = 0,5$. A substituição desses valores na equação (7.14) fornece $T_d = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cálculos desse tipo são úteis para se determinar a variação da temperatura do detetor esperada quando as condições dentro do laboratório variam. Embora não seja factível realizar essas medições com instrumentos de emissividade fixa, é possível inferir seu comportamento a partir de medições feitas com instrumentos semelhantes, de emissividade ajustável.

8.8 Conclusão

Pelo fato de os termômetros de IV de baixa temperatura serem projetados para superar automaticamente o problema da radiação refletida quando utilizados para realizar medições de temperatura, a calibração de tais instrumentos não é uma tarefa simples. Os procedimentos para calibrar termômetros de IV precisam ser cuidadosamente planejados para levar em conta o ajuste da emissividade instrumental, a temperatura do seu detetor e a temperatura ambiente, bem como as propriedades da fonte de corpo negro e do termômetro de referência.

Os métodos apresentados neste guia técnico permitem que o laboratório de calibração calcule a indicação esperada para um dispositivo ideal, ou a correção da indicação do termômetro de referência (a "correção de corpo negro"), contra a qual a indicação do instrumento em calibração será comparada. Um certificado de calibração deve declarar as correções dos instrumentos em relação a essas indicações esperadas e não às indicações do termômetro de referência. Por exemplo: de acordo com a Figura 7.8, espera-se que um termômetro de 8-14 μm , com emissividade instrumental de 0,95, indique $-1,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (quando as temperaturas do detetor e ambiente estão ambas a $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Se a indicação real for $-0,9 \text{ }^\circ\text{C}$, então a correção a ser relatada para esta indicação seria $-0,3 \text{ }^\circ\text{C}$. O certificado também deve declarar a definição de emissividade instrumental.

Deve ser enfatizado que a calibração é projetada apenas para determinar o quão bem o termômetro está de acordo com seu comportamento esperado [ou seja, quão bem T_{meas} está de acordo com a equação (7.8)]. Durante o uso, é de responsabilidade do usuário assegurar que as condições de medição sejam tais que o valor de T_{meas} (depois de aplicadas quaisquer correções do certificado) seja uma boa aproximação de T_s , a temperatura verdadeira do alvo. As condições necessárias são que tanto $\varepsilon_{instr} = \varepsilon_s$ quanto que $T_d = T_w$. Isto é, a emissividade instrumental deve ser ajustada para a emissividade do alvo e a temperatura do detetor deve ser igual à temperatura do meio circundante. Quando qualquer uma, ou ambas as condições não forem válidas, o erro resultante deve ser calculado utilizando-se a equação (7.9). Exemplos desses cálculos são dados em [2] e [3].



8.9 Referências

[1] MSL Technical Guide 2: “Infrared Thermometry Ice Point”, <http://msl.irl.cri.nz>.

[2] P Saunders, “Reflection errors for low-temperature radiation thermometers”, in Proceedings of TEMPMEKO 2001, 8th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, edited by B Fellmuth, J Seidel, G Scholz, VDE Verlag GmbH, Berlin, 149–154, 2002.

[3] P Saunders, “Calibration and use of low temperature direct-reading radiation thermometers”, Measurement Science and Technology, 20, 025104, 2009.

Preparado por Peter Saunders, junho de 2009.

O MSL é o Instituto Nacional de Metrologia da Nova Zelândia, que opera no *Industrial Research Limited*, sob a autoridade do *New Zealand Measurement Standards Act 1992*.
