2 Base Teórica

2.1. Radiação Eletromagnética

Na teoria clássica, a radiação eletromagnética é considerada como uma onda, consistindo de um campo elétrico e um campo magnético no espaço livre que são perpendiculares entre si e a sua direção de propagação, ver Fig.17.



Figura 17 - Radiação eletromagnética descrita pela teoria clássica.

A luz, o calor (energia térmica radiante), as ondas de rádio, as ondas de radares e os raios-x são todas formas de radiação eletromagnética. Cada uma é caracterizada pela faixa específica de comprimento de onda e, também, pela técnica ou processo pela qual é gerada. O *espectro eletromagnético* de radiação cobre uma extensa faixa de comprimento de onda, que varia de comprimentos extremamente pequenos, como, por exemplo, os raios- γ com cerca de 10^{-12} m (emitidos por materiais radioativos) até comprimentos de onda muito grandes, como ondas de rádio com cerca de 10^{5} m[3].

A unidade de comprimento de onda na região de interesse é comumente descrita em micrometro (µm). O espectro eletromagnético em escala logarítmica, ver Fig.18.



Figura 18 - Espectro eletromagnético e a região do espectro infravermelho[5].

A luz visível encontra-se dentro de uma pequena região dentro do espectro eletromagnético, com comprimentos de onda entre $0,40\mu$ m e $0,70\mu$ m. Nossa percepção das cores é determinada pelo comprimento de onda; por exemplo, a radiação eletromagnética tendo um comprimento de onda de $0,40\mu$ m aparece violeta, enquanto que a cor verde e vermelha ocorre a comprimentos de onda de $0,50\mu$ m e $0,65\mu$ m, respectivamente.

A radiação eletromagnética denominada de *infravermelho* encontra-se dentro de uma região do espectro eletromagnético, com comprimentos de onda entre 0,7µm e 1400µm, conseqüentemente não é visível para nós. Na prática, a medição de temperatura a partir da radiação infravermelha emitida por um corpo é feita com comprimentos de onda entre 0,7µm a 20µm[6].

Toda radiação eletromagnética se propaga no vácuo à mesma velocidade, que é igual à da luz, $c_0=2,998 \times 10^8$ m/s. Além disto a freqüência v e o comprimento de onda λ são uma função da velocidade, de acordo com a fórmula:

$$c = \lambda \cdot v \tag{1}$$

Uma outra teoria desenvolvida para explicar os fenômenos da radiação eletromagnética foi a mecânica quântica, a qual considera a radiação

eletromagnética como a propagação de um conjunto de partículas denominadas de *fótons ou quantas*.

A energia de 1(um) fóton é dita quantizada, ou seja, tendo apenas valores específicos, definidos pela seguinte relação:

$$E = h \cdot v = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \qquad (2)$$

onde *h* é uma constante universal denominada de "*constante de Planck*" que tem o valor considerado igual a $h=6,6256 \times 10^{-34}$ J.s.

A energia do fóton é proporcional à freqüência da radiação eletromagnética e inversamente proporcional ao comprimento de onda.

2.2. Radiação Térmica

Toda forma de matéria que esteja a uma temperatura (T) acima do zero absoluto (0K=-273,15°C) emite radiação eletromagnética diretamente proporcional à magnitude desta temperatura. Isto é denominado de radiação característica ou radiação térmica[5].

O mecanismo de emissão de radiação térmica por um objeto é relacionado à liberação de energia que ocorre devido ao movimento interno dos átomos que o constituem, como oscilações e transições. A intensidade deste movimento de átomos depende da temperatura e, então, radiação eletromagnética (partículas de fótons) é emitida. Estes fótons movem-se à velocidade da luz e comportam-se de acordo com os princípios ópticos conhecidos. Eles podem ser defletidos, focalizados com uma lente ou refletidos por superfícies. O espectro desta radiação térmica varia de 0,7µm a 1000µm. Por esta razão, esta radiação não pode ser normalmente vista a olho nu. Esta região do espectro eletromagnético pertence ao início da faixa de luz visível vermelha e por esta razão tem sido denominada de "infravermelho"[7].

Para gases e sólidos semitransparentes, tal como o vidro, o cristal de sal quando em altas temperaturas. a emissão de radiação térmica é um *fenômeno volumétrico*. Na maioria dos sólidos e líquidos a radiação térmica é um *fenômeno de superfície*; conseqüentemente, a radiação térmica emitida é gerada pelo movimento de átomos e/ou moléculas a uma distância de aproximadamente 1µm $(10^4 \text{ camadas atômicas})$ da superfície[7]. A radiação térmica emitida por uma superfície pertence a uma extensa faixa de comprimentos de onda no espectro infravermelho, ver Fig.18, a magnitude da radiação varia com o comprimento de onda, e o termo espectral é usado para se referir à natureza desta dependência. A radiação emitida consiste de uma contínua e não uniforme distribuição angular de componentes monocromáticos (comprimentos de onda únicos).

A natureza espectral da radiação térmica é uma das duas características que complicam sua descrição. A segunda característica é a sua direcionalidade, ou seja, uma superfície pode emitir preferencialmente em certas direções, criando assim uma distribuição direcional de radiação emitida.

A magnitude da radiação térmica para um determinado comprimento de onda e a distribuição espectral variam com a temperatura e com a natureza da superfície emissora[7].

2.3. Resumo histórico

Gustav Kirchoff, em 1860, definiu o que seria um "corpo negro" (Blackbody) como sendo uma superfície ideal tendo as seguintes propriedades:

- 1. Um corpo negro absorve toda radiação eletromagnética incidente, independentemente do comprimento de onda e de sua direção.
- Para uma determinada temperatura e um determinado comprimento de onda, nenhuma superfície pode emitir nem absorver mais energia do que um corpo negro.
- 3. Embora a radiação eletromagnética emitida por um corpo negro seja função do comprimento de onda e da temperatura, ela independe da direção. Isto quer dizer que um corpo negro é um emissor difuso, ou seja, um perfeito emissor de radiação eletromagnética.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA

Ele sugeriu que tal superfície poderia ser realizada pelo aquecimento de um objeto oco (um tubo ou uma esfera vazia) e observar-se-ia a radiação térmica por um pequeno orifício (um furo cilíndrico com uma profundidade de 5 a 9 vezes o seu diâmetro) na superfície do objeto.[8]

Kirchoff definiu a *emissividade* (ε) de um corpo não negro como a razão entre sua energia radiante e a energia radiante de um similar corpo negro para mesma temperatura. Devemos notar que a emissividade de um corpo negro é $\varepsilon_{negro}=1$ e que a emissividade de um corpo não negro é $\varepsilon_{não negro}<1$, e que $\varepsilon_{não negro}$ varia fortemente com o comprimento de onda.

Henri LeChatelier, em 1892, construiu o primeiro pirômetro ótico. Este era feito com uma lâmpada a óleo que servia como fonte de referência de radiação térmica, um filtro (vidro vermelho) para limitar o comprimento de onda e um diafragma para tentar igualar a fonte de luz e o objeto aquecido.

Wilhelm Wien, em 1896, derivou sua lei para a distribuição de energia (radiação eletromagnética emitida) no espectro de emissão de um corpo negro como:

$$J_{b,\lambda} = \frac{f(\lambda \cdot T)}{\lambda^5} \therefore f(\lambda \cdot T) = \frac{2 \cdot h \cdot c_0^2}{exp \left[\frac{h \cdot c_0}{\lambda \cdot k \cdot T}\right]}$$
(3)

Onde (*J*) representa a intensidade de radiação eletromagnética emitida por um corpo negro para uma determinada temperatura (*T*) e comprimento de onda (λ), *h*=6,6256 x 10⁻³⁴J.s, *k*=1,3807 x 10⁻²³J.K⁻¹ e *c*₀=2,998x10⁸m/s.

Max Planck, para corrigir os desvios que apareciam entre a equação (3) e os dados experimentais para altos valores de λ .*T*, sugeriu em 1900 a seguinte expressão matemática:

$$J_{b,\lambda} = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{exp\left[\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right] - 1}$$
(4)

Para descrever a intensidade de radiação emitida por um corpo negro para qualquer comprimento de onda. Onde $c_1 e c_2$ são conhecidas como primeira e segunda constante de radiação, e são iguais a: $c_1 = 2\pi h c_0^2 = 3,7413 \times 10^8 \text{W.}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$

e
$$c_2 = \frac{hc_0}{k} = 1,43883 \times 10^4 \mu \text{m.K.}$$

Para explicar o significado de (-1) no denominador, Planck desenvolveu a teoria quântica, a qual ele postula que: as ondas eletromagnéticas somente podem ser emitidas por um corpo na forma de certos pacotes discretos de energia ou "quanta". Subseqüentemente Planck recebeu o prêmio Nobel por este trabalho em 1918.

A equação (4) é conhecida como *distribuição de Planck*, a Fig.19 mostra a distribuição de energia para um corpo negro para diferentes temperaturas.



Figura 19 - Radiação característica de um corpo negro em relação a sua temperatura[6].

Características importantes que devem ser notadas na Fig.19 são:

- 1. A radiação eletromagnética emitida varia continuamente com o comprimento de onda.
- Para um determinado comprimento de onda a radiação eletromagnética emitida aumenta com o aumento de temperatura.
- A região do espectro na qual a radiação eletromagnética está concentrada depende da temperatura, comparativamente mais radiação eletromagnética é emitida para pequenos comprimentos de onda como para maiores temperaturas.
- Para temperaturas menores que 800K, a radiação eletromagnética emitida é predominantemente na região do infravermelho no espectro e não é visível a olho nu.

Base teórica para medição de temperatura a partir da radiação infravermelha

Das fórmulas definidas anteriormente conseguiu-se provar certas leis, que hoje são a base para a medição de temperatura a partir da radiação infravermelha emitida por um objeto.[9]

2.4.1.Lei de Kirchoff

Quando um objeto está em equilíbrio térmico, a quantidade de radiação eletromagnética absorvida é igual à radiação emitida.

$$a = e \tag{5}$$

Obs.: Relembrando o descrito anteriormente, Kirchoff definiu a *emissividade* (ϵ) de um corpo não negro como a razão entre sua energia radiante e a energia radiante de um similar corpo negro para mesma temperatura. Deve-se notar que a emissividade de um corpo negro é $\epsilon_{negro} = 1$ e que a emissividade de um corpo não negro é $\epsilon_{não negro} < 1$, e que $\epsilon_{não negro}$ varia fortemente com o comprimento de onda.

2.4.2.Lei de Stefan e Boltzmann

A potência emissiva hemisférica total de um corpo negro (E_b) pode ser expressa como:

$$J_{b} = E_{b} = \int_{0}^{\infty} \frac{c_{I} \cdot \lambda^{-5}}{exp\left[\frac{c_{2}}{\lambda \cdot T}\right] - I} d\lambda, \qquad (6)$$

determinando-se numericamente esta equação chegou-se à seguinte expressão:

$$E_b = \sigma T^4 \,, \tag{7}$$

onde σ é a constante de Stefan e Boltzmann e seu valor numérico é considerado igual a: σ =5,6697 x10⁻⁸W/m².K⁴.

Obs.: Relembrando o descrito anteriormente, Kirchoff definiu também a emissividade (ε) de um corpo não negro (E_λ) como a razão entre sua energia radiante e a energia radiante de um similar corpo negro (E_b) para a mesma temperatura. Então:

$$\varepsilon = \frac{E_{\lambda}}{E_{b}} \therefore E_{\lambda} = \varepsilon \cdot E_{b} \therefore E_{\lambda} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^{4}$$
(8)

2.4.3.Lei do Deslocamento de Wien

Na Fig.19, pode-se ver que a distribuição espectral ($J_{b, max}$) tem um valor máximo e que este corresponde a um valor de comprimento de onda (λ_{max}) para uma determinada temperatura. A natureza desta dependência pode ser obtida derivando a equação de distribuição de Planck (4) em relação a λ e igualando a zero. Então obtemos a seguinte relação:

$$\lambda_{max} = T \cdot c_3$$
, onde: $c_3 = 2897,8 \mu m.K.$ (9)

Como exemplo da aplicação da Lei do deslocamento de Wien podemos considerar o Sol como um corpo negro que emite radiação a partir de uma temperatura de 5800K, então a máxima intensidade da radiação eletromagnética é para um comprimento de onda de λ_{max} =0,5µm, ou seja, dentro do espectro visível.

Para um corpo negro a uma temperatura de 1000K, o comprimento máximo de onda ocorre a 2,90µm, com alguma radiação emitida dentro do espectro visível como luz vermelha.

Com o aumento da temperatura, menor será o comprimento de onda da radiação emitida por um corpo. Por exemplo, um filamento de uma lâmpada de tungstênio operando a 2900K (λ_{max} =1,0µm) emite luz branca visível, embora a maior quantidade de radiação emitida esteja na região infravermelha.

2.5. Propriedades da radiação eletromagnética

Quando a radiação eletromagnética atinge uma superfície de um material semitransparente, como por exemplo uma placa de vidro, parte da radiação é refletida (r), parte é absorvida (a), e parte é transmitida (t)[10], ver Fig.20.



Figura 20 - Propriedades da radiação eletromagnética ao atingir um material semitransparente[6].

A refletividade (ρ) é a fração refletida, a absortividade (α) é a fração absorvida e a transmissividade (τ) é a fração transmitida. Portanto:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \tag{10}$$

Muitos corpos sólidos não transmitem a radiação térmica, e para muitos problemas práticos, a transmissividade pode ser considerada igual a zero. Assim

$$\rho + \alpha = 1 \tag{11}$$

Quando um fluxo de radiação eletromagnética atinge uma superfície, podem ser observados dois tipos de reflexão. Se o ângulo de incidência for igual ao ângulo de reflexão, a reflexão é dita *especular*. Por outro lado, quando a radiação incidente é distribuída uniformemente em todas as direções após a reflexão, esta é dita *difusa*. Um espelho comum é praticamente especular para a luz visível, mas não é necessariamente especular para todos os comprimentos de onda da radiação térmica. De uma maneira geral, uma superfície áspera apresenta um comportamento difuso mais pronunciado do que uma superfície polida. Analogamente, uma superfície polida é mais especular do que uma superfície áspera. A influência da rugosidade superfícial sobre as propriedades da radiação térmica dos materiais é um assunto que vem sendo continuamente pesquisado.

A potência emissiva hemisférica total *E* de um corpo é definida como a energia emitida por um corpo por unidade de área e por unidade de tempo. Podemos estabelecer uma relação entre o poder emissivo de um corpo e as propriedades do material definidas acima. Considere uma cavidade perfeitamente negra, ou seja, uma cavidade que absorva toda radiação incidente sobre ela, ver Fig.21. Esta cavidade também emite radiação conforme a lei de Stefan e Boltzmann.



Figura 21 - Cavidade esférica que simula um corpo negro[9].

Seja q_i [W/m²] o fluxo de radiação eletromagnética incidente em alguma área na cavidade. Suponha agora que um corpo seja colocado no interior da cavidade e lá deixado até que entre em equilíbrio térmico com a cavidade. No equilíbrio a energia absorvida pelo corpo deve ser igual à energia emitida, pois, caso contrário, estaria havendo um fluxo de energia entrando ou saindo do corpo, o que iria elevar ou abaixar a sua temperatura. Na condição de equilíbrio pode-se escrever:

$$E.A = q_i. A. \alpha \tag{12}$$

Substituindo o corpo na cavidade por um corpo negro de mesma forma e mesmas dimensões, em equilíbrio térmico com a cavidade à mesma temperatura,

$$E_{b}A = qi \,.\, A \tag{13}$$

Pois a absortividade α de um corpo negro é a unidade. Dividindo (12) por (13), tem-se:

$$\frac{E}{E_b} = \alpha \tag{14}$$

O que significa que a relação entre a potência emissiva hemisférica total de um corpo qualquer e a potência emissiva hemisférica total de um corpo negro para a mesma temperatura é igual a absortividade α do corpo. Esta relação é definida como a emissividade (ε) do corpo

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \tag{15}$$

As emissividades e absortividades que estão sendo discutidas são as propriedades totais de um material particular, isto é, representam o comportamento integrado do material em todos os comprimentos de onda. Os materiais reais emitem menos radiação eletromagnética do que as superfícies negras ideais. Na realidade, a emissividade de um material varia com a temperatura e o comprimento de onda da radiação.

Um corpo cinzento é definido como aquele cuja emissividade monocromática ε_{λ} do corpo é independente do comprimento de onda. A emissividade monocromática é definida como a relação entre a potência total emissiva monocromática de um corpo e a potência emissiva hemisférica monocromática de um corpo negro no mesmo comprimento de onda e na mesma temperatura. Portanto

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{E_{b\lambda}} \tag{16}$$

A potência total emissiva de um corpo pode ser relacionada à emissividade monocromática observando-se que:

$$E = \int_{0}^{\infty} \varepsilon_{\lambda} \cdot E_{b,\lambda} d\lambda \ e \ E_{b} = \int_{0}^{\infty} E_{b,\lambda} d\lambda = \sigma \cdot T^{4}$$
(17) e (18)

e, portanto,

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda \cdot E_{b,\lambda} d\lambda}{\sigma \cdot T^4}$$
(19)

onde $E_{b,\lambda}$ é a potência emissiva hemisférica total de um corpo negro por unidade de comprimento de onda. Para uma condição de corpo cinzento, isto é, ε_{λ} =constante, a equação (19) fica

$$\varepsilon = \varepsilon_{\lambda}$$
 (20)

As emissividades dos materiais variam significativamente com o comprimento de onda, a temperatura e a condição de sua superfície. Alguns valores típicos da emissividade total para vários materiais, ver Fig.22.

Material	Temperatura	Emissividade	Material Temperatura Emissiv		Emissividade
	[°C]			[°C]	
Alumínio			Chumbo		
Polido	100	0,065	Não oxidado	127 a 227	0,057 a 0,075
Comercial	100	0,09	Oxidado	200	0,63
Óxido	500 a 827	0,42 a 0,26	Inconel		
Asfalto			Tipo X	-	0,55 a 0,78
Comum	ambiente	0,90 a 0,98	Tipo B	450 a 1620	0,35 a 0,55
Camada de óleo			Magnésio		
sobre um metal			Óxido de		
Espessura de 0,001"	ambiente	0,27	Magnésio	227 a 826	0,55 a 0,20
Espessura de 0,002"	ambiente	0,46		900 a 1704	0,20
Espessura de 0,005"	ambiente	0,72	Molibdênio		
Bronze			Polido	538	0,05
Polido	50	0,10		1482	0,17
Concreto			Oxidado	538	0,82
	0 a 100	0,94	Não oxidado	1000	0,13
Cobalto				1500	0,19
Não oxidado	500	0,13		2000	0,24
	1000	0,23	Filamento	827 a 2593	0,096 a 0,202
Cobre			Níquel		
Comercial	20	0,07	Polido	20	0,12
Oxidado	25	0,78		1204	0,32
	50	0,6 a 0,70	Oxidado	200	0,37
	200	0,60		871	0,85
	500	0,88		1200	0,85
Polido	50 a 100	0,02 a 0,05	Não oxidado	25	0,045
Cerâmica				100	0,06
Porcelana	20	0,92		500	0,12
Refratário branco	93	0,94		1000	0,19
Refratário negro	93	0,90	Ouro		
Cromo			Puro polido	100	0,02
Polido	50	0,10		200 a 600	0,02 a 0,03
	500 a 1000	0,28 a 0,38	Não oxidado	100	0,02
Oxidado	316	0,08		500	0,03
	482	0,18	Pele humana		
	650	0,27		36,7 a 37,2	0,985
	816	0,36	Platina		
	982	0,66	Polida	200 a 600	0,05 a 0,10
Carbono			Não oxidada	25	0,037
Filamento	1000 a 1400	0,53		100	0,047
Grafite	0 a 3600	0,70 a 0,80		500	0,096

Emissividade total para várias superfícies

Figura 22 - Tabela de valores de emissividade para diversos materiais[9].

2.6. Princípio de funcionamento de um pirômetro infravermelho

Um pirômetro infravermelho mede a temperatura através da detecção da radiação infravermelha emitida por qualquer material que esteja acima do zero absoluto (0K).[6]

O projeto de construção básico de um pirômetro infravermelho consiste de: uma lente para focalizar a radiação infravermelha sobre um detector, o detector converte esta energia (radiação infravermelha) em um sinal elétrico que pode ser correlacionado com as unidades de temperatura do Sistema Internacional (SI), um ajuste de emissividade para encontrar o ponto de calibração do pirômetro infravermelho para as características de emissividade do objeto que está sendo medido e um circuito para compensação da temperatura ambiente para assegurar que variações de temperatura dentro do pirômetro infravermelho não sejam transferidas para o sinal de saída.

Por muitos anos este conceito de construção foi utilizado pela maioria dos fabricantes de pirômetros infravermelhos. Eles eram extremamente limitados na sua aplicação e seu retrospecto de medição de temperatura era insatisfatório para a maioria das circunstâncias práticas, embora eles fossem muito duráveis, ver Fig.23.





Os modernos pirômetros infravermelhos são fabricados também neste conceito de construção, mas são mais sofisticados tecnologicamente para abranger um grande número de aplicações práticas. As maiores diferenças são encontradas no uso de uma grande variedade de detectores de radiação infravermelha; filtros seletivos de radiação infravermelha; linearização e amplificação do sinal do detector e sinal final de saída 4 a 20mA, 0 a 10Vdc, etc. Um típico conceito de um moderno pirômetro infravermelho é mostrado na Fig.24.



Figura 24 - Conceito moderno de medição de temperatura por radiação infravermelha[9].

2.7. Tipos de Pirômetro Infravermelhos

Uma conveniente classificação pode ser empregada para os pirômetros infravermelhos.[11]

- Pirômetros com faixa espectral extensa (broadband).
- Pirômetros com faixa espectral estreita (narrow band).
- Pirômetros com razão espectral (ratio).

2.7.1.Pirômetros com faixa espectral extensa (broadband)

Os pirômetros com faixa espectral extensa são os mais simples pirômetros infravermelhos, possuindo uma resposta espectral para uma extensa faixa de comprimento de onda que varia de 0,3µm até 20µm. Esta faixa é determinada pelas lentes utilizadas.

49

Os pirômetros com faixa espectral extensa têm sido denominados de "pirômetros de radiação total", devido ao fato de poderem medir uma significativa fração de toda radiação térmica emitida por um objeto.

As principais vantagens são:

- ✓ economia;
- ✓ capacidade de medir uma grande faixa de temperaturas;
- ✓ construção mais simples.

As desvantagens são:

- ✓ baixa sensibilidade;
- ✓ suscetibilidade a erros devido às condições atmosféricas entre o objeto e o pirômetro.

2.7.2.Pirômetros com faixa espectral estreita (narrow band)

Os pirômetros com faixa espectral estreita operam sobre uma estreita faixa de comprimentos de onda. A resposta espectral de muitos desses pirômetros é determinada pelos filtros ópticos utilizados.

Os pirômetros com faixa espectral estreita são utilizados para medir uma determinada faixa de temperatura de interesse. Por exemplo, um pirômetro que possua um detector feito de células de silício deverá ter um estímulo máximo de sinal para uma radiação com um comprimento de onda de 0,9µm. Tais pirômetros, somente poderão ser utilizados para medição de temperaturas de objetos acima de 600°C.

Outros tipos de pirômetros com faixa espectral estreita utilizam filtros para restringir a resposta do pirômetro dentro de uma faixa de comprimento de onda para uma determinada aplicação.

- ✓ Ótima exatidão de medição em altas temperaturas;
- ✓ Utilizado para medições em ambientes abertos;
- ✓ Utilizam faixas de comprimento de onda específicas para possibilitar a medição de temperatura através de vidros, plásticos e chamas.

As desvantagens são:

- ✓ Pequena faixa de medição de temperaturas;
- Dificuldade para selecionar o melhor pirômetro que vá satisfazer todos os critérios.

2.7.3.Pirômetros com razão espectral (ratio)

Os pirômetros com razão espectral medem a radiação térmica emitida por um corpo em duas faixas estreitas de comprimento de onda e calculam a razão entre estas duas radiações térmicas. Esta razão é uma função direta da temperatura.[12]

Para se determinar a equação pela qual um pirômetro com razão espectral indica a temperatura de um objeto (T_p) , primeiramente, considere J_1 e J_2 a radiação eletromagnética recebida pelo pirômetro de um objeto para os comprimentos de onda λ_1 e λ_2 , respectivamente.Usando a aproximação de Wien's (3), tem-se que:

$$J_{I} = \frac{c_{I} \cdot \varepsilon_{1} \cdot \lambda_{I}^{-5}}{exp\left[\frac{c_{2}}{\lambda_{I} \cdot T}\right]} e J_{2} = \frac{c_{I} \cdot \varepsilon_{2} \cdot \lambda_{2}^{-5}}{exp\left[\frac{c_{2}}{\lambda_{2} \cdot T}\right]}$$
(21) e (22)

onde ε_1 e ε_2 são as emissividades do objeto para os comprimentos de onda λ_1 e λ_2 , respectivamente.

Para um pirômetro com razão espectral, a temperatura é obtida pelo cálculo da razão dos sinais recebidos pelo pirômetro, teremos que:

$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{\varepsilon_2 \cdot \lambda_2^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_2 \cdot T}\right)}{\varepsilon_1 \cdot \lambda_1^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_1 \cdot T}\right)}$$
(23)

Determinando o logaritmo natural em ambos os lados da equação, tem-se que:

$$Ln\left(\frac{J_2}{J_1}\right) = Ln\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right) - 5 \cdot Ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) + \left(\frac{c_2}{T}\right) \cdot \left[\frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1 \cdot \lambda_2}\right]$$
(24)

Invertendo $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ e resolvendo para *T*.

$$\frac{1}{T} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{c_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot \left[Ln \left(\frac{J_2}{J_1} \right) + 5 \cdot Ln \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right) + Ln \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right) \right]$$
(25)

Agora, para se determinar a temperatura indicada por um pirômetro com razão espectral (T_p) , deve-se determinar a razão entre as radiações eletromagnéticas (ou sinais), $J_1 \in J_2$, efetivamente lidos pelo pirômetro para os comprimentos de onda $\lambda_1 \in \lambda_2$, respectivamente. Fazendo-se a mesma análise anterior e resolvendo para T_p, tem-se que:

$$\frac{1}{T_p} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{c_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot \left[Ln \left(\frac{J_2}{J_1} \right) + 5 \cdot Ln \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right) \right]$$
(26)

Igualando-se as equações (25) e (26).

$$\frac{1}{T_p} = \frac{1}{T} + \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{c_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot Ln\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right)$$
(27)

A equação (27) é considerada como a equação de um pirômetro com razão espectral. O segundo termo da equação (27), representa o erro de medição da temperatura T_p , para um objeto em que sua emissividade varia com o comprimento de onda da radiação emitida.

A medição de temperatura, então, não é primariamente dependente da radiação térmica emitida em cada faixa espectral de sua operação, mas apenas da razão destas radiações térmicas. Conseqüentemente, qualquer influência que afete a quantidade de radiação térmica recebida em cada uma das faixas espectrais de medição pelo pirômetro pela mesma porcentagem não terá nenhum efeito sobre a indicação de temperatura pelo instrumento, seja esta influência variação na emissividade da superfície emissora, na transmissividade de materiais transparentes, no tamanho do alvo ou na atenuação da energia eletromagnética. Infelizmente, esta condição não é válida para todos os materiais que sofrem oxidações.

Para outros materiais, os pirômetros com razão espectral podem reduzir ou até eliminar as variações na indicação de temperatura com relação à variação de acabamento superficial.

Os pirômetros com razão espectral podem, também, reduzir o efeito que certos materiais possuem de absorverem a radiação térmica emitida por um objeto, como por exemplo partículas em suspensão no ar e o gás dióxido de carbono (CO₂), caso a porcentagem de absorção de radiação térmica seja a mesma para cada faixa espectral de sua operação.

As principais vantagens são:

 Menor sensibilidade à variação do tamanho do alvo e da atmosfera existente entre o objeto e o pirômetro, tal como gases e partículas em suspensão.

As desvantagens são:

- ✓ Alto custo;
- Necessidade de se conhecer a razão de emissividade nos dois comprimentos de onda da medição;
- ✓ Sensibilidade irá variar de acordo com a razão das emissividades.

2.8. Detectores

Os detectores usados por pirômetros infravermelhos estão divididos em dois grupos principais.[13]

Detectores quânticos, cujas características são determinadas pela absorção de fótons individuais. Sua resposta é limitada a uma relativa faixa de comprimento de onda, além de depender da estrutura atômica do material fotossensível.

Detectores térmicos, que utilizam a elevação da temperatura como resultado da absorção da radiação térmica. Sua resposta espectral pode ser feita independentemente do comprimento de onda.

2.8.1.Detectores Quânticos

Os detectores quânticos podem ser divididos em dois grupos: elementos fotocondutivos e elementos fotovoltaicos.

2.8.1.1.Detectores fotocondutivos

Os detectores feitos com elementos fotocondutivos experimentam uma redução na sua resistência elétrica quando radiação infravermelha incide sobre eles. Estes elementos fotocondutores são feitos de materiais semicondutores, onde fótons com uma determinada energia são capazes de mover elétrons da camada de valência do material, aumentando assim sua condutividade.

Pode-se correlacionar a variação de resistência elétrica com a temperatura, utilizando para medir a variação, uma ponte de Wheatstone.

Uma seleção dos materiais utilizados como detectores fotocondutivos mais utilizados e a sua faixa espectral de utilização, ver Fig.25.

Material	Faixa espectral de utilização [µm]
Sulfeto de chumbo (PbS)	1 – 3
Seleneto de chumbo (PbSe)	1 – 4,5
Telureto de chumbo (PbTe)	3 – 6
Arsenieto de gálio e índio (InGaAs)	1,2 – 2,6
Arsenieto de gálio fosfato e índio (InPGaAs)	2,1 – 2,4
Telureto de cádmio e mercúrio (HgCdTe)	2 – 12
Arsenieto de gálio fosfato e índio (InPGaAs) Telureto de cádmio e mercúrio (HgCdTe)	2,1 – 2,4 2 – 12

Figura 25 - Tabela de materiais fotocondutivos[13].

2.8.1.2.Detectores fotovoltaicos

Materiais Fotocondutivos

Os detectores de materiais fotovoltaicos são semicondutores construídos como uma *junção p-n*. Quando fótons de radiação térmica atingem esta junção há um desequilíbrio de força eletromotriz provocado pelo choque dos fótons sobre a junção.

Uma seleção dos materiais utilizados como detectores fotovoltaicos e a sua faixa espectral de utilização, ver Fig.26.

Materiais	semicondutores	

Material	Faixa espectral de utilização [µm]
Germânio (Ge)	0,6 - 1,8
Arsenieto de índio (InAs)	1 – 3
Antimoneto de índio (InSb)	2 – 5,5
Telureto de chumbo e estanho (PbSnTe)	2 – 11
Figure 00 Tabala da reatariais fatavaltaisas	401

Figura 26 - Tabela de materiais fotovoltaicos[13].

Embora os detectores fotovoltaicos sejam mais rápidos, produzam menor ruído e sejam mais lineares do que os fotocondutores, os detectores fotovoltaicos produzem apenas uma pequena saída de voltagem, tipicamente 300mV para 100lux de iluminação. Conseqüentemente seu sinal de saída deve ser amplificado, para isto utilizam o circuito mostrado na Fig.27.



Figura 27 – Circuito amplificador para ser usado com sensores fotovoltaicos[13].

2.8.2. Detectores Térmicos

Assim como os detectores quânticos, os detectores térmicos podem ser separados por dois distintos princípios de operação: os que funcionam de acordo com o efeito Seebeck e os que são conhecidos como ferroelétricos.[13]

2.8.2.1.Detectores que funcionam de acordo com o efeito Seebeck

Este grupo de detectores consiste basicamente de termopares, que são normalmente utilizados em medições de temperatura por contato. Um termopar é composto basicamente por dois fios de materiais diferentes onde ambas extremidades são unidas para formarem duas junções.

Uma diferença de temperatura entre as duas junções causa uma força eletromotriz que pode ser facilmente medida.

Se estes elementos de termopares forem feitos suficientemente pequenos, e um grande número desses forem combinados para aumentar a "sensibilidade", então esta "termopilha" pode ser usada como um pirômetro sem contato.

Antes do advento da micro-mecânica, era muito custosa a fabricação de termopilhas e se limitava a utilizar os materiais convencionais para a fabricação de termopares tais como: bismuto/antimônio, cromel/alumel, etc... Hoje em dia, o uso de silício policristalino e alumínio processado no tipo CMOS possibilitam a produção de termopilhas mais sensíveis, capazes de operar dentro da faixa do espectro do infravermelho.

2.8.2.2.Detectores ferroelétricos

Os mais comuns detectores de radiação infravermelha funcionam de acordo com o princípio da ferroeletricidade. Estes trabalham sobre o mesmo princípio dos sensores de cristais piezoelétricos exceto na energia do sinal de entrada, que em vez de ser a tensão mecânica é a energia térmica. Materiais que são freqüentemente usados como detectores ferroelétricos, ver Fig.28.

	<i>c i i i i i i i i i i</i>				
N/lotorioio	torroolotriooo	11000000	$\sim m$	nirom	otrio
IVIAIE IAIS	IETOEIETTCOS				
materiale	10110010110000	addaddd	U 111		Cuiu

Material Ferroelétrico	Coeficiente piroelétrico [nC/cmK]	Permissividade relativa	Calor específico [J/cmK]	Temperatura de Curie [°C]	
Sulfato de triglicerina (TGS)	40	35	2,5	49	
Tantalato de lítio (LITaO ₃)	19	46	3,19	665	
Niobato de bário e estrôncio (SBN)	60	400	2,34	121	
Fluoreto de polivilidina (PVDF)	3	11	2,4	80	
Titanato de bário (BaTiO ₃)	70	4300	2,5	120	
Niobato de lítio (LiNbO ₃)	4	78	3,1	1210	
Titanato de chumbo (PbTiO ₇)	90	80	2,5	490	

Figura 28 - Tabela de materiais ferroelétricos usados em pirometria[13].

Os materiais ferroelétricos possuem uma vantagem, sua resposta espectral é muito linear e se estende através de quase todo o espectro infravermelho.

Os materiais ferroelétricos perdem suas propriedades piroelétricas quando estão acima da temperatura de Curie (Fig.28).

Conseqüentemente, deve-se ter muito cuidado na escolha do material utilizado como sensor para determinadas aplicações.

Geralmente, nós desejamos maximizar o coeficiente piroelétrico e minimizar os outros parâmetros que adversamente afetam o tempo de resposta, tais como a constante dielétrica e o calor específico do material (Fig.28).

A maioria dos elementos que constituem um pirômetro ferroelétrico é hermeticamente selada dentro de uma caixa DIL ou TO5. Isto é essencial para os materiais piroelétricos, pois também são piezoelétricos, conseqüentemente sendo sensíveis à variação de pressão e do movimento do ar.

Ao contrário do que foi visto anteriormente para os detectores infravermelhos, os detectores ferroelétricos são capacitivos. Conseqüentemente, sua impedância de saída é extremamente alta, necessitando o uso de um amplificador operacional com uma alta impedância de entrada, ou o mais comumente conhecido pré-amplificador do tipo FET, ver Fig.29. Os aparelhos comumente fabricados incluem os detectores piroelétricos e o amplificador em um único módulo.

Muitos fabricantes especificam como a principal característica de sensibilidade dos materiais ferroelétricos, o coeficiente piroelétrico (aumenta de acordo com um fator que depende da área operacional que está sendo aquecida pela radiação infravermelha incidente).

O circuito amplificador, ver Fig.27, pode também ser usado como amplificador operacional, mas, para isto, deverá possuir uma alta impedância de entrada e uma resistência também muito alta. De qualquer modo se o circuito, ver Fig.29, estiver sendo usado com um sensor fotovoltaico, a operação deverá ser logarítmica em vez de linear.



Figura 29 - Amplificador de entrada tipo FET para sensores ferroelétricos[13].

Sendo basicamente capacitivos, os aparelhos ferroelétricos não medem a temperatura constante de um corpo, mas a variação de temperatura deste. A temperatura constante de um objeto somente pode ser medida se a radiação infravermelha incidente sobre o detector ferroelétrico for periodicamente interrompida, como por exemplo por uma hélice de um ventilador.

Dois elementos ferroelétricos, ver Fig.29, cada um gerando um pulso de saída de uma polaridade dependendo da variação de temperatura, ver Fig.30.



Figura 30 - Voltagem de saída de pirômetros ferroelétricos resultante da variação de temperatura[13].

2.9. Índices de mérito para caracterização estática e dinâmica

Nada melhor para definir os principais índices de mérito para caracterização estática e dinâmica[14] do que as informações fornecidas por um dos maiores fabricantes de pirômetros infravermelhos que é a Micron[9], ver Fig.31. e Fig.32.

2.9.1.Pirômetros com detectores quânticos

Especificações técnicas	
Faixa de medição	750 – 2000°C
Resolução	1°C
Resposta espectral	Duas faixas estreitas próximo de 1µm
Distância focal	381mm ao ∞
Foco	90:1
Ajuste de emissividade	De 0,100 a 1,000 com incremento de 0,001
Tempo de resposta	7,5ms
Sinal de saída digital	RS-485
Sinal de saída analógico	4 – 20mA
Exatidão	\pm 0,5% da leitura do fundo de escala
Repetitividade	$\pm 0,1\%$ da leitura do fundo de escala

Índices de mérito para detectores quânticos

Figura 31 – Informações técnicas para caracterização dos índices de mérito de detectores quânticos[9].

2.9.2.Pirômetros com detectores térmicos

Índices de mérito para detectores térmicos

-20 – 300°C
0,1% da temperatura do fundo da escala
6,5μm a 14,0μm
6:1
De 0,100 a 1,000 com incremento de 0,001
80ms
< 10Ω
\pm 1,5% da leitura do fundo de escala
\pm 0,25% da leitura do fundo de escala

Figura 32 – Informações técnicas para caracterização dos índices de mérito de detectores térmicos[9].

2.10. Calibração

A calibração de pirômetros infravermelhos é feita utilizando-se um forno especial, denominado de cavidade de corpo negro, como padrão de radiação eletromagnética.[9]

Este forno especial simula um emissor de radiação eletromagnética ideal, ou seja, um corpo negro. Sua construção típica, ver Fig.33.



Figura 33 - Construção típica de um forno para calibração de pirômetros infravermelhos[9].

As características principais que devem possuir esse tipo de forno de calibração são:

- distribuição uniforme de temperatura na região que será focada pelo pirômetro infravermelho;
- ✓ um controle exato de temperatura;
- ✓ rápida estabilização quando se modifica a temperatura de calibração;
- ✓ fornecer a máxima emissividade possível (ε ≈ 1) para a faixa espectral de calibração;
- possuir uma abertura adequada para possibilitar o foco dos diversos tipos de pirômetros infravermelhos.

A calibração é realizada posicionando-se o pirômetro infravermelho a uma distância conhecida para que se tenha um tamanho de alvo adequado para receber toda a radiação eletromagnética da superfície emissora do forno, ver Fig.34.



Operator calibrates a transfer standard (lower foreground) – an infrared thermometer with 0.1°C resolution – with a blackbody calibration source that provides temperatures from 600° to 3000°C.

Figura 34 - Típica calibração de pirômetros infravermelhos[9].

Espera-se um determinado tempo até que a temperatura do forno de calibração esteja uniforme, e então se faz a leitura de temperatura no pirômetro infravermelho.

Geralmente a calibração é realizada em 8 pontos diferentes dentro da faixa de medição do pirômetro.

As principais fontes de incerteza de medição neste tipo de calibração são:

- ✓ incerteza do termopar de controle do forno de calibração;
- ✓ resolução do pirômetro infravermelho;
- ✓ incerteza da emissividade da superfície do forno de calibração;
- não homogeneidade da temperatura no interior do forno de calibração;

- ✓ incerteza devido ao alinhamento do pirômetro infravermelho;
- ✓ incerteza de focalização do pirômetro infravermelho.

As incertezas de medições obtidas em calibrações de pirômetros infravermelhos, ver Fig.35[15].

Standard	Temperature Range	Expanded Uncertainty
Ribbon filament lamp	800 °C to 1600 °C	0.7 °C
	1600 °C to 1900 °C	1.0 °C
	1900 °C to 2300 °C	1.5 °C
Leeds & Northrup	800 °C to 1600 °C	4 °C
Model 8000 series	1600 °C to 2100 °C	5 °C
	1900 °C to 2300 °C	7 °C
Disappearing filament	2400 °C to 2700 °C	8 °C
optical pyrometer	2700 °C to 3200 °C	17 °C
	3200 °C to 4200 °C	25 °C
Pyrometer Instrument	800 °C to 1400 °C	3 °C
Model 95	1400 °C to 1800 °C	4 °C
	1800 °C to 2400 °C	5 °C
Disappearing filament	2400 °C to 2700 °C	8 °C
optical pyrometer	2700 °C to 3200 °C	12 °C
Infrared radiation	800 °C to 2000 °C	2 °C
thermometer	2000 °C to 2700 °C	3 °C

The expanded uncertainty (coverage factor k = 2) is

equivalent to a two standard deviation estimate.

Figura 35 – Incerteza de medição para diversos tipos de pirômetros infravermelhos[15].

No Brasil os laboratórios de calibração acreditados pela RBC (Rede Brasileira de Calibração) para calibrar pirômetros infravermelhos são: o INMETRO (faixa de calibração de temperaturas próximo da ambiente até 1500°C) no Rio de Janeiro, a USIMINAS (faixa de calibração 600 até 1500°C) em Ipatinga, Minas Gerais e a CST (faixa de calibração 500 até 1500°C) em Serra, Espírito Santo.

2.11. Aplicações práticas

Os pirômetros infravermelhos são utilizados principalmente pelas indústrias siderúrgicas, têxteis, nucleares e de produção de vidros. Eles também são utilizados em pesquisas e como instrumento interpolador para definição da escala internacional de temperatura - ITS-90, para a faixa de temperatura acima do ponto de solidificação da prata (961,78°C).

Os principais fabricantes de pirômetros infravermelhos são.[9]

✓ MICRON Infrared, Inc.
 16 Thornton Road, Oakland, New Jersey 07436 USA
 www.mikroninfrared.com ou www.imaging.com

✓ Raytec Corporation
 Santa Cruz, CA USA
 www.raytec.com

O preço hoje em dia de um pirômetro infravermelho para medição de altas temperaturas com as características mostradas na Fig.36:

750 – 2000°C
1°C
Duas faixas estreitas próximo de 1µm
381mm ao ∞
90:1
De 0,100 a 1,000 com incremento de 0,001
7,5ms
RS-485
4 – 20mA
\pm 0,5% da leitura do fundo de escala
\pm 0,1% da leitura do fundo de escala
460g
177mm x 60mm
4 dígitos \rightarrow 17,78mm x 6,35mm

Figura 36 – Informações técnicas para aquisição de pirômetros[9].

Custa em torno de US\$ 5500,00.

As principais aplicações práticas dos pirômetros infravermelhos são mostradas nas, Fig.37, Fig.38, Fig.39, Fig.40, Fig.41. Um exemplo de pirômetro infravermelho, Fig.42.



Figura 37 – Medições de temperatura sem contato com o objeto[9].



Figura 38 – Medições de altas temperaturas (maiores do que 1300°C) onde outros tipos de termômetros de contato não podem ser usados[9].



Figura 39 – Medições de temperaturas em objetos móveis[9]



Figura 40 – Medições de temperatura em objetos que se encontram fisicamente inacessíveis e/ou em lugares com alto nível de periculosidade, como por exemplo: ambientes explosivos, reatores nucleares, redes de alta tensão, etc...[9].



Figura 41 – Produção de imagens térmicas[9]



Figura 42 – Exemplo de um tipo de pirômetro infravermelho[9].