

# Aparelhos de medição de temperatura por radiação

## 1. A RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

Dá-se o nome de **radiação infravermelha**, ou **infravermelhos**, a toda a radiação eletromagnética cujo comprimento de onda se situa entre  $0,76\ \mu\text{m}$  e  $1\ \text{mm}$ .

A faixa dos infravermelhos (IV) situa-se no espectro das ondas electromagnéticas entre a faixa visível e a faixa das micro-ondas. Do lado visível a fronteira é relativamente bem demarcada, uma vez que a vista humana apenas detecta a faixa entre  $0,38\ \mu\text{m}$  e  $0,76\ \mu\text{m}$ , ficando estabelecido que  $0,76\ \mu\text{m}$  é o extremo inferior dos IV em termos de comprimento de onda. Do lado das micro-ondas (extremo superior dos IV) existe uma sobreposição de nomes, uma vez que estas se estendem por dentro dos IV, até comprimentos de onda de  $0,1\ \text{mm}$ .

A faixa dos IV está dividida em três subfaixas: IV próximos ( $0,76\ \mu\text{m}$  a  $2,5\ \mu\text{m}$ ), IV médios ( $2,5\ \mu\text{m}$  a  $5\ \mu\text{m}$ ) e IV afastados ( $5\ \mu\text{m}$  a  $1000\ \mu\text{m}$ ). Estes nomes têm a ver com a maior ou a menor proximidade em relação ao espectro da radiação visível.

A radiação IV está associada ao calor. Com efeito, esta radiação faz parte da que é emitida pelo corpo negro quando este se encontra a uma determinada temperatura. Sabemos que o comprimento de onda  $\lambda_{\text{máx}}$  a que corresponde o máximo da radiação emitida por um corpo negro é inversamente proporcional à sua temperatura absoluta  $T$ , de acordo com a equação (1)

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{b}{T} \quad (1)$$

em que  $b=2\ 897,7685 \times 10^{-6}\ \text{m K}$  (metro kelvin) representa a **constante de dispersão de Wien**.

Como curiosidade, note-se que o Sol, cuja superfície se encontra à temperatura  $T=5800\ \text{K}$ , tem o pico da sua energia radiada no comprimento de onda  $\lambda_{\text{sol}}=0,555\ \mu\text{m}$  (região do visível a que corresponde a maior sensibilidade da visão humana), mas a maior parte da energia por ele radiada encontra-se na faixa dos IV. Uma lâmpada de iluminação com filamento de tungsténio,  $T \approx 2000\ \text{K}$  tem o pico de radiação no comprimento de onda  $\lambda_{\text{W}}=1,4\ \mu\text{m}$  (região dos IV próximos). Da equação (1) também se conclui que a temperatura a que corresponde o pico de radiação no comprimento de onda  $15\ \mu\text{m}$  são  $-80\ ^\circ\text{C}$ .

De referir, também, que no reino animal determinadas espécies de cobras, como por exemplo a víbora, têm junto à cabeça órgãos sensoriais capazes de detectarem a radiação IV até um

comprimento de onda de  $11\ \mu\text{m}$ , podendo deste modo localizar animais de sangue quente. Na realidade este comprimento de onda corresponde à temperatura  $T=-10\ ^\circ\text{C}$ .

Não é só através da radiação de um corpo negro que podem ser emitidos IV. O LASER de  $\text{CO}_2$  é um dispositivo emissor de radiação IV com duas riscas (dois comprimentos de onda) muito estreitas, centradas em  $9,6\ \mu\text{m}$  e em  $10,6\ \mu\text{m}$ , podendo corresponder a uma potência contínua de algumas centenas de quilowatt concentrada num feixe de densidade muito elevada, com um diâmetro de cerca de  $1\ \text{mm}$ . Este dispositivo é utilizado para cortar chapas de aço com a espessura de alguns centímetros e requer medidas de protecção e de segurança muito apertadas.

## 2. APARELHOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR RADIAÇÃO

A necessidade de medir a temperatura de objectos nos quais não é possível colocar fisicamente um sensor de temperatura, conduziu ao desenvolvimento de métodos de medição que utilizam a radiação emitida por esses corpos. De entre os motivos pelos quais não é possível colocar um sensor em contacto com o material do qual se pretende saber a temperatura salientam-se:

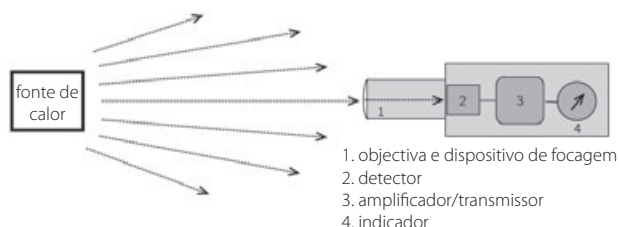
- materiais a temperaturas elevadas, e.g. os metais em fusão numa siderurgia;
- materiais corrosivos, e.g. o "smelt"<sup>1</sup> na fornalha de uma caldeira de recuperação de lixívia negra (indústria da pasta de papel);
- órgãos de máquinas e peças em movimento numa linha de montagem;
- objetos inacessíveis como os corpos celestes no caso da astronomia.

Como a maior parte das utilizações foram originadas pela necessidade de medição de temperaturas elevadas, aos dispositivos utilizados dá-se o nome de **pirómetros**<sup>2</sup>. São, também hoje em dia, vulgares os dispositivos que utilizam a radiação IV emitida pelos corpos para medir temperaturas da ordem da temperatura ambiente e mesmo inferiores, devendo estes, neste caso particular, ser chamados **termómetros**.

O esquema de princípio de um aparelho de medição de temperatura por radiação IV encontra-se indicado na Figura 1. Há basicamente três tipos de dispositivos: o **pirómetro óptico**, o **termómetro de IV** e o **termómetro de fotões**. Também se destaca a **câmara de IV**.

1 Sais fundidos.

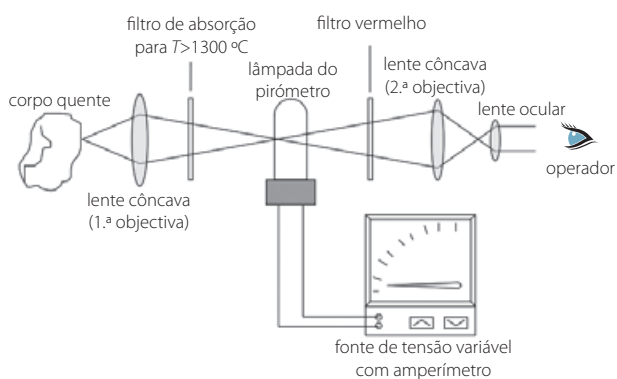
2 Do grego "pyro", que significa fogo.



**Figura 1.** Esquema de princípio de um aparelho de medição de temperatura por radiação IV.

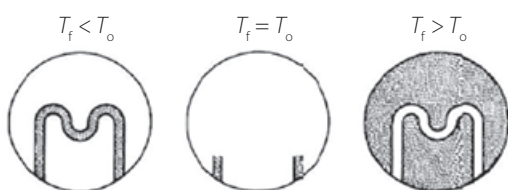
### 2.1. Pirómetro óptico

Os pirómetros ópticos são hoje uma curiosidade histórica. Destinam-se ao intervalo de medição de temperaturas compreendidas entre os 700 °C e os 4000 °C. Neste tipo de pirómetros, a energia radiante emitida pelo corpo é focada por meio de uma primeira objectiva sobre o filamento de tungsténio de uma lâmpada de incandescência, sendo a imagem do conjunto, depois de filtrada, focada por uma segunda objectiva e observada através de uma ocular, como se representa na Figura 2. O filtro de absorção, colocado entre a primeira objectiva e o filamento de tungsténio, destina-se a estender a utilização do pirómetro a temperaturas elevadas. O filtro vermelho tem por finalidade restringir a análise espectral a uma estreita faixa de frequências da zona do visível, significativa para o espectro da radiação correspondente ao intervalo de medição deste pirómetro. A fonte de tensão variável com amperímetro ajusta a corrente da lâmpada de incandescência, permitindo controlar o brilho do seu filamento de tungsténio.



**Figura 2.** Esquema de princípio de funcionamento de um pirómetro óptico.

A imagem observada através da ocular contém o filamento de tungsténio e o objeto incandescente sobrepostos, como se representa na Figura 3 em três casos distintos:  $T_f < T_o$ ,  $T_f = T_o$  e  $T_f > T_o$ , em que  $T_f$  e  $T_o$  designam as temperaturas do filamento de tungsténio e do objecto, respectivamente.



**Figura 3.** Aspecto do filamento de tungsténio da lâmpada de incandescência de um pirómetro óptico para três diferentes relações entre a temperatura do filamento de tungsténio  $T_f$  e a temperatura do objeto  $T_o$ .

O operador ajusta a corrente eléctrica da lâmpada de incandescência até que o seu filamento de tungsténio deixe de ser visível, desaparecendo da imagem. Nesta situação tem-se  $T_f = T_o$ . Quando é  $T_f < T_o$ , o filamento de tungsténio aparece escurecido e o fundo da imagem é brilhante. Para a situação em que se tem  $T_f > T_o$ , o filamento de tungsténio aparece brilhante e o fundo da imagem é escuro. O valor da amplitude da corrente eléctrica é indicativo da temperatura medida do objecto.

Os pirómetros ópticos são calibrados visualmente, comparando o brilho do filamento de tungsténio da lâmpada de incandescência com o brilho de um corpo negro, a diversas temperaturas conhecidas.

É de notar que a energia radiada depende da temperatura e da emissividade  $\epsilon$  do material. No entanto, a 1500 K, um erro de 20% no valor da emissividade introduz um erro na determinação da temperatura de apenas 1,3 %.

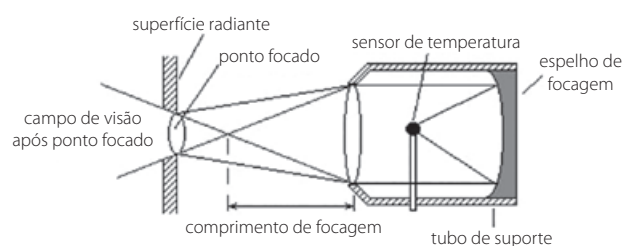
Na Tabela 1 indicam-se os valores da emissividade  $\epsilon$  de alguns materiais.

**Tabela 1.** Emissividade  $\epsilon$  de alguns materiais.

| Material   | Sólido      | Líquido | Material         | Sólido | Líquido |
|------------|-------------|---------|------------------|--------|---------|
| berílio    | 0,61        | 0,61    | tântalo          | 0,49   | –       |
| carbono    | 0,80 – 0,93 | –       | tório            | 0,36   | 0,40    |
| crómio     | 0,34        | 0,39    | titânio          | 0,63   | 0,65    |
| cobalto    | 0,36        | 0,37    | tungsténio       | 0,43   | –       |
| cobre      | 0,10        | 0,15    | urânio           | 0,54   | 0,34    |
| ferro      | 0,35        | 0,37    | vanádio          | 0,35   | 0,32    |
| manganês   | 0,59        | 0,59    | zircónio         | 0,32   | 0,30    |
| molibdénio | 0,37        | 0,40    | aço              | 0,35   | 0,37    |
| nióbio     | 0,37        | 0,40    | ferro fundido    | 0,37   | 0,40    |
| níquel     | 0,36        | 0,37    | constantan       | 0,35   | –       |
| platina    | 0,30        | 0,38    | monel            | 0,37   | –       |
| ródio      | 0,24        | 0,30    | 90 % Ni, 10 % Cr | 0,35   | –       |
| prata      | 0,07        | 0,07    | 80 % Ni, 20 % Cr | 0,35   | –       |

### 2.2. Termómetro de IV

Estes termómetros de IV medem a energia radiada na zona dos IV mais afastados do visível do que o pirómetro óptico. Destinam-se à medição de temperaturas mais baixas, tipicamente entre os –20 °C e os 1000 °C. O esquema de funcionamento deste termómetro de IV encontra-se indicado na Figura 4.



**Figura 4.** Esquema de funcionamento de um termómetro de IV.

O feixe de IV é focado sobre um sensor de temperatura, através de uma lente côncava e de um espelho parabólico. Como sensor de temperatura é comum utilizarem-se termopares ou termístores. A temperatura de equilíbrio do sensor depende da energia absorvida e da energia perdida por radiação, condução e convecção.

Convém, contudo, chamar a atenção para o facto de que a lente de IV utilizada no termómetro de IV representado na Figura 4 não deverá ser de vidro, mas sim feita de um material transparente aos IV (e.g. safira, fluoreto de cálcio ou germânio), escolhido consoante o intervalo de comprimentos de onda em que se trabalha. Este último poderá ser estreito caso seja utilizado um filtro passa banda de IV.

Os termómetros de IV medem um valor médio da temperatura dos corpos que se encontram dentro do seu campo de visão, pelo que é importante conhecer a sua abertura.

Para aumentar a sensibilidade destes dispositivos, o sensor de temperatura, quando constituído por termopares, utiliza uma ligação em série destes sob a forma de uma **termopilha** com a configuração física de um disco, como indicado na Figura 5.

À semelhança dos pirómetros ópticos, os termómetros de IV efectuem uma medição de temperatura influenciada pela emissividade do objecto, tendo por isso um ajuste para a sua compensação. As leituras são ainda afectadas por gases e vapores que se possam interpor no caminho do feixe de IV.



Figura 5. Esquema de uma termopilha em associação série de termopares.

Também os **vidros protectores** alteram as leituras, chegando a comportar-se como **corpos opacos** em certos intervalos de comprimentos de onda.

### 2.3. Termómetro de fotões

Pela própria constituição do detector, estes termómetros de fotões são de resposta muito mais rápida do que a dos anteriores, podendo efectuar algumas centenas de milhar de leituras por segundo. Usam-se num intervalo de medição global desde os  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  até aos  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para todos os tipos de material semicondutor utilizado como detector. A sua resolução é elevada, da ordem de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  à temperatura de  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 2.4. Câmara de IV

As câmaras de IV são de constituição análoga à das máquinas fotográficas digitais, com a grande diferença de cada píxel utilizar um detetor de IV. A sua utilização tem tido um rápido cres-

cimento na detecção da radiação IV emitida por cada ponto de uma imagem. As suas aplicações podem ir desde a detecção de terminais mal apertados em quadros eléctricos e isoladores estalados (com fugas) em linhas de alta tensão, até à detecção de problemas ósseos nos seres humanos, visão noturna, etc. No entanto, a sua grande aplicação reside no domínio da astronomia. Com efeito, a atmosfera terrestre é transparente à radiação IV nas bandas de  $3\text{ }\mu\text{m}$  a  $5\text{ }\mu\text{m}$  e de  $8\text{ }\mu\text{m}$  a  $12\text{ }\mu\text{m}$ , tornando estas bandas ideais para a observação, a partir da Terra, da radiação IV proveniente de galáxias distantes. A empresa *Rockwell Scientific*<sup>®</sup> (entretanto comprada pela *Teledyne Technologies*<sup>®</sup>, em Setembro de 2006) já construiu, para este fim, alguns "arrays" de detetores de IV com  $2048 \times 2048$  píxeis (4,2 milhões de píxeis). Os fotodetectores são de HgCdTe (telureto de mercúrio-cádmio) e o "array" mede cerca  $8 \times 8\text{ cm}$ . Os sinais eléctricos gerados pelos fotodetectores do "array" são amplificados por 13 milhões de transístores CMOS, dispostos num circuito integrado com  $4 \times 4\text{ cm}$ , dos maiores já fabricados.

A *Teledyne Technologies*<sup>®</sup> comercializa atualmente os modelos *H4RG-15* e *H4RG-10* correspondentes a "arrays" de fotodetectores com  $4096 \times 4096$  píxeis (16,8 milhões de píxeis), com densidade de píxel de  $15\text{ }\mu\text{m}$  e de  $10\text{ }\mu\text{m}$ , e área de imagem de  $61 \times 61\text{ mm}$  e de  $41 \times 41\text{ mm}$ , respectivamente. Na Figura 6 representa-se o circuito integrado *H4RG-10* para instrumentação visível e IV quer em aplicações terrestres quer em telescópios espaciais.

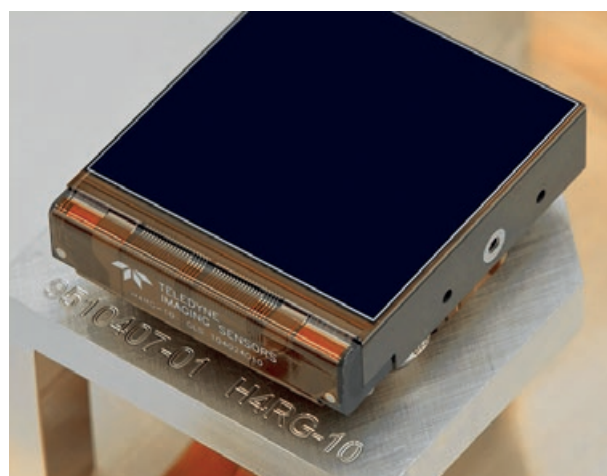



Figura 6. Circuito integrado *Teledyne Technologies H4RG-10*<sup>®</sup> para instrumentação visível e IV em aplicações terrestres e em telescópios espaciais (cortesia da *Teledyne Technologies*<sup>®</sup>). 



O filtro vermelho tem por finalidade restringir a análise espectral a uma estreita faixa de frequências da zona do visível, significativa para o espectro da radiação correspondente ao intervalo de medição deste pirómetro. A fonte de tensão variável com amperímetro ajusta a corrente da lâmpada de incandescência, permitindo controlar o brilho do seu filamento de tungsténio.