

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Princípio de medição de temperatura através da radiação

Radiação ou radiação térmica é a denominação dada à emissão de energia pela matéria e sua transmissão não exige a presença de qualquer meio material, isto é, a Radiação se propaga ainda que tenhamos vácuo. Com relação à natureza desta, a Mecânica Quântica prevê que a radiação pode se comportar de duas maneiras: pode ser tratada como onda, utilizando a teoria eletromagnética na qual a energia é transmitida na forma de ondas eletromagnéticas e, ao mesmo tempo, pela propagação de partículas denominadas de fótons, que são pacotes de energia sem massa, que são emitidos a partir de moléculas excitadas e que são propagadas em uma trajetória retilínea até que sejam absorvidos ou espalhados por outras moléculas.

Quando um corpo tem sua temperatura acima do zero absoluto (-273,15 °C) ele é capaz de emitir radiação térmica e a ela podem ser atribuídas as propriedades típicas de uma onda eletromagnética, ou seja, a frequência ν e o comprimento de onda λ (a velocidade da radiação térmica considerada é a da luz, conforme a Teoria Eletromagnética). Dessa forma, de acordo com Planck temos a seguinte relação:

$$E = h.\nu \quad (7)$$

onde:

E = energia [Joules]

ν = frequência de onda da radiação [Hz]

$h = 6,626 \times 10^{-34}$ [J.s], constante de Planck

A radiação térmica se distingue de outros tipos de radiação, como ondas de rádio e raios-x, pelo fato destas não se propagarem como consequência da temperatura do corpo.

Podemos definir aproximadamente a faixa do espectro eletromagnético que ocorre essa propagação, que vai de 0,1 μm a 100 μm (3×10^{15} Hz e 3×10^{12} Hz, respectivamente), sendo que, de 0,1 – 0,4 μm temos a radiação ultravioleta, visível de 0,4 – 0,8 μm e infravermelha de 0,8 – 100 μm .

O espectro eletromagnético não possui limites inferior ou superior definidos, estando dividido de maneira arbitrária em regiões distintas pelo método de produção e detecção da onda. Não existe, no entanto, nenhuma diferença fundamental entre as várias radiações, com relação as leis de refração, reflexão, difração e polarização, uma vez que todas seguem as mesmas.

O produto da frequência com o comprimento de onda é a velocidade da onda. Desta forma relaciona-se a frequência com o comprimento de onda no espectro, desde que a velocidade da luz seja uma constante.

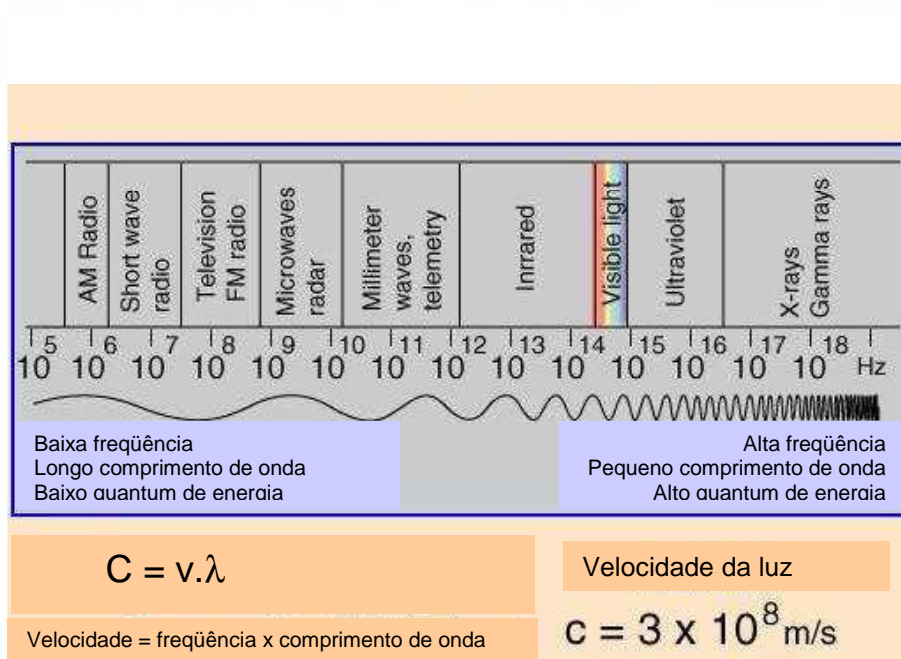


Figura 9: Espectro eletromagnético

Fonte: hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/ems1.html#c1

O radiador térmico ideal é chamado de *corpo negro*. O corpo negro é um modelo idealizado no qual toda a radiação incidente é absorvida, independente do comprimento de onda e da direção de incidência. Este corpo absorveria toda a radiação nele incidente e, para uma dada temperatura e comprimento de onda, emitiria o máximo possível de radiação térmica sendo o padrão de comparação para todas as superfícies reais. Assim a taxa emitida em cada comprimento de

onda, chamada de emitância ou poder emissivo espectral [W/m²μm] do corpo negro é dada pela Lei de Planck, segundo a qual

$$E_{\lambda,b}(\lambda,T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]} \quad (8)$$

onde:

$E_{\lambda,b}$ = emitância espectral (intensidade da radiação hemisférica) [W/m².μm]

$C_1 = 3,7405 \cdot 10^8$ [W.μm⁴/m²]

$C_2 = 1,43879 \cdot 10^4$ [μm.K]

λ = comprimento de onda da radiação [μm]

T = temperatura absoluta do corpo [K]

A taxa de radiação emitida pelo corpo negro (emitância ou poder emissivo total W/m²) é dada pela seguinte equação:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (9)$$

sendo $\sigma = 5,6697 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴, a constante de Stefan-Boltzmann.

A quantidade $E_{\lambda,b}$ é a radiação emitida por uma superfície plana para o hemisfério (isto é, 180° sobre ela) por unidade de comprimento de onda, no comprimento de onda λ . Ou seja, um corpo negro a uma certa temperatura emite alguma radiação por unidade de comprimento de onda em todos os comprimentos de onda próximo de zero ao infinito, mas não a mesma quantidade de radiação em cada comprimento de onda. A Fig. (10) mostra a emitância espectral do corpo negro, em gráfico log-log, para algumas temperaturas inferiores a 6000 °C.

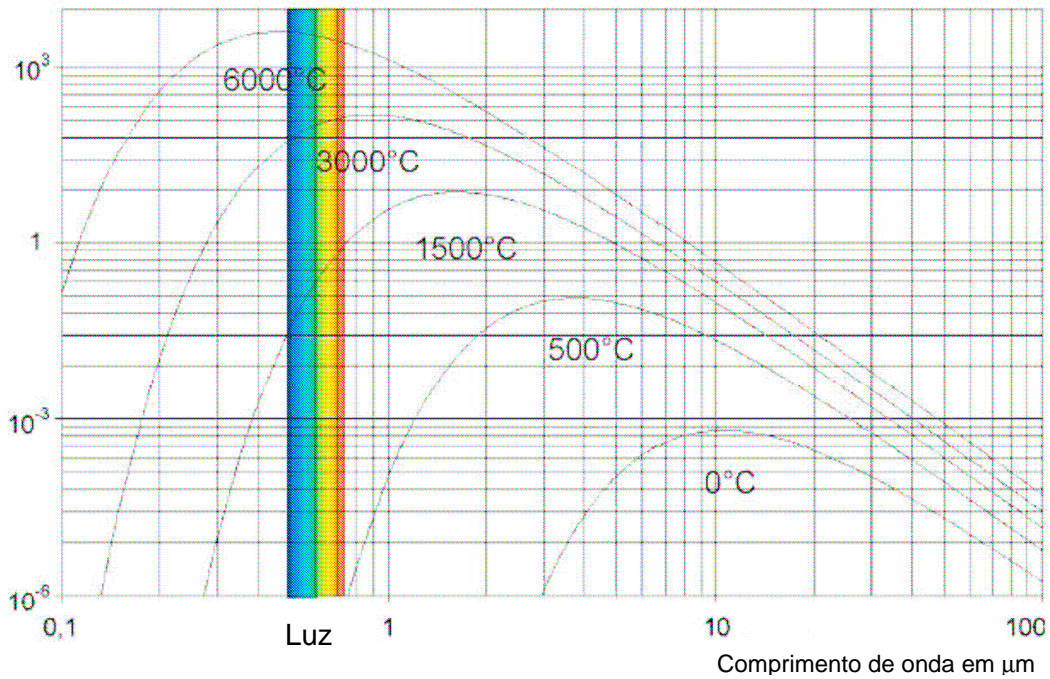


Figura 10: Emitância espectral de corpo negro para cinco temperaturas, log x log

Fonte: <http://www.ir-impac.com/englich/Pyrometerhandbook.pdf>

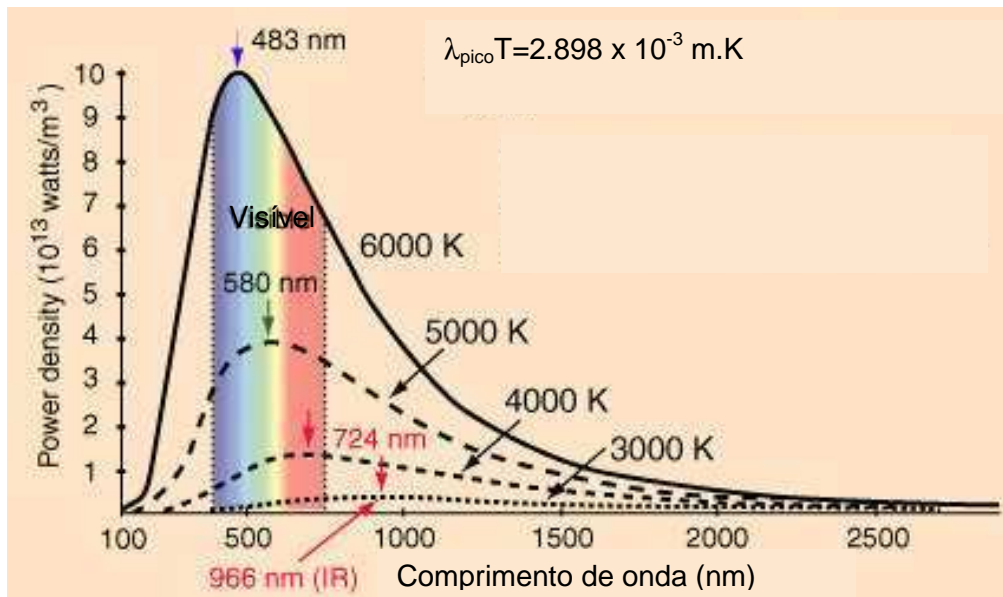


Figura 11: Emitância espectral de corpo negro para quatro temperaturas, escala linear.

Fonte: <http://www.ir-impac.com/englich/Pyrometerhandbook.pdf>

Podem ser observadas algumas características importantes:

1. A radiação emitida varia *continuamente* com o comprimento de onda, Eq. (7).

2. Em qualquer comprimento de onda, a intensidade da radiação emitida aumenta com o aumento da temperatura.
3. As curvas exibem picos (intensidades máximas de radiação) em certos comprimentos de onda, sendo que estes picos se deslocam para a esquerda (comprimentos de onda menores) à medida que a temperatura aumenta, Fig.(10) .
4. A área sob cada curva é a emitância total do corpo negro, que aumenta rapidamente com o aumento da temperatura, Eq. (9).

A razão entre as emitâncias reais e de corpo negro é o que se denomina de emissividade do corpo real. Vários tipos de emissividade foram definidos, em função de interesses específicos. A emissividade pode ser espectral hemisférica, total, hemisférica seletiva, etc. A definição para os presentes propósitos é a da emissividade espectral hemisférica, $\epsilon_{\lambda,T}$, de um corpo real à temperatura T. Admitamos que ela possa ser medida utilizando filtros, de modo a que somente a emitância em um comprimento de onda se propague. São os chamados filtros ópticos seletivos. A emissividade espectral hemisférica é dada por

$$\epsilon_{\lambda,T} = \frac{E_{\lambda}}{E_{\lambda,b}} \quad (10)$$

onde:

E_{λ} é a emitância espectral do corpo real a um dado comprimento de onda e temperatura

$E_{\lambda,b}$ é a emitância espectral do corpo negro à mesma temperatura e comprimento de onda do corpo real.

Portanto, a emissividade é uma quantidade adimensional, sempre menor do que 1,0 para corpos reais. Note também que, no caso mais geral, é função de λ e T (eventualmente, numa pequena faixa limitada de λ e T, pode ter valor semelhante e constante, mas não é o caso geral).

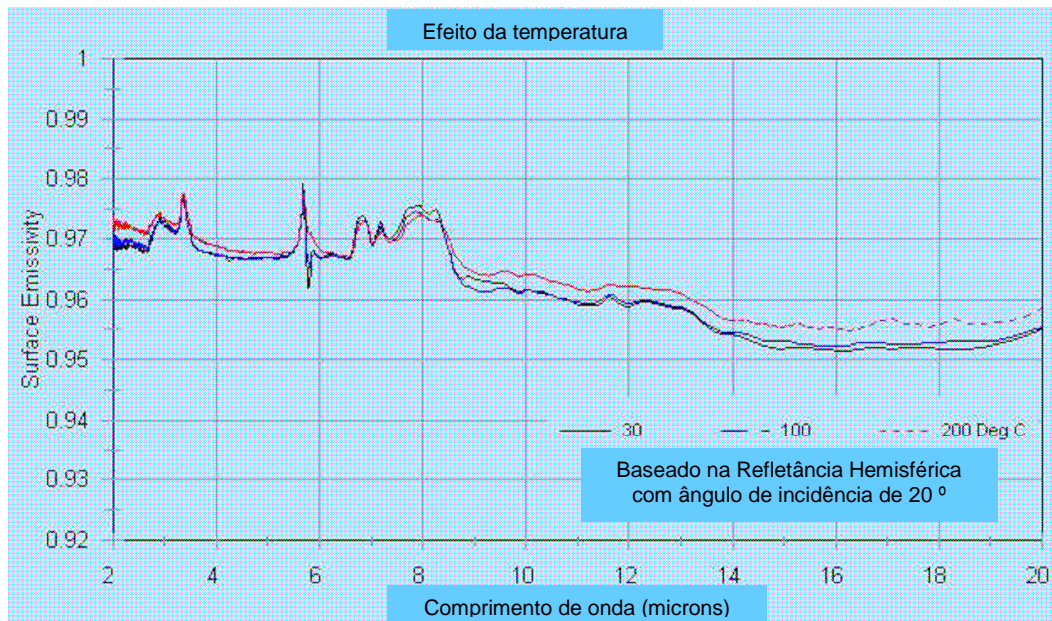


Figura 12: Emissividade espectral de superfície: dependência com λ e T

Fonte: <http://www.ir-impac.com/englisch/Pyrometerhandbook.pdf>

Analogamente, pode-se definir a emissividade total hemisférica

$$\varepsilon_T = \frac{E}{E_b} \quad (11)$$

onde E é a emitância total (isto é, na totalidade do espectro, $0 < \lambda < \infty$, ou $0 < \nu < \infty$) hemisférica da superfície real à temperatura T e E_b é a emitância total do corpo negro à mesma temperatura.

Se a emissividade espectral hemisférica ($\varepsilon_{\lambda,T}$) de um corpo for a mesma para qualquer comprimento de onda (λ) a uma dada temperatura, então $\varepsilon_{\lambda,T} = \varepsilon_T$ e a superfície é dita cinzenta.

As superfícies reais freqüentemente exibem emissividades variáveis ao longo do espectro de comprimentos de onda. Porém, na presente análise, admite-se que a superfície real seja uma superfície cinzenta com uma emissividade igual à emissividade total da superfície.

Como muitos sensores de radiação operam em faixas restritas de comprimentos de onda, define-se a emissividade hemisférica seletiva (hemispherical band emissivity).

$$\varepsilon_{\lambda_1-\lambda_2,T} = \frac{E_{\lambda_1-\lambda_2,T}}{E_{b,\lambda_1-\lambda_2,T}} \quad (12)$$

Se um sensor de radiação tiver sido calibrado tomando como referência um corpo negro, o conhecimento do valor correto da emissividade do corpo não-negro, cuja temperatura se quer medir, permite o cálculo da sua emitância total e, portanto, da sua temperatura:

$$T = \left(\frac{E}{\varepsilon\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (13)$$

Infelizmente, a emissividade de um material não é uma propriedade simples de ser obtida já que depende do tamanho do corpo, formato, rugosidade, ângulo de observação, etc. Estes fatores levam a incertezas nos valores numéricos da emissividade que são um dos maiores problemas nas medidas de temperatura com sensores de radiação, vide Tabela (25) do anexo.

2.1.1. O infravermelho

O limite inferior do infravermelho coincide com o limite da percepção visual para o vermelho (0,75 μm), enquanto que o superior confunde-se com as microondas. O infravermelho é comumente sub-dividido em quatro partes cujos limites são arbitrariamente escolhidos:[5]

- Infravermelho próximo (0,75 à 3 μm)
- Infravermelho médio (3 à 6 μm)
- Infravermelho distante (6 à 15 μm)
- Infravermelho extremo (15 à 1000 μm)

Outro critério divide o infravermelho em duas regiões a partir do comprimento de onda de 3 μm . Abaixo desse valor predomina a radiação refletida (infravermelho refletido), acima desse valor a emissão própria prevalece (infravermelho termal).

Tabela 12: Divisão da região infravermelha

Comprimento de onda (μm)	Designação	
0,1 – 0,4	Ultra-Violeta	
0,4 – 0,8	Visível	
0,8 – 3,0	Infravermelho Refletido	Infravermelho Próximo
3,0 – 6,0	3,0 1000,0	Infravermelho Médio
6,0 – 15,0		Infravermelho Distante
15,0 – 1000,0		Infravermelho Extremo
1000,0 – 1200,0	Microondas	

2.2. Princípio de funcionamento do termovisor

2.2.1. Elemento Sensor

Bolômetro - Trata-se de um termoresistor, isto é, de um dispositivo cuja resistência elétrica varia com a temperatura, sendo um elemento básico para a medição da temperatura pelo termovisor. Pode ser construído tanto a partir de metais (dispositivos clássicos) quanto com semicondutores (dispositivos modernos) que apresentem dependência significativa da resistência elétrica com a temperatura. A Fig. (13) ilustra, qualitativamente, essa dependência. Para os metais a dependência é expressa pela relação $R = R_0 (1 + \beta.T)$ com β positivo e variando entre $0,3 - 0,6\% \times \text{°C}^{-1}$. Na Fig. (14) temos a variação da resistividade do ouro com a temperatura. Para semicondutores a dependência é expressa como $R = R_0 T^{-3/2} e^{\beta/T}$. Existe ainda uma terceira categoria de materiais conhecidos como Termistores que são compostos por óxidos mistos e vêm sendo utilizados com sucesso na construção de bolômetros.

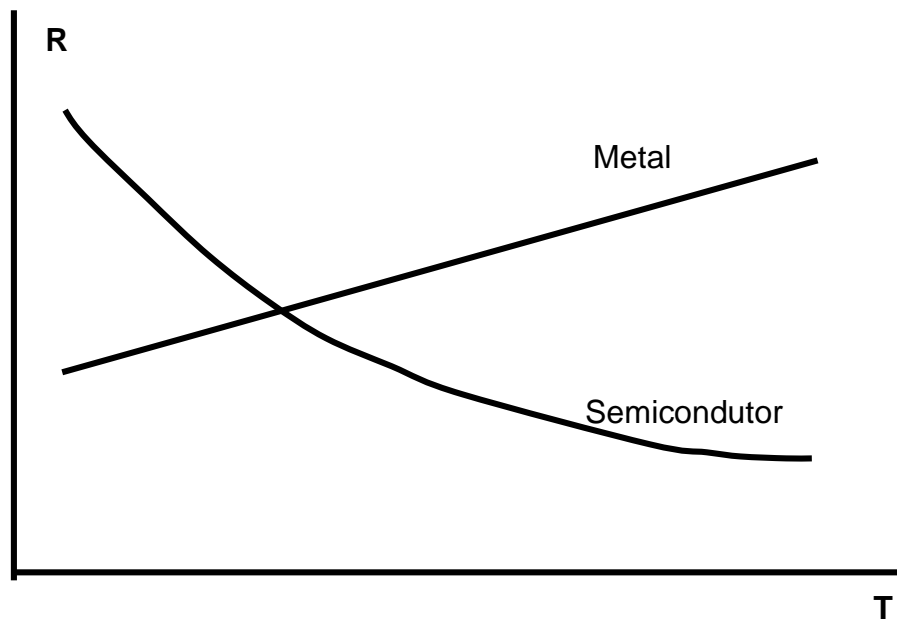


Figura 13: Dependência típica da resistência elétrica dos metais, com β constante, e dos semicondutores com a temperatura.

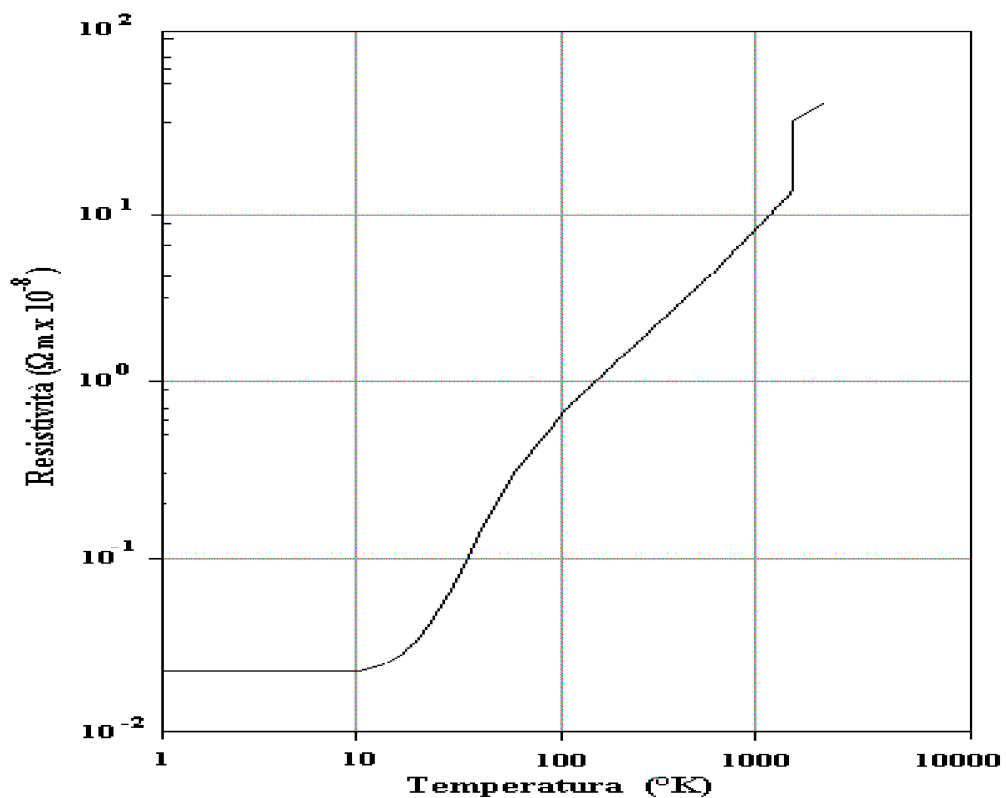


Figura 14: Resistividade do ouro em função da temperatura.[6]

A operação de um bolômetro é relativamente simples, requerendo entretanto, um circuito de polarização e um resistor de carga como mostrado na

Fig. (15). A tensão de saída do circuito deve ser através de um capacitor para desacoplar o nível DC da polarização. O sinal de saída (V_s) pode ser expresso por:

$$V_s = \frac{V_B \cdot R_L \cdot \Delta R_b}{(R_b + R_L)^2} \quad (14)$$

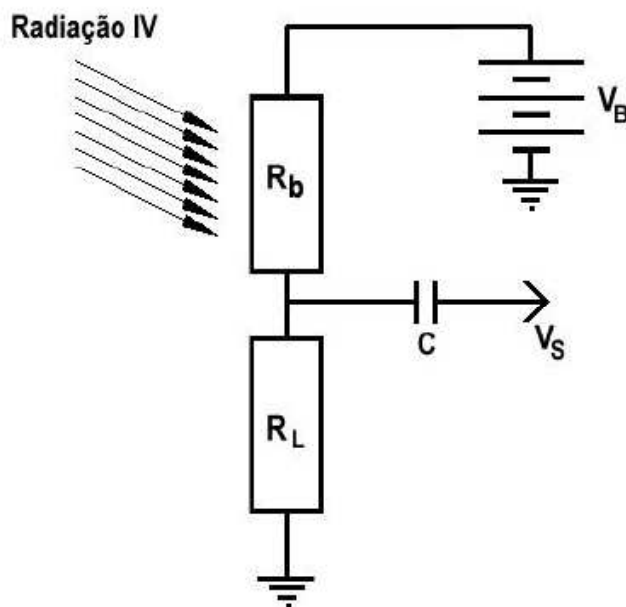


Figura 15: Circuito de polarização de um bolômetro

2.2.2. Instrumento (transdutor + condicionamento)

O instrumento está baseado em dois módulos básicos. O primeiro é a pré-amplificação, que recebe um sinal de tensão do bolômetro, e através da passagem deste sinal em vários blocos, como somadores, ajuste (offset), demodulador e filtro (passa-baixa), ele é convertido em frequência para que o mesmo possa ser transmitido pela fibra ótica até o segundo módulo. Neste temos outra conversão de sinal, dessa vez de frequência para tensão, e em seguida ele vai para um outro bloco para receber um possível valor de ganho

externo. O bloco seguinte é o de saída que converte o sinal analógico em digital indo então para uma interface homem-maquina.

Resumindo, temos inicialmente, a recepção do sinal, sua amplificação e filtragem. Em seguida a introdução de um possível ganho no sinal, e finalmente a conversão de analógico para digital e sendo disponibilizado em uma interface homem-maquina.

O diagrama da Fig. (16) representa todos os passos para a aquisição do sinal do bolômetro.

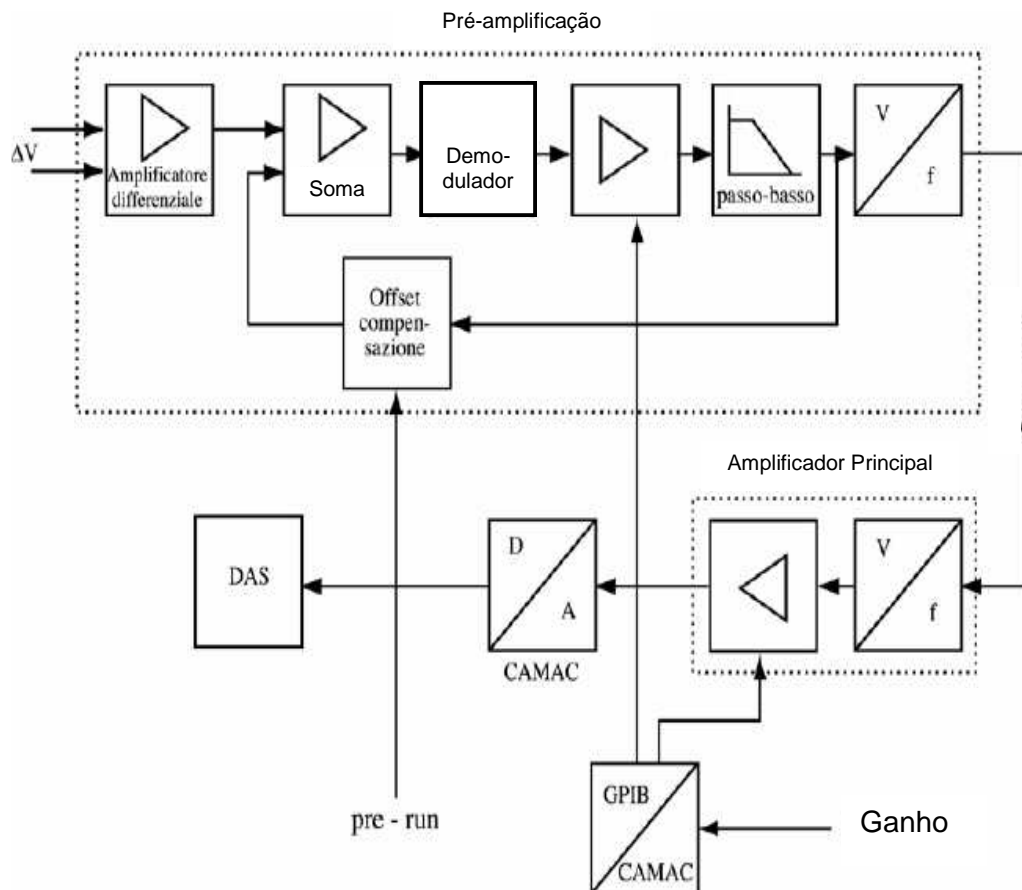


Figura 16: Diagrama para aquisição do sinal bolométrico

2.2.3. Caracterização Estática

A denominação “índice de mérito” se refere a um conjunto de parâmetros que devem ser determinados para a qualificação do sistema. No caso de um sensor bolométrico os principais parâmetros são: a responsividade, a constante de tempo, a detectividade, o TCR e o NEP.

- Responsividade: A principal função de um detector de radiação é converter a radiação eletromagnética em corrente ou tensão elétrica. O termo responsividade é usado para descrever a amplitude do sinal elétrico gerado com respeito ao fluxo incidente. A responsividade pode ser determinada por:

$$R(\lambda, f) = \frac{V_{saída}}{\Phi_{incidente}} = \frac{V_{saída}}{E(\lambda, f) \cdot A_d} \quad [V/W] \quad (15)$$

onde:

$V_{saída}$ é a tensão de saída do detector [V];

$\Phi_{incidente}$ é o fluxo da radiação eletromagnética incidente [Watts];

$E(\lambda, f)$ é a irradiância [W/cm^2];

A_d é a área do detector [cm^2];

- TCR (Coeficiente Térmico de Resistividade): A resistência elétrica de um condutor ou semicondutor é dependente dos processos de colisão de seus átomos, desta forma sua resistência irá aumentar com a temperatura devido ao maior número de colisões. O coeficiente térmico de resistividade, TCR, é uma medida da rapidez em que a resistência elétrica do material responde a uma mudança de temperatura.

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha \Delta T \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (17)$$

onde:

α é o TCR (Coeficiente térmico de resistividade) [%/K]

R é a resistência [Ω]

T é a temperatura [K]

- Constante de Tempo: A constante de tempo do detector, τ , pode ser definida como o tempo necessário para a temperatura diminuir uma quantidade de $1/e$ quando a fonte de radiação cessa. O τ corresponde à razão entre a capacidade de um material de armazenar energia térmica e a capacidade de conduzir essa mesma energia, ou seja,

$$\tau = \frac{C}{G} \quad (18)$$

onde:

G é a Condutância térmica [W/K]

C é a Capacitância térmica [J/K]

- Potência Equivalente de Ruído – NEP: O parâmetro que define a sensibilidade de um detector térmico é a sua potencia equivalente de ruído, NEP. O NEP é definido como a potência incidente necessária para produzir um sinal de saída igual ao ruído rms do sistema. Segundo Vandebussche, o NEP pode ser obtido através do somatório em quadratura de todas as fontes de ruído existentes, como mostra a equação abaixo:

$$NEP^2 = NEP_{\text{fundo}}^2 + NEP_{\text{detector}}^2 \quad (19)$$

- Detectividade: A detectividade, D, do sensor é definida como o inverso do NEP:

$$D = \frac{1}{NEP} [W^{-1}] \quad (20)$$

A detectividade específica, D^* , é uma dos índices de mérito mais importantes, pois possibilita a comparação do desempenho de sensores com diferentes áreas, sendo definida como a relação sinal-ruído rms (para uma largura de banda de 1 Hz) por unidade rms de potência de

radiação incidente. Um D^* maior significa um NEP menor e, portanto, um detector mais sensível:

$$D^* = \frac{\sqrt{A \cdot \Delta f}}{NEP} [cmHz^{1/2}W^{-1}] \quad (21)$$

Onde:

A é a área do detector [cm]

Δf é a banda passante [Hz]

2.2.4. Caracterização Dinâmica

Como o bolômetro é basicamente um termistor, e assim é classificado como um instrumento de primeira ordem.

2.2.5. Aplicações Práticas

Na literatura consultada para este trabalho, encontrou-se inúmeras aplicações do termovisor.

Uma das grandes vantagens do termovisor é sua capacidade de não ser preciso o contato com o elemento a ser medido, criando dessa forma um grande número de aplicações. Algumas das aplicações mais relevantes estão no final do tópico. Apesar do seu custo ser alto, sua praticidade compensa.

Fazendo uma comparação dos dispositivos de medição alternativos temos:

Detectores de Fótons: absorvem energia e produzem portadores de carga em um material semiconductor. Desta forma ocorre uma mudança nas propriedades elétricas deste material.

Quando um fóton incidente é absorvido em um catodo, por exemplo, o elétron pode ganhar energia suficiente para escapar da superfície e então se dirigir ao anodo. Quando o elétron deixa o catodo este efeito é chamado de fotoefeito externo. Como a energia de um fóton varia inversamente com seu comprimento de onda (ou diretamente com a frequência) há um limite de

comprimento de onda onde a energia do fóton é menor do que a necessária para que o elétron escape da superfície. A existência deste limite de corte é característico de todos os detectores de fótons. Este limite ocorre em aproximadamente 1,25 μm para materiais fotoemissivos, ou seja, podemos utilizar detectores fotoemissivos somente para o infravermelho próximo. Esta classe de detectores necessita de refrigeração para minimizar o ruído de geração e recombinação de portadores de carga e a corrente de escuro ou ruído térmico (ruído Johnson). A intensidade da resposta destes detectores depende da eficiência quântica do material, ou seja, do número de portadores de carga gerados pela absorção de um fóton.

O tempo de resposta de um detector de fótons é proporcional ao número de fótons absorvidos.

Entre os detectores de fótons estão os fotocondutores, fotovoltaicos e fotoemissivos.

Detectores Térmicos: Nos detectores térmicos a energia absorvida causa o movimento das moléculas ou átomos do material. Este movimento por sua vez causa um aumento na temperatura do material resistivo, que deve possuir ao menos uma propriedade elétrica que varia com a temperatura. Esta propriedade deve ser medida para determinar a potência incidente no detector. Devido à natureza dos detectores térmicos eles possuem uma resposta espectral mais plana com a frequência, comparados com os detectores quânticos, ou seja, fótons com “qualquer” energia irá gerar vibrações da rede cristalina e aquecer o material.

Uma desvantagem destes sensores é seu tempo de resposta, mais lento do que os detectores de fótons; sendo proporcional à energia dos fótons absorvidos, tipicamente da ordem de milisegundos, o que pode limitá-los a algumas aplicações.

Na Tabela (13) estão os detectores térmicos mais comuns e as propriedades dependentes da temperatura.

Tabela 13: Coeficientes do ajuste e incerteza de medição dos termopares tipo T

DETECTORES	MÉTODO DE OPERAÇÃO
TERMOPILHA	Geração de uma tensão causada por uma mudança de temperatura da junção de dois materiais diferentes.
BOLÔMETRO	Mudança da condutividade elétrica devido à mudança de temperatura.
CÉLULA DE GOLAY	Expansão térmica de um gás.
DISPOSITIVOS PIROELÉTRICOS E PIROMAGNÉTICOS	Mudança nas propriedades elétricas e magnéticas.
DISPOSITIVOS DE CRISTAL LÍQUIDO	Mudanças nas propriedades ópticas.

As principais diferenças entre estas duas classes de detectores estão relacionadas à sua resposta espectral e às fontes de ruído consideradas para cada classe de sensores.

Nos detectores de fótons existe uma grande probabilidade de geração de cargas livres causada pela excitação térmica da rede cristalina. Isto degrada o desempenho do detector, gerando um ruído indesejável, que pode tornar difícil ou impossível a detecção das cargas induzidas pelos fótons incidentes. Utilizando a criogenia o número de cargas geradas desta natureza pode ser desprezado. Porém a criogenia é um fator determinante em algumas aplicações, pois acarreta um aumento expressivo do custo, da massa e da potência utilizada.

Atualmente, têm-se investido muito no desenvolvimento de sensores térmicos não refrigerados, pois apresentam vantagens tais como baixo custo e peso, facilitando as aplicações comerciais, e especialmente a utilização em satélites artificiais onde a redução de massa é fundamental.

O tempo de resposta de um detector de fótons é determinado pelo tempo de vida do portador de carga, que é geralmente de microsegundos ou menos,

enquanto que para detectores térmicos o tempo de resposta é mais lento, sendo proporcional ao inverso da taxa de perda de calor para sua vizinhança. Portanto para um detector térmico o tempo de resposta é descrito pela razão entre a capacitância térmica (capacidade de armazenar energia) e a condutância térmica (capacidade de conduzir energia) do mecanismo principal de perda de calor. Tipicamente o tempo de resposta para detectores térmicos é de milissegundos ou mais e para detectores de fótons podemos obter valores de até nanossegundos.

Na Fig. (17) ilustramos as características de resposta espectral típica para diversos tipos de sensores, expressando-as em termos de detectividade específica, que qualifica a sensibilidade do sensor, em função do comprimento de onda. Através da Fig. (17) podemos verificar que para todos os detectores de fótons (PC e PV) a refrigeração é necessária e a resposta do sensor ocorre em bandas espectrais estreitas, que são determinadas pelo material utilizado, enquanto os sensores térmicos apresentam uma sensibilidade reduzida porém apresenta banda plana de resposta e não utiliza refrigeração.

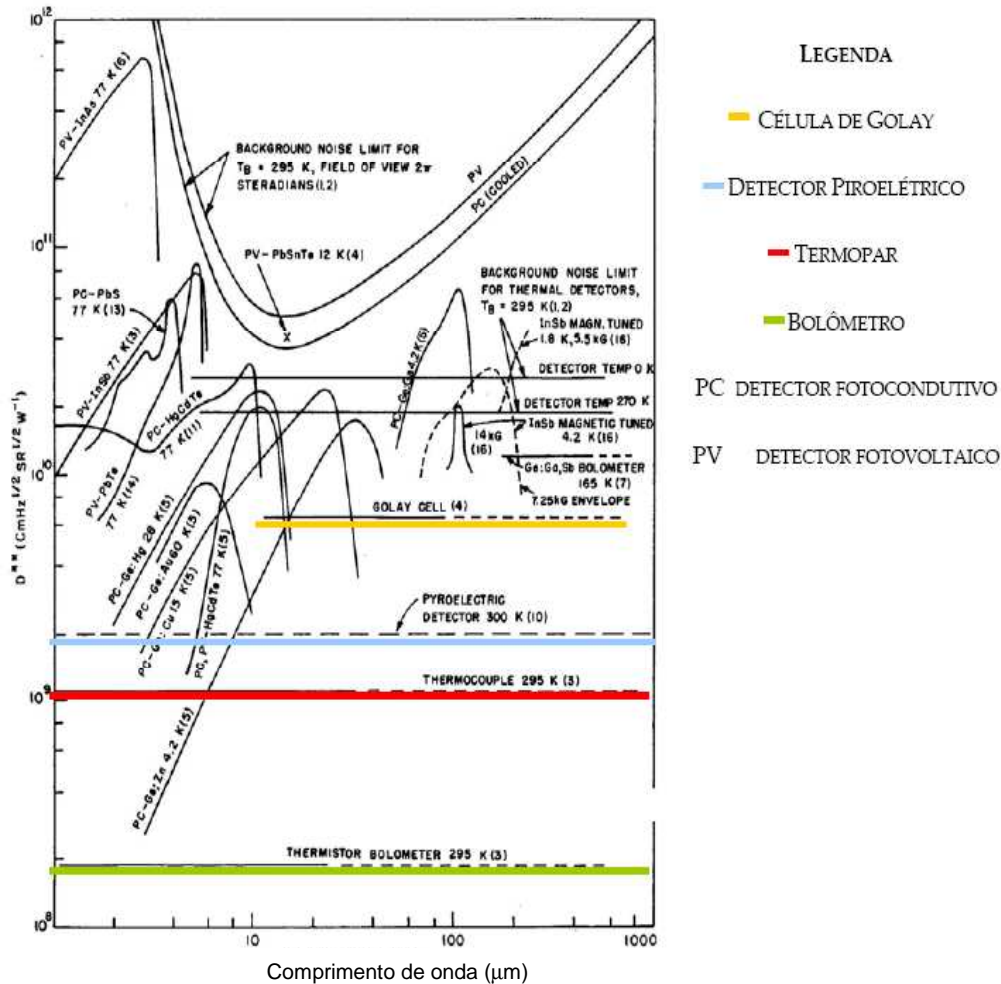


Figura 17: Desempenho de diferentes detectores, térmicos e quânticos

A Fig. (17) ilustra graficamente as diferenças entre os detectores de fótons e os detectores térmicos. Não pretendemos através dela fazer comparações das diferentes respostas dos detectores de fótons, nem comparar quantitativamente estes resultados visto que a performance destes detectores tem sido muito aperfeiçoada ao longo dos anos.