

Introdução

O pirómetro de radiação insere-se na classe dos medidores de temperatura de não-contacto, mais especificamente, é um termómetro de radiação. O termo “não-contacto” refere-se ao facto do sensor não necessitar de estar em contacto físico directo como o objecto cuja temperatura se pretende medir.



Na indústria são usados em áreas como a farmacêutica, química, manutenção automóvel, alimentar, metalúrgica, plásticos, pasta e papel, cimento, cerâmica, ar condicionado, e semicondutores.

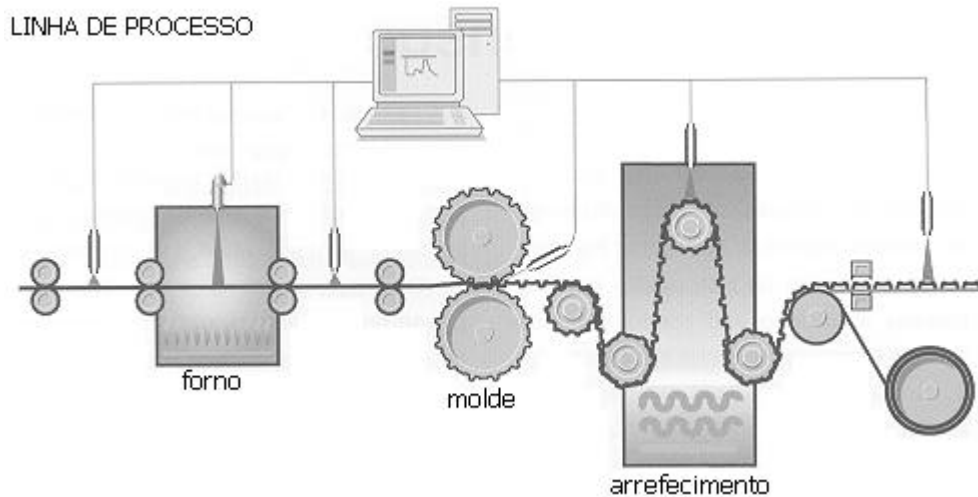
A medição de temperatura através de pirómetros de radiação trás várias vantagens: é rápida, não requer contacto, não afecta a temperatura do objecto que se pretende medir, tem um elevado tempo de vida. Para temperaturas superiores a 1800°C, não há, de facto, outra alternativa prática.



Mais especificamente, o pirómetro de radiação é o medidor a escolher quando o objecto cuja temperatura se pretende medir está sob as seguintes condições:

- Move-se, roda, vibra
- Está sob o efeito de campos magnéticos fortes (ex. aquecimento por indução)
- Sofre mudanças de temperaturas muito rápidas (ex. fundição, incineradora)
- Está localizado em posição inacessível (dentro de um recipiente)
- Requer medidas de temperatura ao longo da sua superfície
- Está a temperaturas demasiado elevadas para um termómetro de contacto, i.e., superiores a 1400°C (p.ex. está dentro de um forno ou de uma fundição)
- Está fisicamente inacessível para um termómetro de contacto
- Pode danificar-se ou contaminar-se por contacto com um medidor (ex. indústria vidreira, farmacêutica, química, alimentar)
- Tem uma distribuição superficial de temperaturas muito variada
- Veria a sua temperatura modificar-se se fosse posto em contacto com um medidor
- É feito de um material com baixa capacidade calorífica ou condutividade térmica

- Tem uma aparência translúcida ou encontra-se na fase gasosa (ex. gases de combustão)
- Requer medições de temperatura rápidas e frequentes.



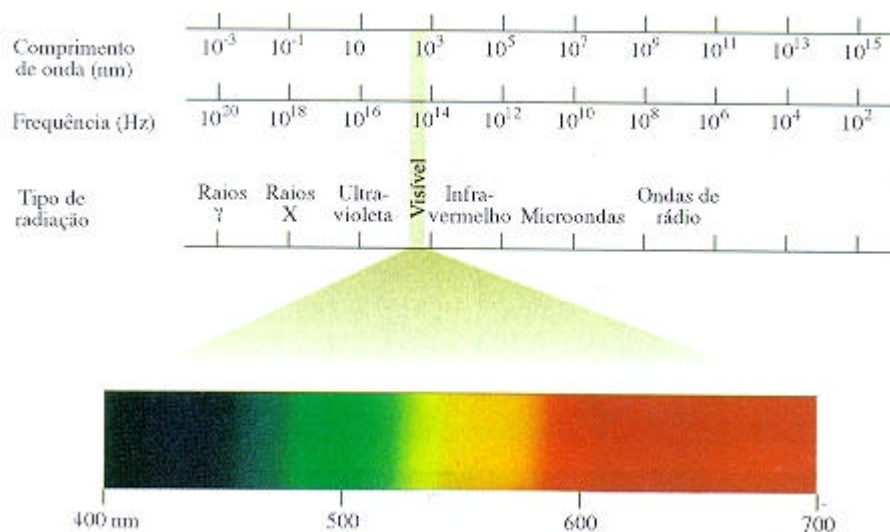
Exemplo da montagem de sensores numa linha de processo.

Uma distinção importante a nível prático é a entre pirómetros portáteis e pirómetros fixos. Os primeiros são para medições discretas e ocasionais, e os segundos são geralmente para medições contínuas. Os portáteis têm a forma de uma pistola. Têm gamas de medida compreendidas entre -50°C e 1300°C . São, regra geral, de preço relativamente acessível. Os fixos têm gamas medida que podem ir até valores mais elevados (cerca de 2900°C).

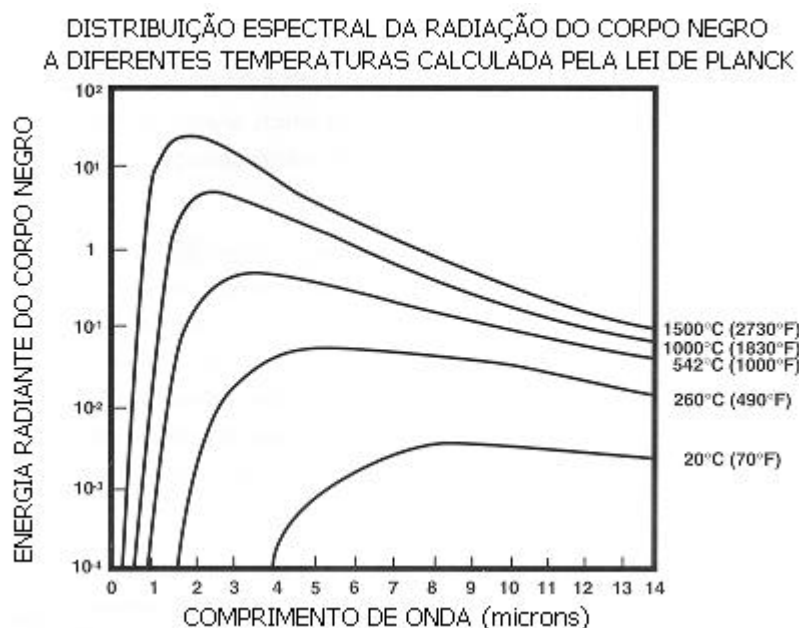
Princípio de funcionamento

Todos os corpos com temperatura superior a 0K emitem energia. A energia emitida aumenta à medida que a temperatura do objecto aumenta. Este facto permite que se possam fazer medições de temperatura a partir de medições da energia emitida, particularmente se essa energia for infravermelha ou visível.

Os vários tipos de energia radiada podem ser caracterizados pela frequência (F) ou comprimento de onda (l). Assim, a zona do visível abrange comprimentos de onda compreendidos entre 0,4mm e 0,7mm, e os infravermelhos (IV) entre 0,7mm e 20mm. Na prática, o pirómetro de IV comum usa a banda entre 5mm e 20mm. Os vários tipos de radiação encontram-se representados na figura abaixo:



A amplitude (intensidade) de energia radiada pode ser expressada como função do comprimento de onda a partir da Lei de Planck. A figura abaixo representa as curvas de emissão de energia a temperaturas diferentes. A área sob cada curva representa o total da energia radiada a essa temperatura.



À medida que a temperatura aumenta, constata-se dois factos: a amplitude da curva aumenta, aumentando a área; e o ponto de maior energia desloca-se para valores de comprimento de onda mais pequenos. Esta relação é descrita pela Lei do Deslocamento de Wien:

$$(\lambda_{\text{máx}} / \text{m}) = 2,89 \times (T/\text{K})^{-3}$$

Porque este ponto máximo se desloca para a esquerda do gráfico à medida que a temperatura aumenta, é necessário muito cuidado na selecção óptima do espectro a usar nas medições de temperatura.

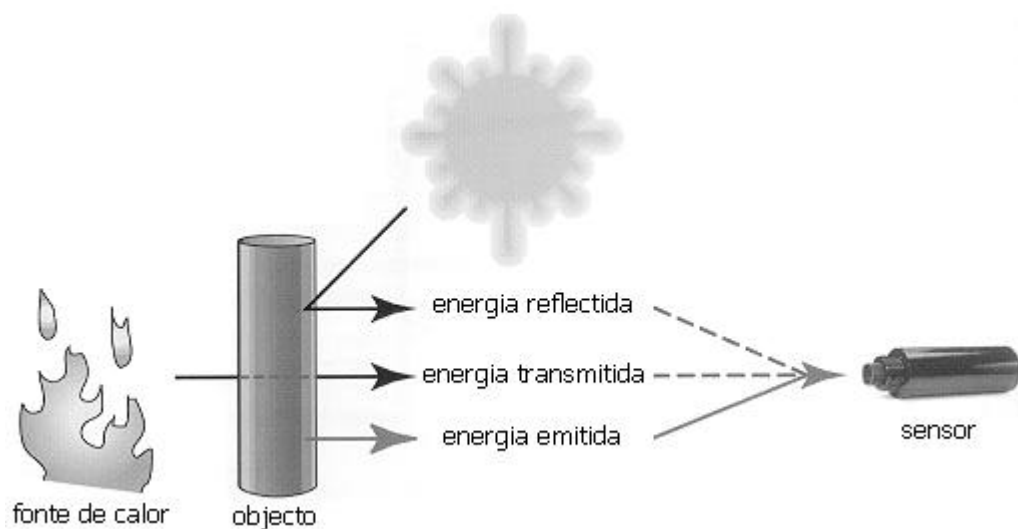
Um conceito importante é a emissividade (E): o quociente entre a energia que um corpo radia a uma dada temperatura e a energia que o corpo negro radia a essa mesma temperatura. A emissividade do corpo negro é então igual a 1. Para corpos reais, a emissividade está compreendida entre 0 e 1. Assim, a emissividade mede a capacidade de um corpo emitir energia. Analogamente, definem-se a reflectividade (R) que mede a capacidade de um corpo reflectir energia, a transmissividade (T) que mede a capacidade de um corpo transmitir energia, e a absorvidade (A) que mede a capacidade de um corpo absorver energia. A relação entre A, R e T é de complementaridade:

$$A + R + T = 1$$

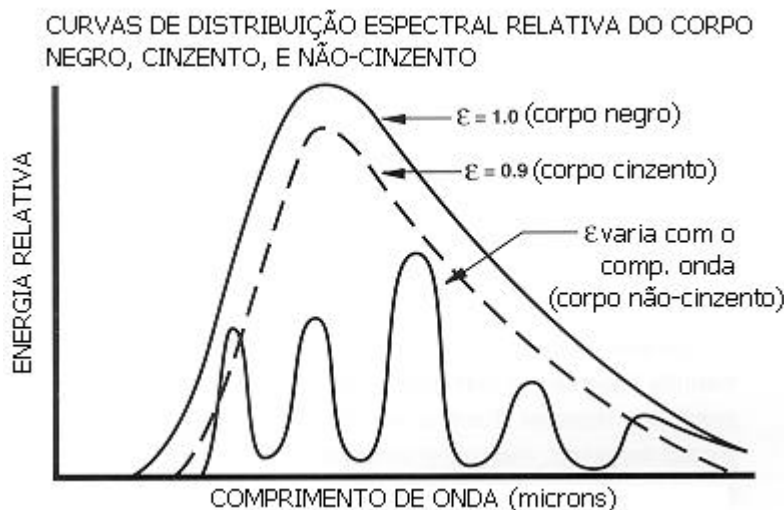
Na prática, os valores habituais são A=70%, R=20%, T=10%. Se um objecto estiver em estado de equilíbrio térmico, então a energia que está a absorver é igual à energia que está a emitir (A=E). Pelo que fica:

$$E + R + T = 1$$

Como é ilustrado na figura abaixo, a energia recebida pelo sensor pode não reflectir a verdadeira temperatura do objecto. A reflectividade R e a transmissividade T são conceitos associados à natureza do objecto (opaco ou translúcido) e às condições atmosféricas na zona entre sensor e objecto.

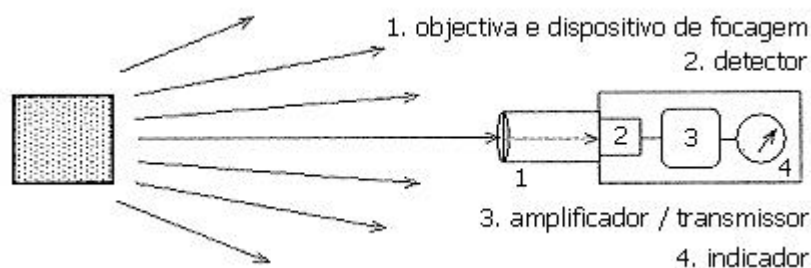


A superfície ideal para efectuar medições de temperatura seria então o corpo negro, i.e., um objecto com E=1 e R=T=0. Na prática, contudo, a maioria dos corpos são corpos cinzentos (têm a mesma emissividade em todos os comprimentos de onda) ou corpos não-cinzentos (a emissividade varia com o comprimento de onda/temperatura):



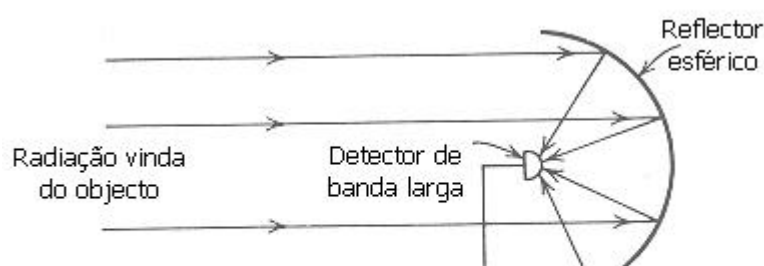
Na prática, as medições de temperatura devem ser feitas em ambientes em que a atmosfera seja "transparente" ($R=0$), e ajustando a resposta espectral do sensor a uma banda de comprimentos de onda na qual o objecto seja opaco ($T=0$). Se, p.ex., um objecto tiver $E=0,7$ então ele só está a emitir 70% da energia disponível, pelo que o pirómetro indicaria uma temperatura inferior à real. Por isso, os pirómetros estão equipados com um mecanismo que ajusta a amplificação do sinal do sensor de modo a corrigir esta perda de energia.

Um esquema genérico de um pirómetro de radiação é indicado na figura abaixo:

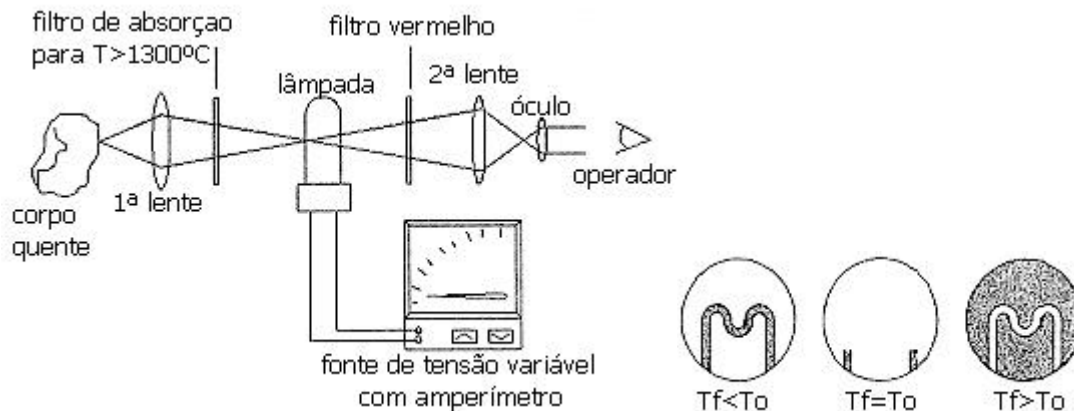


Existem vários tipos de pirómetros de radiação: estes podem-se englobar em duas classes - pirómetros de banda larga e pirómetros de banda estreita. Nos primeiros usa-se uma relação exponencial entre a energia total da radiação emitida e a temperatura. Nos segundos usa-se a variação da emissão de energia de radiação monocromática com a temperatura.

Dentro dos pirómetros de banda larga encontram-se os pirómetros de radiação total e de infravermelhos. Nestes aparelhos, a radiação proveniente de um objecto é colectada pelo espelho esférico e focada num detector de banda larga D, que emite um sinal que é função da temperatura. O valor de temperatura indicado é um valor médio da temperatura dos corpos que se encontram dentro do seu campo de visão, pelo que uma característica importante é a sua abertura.



O pirômetro de banda estreita clássico é o chamado pirômetro óptico. Este destina-se a temperaturas entre 700-4000°C. A energia radiante emitida pelo corpo é focada por meio de uma objectiva sobre o filamento de uma lâmpada de incandescência, senso a imagem do conjunto, depois de filtrada, observada por uma ocular. O filtro de absorção destina-se a estender a utilização do pirômetro a temperaturas elevadas. O filtro vermelho efectua a análise espectral numa banda de frequências estreita da zona do visível, onde é importante para o espectro de radiação correspondente à gama de medida do pirômetro. A imagem observada pela ocular contem o filamento e o objecto incandescente sobrepostos. A figura abaixo descreve o que se vê em três situações possíveis (Tf=temperatura do filamento, To=temperatura do objecto).



Mais informação sobre o princípio de funcionamento destes medidores pode ser consultada em:

- Non Contact Temperature Measurement - <http://www.omega.com/literature/transactions/volume1/>
- Temperature Sensors - <http://www.temperatures.com/>
- Temperature Measurements Info Notes - <http://www.inxinc.com/temperat.htm>
- Medição de Temperatura – Pirômetro de Radiação - <http://orion.ufrgs.br/lmm/aula10/piometr.htm>
- The Fundamentals of Infrared Temperature Measurement - <http://www.pyrometer.com/technology/irfundamentals.htm>
- Temperature - <http://www.unidata.ucar.edu/staff/blynds/tmp.html>
- Temperature Standards - <http://www.irl.cri.nz/msl/teresea.htm>
- Edinburgh Engineering Virtual Library - <http://www.eevl.ac.uk/>

Construção e materiais

Os materiais de construção podem variar muitíssimo consoante a aplicação a que se destinam. Podem ter, p.ex. capas protectoras isolantes, caso as condições de operação sejam extremas. De igual modo podem ter um vasto leque de acessórios.



Também pode haver algumas variantes no capítulo da construção. Para os pirómetros de banda larga, o detector pode ser uma série de microtermopares fixados a um disco de platina enegrecido. A radiação é absorvida pelo disco que aquece e daí resulta uma f.e.m. nos termopares. A vantagem deste detector é que responde à radiação do visível e IV de uma forma indiferente ao comprimento de onda.

O pirómetro de IV usa-se muitas vezes uma lente de silício ou germânio para focar a radiação IV num detector adequado. Os pirómetros de IV são muitas vezes dispositivos portáteis, em forma de pistola, que lêem a temperatura do objecto para o qual são apontados. Neste caso, são essencialmente feitos de plástico.

Características estáticas

Essencialmente, a qualidade das características estáticas dependerá do preço do medidor. Apesar dos valores que se verificam normalmente, existem alguns pirómetros com óptimas características estáticas. Estes têm uma construção de raiz dedicada a uma aplicação muito específica e são muitíssimo caros (podem chegar a \$9900).

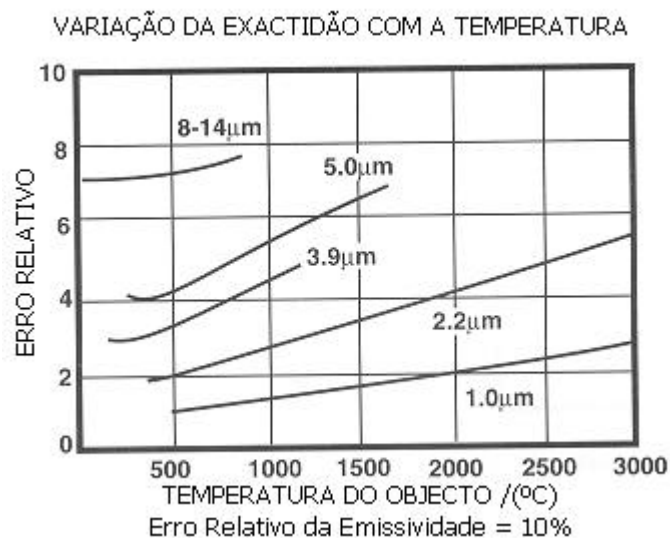


Em média, verificam-se, para os pirómetros de banda larga, os seguintes valores:

%fsd: $\pm 0,5\%$ a $\pm 1\%$

erro absoluto: $\pm 0,5K$ a $\pm 10K$

Há ainda que ter em conta variações de certas características estáticas com as condições de operação (comprimento de onda de operação, temperatura). Na figura abaixo ilustra erros de temperatura devidos a incerteza na emissividade quando se mede temperaturas com instrumentos com diferentes sensibilidades espectrais.



Dentro dos pirómetros ópticos, os valores para as características estáticas são mais consensuais:

- frequência de oscilação a 0°C: $f_0=28\ 208\text{ kHz}$
- sensibilidade: $1000\text{ Hz/}^\circ\text{C}$
- não linearidade: $\pm 0,05\%$ do alcance
- histerese: $\pm 0,05^\circ\text{C}$
- resolução: $\pm 0,0001^\circ\text{C}$

Gama de medida

As gamas de medida para os principais tipos de pirómetros de radiação são:

- pirómetro de radiação total $[-40^{\circ}\text{C}; \text{inf}[$
- pirómetro de radiação parcial $[200^{\circ}\text{C}; \text{inf}[$
- pirómetro ópticos $[700^{\circ}\text{C}; 3100[$



Outra distinção que se pode fazer é entre móveis e fixos:

- pirómetro móveis: -50°C a 1300°C
- pirómetro fixos: 0°C a 2900°C



Calibração

É fundamental, para qualquer medidor, que a calibração seja de boa qualidade e que seja frequente.

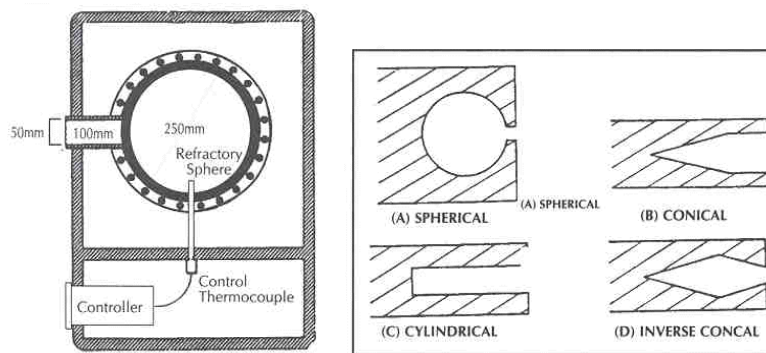
O software de calibração vem normalmente incluído com o instrumento. A calibração permite que os parâmetros do sensor sejam guardados em ficheiros de dados. Deste modo, é possível efectuar um registo completo das sucessivas alterações de parâmetros.

O processo de calibração é baseado no conceito de corpo negro e na lei de Planck (ou uma aproximação), de forma a estabelecer uma relação entre o sinal de saída e a temperatura:

$$T = B / [A + \ln(E) - \ln(S)]$$

Onde

- T - temperatura
- B, A - constantes de calibração
- E - emissividade
- S - sinal de saída

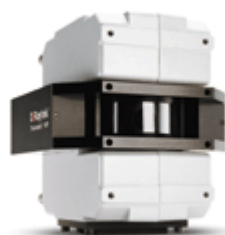


Calibrador de corpo negro. Tipos de cavidades.

As técnicas de calibração podem ser de: um ponto, dois pontos, ou três pontos.

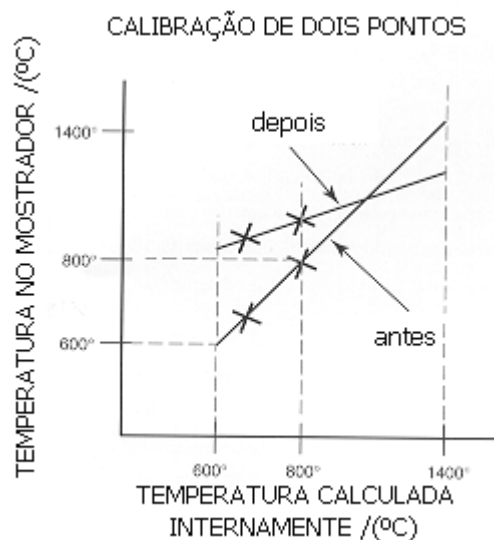
CALIBRAÇÃO DE UM PONTO

Este tipo de calibração deve ser usado quando se está a trabalhar com uma única temperatura de processo e as leituras do sensor necessitam de um offset para serem calibradas com uma temperatura conhecida. Este offset é aplicado a todas as temperaturas ao longo da gama de medida.



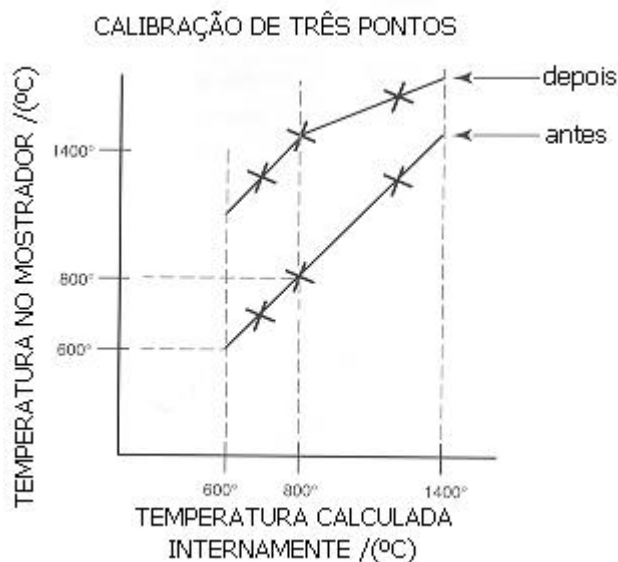
CALIBRAÇÃO DE DOIS PONTOS

Este tipo de calibração deve ser usado quando o sensor tem de ser corrigido para duas temperaturas processuais. Neste caso há que corrigir tanto o declive da curva como a sua ordenada na origem. Este processo é ilustrado na figura abaixo:



CALIBRAÇÃO DE TRÊS PONTOS

Quando num processo se trabalha com várias temperaturas processuais, e se pretende que o sensor dê o valor correcto em três temperaturas do processo, usa-se a calibração de três pontos. São traçadas dois segmentos de recta de calibração de acordo com o ilustrado:

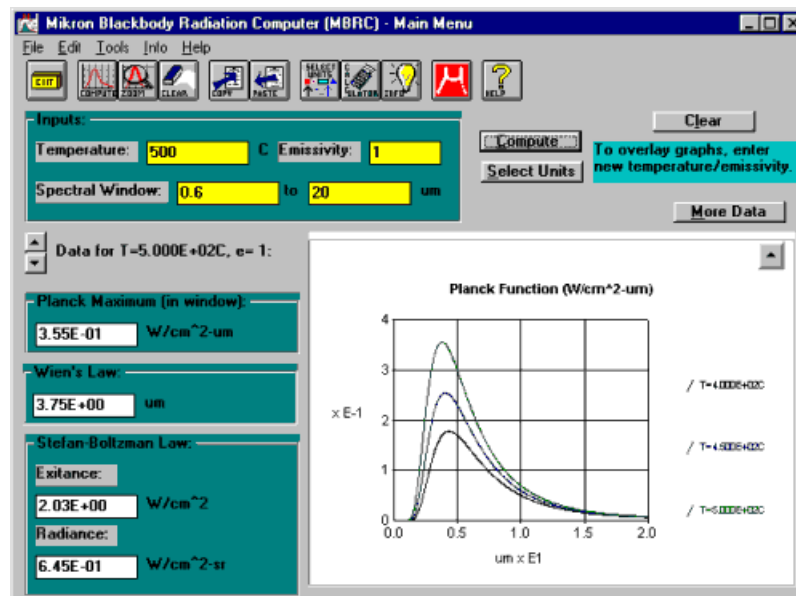


A calibração é um processo importante porque permite testes de diagnóstico regulares, que podem também incluir testes à voltagem fornecida, e testes ao tempo de resposta. Isto permite determinar se um sensor está a funcionar ou não de forma óptima. Além disso, é um processo de prevenção a possíveis avarias.

Os aparelhos usados para corrigir a emissividade do medidor chamam-se calibradores de corpo negro.

Estes podem ser de dois tipos: calibradores standard primários e calibradores standards de referência. Ambos estão de acordo com as normas regulamentares, mas enquanto os primeiros consistem de uma sonda certificada que é introduzida na cavidade de radiação, os segundos consistem de termómetros certificados para calibração cujo comportamento deve ser comparado com o do medidor.

O screenshot de um destes programas é:



Seleção

No que diz respeito à seleção de um determinado pirómetro para um processo, há uma série de questões a ter em conta que condicionam a escolha do modelo certo. Em termos gerais

- A capacidade do objecto em emitir radiação térmica (i.e., a sua emissividade)
- A sensibilidade espectral do sensor (i.e., a gama de comprimentos de onda na qual o sensor tem maior sensibilidade)
- O tipo de atmosfera na zona entre sensor e objecto
- Estruturas que possam obscurecer o campo de visão do sensor
- Fontes de calor próximas do sensor ou do objecto.



Para se dar uma perspectiva mais englobante dos itens a ter em conta na seleção, apresentam-se em seguida questionários pré-venda de duas empresas, destinados aos clientes.

em: <http://www.omega.com/literature/vanzetti/questionnaire.html>

- Faça uma descrição breve do processo.
- Como é feito o aquecimento do seu produto (p.ex. indução)?
- Qual é a gama de medida pretendida?
- Qual é a banda de operação?
- Qual é o tamanho da zona cuja temperatura pretende medir?
- De que materiais é feito o produto cuja temperatura pretende medir?
- Qual é o tamanho total do produto?
- Que materiais constituem a zona específica cuja temperatura pretende medir? (p.ex. barra de cobre)
- Qual a distância de separação entre sensor e produto?
- Caso pretenda um sensor com cabo de transmissão de fibra óptica, qual a distância mínima e máxima do cabo?
- Qual a temperatura ambiente nas vizinhanças do cabo?
- Qual o tempo de resposta pretendido?
- Está o produto em movimento? Se sim, o movimento é contínuo ou intermitente? Se contínuo, a que velocidade média se desloca? Se intermitente, durante quanto tempo está no campo de visão do sensor?
- Há interferências entre sensor e produto? (p.ex. fumo ocasional)



em: <http://www.landinst.com/infr/contacts/c-tsds.html>

O PROCESSO

- Faça uma descrição breve do processo.
- Descreva o método de aquecimento (p.ex. forno, aquecimento com óleos)
- Descreva a forma e dimensões do produto e restrições em relação ao termómetro.

O PRODUTO

- Qual é o produto? (p.ex. barra de ferro, forno de fundição)
- Que tipo de superfície apresenta? (p.ex. não-oxidada, rugosa)
- Qual a área do produto que pretende medir?
- Qual é a temperatura máxima e mínima do produto? Qual o intervalo normal de temperaturas? Caso a temperatura mude rapidamente, qual a taxa máxima de variação?
- Qual é a distância mínima e máxima pretendida entre produto e termómetro?
- Qual a temperatura e natureza das vizinhanças? (ex. sala à temperatura ambiente, parede interior de um forno a 1000°C)
- Caso o produto seja transparente, qual a temperatura e natureza do fundo? (p.ex. metal brilhante a 300°C, metal rugoso frio)
- Que tipo de atmosfera existe no local? (p.ex. ar com produtos de combustão, vácuo)

O TERMÓMETRO

- Qual a temperatura ambiente máxima e mínima no local de instalação do termómetro? Se não houver processo de arrefecimento, até que ponto pode o termómetro aquecer? – especifique a temperatura caso saiba, ou indique se p.ex. o termómetro ficaria quente demais para ser manipulado à mão.
- Especifique restrições ao tamanho do termómetro.

PROCESSAMENTO DO SINAL

- Qual o tipo de output que prefere? Qual é o actual output: 0-20mA, 4 a 20mA, mV/°C? Se outro, p.f. especifique.
- Prefere que o output: siga exactamente a temperatura do produto; represente os valores máximos recebidos; produza valores médios? Se outro, p.f. especifique.
- Pretende alguma das seguintes funções: alarme para valores altos; alarme para valores baixos; alarme para valores altos e baixos.
- Se pretende uma função de alarme, qual é o tempo de resposta pretendido?

- Se tem outras condições acerca do processamento de sinal, p.f. descreva-as.

APRESENTAÇÃO DO SINAL

- Que equipamento de leitura de sinal pretende: nenhum, indicação digital; indicação analógica; registo; de controlo do tipo On/Off.
- Quais as limitações do tamanho do equipamento de leitura.

Custos e fabricantes

Quanto à questão dos preços, tal como no capítulo das características estáticas, existe muita variedade. Os preços podem variar entre \$100 e \$9900. A consulta de alguns destes links pode dar uma ideia mais aproximada.



www.omega.com



www.raytek.com



www.kobold.com



www.ircon.com

Vantagens e desvantagens

Vantagens

- Não há contacto físico directo
- Banda larga
- Medição relativamente independente da distância
- O tempo de resposta é excelente
- Tem um elevado tempo de vida
- São de fácil manuseamento



Desvantagens

- Mais frágeis que os sensores eléctricos
- Escala não linear
- Não são adequados para temperaturas baixas
- Tem erro por absorção
- É necessário corrigir a emissividade