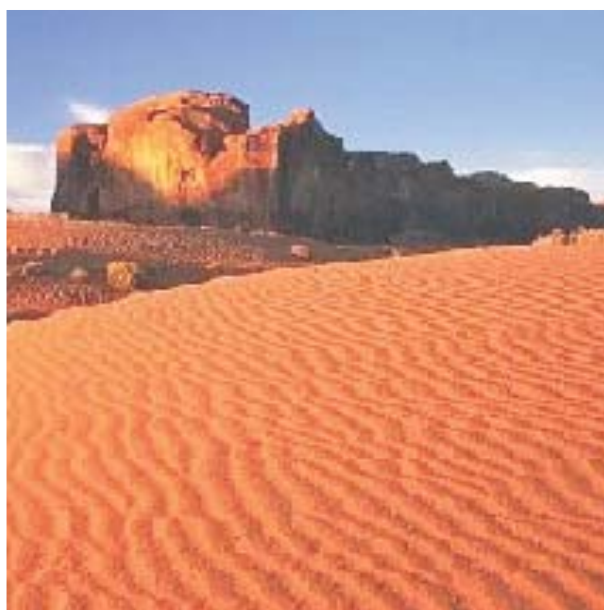


Evolução do Conceito de Medição de Temperatura Sem Contato



RoMiotto
Instrumentos de Medição

**RoMiotto Instrumentos
de Medição Ltda**

Rua São Leonardo, 187 - Freguesia do Ó - São Paulo - SP
Cep: 02803-000 | Fone.: (11) 3976-4003 - Fone.: (11) 3999-7737
www.romiotto.com.br | E-mail: info@romiotto.com.br

CONTEÚDO

Sumário

- Introdução pág. 02
- Temperatura pág. 02
- Mas porque calor pág. 02
- Primeiras descobertas pág. 04
- Radiação do corpo Negro pág. 04
- Fórmulas empíricas da distribuição espectral pág. 06
- A lei clássica da radiação térmica pág. 06
- A teoria de Plank sobre a radiação do calor pág. 07
- Pirômetros ópticos pág. 08
- Medidores de temperatura por radiação pág. 09
- Referências..... pág. 13

Anexo I

- Como especificar um pirômetro infravermelho pág. 14

Anexo II

- Valores típicos de emissividade..... pág. 15

Evolução do Conceito de Medição de Temperatura sem Contato

Ronei Miotto & Rodnei Miotto

Introdução

Neste trabalho abordaremos aspectos básicos de termometria, desde as primeiras descobertas passando pelo conceito de calor e a Lei Zero da Termodinâmica, até a medição através da emissão de radiação. Para tanto, torna-se necessário introduzir conceitos de Física Quântica, notadamente o Postulado de Planck. A seguir, discutiremos os conceitos básicos relacionados à pirômetros ópticos e medidores de temperatura por radiação.

Temperatura

Imagine o seguinte experimento: tome três vasilhas com quantidades de água iguais, estando uma delas com uma mistura de água e gelo (1), outra com água à temperatura ambiente (2), e uma terceira com água morna (3). Ao mergulharmos a mão nos três recipientes seguindo a ordem 1, 2, 3, teremos sempre a sensação de estarmos indo do "frio" para o "quente". Todavia, se mergulharmos a mão primeiro no recipiente 3 e depois no 2, teremos a sensação de "frio" no recipiente 2. Isso significa que, dependendo da ordem que adotarmos, poderemos associar ao recipiente 2 as sensações de "frio" ou "quente", ou mesmo as duas sensações ao mesmo tempo, desde que duas pessoas realizem os experimentos simultaneamente. A ambigüidade em tais atribuições impede que classificações como "frio" ou "quente" possam ser utilizadas em processos que necessitem ser repetidos, como é o caso dos processos industriais em geral. Assim, torna-se necessária uma medida quantitativa que determine univocamente o estado do corpo. A temperatura, variável macroscópica que está relacionada com a energia cinética média das partículas (mais precisamente com o valor médio dessa grandeza microscópica), é a variável mais adequada para classificarmos corpos quentes e frios. A forma mais comum de medida de temperatura baseia-se na chamada lei zero da termodinâmica, que estabelece que dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si. Assim, para sabermos se um corpo tem a temperatura desejada para a realização de um determinado processo, basta colocá-lo em equilíbrio térmico com um termômetro. A troca de calor entre o termômetro e o sistema estudado, leva o sistema a um estado final onde a temperatura dos dois corpos é idêntica. Todavia, como veremos a seguir, nem sempre é conveniente ou mesmo possível utilizarmos termômetros para medir a temperatura de um corpo.

Mas por que o calor?

As diferentes teorias a cerca da natureza do calor remontam aos filósofos gregos, sucedendo-se até os dias de hoje. Uma dessas teorias considera o calor como um fluido sutil, elástico, imponderável, mas material, que se encontra nos corpos quentes. Este conceito regente no início do século 17 tinha como um de seus defensores Galileu. De acordo com este conceito, o calor fica constituído por uma substância extraordinária capaz de penetrar em todos os corpos e abandoná-los facilmente. Esta substância termogênea não pode ser gerada ou destruída, mas apenas distribuída e redistribuída entre os corpos. Quando a quantidade de calórico do corpo diminui, usa temperatura abaixo e vice-versa. Este conceito é atribuído ao um médico escocês chamado James Black.

A idéia de que o calor seja uma espécie de movimento interior aos corpos e não uma substância especial, como se acreditava, foi feita inicialmente pelo inglês Bacon, ao observar que fortes e freqüentes marteladas produzem o aquecimento de um pedaço de ferro. Outro inglês, Benjamin Thompson, o conde de Rumford, observou que a perfuração de canhões em uma fábrica de munições produzia uma enorme quantidade de calor. Para evitar que as brocas utilizadas se queimassem, elas eram resfriadas com água, o que produzia uma enorme quantidade de calor. Thompson examinou a possibilidade de que os corpos materiais tivessem uma capacidade maior para o fluido calórico quando constituem um bloco sólido do que quando estão reduzidos a pequenos fragmentos, o que explicaria o desprendimento de calor durante a perfuração do canhão (dada a produção de limalha). Todavia, ele não encontrou quaisquer evidências que apontassem neste sentido. Tudo isto o levou a concluir que o calor não pode ser uma substância, mas sim alguma coisa em movimento.

Este conceito foi posteriormente desenvolvido pelo físico alemão Julius Robert Mayer e pelo inglês James Prescott Joule, possibilitando-nos enunciar o conceito moderno de que calor é energia térmica em trânsito.

Desta forma, nosso senso comum sugere que um corpo aquecido deve emitir calor, pois "sentimos" que está "quente" mesmo sem tocá-lo. A emissão de calor por um corpo aquecido ocorre via radiação eletromagnética. Esta radiação emitida em um largo espectro contínuo de freqüências, principalmente na região do infra-vermelho (que é responsável pela sensação de calor), mas com intensidade variável, que atinge um máximo em um determinado comprimento de onda. Sabemos que um metal a 600 °C (por exemplo, em um forno elétrico) apresenta uma fraca coloração azulada, enquanto o mesmo material (em uma siderúrgica, por exemplo) apresenta uma coloração mais avermelhada à temperaturas bem mais altas. O sol, cuja temperatura na superfície é de cerca de 6000 °C, é o exemplo mais familiar de emissão de radiação térmica, cujo espectro abrange toda a região visível, incluindo a de comprimento de ondas maiores (infravermelho) e menores (ultravioleta).

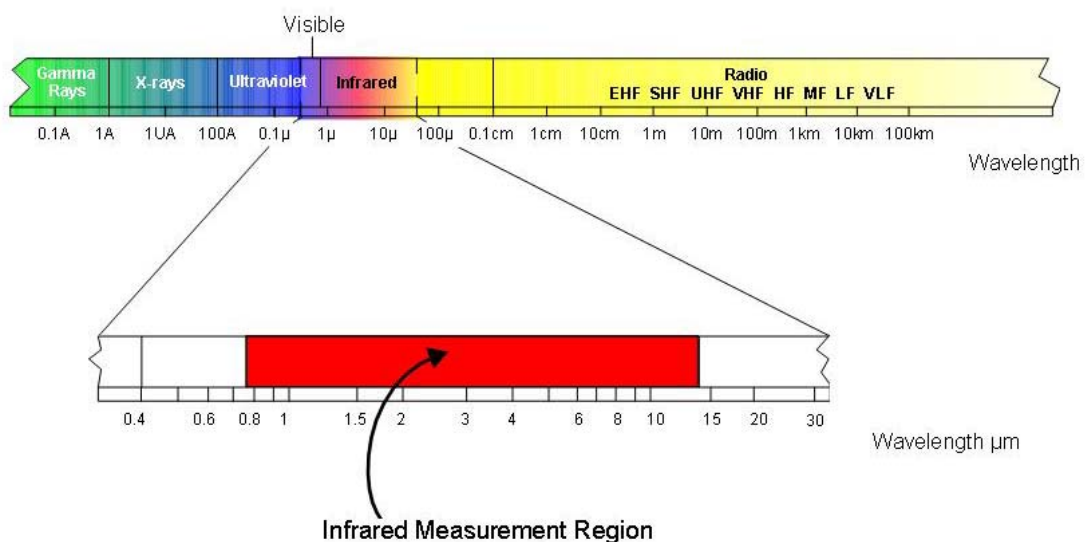


Fig. 1. O espectro de ondas eletromagnéticas.

Primeiras descobertas

Tire uma pedra da sombra e coloque-a à luz direta do sol. Começará a esquentar até que, a uma determinada temperatura, cessam as mudanças. Observa-se, então, equilíbrio térmico entre a radiação e a matéria. Esta é uma observação empírica elementar. Em 1770, Josiah Wedgwood obteve o primeiro resultado científico sobre o problema em questão: a descoberta de que a cor emitida por um forno a alta temperatura independe de qualquer detalhe do forno, seja do material de que é feito, seja do material que está no seu interior, seja da forma do forno. A cor depende só da temperatura (que é a temperatura de equilíbrio entre a matéria e a radiação) do forno. A partir dessa constatação, Wedgwood criou o pirômetro óptico, um aparelho que mede a temperatura do forno pela cor da luz emitida. Tamanha foi a importância desse instrumento que seu invento foi eleito para a Royal Society.

Radiação do corpo negro

De uma maneira geral, matéria e radiação interagem e atinam equilíbrio termodinâmico através de trocas de energia. Sejam e a potência emissiva, isto é, a quantidade de energia radiante emitida por unidade de área e por unidade de tempo, e a a absorvidade ou absorvância, isto é, a fração de energia incidente sobre a superfície que é absorvida. Por volta de 1833, W. Ritchie verificou o princípio de proporcionalidade entre emissão e absorção total através de um experimento com dois corpos radiantes A e B , e um termômetro diferencial. No equilíbrio térmico, o princípio estabelece que:

$$\frac{e_A}{a_A} = \frac{e_B}{a_B}.$$

Supondo que um dos corpos apresenta a especificidade de que $a_N = 1$, ou seja, ele absorve toda a radiação sobre ele incidente, teremos

$$e_N = \frac{e_A}{a_A}$$

e e_N será conhecido como Corpo Negro.

Em outras palavras, todo corpo negro tem uma potência emissiva maior do que a de qualquer outro corpo. Evidentemente, um objeto com estas características é um corpo ideal que não pode ser encontrado na prática, mas pode ser construído, com uma boa aproximação, através de uma caixa oca (um forno, por exemplo) com paredes internas metálicas e uma pequena abertura que permite a passagem de radiação, como ilustrado na figura 2. A caixa deve ser revestida de um excelente isolante térmico e espelhada externamente, refletindo toda a radiação eventualmente incidente. A radiação que entra na cavidade, tem uma probabilidade muito pequena de sair, permanecendo em seu interior e sendo espelhada pelas paredes da cavidade até atingir o equilíbrio térmico. Desta forma, toda radiação incidente é absorvida pelo corpo (daí o nome corpo negro).

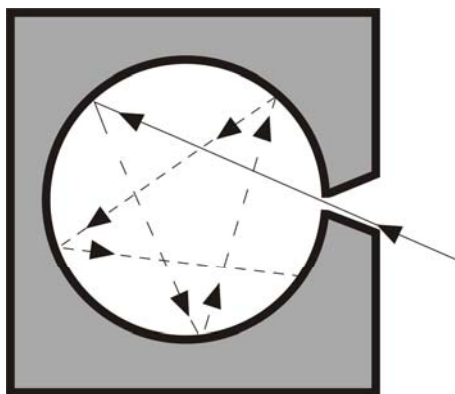


Fig. 2. Representação de um corpo negro através de uma cavidade com paredes internas espelhadas.

A radiação contida na cavidade pode ser decomposta em suas componentes espectrais através de uma função distribuição $\rho(\nu, T)$, tal que $\rho(\nu, T)d\nu$ é a densidade de energia (energia por unidade de volume) da radiação com frequência no intervalo compreendido entre ν e $\nu + d\nu$ quando a cavidade está a uma temperatura absoluta T . O espectro emitido pela cavidade é especificado pelo fluxo de energia $R(\nu, T)$ que, obviamente, deve ser proporcional a $\rho(\nu, T)$, com constante de proporcionalidade advinda de fatores geométricos, e que é a densidade de energia medida experimentalmente.

Em 1854, Gustav Robert Kirchhof apresentou perante a Academia de Berlin o trabalho "Sobre a relação entre a emissão e absorção de calor e luz", em que provou que "para raios de mesmo comprimento de onda e a mesma temperatura, a razão entre a potência emitida e a absorvida são as mesmas para todos os corpos". O teorema foi demonstrado com base em considerações teóricas bastante simples e estabelece que, para quaisquer corpos em equilíbrio térmico trocando radiação com comprimento de onda λ , a equação $\frac{e_A}{a_A} = \frac{e_B}{a_B}$ é satisfeita. Somente em um segundo trabalho, Kirchhoff introduziu a noção de um corpo perfeitamente negro, conforme discutido anteriormente, e mostrou que a potência emissiva de um corpo negro depende só da temperatura e da frequência de radiação, tal que $e_N = F(\nu, T)$ onde $F(\nu, T)$ é uma função universal independente da forma, tamanho e composição química do corpo. Com base na termodinâmica e na teoria eletromagnética da radiação, é possível deduzir duas leis relativas à dependência da radiação do corpo negro com a temperatura:

1. A partir dos resultados experimentais de J. Tyndall (1864) de que a emissão total de um fio de platina a 1200°C é 11,7 vezes maior que a correspondente emissão a 525°C , Josef Stefan concluiu, em 1879, que a energia total é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta (ou seja, da temperatura medida em kelvin), já que $(1473/798)^4 \cong 11,7$!!!! Este resultado fortuito (pois as medidas foram realizadas com um corpo de prova que não tinha as características de um corpo negro) foi demonstrada rigorosamente por Boltzmann em 1884 com base na existência de uma pressão de radiação e considerando a radiação como uma máquina térmica, sujeita às leis das termodinâmica e pode ser expressa como $U = \sigma T^4$;
2. A outra lei, chamada lei de deslocamento, data de 1893 e foi apresentada por Wilhelm Wien. A lei, que pode ser demonstrada matematicamente, estabelece

que o comprimento de onda, no qual a intensidade de radiação é máxima, varia com a temperatura de acordo com a relação $\lambda_{\max} T = b$ ou $\lambda_{\max} \propto \frac{1}{T}$. A lei de Wien foi verificada experimentalmente inúmeras vezes, por exemplo, por Friederich Paschen e por Otto Lummen e Ernst Pringsheim, que obtiveram $b = 0,294$ cm. grau (valor usado posteriormente por Planck).

Fórmulas empíricas da distribuição espectral

Nem os princípios e relações básicas da termodinâmica ou do magnetismo permitem, por si só, determinar a forma funcional de $F(\nu, T)$. Sua determinação era um dos maiores problemas da física teórica no final do século XIX. Uma das conjecturas propostas em 1896 pelo próprio Wien indica uma dependência da forma

$$F(\nu, T) = \alpha e^{-\frac{\beta\nu}{T}}.$$

O mais interessante é que essa fórmula ajustava-se satisfatoriamente aos primeiros resultados experimentais obtidos ao final de 1899, mas não resistiu aos trabalhos posteriores que utilizavam grandes comprimentos de onda.

A Lei Clássica da Radiação Térmica

A contribuição de Lord Rayleigh à investigação da radiação do corpo negro baseia-se na Mecânica Estatística Clássica de Maxwell-Boltzmann, sendo conhecida como o resultado clássico da distribuição espectral.

Em uma curta nota, publicada em junho de 1900, Rayleigh aplicou a “doutrina de Maxwell-Boltzmann da partição de energia”, ou seja, o teorema de equipartição de energia às oscilações eletromagnéticas da radiação na cavidade contrária à fórmula de Wien. Seu método consistia em calcular o número de ondas estacionárias, ou seja, a distribuição de modos eletromagnéticos permitidos com frequência no intervalo entre ν e $\nu + d\nu$, dentro da cavidade.

Para encontrar a densidade de energia devemos determinar a energia média de cada oscilador. Como cada onda estacionária oscila senoidalmente, ela terá uma energia total que é igual a duas vezes sua energia cinética média, ou seja, $u_{\text{medio}}(T) = k_B T$.

A lei obtida por Rayleigh para a radiação do corpo negro pode ser expressa pelo produto do número de ondas eletromagnéticas dentro da cavidade pela energia de cada uma delas, e pode ser escrita como:

$$\rho(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \frac{k_B T}{\nu^2} d\nu.$$

A lei de radiação de Rayleigh é conhecida como lei de Rayleigh-Jeans, após a contribuição de James Jeans em maio de 1905, que introduziu o fator 1/8 esquecido por Rayleigh em seu trabalho original. Como seu resultado era consideravelmente diferente da aclamada fórmula de Wien, Rayleigh introduziu um fator exponencial igual ao proposto anteriormente por Wien. A figura 3 apresenta uma comparação entre a equação de Rayleigh-Jeans e resultados obtidos para um corpo negro. Observe que a proposição de Rayleigh-Jeans só descreve os pontos experimentais na região de baixos comprimentos de onda, além de satisfazer a lei de deslocamento de Wien. Todavia, a fórmula falha no limite de grandes frequências e conduz a uma

divergência na densidade de energia total conhecida como “catástrofe do ultravioleta”, graças a Ehrenfest.

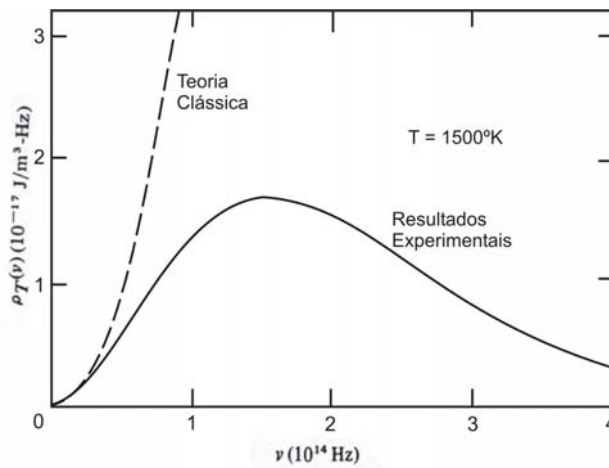


Fig. 3. Comparação entre a equação de Rayleigh-Jeans e resultados obtidos para um corpo negro

A teoria de Planck sobre a Radiação do calor

Planck foi apenas mais um pesquisador que, em 1897, passou a se dedicar à tarefa de encontrar uma fórmula precisa e bem fundamentada da distribuição espectral. Planck, assim como Rayleigh, concentrou seus esforços na determinação da energia média de um oscilador harmônico à uma temperatura T . Ao invés de utilizar o teorema da equi-partição, Planck preferiu usar uma abordagem termodinâmica, que o levou a propor em 19 de outubro de 1900 a seguinte expressão, baseada nos resultados experimentais a ele fornecidos por Rubens:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3} \frac{A\nu^3}{\left(e^{\frac{h\nu}{T}} - 1 \right)}$$

Na reunião de 14 de dezembro de 1900, Planck comunicou aos membros da Sociedade Alemã de Física a dedução teórica de sua fórmula, proposta em 19 de outubro, e no que veio a chamar de um “ato de desespero” teve que introduzir a hipótese da descontinuidade da energia dos osciladores. Para tanto, Planck baseou-se no trabalho de Boltzmann e propôs que um dado valor de energia do sistema só poderia ser distribuído entre os diversos osciladores da cavidade se fosse composta de um número inteiro de partes finitas iguais (lembre-se, arranjos e combinações só são possíveis com números inteiros). Desta suposição simples nasceu a Física Quântica, pois está aí colocado o argumento básico da quantização de energia: os osciladores não podem ter um valor de energia qualquer, mas apenas múltiplos inteiros de um valor elementar. Comparando sua equação original com os resultados experimentais e com a expressão proposta por Wien, Planck escreveu sua famosa expressão para a radiação do Corpo Negro:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3} \frac{h\nu^3}{\left(e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1 \right)}$$

onde h é a constante de Planck.

O postulado de Planck tem uma implicação muito importante: se classicamente a energia de um sistema pode assumir qualquer valor (de 0 a infinito), quanticamente um ente executando oscilações harmônicas simples pode ter apenas energias totais discretas $E = 0, h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \dots$, etc. Mas porque não verificamos este fato para sistemas muito simples como um pêndulo. Ao vê-lo oscilar parece-nos que o sistema é capaz de possuir um conjunto contínuo de energia. A resposta, esta no fato de que o incremento de energia ($h\nu$) é da ordem de 10^{-33} J, enquanto que a energia típica de tal sistema é da ordem de 10^{-5} J. Para piorar a situação, não temos condições técnicas de medir incrementos de energia da ordem de 10^{-33} J. O mesmo fato é observado para todos os sistemas mecânicos macroscópicos presentes em nosso cotidiano.

Pirômetros ópticos

Como visto anteriormente, as descobertas de Josiah Wedgwood levaram ao desenvolvimento do pirômetro óptico. O termo "pirômetro" (do grego *pyros*, fogo) foi originalmente atribuído a todos os instrumentos destinados à medição de temperaturas acima da incandescência (aproximadamente 550 °C). Os primeiros pirômetros foram construídos por Henri-Louis Le Châtelier em 1892, quando já recebeu o nome de pirômetro ótico. A primeira patente desse pirômetro foi concedida em 1901 e os primeiros modelos comerciais foram introduzidos em 1931. Pirômetros são sensores de temperatura que utilizam como informação a radiação eletromagnética emitida pelo corpo a medir. Este aparelho permite a medida de temperatura sem contato. Os modelos utilizados atualmente não diferem em muito dos primeiros aparelhos construídos: olha-se através de um telescópio para um objeto incandescente, comparando o seu brilho com o de um filamento dentro do pirômetro. Ajusta-se a corrente no filamento até o seu brilho coincidir com o do objeto, sendo ambos observados através de um filtro vermelho, e então lê-se a temperatura. Este é um método prático para medir a temperatura de objetos muito quentes, objetos em locais inacessíveis como fornos ou câmaras de vácuo, ou objetos em atmosferas oxidantes ou redutoras onde não podem ser utilizados termopares. Pirômetros ópticos típicos cobrem um intervalo de 750°C até 3000°C, com uma precisão de cerca de 4°C no início do intervalo e 20°C na parte superior.

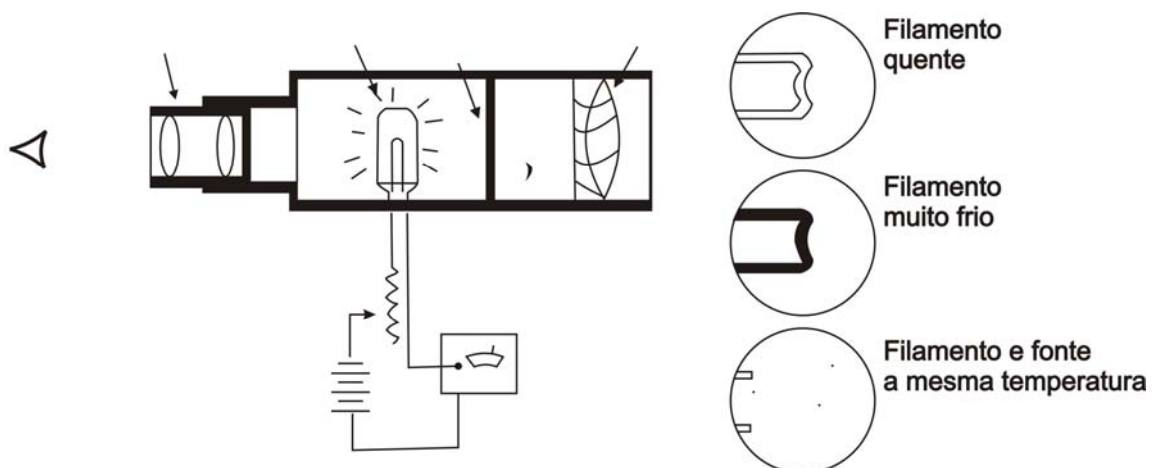


Fig. 4. Diagrama esquemático de um pirômetro óptico.

Além da pequena faixa de temperatura acessível, os pirômetros ópticos têm no elemento humano uma de suas mais sérias restrições: a subjetividade do operador. Para um mesmo corpo, poderemos ter diferentes medidas de temperatura, já que diferentes operadores certamente terão sensibilidade óptica diferente, o que os levaria a perceber de forma diferente quando o objeto incandescente tem brilho coincidente com filamento do pirômetro. Além disso, ao considerar-se uma aplicação deve-se levar em conta os seguintes dados:

- Os limites normais de utilização estão entre 750 °C e 2850 °C.
- As medidas efetuadas com pirômetros ópticos são independentes da distância entre a fonte e o aparelho. De fato, muitos aparelhos possuem um conjunto de lentes que aproxima o objeto a ser medido.
- Em uso industrial, consegue-se uma precisão de até $\pm 2\%$.
- Devido à medida de temperatura ser baseada na emissividade da luz (brilho), erros significativos podem ser introduzidos, principalmente devido à reflexão de luz ambiente pela fonte a ser medida.
- Quando o meio onde se executa a medida possui partículas em suspensão, causando assim uma diminuição da intensidade da luz proveniente da fonte, ocorre uma diminuição da precisão da medição.

Medidores de temperatura por radiação

Por volta de 1800, Sir. Frederick Willian Herschel, astrônomo já famoso pela descoberta do planeta Urano, estava envolvido com experiências relacionadas ao espectro de cores. Em particular, ele queria determinar como o calor se relacionava com as diferentes cores. Para tanto, ele passava luz através de diferentes filtros utilizados para observar a luz solar. Ele notou que filtros de diferentes cores aparentemente permitiam a passagem de diferentes quantidades de calor. Herschel acreditava que as cores propriamente ditas poderiam ter cores diferenciadas. Para provar suas suposições ele imaginou um experimento onde a luz solar direta passa por um prisma para criar um espectro (tal qual na formação do arco-íris) e depois mediu a cor de cada cor, com o auxílio de três termômetros com bulbos escuros (para melhor absorver o calor) sendo que, para cada cor do espectro, um bulbo se encontrava iluminado pela cor e os outros dois mais distantes para servir como controle. Quando mediu as temperaturas individuais das cores violeta, azul, verde, vermelho, laranja e amarelo, ele notou que todas as cores tinham temperaturas mais altas do que o controle. Além disso, ele observou um aumento da temperatura indo do violeta para o vermelho. Este fato levou-o a medir a temperatura pouco além da porção vermelha do espectro, em uma região onde a luz solar não era visível. Para sua surpresa, ele encontrou nessa região a mais alta temperatura.

Herschel realizou uma série de experimentos adicionais com os então "raios calóricos". Ele observou que eles eram refletidos, refratados, absorvidos e transmitidos da mesma forma que a luz visível. Herschel havia descoberto os raios infra-vermelhos, o primeiro tipo de luz não-visível conhecida.

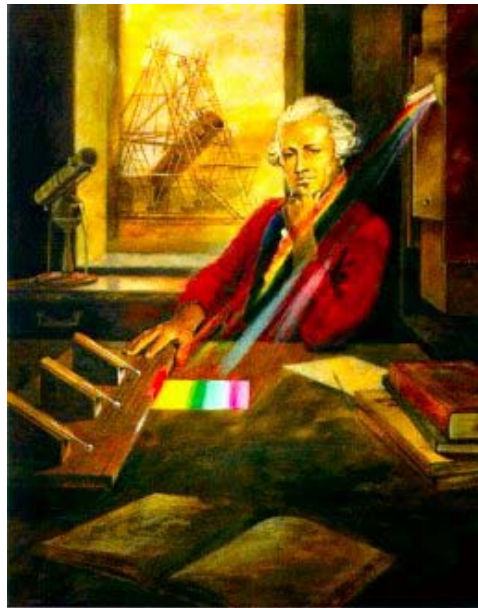
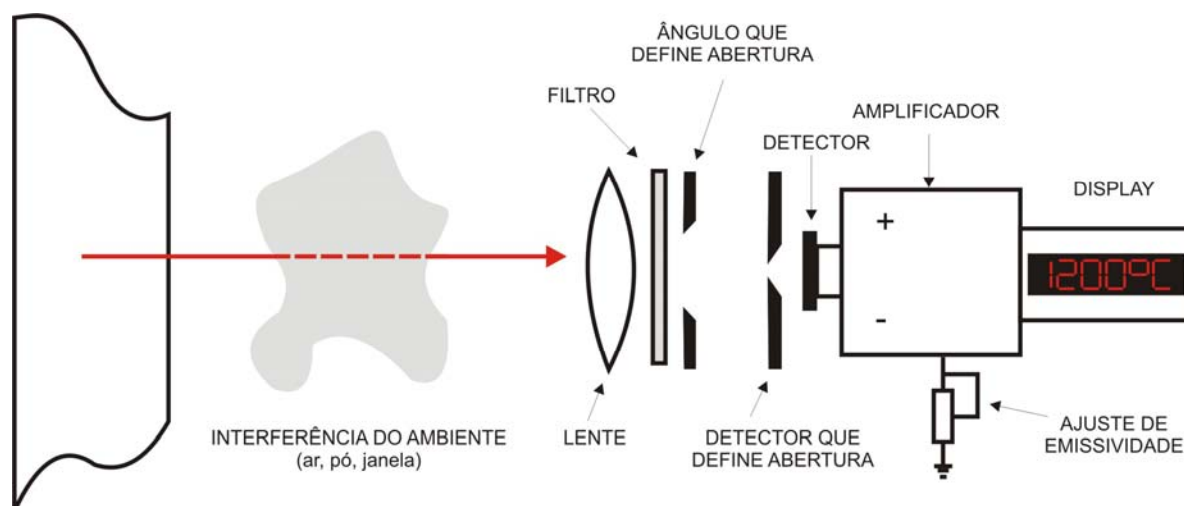


Fig. 5. *Sir Herschel em uma ilustração sobre a descoberta dos raios infra-vermelhos.*

Os grandes avanços tecnológicos propiciados pela Ciência dos Materiais permitiram o desenvolvimento de detectores de radiação infravermelho pequenos, duráveis e extremamente precisos. Com o intuito de ampliar a faixa de atuação dos pirômetros ópticos e com o objetivo primordial de eliminar a subjetividade advinda do operador, o desenvolvimento de medidores de temperatura baseados em radiação constituíram um caminho natural no desenvolvimento das técnicas de medição de temperatura sem contato. De fato, tais detectores permitiram a ampliação da janela de medição e ampliar sua gama de utilização, já que neste tipo de detector a medida da intensidade da radiação infravermelha, em alguns casos utilizando diferentes comprimentos de onda, permite determinar com boa precisão a temperatura do objeto remoto. A sua portabilidade, confiabilidade e precisão levaram os medidores de temperatura por radiação a serem utilizados nas mais variadas áreas desde a medicina, para a detecção de tumores, até a transmissão de energia, onde um termograma de uma torre de alta-tensão pode dizer onde se dão as perdas de energia.

Na maior parte desses medidores de temperatura a radiação é coletada por um arranjo óptico fixo e dirigida a um detetor do tipo termopilha (associação em série - ver figura abaixo) ou do tipo semiconductor nos mais modernos, onde gera um sinal elétrico no caso da termopilha ou altera o sinal elétrico no caso do semiconductor.



Como não possuem mecanismo de varredura próprio, o deslocamento do campo de visão instantâneo é realizado pela movimentação do instrumento como um todo. Os medidores de temperatura por radiação são em geral portáteis, mas podem ser empregados também no controle de processos a partir de montagens mecânicas fixas ou móveis. Graças à utilização de microprocessadores, os resultados das medições podem ser memorizados para o cálculo de temperaturas e seleção de valores. A apresentação dos resultados é normalmente feita através de mostradores analógicos e digitais, podendo ainda ser impressa em papel ou gravadas em mídia magnética, conforme o caso.

Os pirômetros de radiação são calibrados em relação a um corpo negro, e um fator de correção deve ser empregado quando a medição é realizada em um corpo com emissividade diferente. Para isso deve-se conhecer a emissividade da superfície que está sendo medida, o que é um fator de incerteza, visto que a emissividade varia com o estado da superfície, temperatura, etc. Outro fator de incerteza na medição de corpos com emissividade inferior a 1 diz respeito à influência dos corpos vizinhos: a radiação emitida por um corpo vizinho pode vir a ser refletida na superfície de medição e atingir o sensor, falseando a medição.

Outro aspecto diz respeito ao material das lentes utilizado. Materiais como o vidro não transmitem a radiação em comprimentos de onda superiores a 2,8 mm, o quartzo transmite somente até 4 mm, fluoreto de cálcio vai até 10 mm, e iodeto/brometo de tálio transmitem até 30 mm. Na medição de temperaturas mais baixas deve-se ter em mente essas características na hora de escolher o pirômetro adequado. Os pirômetros de radiação diferenciam-se pelo tipo de detector, sendo: térmicos (respondem à energia de todo o espectro e possuem um tempo de resposta relativamente grande) ou de fótons (a radiação incidente libera elétrons na estrutura do detector e produz um efeito elétrico mensurável, e apresentam uma constante de tempo na ordem de 1 ms).

Os medidores de temperatura por radiação são usados industrialmente onde:

- As temperaturas estão acima da faixa de operação prática dos termopares.
- A atmosfera do processo for prejudicial aos termopares, causando medidas falsas e pequena durabilidade ao par.
- No interior de fornalhas a vácuo ou pressão, onde os sensores de temperatura danificam o produto.
- O objeto cuja temperatura se vai medir está em movimento.

- Em locais onde os termopares não podem ser instalados, por causa de vibrações, choques mecânicos ou impossibilidade de montagem.
- Em locais onde haja a presença de campos eletromagnéticos elevados.
- Em sistemas cuja variação de temperatura é muito rápida (da ordem de milisegundos).

Ao considerar-se uma aplicação deve-se, ainda, levar em conta os seguintes dados:

- A temperatura do alvo e a temperatura normal de operação.
- O sinal de saída é independente da distância do alvo, desde que o campo de visão do sistema óptico esteja preenchido totalmente pelo mesmo.
- O material da fonte e sua emitância.
- Ângulos de visada com aplicações em corpo não negro (deve-se restringir o ângulo para uma visada de 45°, ou menos, da perpendicular).
- As condições do ambiente, temperatura e poeira.
- Velocidade do alvo.

Referências

- H. Moysés Nussenzveig, Curso de Física Básica, 2 – Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor, Edgard Blücher, São Paulo, 1983.
- R. Eisberg e R. Resnick, *Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas* (6ª edição, Editora Campus, Rio de Janeiro, 1988).
- P. A. Tipler, *Física Moderna* (Guanabara, Rio de Janeiro, 1981).
- R. Feynman, R. B. Leighton, M. L. Sands, *The Feynman Lectures on Physics, Vol. 2* (Addison-Wesley, Reading, 1989).
- R. Feynman, R. B. Leighton, M. L. Sands, *The Feynman Lectures on Physics, Vol. 3* (Addison-Wesley, Reading, 1989).
- P. A. Tipler, *Física, Vol. 2* (Guanabara, Rio de Janeiro, 1995).
- P. A. Tipler, *Física, Vol. 4* (Guanabara, Rio de Janeiro, 1995).
- Cláudio Zaki Dib, Tecnologia da educação e sua aplicação à aprendizagem de física (Livraria Pioneira Editora, São Paulo, 1974).
- M. Planck (tradução N. Studart) Rev. Bras. Ens. Fis. 22, 536 (2000).
- M. Planck (tradução N. Studart), Rev. Bras. Ens. Fis. 22, 538 (2000).
- D. P. L. Pires, J. C. Afonso, F. A. B. Chaves, Rev. Bras. Ens. Fis. 28, 101 (2003).
- Spectrum, *Resource for Understanding IR Technology* (Raytek Corporation, Santa Cruz, 1998).
- Nota: a Revista Brasileira de Ensino de Física pode ser encontrada "on-line" e gratuitamente através da base de dados www.scielo.br.

Como especificar um pirômetro infravermelho:



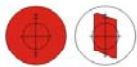
Qual a faixa de temperatura do processo?



Qual o tamanho do alvo?



A qual distância do alvo o instrumento pode ser instalado?



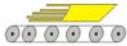
O alvo preenche o campo de visão?



Qual o material do alvo?



A medição será em um alvo estático ou em um processo em movimento (contínuo ou descontínuo)?



Qual a velocidade do processo?



Qual é a temperatura do ambiente?



O ambiente está contaminado (material particulado em suspensão, vapores)?



O instrumento estará conectado a uma unidade de controle existente?



Você precisa manter registros para auditorias e/ou programas de qualidade?

Como Determinar a Emissividade dos Objetos

A emissividade é a medida da capacidade de um objeto em absorver, transmitir e emitir a energia infravermelha. Ele pode ter um valor de 0.0 (espelho brilhante) a 1.0 (corpo negro). Ao ajustar o valor da emissividade no seu sensor, se você ajustar um valor maior do que o valor da emissividade atual, a temperatura lida será menor (se a temperatura do alvo estiver acima da temperatura ambiente do local). Por exemplo, se você ajustar para 0.95 e a emissividade atual do alvo for de 0.9, a leitura do sensor será menor que a temperatura real do alvo (quando a temperatura do alvo estiver acima da temperatura ambiente). Para determinar a emissividade de um objeto, você pode utilizar um dos seguintes métodos:

1. Determine a temperatura atual do objeto usando um sensor como um RTD – Dispositivo de Resistência da Temperatura, termopar ou outro método apropriado. A seguir, use o seu sensor portátil para medir a temperatura do objeto e ajustar a emissividade até que ela exiba a temperatura atual. Esta é a emissividade correta para o material medido.
2. Para objetos com temperaturas relativamente baixas, até 260°C (500°F), coloque um pedaço de fita isolante no objeto. Certifique-se de que a fita é larga o suficiente para cobrir o diâmetro do spot de medição. Não deixe que o spot ultrapasse a extremidade da fita. A seguir, meça a temperatura da fita usando uma emissividade de 0,95. Finalmente, meça uma área adjacente ao objeto e ajuste a emissividade até obter a mesma temperatura. Esta a emissividade correta para o material medido.
3. Se uma parte da superfície do objeto puder ser pintada, use tinta preta. A seguir, meça a área pintada usando uma emissividade de 0,93. Finalmente, meça a área adjacente ao objeto e ajuste a emissividade até obter a mesma temperatura. Esta a emissividade correta para o material medido.

Valores de Emissividade Típicos

As tabelas seguintes fornecem referências para a estimativa da emissividade e podem ser usadas quando não for possível realizar nenhum dos métodos anteriores. Os valores de emissividade mostrados nas tabelas são aproximados. Qualquer um ou todos os parâmetros seguintes podem afetar a emissividade de um objeto.

- 1- Temperatura
- 2- Ângulo de medição
- 3- Geometria (plano, côncavo, convexo, etc)
- 4- Espessura
- 5- Qualidade da superfície (polida, rugosa, oxidada, jateada).
- 6- Faixa espectral da medição do pirômetro.
- 7- Transmissividade (como em filme fino de plástico).

VALORES DE EMISSIVIDADE - METAIS

MATERIAL	EMISSIVIDADE		
	1,0μ	1,6μ	1,6μ
Aço			
Laminado	0.8 - 0.9	0.8 - 0.9	0.7 - 0.9
Inoxidável	0.35	0.2 - 0.9	0.1 - 0.8
Chapa / Barra Polida	0.35	0.25	0.1
Derretido	0.35	0.25 - 0.4	n.r.
Oxidado	0.8 - 0.9	0.8 - 0.9	0.7 - 0.9
Alumínio			
Não oxidado	0.1 - 0,2	0.02 - 0.2	n.r.
Oxidado	0.4	0.4	0.2 - 0.4
Chumbo			
Polido	0.35	0.05 - 0.2	n.r.
Rugoso	0.65	0.6	0.4
Oxidado	n.r.	0.3 - 0.7	0.2 - 0.6
Cobre			
Polido	n.r.	0.03	n.r.
Rugoso	n.r.	0.05 - 0.2	n.r.
Oxidado	0.2 - 0.8	0.2 - 0.9	0.4 - 0.8
Bl. do terminal elétrico			
	n.r	n.r	0.6
Cromo			
	0.4	0.4	n.r
Estanho (não oxidado)			
	0.25	0.1 - 0.3	n.r.
Ferro			
Oxidado	0.4 - 0.8	0.5 - 0.9	0.5 - 0.9
Não oxidado	0.35	0.1 - 0.3	n.r.
Enferrujado	n.r	0.6 - 0.9	0.5 - 0.7
Derretido	0.35	0.4 - 0.6	n.r.
Ferro frojado fosco	0.9	0.9	0.9
Ferro fundido oxidado	0.7 - 0.9	0.7 - 0.9	0.6 - 0.95
Ferro fundido não oxidado	0.35	0.3	0.2
Ferro derretido	0.35	0.3 - 0.4	0.2 - 0.3
Inconel			
Oxidado	0.4 - 0.9	0.6 - 0.9	0.7 - 0.95
Jateado	0.3 - 0.4	0.3 - 0.6	0.3 - 0.6
Eletropolido	0.2 - 0.5	0.25	0.15
Latão			
Polido	0.8 - 0.95	0.01 - 0.05	n.r.
Brunido	n.r.	n.r.	0.3
Oxidado	0.6	0.6	0.5
Magnésio			
	0.3 - 0.8	0.05 - 0.3	n.r.
Mercúrio			
	n.r.	0.05 - 0.15	n.r.
Molibdênio			
Oxidado	0.5 - 0.9	0.4 - 0.9	0.2 - 0.6
Não Oxidado	0.25 - 0.35	0.1 - 0.35	0.1
Monel (Ni-Cu)			
	0.3	0.2 - 0.6	0.1 - 0.14

MATERIAL	EMISSIVIDADE		
	1,0 μ	1,6 μ	1,6 μ
Níquel			
Oxidado	0.8 - 0.9	0.4 - 0.7	0.2 - 0.5
Eletrolítico	0.2 - 0.4	0.1 - 0.3	n.r.
Ouro	0.3	0.01 - 0.1	n.r.
Platina			
Preta	n.r.	0.95	0.9
Prata	n.r.	0.02	n.r.
Titânio			
Polido	0.5 - 0.75	0.3 - 0.5	n.r.
Oxidado	n.r.	0.6 - 0.8	0.5 - 0.6
Tungstênio	n.r.	0.1 - 0.6	n.r.
Polido	0.35 - 0.4	0.1 - 0.3	n.r.
Zinco			
Oxidado	0.6	0.15	0.1
Polido	0.5	0.05	n.r.

VALORES DE EMISSIVIDADE - NÃO METAIS

MATERIAL	EMISSIVIDADE			
	1,0 μ	5,0 μ	7,9 μ	8 - 14 μ
Água	n.r.	-	0.93	0.93
Amianto	0.9	0.9	0.95	0.95
Areia	n.r.	0.9	0.9	0.9
Argila	n.r.	0.85-0.95	0.95	0.95
Asfalto	n.r.	0.95	0.95	0.95
Basalto	n.r.	0.7	0.7	0.7
Borracha	n.r.	0.9	0.95	0.95
Calcário	n.r.	0.4 - 0.98	0.98	0.98
Carbano				
Não oxidado	0.8-0.95	0.8 - 0.9	0.8 - 0.9	0.8 - 0.9
Grafite	0.8 - 0.9	0.7 - 0.9	0.7 - 0.8	0.7 - 0.8
Carborundo	n.r.	0.9	0.9	0.9
Cascalho	n.r.	0.95	0.95	0.95
Cerâmica	0.4	0.85 - 0.95	0.95	0.95
Concreto	0.65	0.9	0.95	0.95
Gelo	n.r.	-	0.98	0.98
Gesso	n.r.	0.4 - 0.97	0.8 - 0.95	0.8 - 0.95
Madeira (natural)	n.r.	0.9 - 0.95	0.9 - 0.95	0.9 - 0.95
Neve	n.r.	-	0.9	0.9
Papel (qualquer cor)	n.r.	0.95	0.95	0.95
Pintura (não aluminizada)	n.r.	-	0.98	0.9 - 0.95
Plástico (opaco > 20 mils)	n.r.	0.95	0.95	0.95
Solo	n.r.	-	0.9 - 0.98	0.9 - 0.98
Tecido	n.r.	0.95	0.95	0.95
Vidro				
Plano	n.r.	0.98	0.85	0.85
"Gob"	n.r.	0.9	n.r.	n.r.

n.r. = não recomendado

Para otimizar as medições de temperaturas superficiais, considere as seguintes orientações:

1. Determine a emissividade do objeto para a faixa espectral do instrumento que será utilizado para medição.
2. Evite reflexões protegendo o objeto de fontes de alta temperatura ao seu redor.
3. Para objetos com temperaturas elevadas, use instrumentos c/ comprimento de onda curta, sempre que possível.
4. Para materiais semitransparentes, tais como, filme plástico e vidro, certifique-se de que o plano de fundo é uniforme e com temperatura menor do que a do objeto.
5. Segure o instrumento perpendicularmente à superfície, sempre que a emissividade for menor que 0,9. Em todos os casos, não exceda 30° no ângulo de incidência.
6. Para sensores com comprimento de onda de 1,0 μ e 1,6 μ , evite medições em ambientes com alta luminosidade.



Rua São Leonardo, 187 - Freguesia do Ó - São Paulo - SP
Cep: 02803-000 | Fone.: (11) 3976-4003 - Fone.: (11) 3999-7737
www.romiotto.com.br | E-mail: info@romiotto.com.br