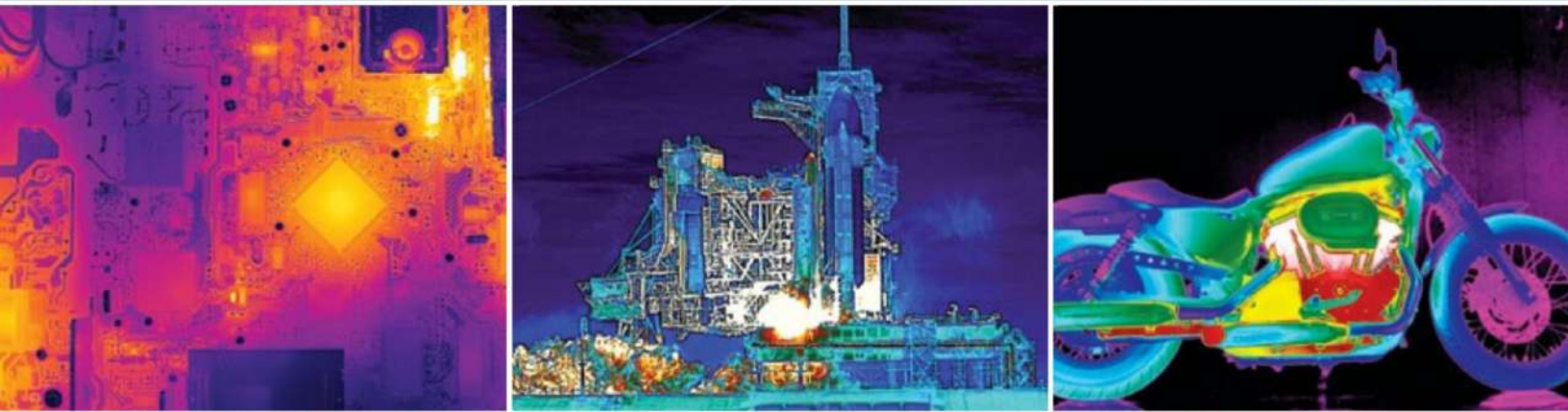


# *O melhor manual de infravermelho* para profissionais de P&D



## O melhor manual de infravermelho para profissionais de P&D

O Guia de Recursos Definitivo para o Uso de  
Infravermelho na Indústria de Pesquisa e Desenvolvimento



The World's Sixth Sense™

### BOSTON

FLIR Systems, Inc.  
9 Townsend West  
Nashua, NH 03063 EUA  
PH: +1 866.477.3687  
PH: +1 603.324.7600

### Sede

Corporativa de PORTLAND  
FLIR Systems, Inc.  
27700 SW Parkway Ave.  
Wilsonville, OR 97070 EUA  
PH: +1 866.477.3687

### CANADÁ

FLIR Systems, Ltd.  
920 Sheldon Ct.  
Burlington, ON L7L 5L6  
Canadá PH: +1 800.613.0507

### MÉXICO/AMÉRICA LATINA

FLIR Systems Brasil Av. Prof.  
Antonio Bardella 320 - B. Boa  
Vista- Cep: 18085-852 -  
Sorocaba – SP - Brasil PH: +55 15  
3238 8070

[www.flir.com](http://www.flir.com)

NASDAQ: FLIR

O equipamento aqui descrito pode exigir autorização do governo dos EUA para fins de exportação. O desvio contrário à lei dos EUA é proibido. Imagens meramente ilustrativas.  
As especificações estão sujeitas a alterações sem aviso prévio. ©2015 FLIR Systems, Inc. Todos os direitos reservados. (Rev. 12/01/15)

# Conteúdo

<u>Termografia IR - Como Funciona</u>	<u>4</u>
<u>Detectores de infravermelho para imagens termográficas</u>	<u>7</u>
<u>Obtendo o máximo de sua câmera IR</u>	<u>11</u>
<u>Filtros Estendem a Utilidade da Câmera IR</u>	<u>18</u>
<u>Termografia de ultra alta velocidade</u>	<u>23</u>
<u>Câmeras e Lentes</u>	<u>26</u>

Os pensamentos, ideias, opiniões e recomendações expressas neste livro destinam-se apenas a fins informativos. A FLIR não se responsabiliza por ações tomadas pelos leitores em seus negócios ou circunstâncias individuais.

Publicado por FLIR Systems Incorporated

Este livreto não pode ser reproduzido de nenhuma forma sem a permissão por escrito da FLIR Systems, Inc.

[www.FLIR.com](http://www.FLIR.com) • 1 866.477.3687

©2015 FLIR Systems Inc. Todos os direitos reservados.

# Capítulo 1

## Termografia IR - Como Funciona

### Câmeras de termografia infravermelha

Embora a radiação infravermelha (IR) não seja detectável pelo olho humano, uma câmera infravermelha pode convertê-la em uma imagem visual que retrata as variações térmicas em um objeto ou cena. O IR cobre uma porção do espectro eletromagnético de aproximadamente 900 a 14.000 nanômetros (0,9–14  $\mu\text{m}$ ).

O IR é emitido por todos os objetos em temperaturas acima do zero absoluto, e a quantidade de radiação aumenta com a temperatura.

A termografia é um tipo de imagem realizada com uma câmera de infravermelho calibrada para exibir valores de temperatura em um objeto ou cena. Portanto, a termografia permite fazer medições sem contato da temperatura de um objeto.

A construção da câmera IR é semelhante a uma câmera de vídeo digital. Os principais componentes são uma lente que focaliza o infravermelho em um detector, além de componentes eletrônicos

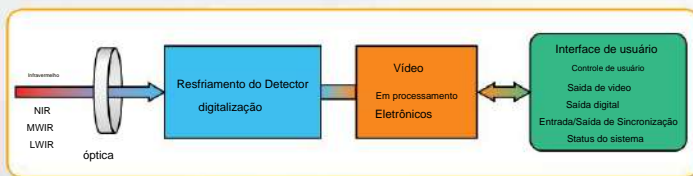


Figura 1. Diagrama de blocos simplificado de uma câmera IR

e software para processar e exibir os sinais e imagens.

Em vez de um dispositivo de carga acoplada que as câmeras fotográficas digitais e de vídeo usam, o detector de câmera IR é uma matriz de plano focal (FPA) de pixels de tamanho micrométrico feitos de vários materiais sensíveis a comprimentos de onda de infravermelho. A resolução FPA pode variar de cerca de 160 x 120 pixels até 1024 x 1024 pixels. Certas câmeras IR possuem software integrado que permite ao usuário focar em áreas específicas do FPA e calcular a temperatura. Outros sistemas utilizaram um computador ou sistema de dados com software especializado que fornece análise de temperatura. Ambos os métodos podem fornecer análises de temperatura com precisão superior a  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

As tecnologias do detector FPA são divididas em duas categorias: detectores térmicos e detectores quânticos. Um tipo comum de detector térmico é um microbolômetro não refrigerado feito de metal ou material semicondutor.

Eles normalmente têm custo mais baixo e uma resposta espectral de infravermelho mais ampla do que os detectores quânticos. Ainda assim, os microbolômetros reagem à energia radiante incidente e são muito mais lentos e menos sensíveis que os detectores quânticos. Os detectores quânticos são feitos de materiais como InSb, InGaAs, PtSi, HgCdTe (MCT) e GaAs/AlGaAs em camadas para detectores QWIP (Quantum Well Infrared Photon). O funcionamento de um detector quântico é baseado na mudança de estado dos elétrons em uma estrutura cristalina reagindo aos fótons incidentes. Esses detectores são geralmente mais rápidos e mais sensíveis do que os detectores térmicos. No entanto, eles requerem resfriamento, às vezes até temperaturas criogênicas usando nitrogênio líquido ou uma pequena unidade de refrigeração de ciclo Stirling.

### Considerações sobre o espectro de

**infravermelho** Normalmente, as câmeras de infravermelho são projetadas e calibradas para uma faixa específica do espectro de infravermelho. Isso significa que a ótica e os materiais do detector devem ser selecionados para a faixa desejada. A Figura 2 ilustra as regiões de resposta espectral para vários materiais detectores.

Como o IR tem as mesmas propriedades da luz visível em relação à reflexão, refração e transmissão, a ótica das câmeras térmicas é projetada de maneira semelhante à de uma câmera de comprimento de onda visual. No entanto, os tipos de vidro usados em ótica para câmeras de luz visível não podem ser usados para ótica em uma câmera infravermelha, pois eles não transmitem comprimentos de onda infravermelhos o suficiente. Por outro lado, os materiais que são transparentes ao infravermelho geralmente são opacos à luz visível.

As lentes de câmera IR normalmente usam materiais de silício (Si) e germânio (Ge). Normalmente Si é usado para sistemas de câmeras MWIR (IR de comprimento de onda médio), enquanto Ge é usado em câmeras LW (comprimento de onda longo). O Si e o Ge têm boas propriedades mecânicas, ou seja, não quebram com facilidade, não são higroscópicos e podem ser transformados em lentes com modernos métodos de torneamento. Como nas câmeras de luz visível, as lentes das câmeras IR possuem revestimentos antirreflexo. Com um design adequado, as lentes das câmeras IR podem transmitir quase 100% da radiação incidente.

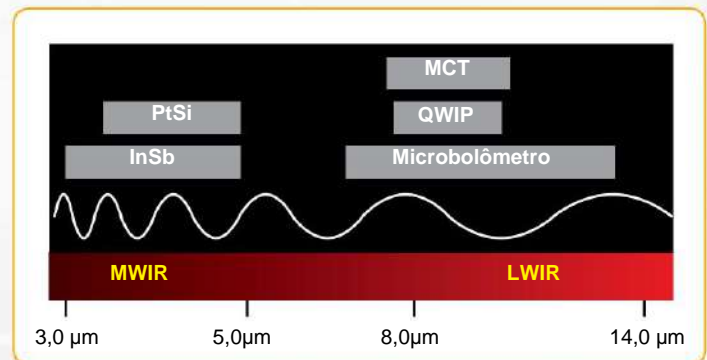


Figura 2. Exemplos de materiais detectores e suas respostas espectrais em relação às bandas de ondas médias (MW) e ondas longas (LW) de infravermelho

### Princípios de Radiação Térmica

A intensidade da energia emitida por um objeto varia com a temperatura e o comprimento de onda da radiação. Se o objeto estiver mais frio do que cerca de 500°C, a radiação emitida estará completamente dentro dos comprimentos de onda do infravermelho. Além de emitir radiação, um objeto reage à radiação incidente de seus arredores absorvendo e refletindo uma parte dela, ou permitindo que parte dela passe (como através de uma lente). A partir desse princípio físico, deriva-se a Lei da Radiação Total, que pode ser enunciada com a seguinte fórmula:

$$W = aW + rW + tW,$$

que pode ser simplificado para:

$$1 = a + r + t.$$

Os coeficientes  $a$ ,  $r$  e  $t$  descrevem a absorção de energia incidente do objeto ( $a$ ), reflexão ( $r$ ) e transmissão ( $t$ ). Cada coeficiente pode ter um valor de zero a um, dependendo de quão bem um objeto absorve, reflete ou transmite a radiação incidente. Por exemplo, se  $r = 0$ ,  $t = 0$  e  $a = 1$ , então não há radiação refletida ou transmitida e 100% da radiação incidente é absorvida. Isso é chamado de corpo negro perfeito.

No mundo real, não existem objetos que sejam absorvedores, refletores ou transmissores perfeitos, embora alguns possam chegar muito perto de uma dessas propriedades. No entanto, o conceito de corpo negro perfeito é muito importante na ciência da termografia, pois é a base para relacionar a radiação infravermelha com a temperatura de um objeto.

Fundamentalmente, um corpo negro perfeito é um absorvedor e emissor perfeito de energia radiante. Este conceito é declarado matematicamente como a Lei de Kirchhoff. As propriedades radiativas de um corpo são indicadas pelo símbolo  $e$ , a emitância ou emissividade do corpo. A lei de Kirchhoff afirma que  $a = e$ , e como ambos os valores variam com o comprimento de onda da radiação, a fórmula pode assumir a forma  $a(\lambda) = e(\lambda)$ , onde  $\lambda$  denota o comprimento de onda.

A lei da radiação total pode assim assumir a forma matemática  $1 = e + r + t$ , que para um corpo opaco ( $t = 0$ ) pode ser simplificada para  $1 = e + r$  ou  $r = 1 - e$  (isto é, reflexão = 1 - emissividade). Como um corpo negro perfeito é um absorvedor perfeito,  $r = 0$  e  $e = 1$ .

As propriedades radiativas de um corpo negro perfeito também podem ser descritas matematicamente pela Lei de Planck. Como isso tem uma fórmula matemática complexa e é uma função da temperatura e do comprimento de onda da radiação, as propriedades radiativas de um corpo negro geralmente são mostradas como uma série de curvas (Figura 3).

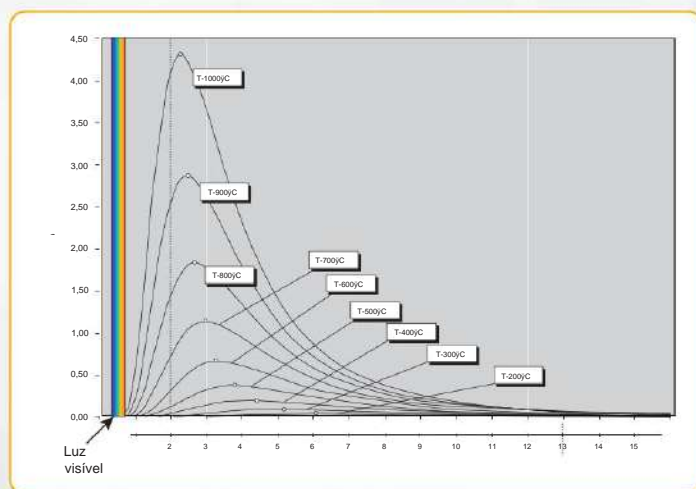


Figura 3. Ilustração da Lei de Planck

Essas curvas mostram a radiação por unidade de comprimento de onda e unidade de área, chamada de emitância radiante espectral do corpo negro. Quanto maior a temperatura, mais intensa a radiação emitida. No entanto, cada curva de emitância tem um valor máximo distinto em um determinado comprimento de onda. Este máximo pode ser calculado a partir da lei de deslocamento de Wien,

$$\lambda_{\text{max}} = 2898/T,$$

onde  $T$  é a temperatura absoluta do corpo negro, medida em Kelvin (K), e  $\lambda_{\text{max}}$  é o comprimento de onda na intensidade máxima. Usando curvas de emitância de corpo negro, pode-se descobrir que um objeto a 30°C tem um máximo próximo a 10  $\mu\text{m}$ , enquanto um objeto a 1000°C tem uma intensidade radiante com um máximo próximo a 2,3  $\mu\text{m}$ . Este último tem uma emitância radiante espectral máxima cerca de 1.400 vezes maior que um corpo negro a 30°C, com uma parcela considerável da radiação no espectro visível.

A partir da lei de Planck, a energia irradiada total de um corpo negro pode ser calculada. Isso é expresso por uma fórmula conhecida como lei de Stefan-Boltzmann,  $W = \sigma T^4$  ( $W/m^2$ ),

onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ ). Como exemplo, um ser humano com temperatura normal (cerca de 300 K) irradiará cerca de 500  $W/m^2$  de superfície corporal efetiva. Como regra geral, a superfície efetiva do corpo é de 1  $m^2$  e irradia cerca de 0,5 kW - uma perda substancial de calor.

As equações descritas nesta seção fornecem relações importantes entre a radiação emitida e a temperatura de um corpo negro perfeito. Uma vez que a maioria dos objetos de interesse para os termógrafos não são corpos negros perfeitos, deve haver alguma maneira de uma câmera IR representar graficamente a temperatura de um objeto "normal".

## Emissividade

As propriedades radiativas dos objetos são geralmente descritas em relação a um corpo negro perfeito (o emissor perfeito). Se a energia emitida de um corpo negro é denotada como  $W_{\text{bb}}$ , e a de um objeto normal na mesma temperatura que  $W_{\text{obj}}$ , então a razão entre esses dois valores descreve a emissividade ( $e$ ) do objeto,

$$e = W_{\text{obj}} / W_{\text{bb}}.$$

Assim, a emissividade é um número entre 0 e 1. Quanto melhores as propriedades radiativas do objeto, maior sua emissividade. Um objeto que tem a mesma emissividade e para todos os comprimentos de onda é chamado de corpo cinza. Conseqüentemente, para um corpo cinza, a lei de Stefan-Boltzmann assume a forma

$$W = e\sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)},$$

que afirma que o poder emissivo total de um corpo cinza é o mesmo que o de um corpo negro da mesma temperatura reduzido proporcionalmente ao valor de  $e$  para o objeto.

Ainda assim, a maioria dos corpos não são nem negros nem cinzentos. A emissividade varia com o comprimento de onda. Como a termografia opera apenas dentro de faixas espectrais limitadas, na prática muitas vezes é possível tratar objetos como corpos cinzentos. Em qualquer caso, um objeto com emitância que varia fortemente com o comprimento de onda é chamado de radiador seletivo. Por exemplo, o vidro é um radiador muito seletivo, comportando-se quase como um corpo negro para certos comprimentos de onda, ao passo que é o contrário para outros comprimentos de onda.

# Capítulo 1

## Influência Atmosférica

Entre o objeto e a câmera térmica está a atmosfera, que tende a atenuar a radiação devido à absorção por gases e espalhamento por partículas. A quantidade de atenuação depende muito do comprimento de onda da radiação. Embora a atmosfera geralmente transmita muito bem a luz visível, neblina, nuvens, chuva e neve podem nos impedir de ver objetos distantes. O mesmo princípio se aplica à radiação infravermelha.

Para medição termográfica devemos usar as chamadas janelas atmosféricas. Como pode ser visto na Figura 4, elas podem ser encontradas entre 2 e 5  $\mu\text{m}$ , as janelas de onda média, e 7,5–13,5  $\mu\text{m}$ , a janela de onda longa. A atenuação atmosférica impede que a radiação total de um objeto alcance a câmera. Se nenhuma correção de atenuação for aplicada, a temperatura aparente medida será cada vez menor com o aumento da distância. O software da câmera IR corrige a atenuação atmosférica.

Normalmente, as câmeras LW na faixa de 7,5 a 13,5  $\mu\text{m}$  funcionam bem em qualquer lugar que envolva atenuação atmosférica, porque a atmosfera tende a atuar como um filtro passa-alto acima de 7,5  $\mu\text{m}$  (Figura 4). A banda MW de 3–5  $\mu\text{m}$  tende a ser empregada com detectores altamente sensíveis para P&D de ponta e aplicações militares. Ao adquirir um sinal através da atmosfera com câmeras MW, devem ser usadas bandas de transmissão selecionadas onde ocorra menos atenuação.

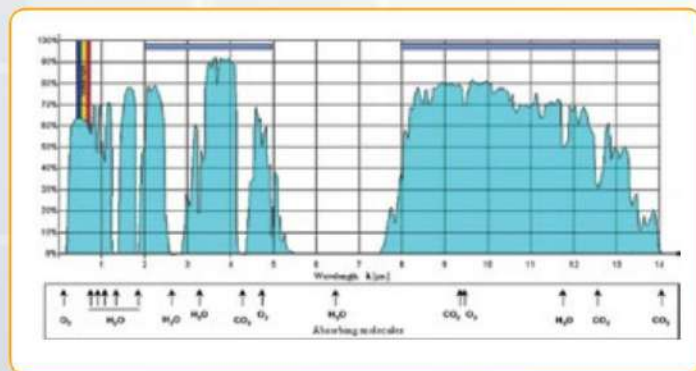


Figura 4. Atenuação atmosférica (áreas brancas) com um gráfico dos gases e vapor de água que causam a maior parte dela. As áreas sob a curva representam a maior transmissão IR.

## Medições de temperatura

A radiação que incide na lente da câmera IR vem de três fontes diferentes. A câmera recebe a radiação do objeto alvo, mais a radiação de seus arredores que foi refletida na superfície do objeto. Ambos os componentes da radiação são atenuados quando passam pela atmosfera. Como a atmosfera absorve parte da radiação, ela também irradiará parte dela (lei de Kirchhoff).

Dada esta situação, podemos derivar uma fórmula para o cálculo da temperatura do objeto a partir da saída de uma câmera calibrada.

1. Emissão do objeto =  $e \cdot t \cdot W_{obj}$ , onde  $e$  é a emissividade do objeto e  $t$  é a transmitância da atmosfera.
2. Emissão refletida de fontes ambientais =  $(1 - e) \cdot t \cdot W_{amb}$ , onde  $(1 - e)$  é a refletância do objeto. (Supõe-se que a temperatura  $T_{amb}$  seja a mesma para todas as superfícies emissoras dentro da meia esfera vista de um ponto na superfície do objeto.)
3. Emissão da atmosfera =  $(1 - t) \cdot W_{atm}$ , onde  $(1 - t)$  é a emissividade da atmosfera.

A potência de radiação total recebida pela câmera agora pode ser escrita:

$$W_{tot} = e \cdot t \cdot W_{obj} + (1 - e) \cdot t \cdot W_{amb} + (1 - t) \cdot W_{atm}$$

onde  $e$  é a emissividade do objeto,  $t$  é a transmissão através da atmosfera,  $T_{amb}$  é a temperatura (efetiva) do arredores do objeto, ou a temperatura refletida do ambiente (fundo), e  $T_{atm}$  é a temperatura da atmosfera.

Para chegar à temperatura correta do objeto alvo, o software da câmera IR requer entradas para a emissividade do objeto, atenuação atmosférica e temperatura e temperatura do ambiente circundante.

Dependendo das circunstâncias, esses fatores podem ser medidos, presumidos ou encontrados em tabelas de consulta.

# Capítulo 2

## Detecores de infravermelho para imagens termográficas

### Detecores de infravermelho para imagens termográficas

#### Câmeras IR

A imagem termográfica é realizada com uma câmera que converte a radiação infravermelha (IR) em uma imagem visual que descreve as variações de temperatura em um objeto ou cena. Os principais componentes da câmera IR são uma lente, um detector na forma de uma matriz de plano focal (FPA), possivelmente um resfriador para o detector, e a eletrônica e o software para processamento e exibição de imagens (Figura 1). A maioria dos detectores tem uma curva de resposta mais estreita do que toda a faixa de infravermelho (900 a 14.000 nanômetros ou 0,9 a 14  $\mu\text{m}$ ). Portanto, deve-se selecionar um detector (ou câmera) que tenha a resposta apropriada para a faixa de infravermelho da aplicação do usuário. Além da resposta do comprimento de onda, outras características importantes do detector incluem a sensibilidade, a facilidade de criá-lo como uma matriz de plano focal com pixels de tamanho micrométrico e o grau de resfriamento necessário, se houver.

Na maioria das aplicações, a câmera IR deve visualizar um objeto radiante através da atmosfera. Portanto, uma preocupação primordial é combinar a curva de resposta do detector com o que é chamado de janela atmosférica. Esta é a faixa de comprimentos de onda de infravermelho que passam prontamente pela atmosfera com pouca atenuação. Essencialmente, existem duas dessas janelas, uma na faixa de 2 a 5,6  $\mu\text{m}$ , a banda IR de comprimento de onda curto/médio (SW/MW), e uma na faixa de 8 a 14  $\mu\text{m}$ , a banda IR de comprimento de onda longo (LW). Existem muitos materiais detectores e câmeras com curvas de resposta que atendem a esses critérios.

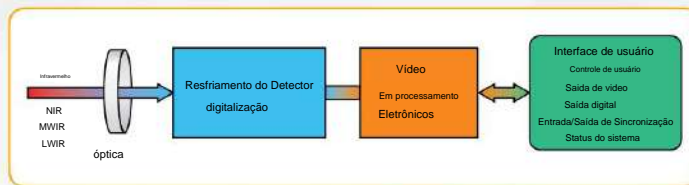


Figura 1. Diagrama de blocos simplificado de uma câmera IR

#### Detecores quânticos x não quânticos

A maioria das câmeras IR possui um detector do tipo microbolômetro, principalmente devido a considerações de custo. Os FPAs de microbolômetro podem ser criados a partir de materiais metálicos ou semicondutores e operam de acordo com princípios não quânticos. Isso significa que eles respondem à energia radiante de uma forma que causa uma mudança de estado no material a granel (isto é, o efeito bolômetro). Geralmente, os microbolômetros não requerem resfriamento, o que permite projetos de câmeras compactas e de custo relativamente baixo. Outras características dos microbolômetros são:

- Sensibilidade relativamente baixa (detectividade)
- Curva de resposta ampla (plana)
- Tempo de resposta lento (constante de tempo ~12ms)

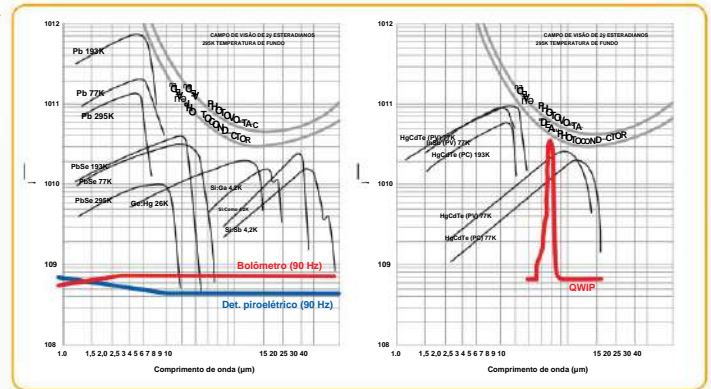


Figura 2. Curvas de detecção ( $D^*$ ) para diferentes materiais detectores

Para aplicações mais exigentes, são utilizados detectores quânticos, que operam com base em um efeito fotoelétrico intrínseco. Esses materiais respondem ao IR absorvendo fótons que elevam os elétrons do material a um estado de energia mais alto, causando uma mudança na condutividade, voltagem ou corrente. Ao resfriar esses detectores a temperaturas criogênicas, eles podem ser muito sensíveis ao infravermelho focado neles. Eles também reagem muito rapidamente a mudanças nos níveis de IR (ou seja, temperaturas), tendo um tempo de resposta constante da ordem de 1  $\mu\text{s}$ . Portanto, uma câmera com este tipo de detector é muito útil para registrar eventos térmicos transitórios. Ainda assim, os detectores quânticos têm curvas de resposta com detectividade que variam fortemente com o comprimento de onda (Figura 2). A Tabela 1 lista alguns dos detectores mais usados nas câmeras infravermelhas atuais.

Tipo de detector/ Material	Operação	Temperatura operacional
Microbolômetro	Detector de banda larga	Não resfriado (~30°C)
HgCdTe	Detector de fótons SW	200 mil
HgCdTe	Detector de fótons LW	77K
InSb	Detector de fótons MW	77K
PtSi	Detector de fótons MW	77K
QWIP	Detector de fótons LW	70 K

Tabela 1. Tipos de detectores e materiais comumente usados em câmeras IR.

# Capítulo 2

## Princípios de operação para detectores quânticos

Nos materiais usados para detectores quânticos, à temperatura ambiente, existem elétrons em diferentes níveis de energia. Alguns elétrons têm energia térmica suficiente para estarem na banda de condução, o que significa que os elétrons estão livres para se mover e o material pode conduzir uma corrente elétrica. A maioria dos elétrons, no entanto, encontra-se na banda de valência, onde não carregam nenhuma corrente porque não podem se mover livremente.

(Consulte as visualizações mais à esquerda da Figura 3.)

Quando o material é resfriado a uma temperatura suficientemente baixa, que varia com o material escolhido, a energia térmica dos elétrons pode ser tão baixa que não há nenhum na banda de condução (vista central superior da Figura 3). Portanto, o material não pode transportar nenhuma corrente. Quando esses materiais são expostos a fótons incidentes e os fótons têm energia suficiente, essa energia pode estimular um elétron na banda de valência, fazendo com que ele suba para a banda de condução (vista superior direita da Figura 3). Assim, o material (o detector) pode transportar uma fotocorrente, que é proporcional à intensidade da radiação incidente.

Existe uma energia mais baixa muito exata dos fótons incidentes que permitirão que um elétron salte da banda de valência para a banda de condução. Essa energia está relacionada a um determinado comprimento de onda, o comprimento de onda de corte. Como a energia do fóton é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda, as energias são maiores na banda SW/MW do que na banda LW. Portanto, como regra, as temperaturas de operação para detectores LW são mais baixas do que para detectores SW/MW. Para um detector InSb MW, a temperatura necessária deve ser inferior a 173 K ( $-100^{\circ}\text{C}$ ), embora possa ser operado a uma temperatura muito mais baixa. Um detector HgCdTe (MCT) LW deve ser resfriado a 77 K ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) ou menos. Um detector QWIP normalmente precisa operar a cerca de 70 K ( $-203^{\circ}\text{C}$ ) ou menos. As vistas inferior central e direita da Figura 3 representam a dependência do comprimento de onda do detector quântico. O comprimento de onda e a energia do fóton incidente devem ser suficientes para superar a energia do intervalo de banda,  $\gamma E$ .

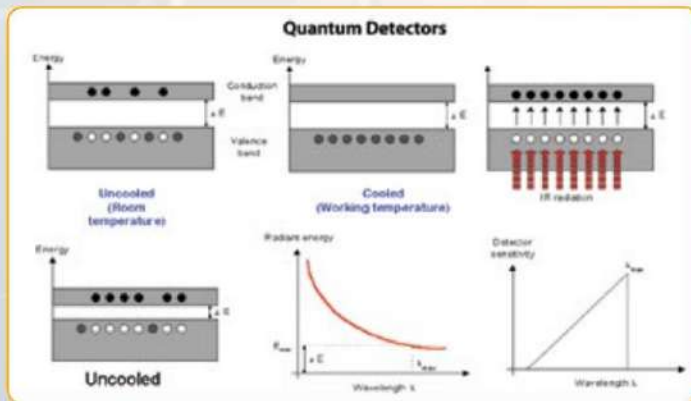


Figura 3. Princípio de funcionamento dos detectores quânticos

## Métodos de resfriamento

Os primeiros detectores usados em instrumentos radiométricos infravermelhos foram resfriados com nitrogênio líquido. O detector foi acoplado ao frasco Dewar que continha o nitrogênio líquido, mantendo assim o detector em uma temperatura muito estável e baixa ( $-196^{\circ}\text{C}$ ).

Mais tarde, outros métodos de resfriamento foram desenvolvidos. A primeira solução de estado sólido para o problema de resfriamento foi apresentada pela AGEMA em 1986, quando introduziu um resfriador de efeito Peltier para uma câmera IR comercial.

Em um resfriador Peltier, a corrente contínua é forçada através de um material termoelétrico, removendo o calor de uma junção e criando um lado frio e um lado quente. O lado quente é conectado a um dissipador de calor, enquanto o lado frio resfria o componente conectado a ele. Veja as Figuras 4 e 5.

Para aplicações muito exigentes, onde era necessária a maior sensibilidade possível, foi desenvolvida uma solução elétrica para resfriamento criogênico.

Isso resultou no refrigerador Stirling. Somente nos últimos 15 a 20 anos os fabricantes conseguiram estender a vida útil dos refrigeradores Stirling para 8.000 horas ou mais, o que é suficiente para uso em câmeras térmicas.

O processo Stirling remove o calor do dedo frio (Figura 6) e o dissipa no lado quente. A eficiência desse tipo de resfriador é relativamente baixa, mas boa o suficiente para resfriar um detector de câmera IR.

Independentemente do método de resfriamento, o plano focal do detector é conectado ao lado frio do resfriador de forma a permitir uma troca de calor condutiva eficiente. Como as matrizes de plano focal são pequenas, a área de conexão e o próprio cooler podem ser relativamente pequenos.

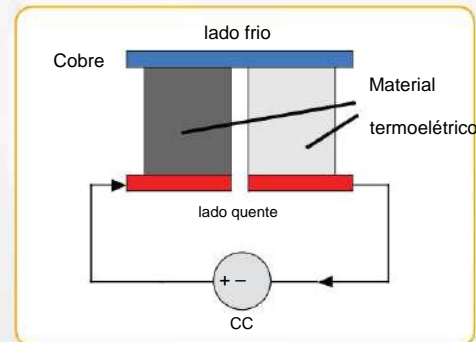


Figura 4. Resfriador Peltier de estágio único

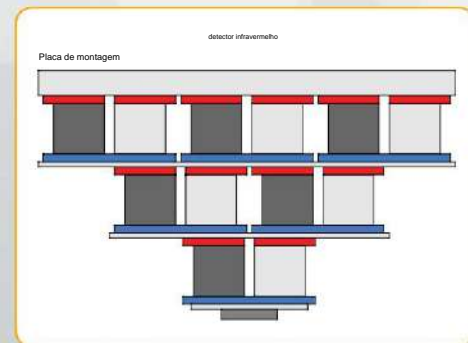


Figura 5. Resfriador Peltier de três estágios



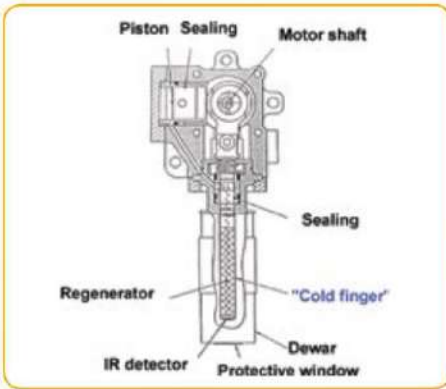


Figura 6. Refrigerador Stirling integrado, trabalhando com gás hélio, resfriando até  $-196^{\circ}\text{C}$  ou às vezes até mais baixas temperaturas

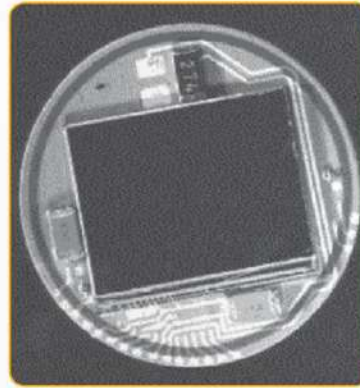


Figura 8. QWIP FPA montado em um substrato de cerâmica e ligado a componentes eletrônicos externos

### Conjuntos de matriz de plano focal

Dependendo do tamanho/resolução de um conjunto FPA, ele tem de (aproximadamente) 60.000 a mais de 1.000.000 de detectores individuais. Para simplificar, isso pode ser descrito como uma matriz de pixel bidimensional com cada pixel (detector) tendo dimensões de tamanho de micrômetro. As resoluções FPA podem variar de cerca de  $160 \times 120$  pixels até  $1024 \times 1024$  pixels.

Na realidade, as montagens são um pouco mais complexas. Dependendo do material do detector e seu princípio de operação, uma grade óptica pode fazer parte do conjunto FPA. Este é o caso dos detectores QWIP, nos quais a grade óptica dispersa a radiação incidente para aproveitar a sensibilidade direcional na rede cristalina do material do detector. Isso tem o efeito de aumentar a sensibilidade geral de um detector QWIP. Além disso, o FPA deve estar ligado à eletrônica de leitura da câmera IR. Um detector QWIP finalizado e um conjunto eletrônico IC é mostrado na Figura 8. Isso seria incorporado a um refrigerador Dewar ou Stirling em um conjunto semelhante aos mostrados na Figura 7.

Outra complexidade é o fato de que cada detector individual no FPA tem um ganho ligeiramente diferente e deslocamento zero. Para criar uma imagem termográfica útil, os diferentes ganhos e deslocamentos devem ser corrigidos para um valor normalizado. Este processo de calibração em várias etapas é realizado pelo software da câmera. Consulte as Figuras 9–11.

O resultado final é uma imagem termográfica que retrata com precisão as temperaturas relativas em todo o objeto ou cena alvo (Figura 12). Além disso, as temperaturas reais podem ser calculadas com precisão de aproximadamente  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

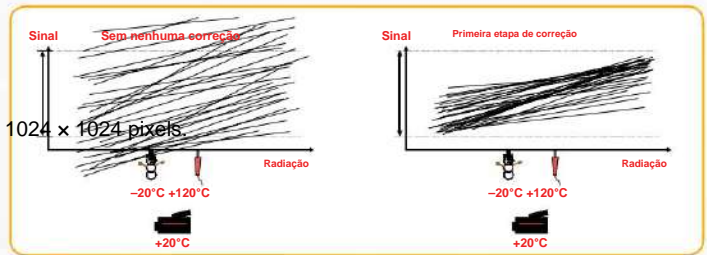


Figura 9. Para normalizar diferentes ganhos e deslocamentos do detector FPA, a primeira etapa de correção é a compensação de deslocamento. Isso coloca cada resposta do detector dentro da faixa dinâmica do conversor eletrônico A/D da câmera.

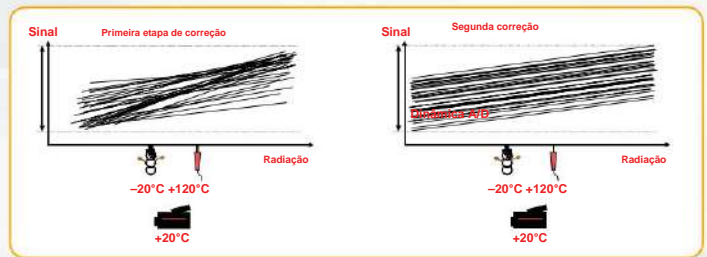


Figura 10. Após a compensação de deslocamento, a correção de inclinação é aplicada.



Figura 7. Exemplos de conjuntos de matriz de plano focal resfriados usados em câmeras de infravermelho

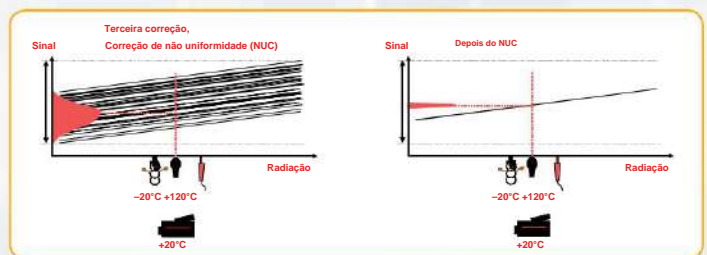


Figura 11. Depois que os fatores de ganho são trazidos para o mesmo valor, a correção de não uniformidade (NUC) é aplicada para que todos os detectores tenham essencialmente as mesmas características eletrônicas.

# Capítulo 2

## Critérios de aplicação

Conforme indicado anteriormente, diferentes tipos de detectores têm diferentes sensibilidades térmicas e espectrais. Além disso, eles têm diferentes estruturas de custos devido a vários graus de manufacturabilidade. Onde eles se encaixam na aplicação, os detectores de fótons, como os tipos InSb e QWIP, oferecem várias vantagens:

- Alta sensibilidade térmica
- Alta uniformidade dos detectores, ou seja, ruído de padrão fixo muito baixo
- Existe um grau de seletividade em sua sensibilidade espectral
- Alto rendimento no processo produtivo
- Custo relativamente baixo
- São resistentes a altas temperaturas e alta radiação
- Eles produzem uma qualidade de imagem muito boa

A eletrônica da câmera pode lidar com amplas variações nas sensibilidades absolutas do detector. Por exemplo, a alta sensibilidade que pode saturar um detector em altas intensidades térmicas pode ser controlada por controle de abertura e filtros de densidade neutra. Ambas as soluções podem reduzir a energia radiante que incide sobre o FPA.

Além do preço, a sensibilidade espectral costuma ser uma preocupação primordial na seleção de um detector e uma câmera para uma aplicação específica. Depois que um detector é selecionado, o material da lente e os filtros podem ser selecionados para alterar um pouco as características gerais de resposta de um sistema de câmera IR. A Figura 13 mostra a resposta do sistema para vários detectores diferentes.



Figura 12. Imagem IR de uma câmera detectora 1024 x 1024 InSb

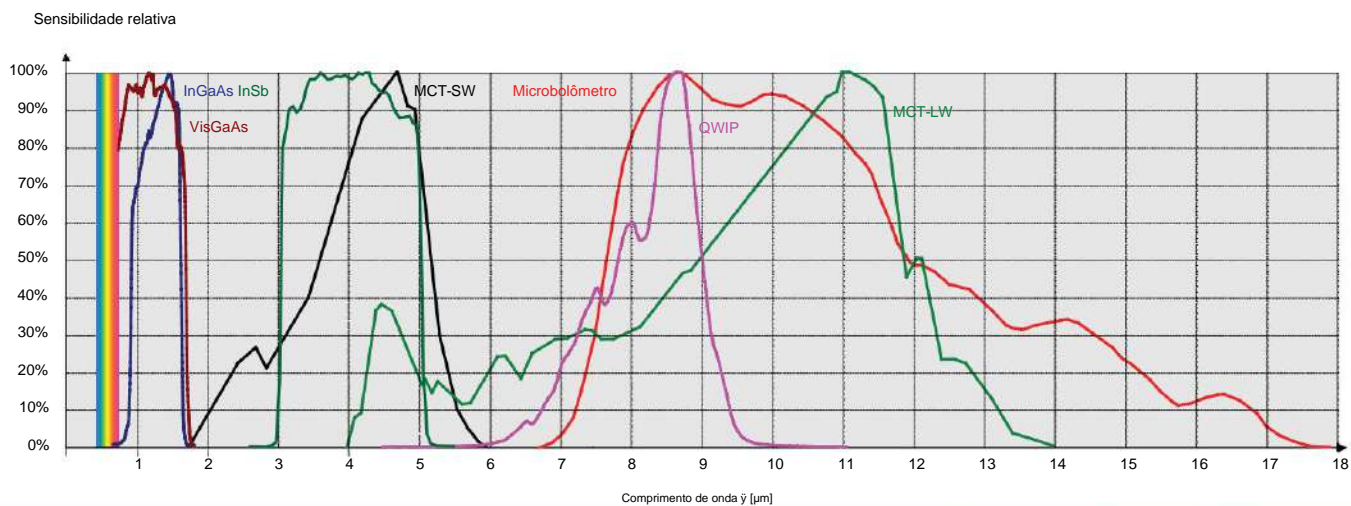


Figura 13. Curvas de resposta relativas para várias câmeras de infravermelho

# Capítulo 3

## Obtendo o máximo de sua câmera IR

### Obtendo o máximo de sua câmera IR

Compreender a calibração e as correções da câmera IR ajuda a garantir medições precisas de temperatura e mapeamento termográfico.

#### Medições Quantitativas com Câmeras IR

Para obter melhores resultados, os usuários de câmeras IR precisam pensar cuidadosamente sobre o tipo de medição que precisam fazer e, então, ser proativos no processo de calibração da câmera. Obviamente, o primeiro passo é selecionar uma câmera com os recursos e o software apropriados para o aplicativo. Uma compreensão das diferenças entre medições termográficas e radiométricas é muito útil a esse respeito.

A termografia é um tipo de imagem infravermelha na qual as câmeras infravermelhas detectam radiação no espectro eletromagnético com comprimentos de onda de aproximadamente 900 a 14.000 nanômetros (0,9–14  $\mu\text{m}$ ) e produzem imagens dessa radiação. Normalmente, essa imagem é usada para medir as variações de temperatura em um objeto ou cena, que podem ser expressas em graus Celsius, Fahrenheit ou Kelvin.

A radiometria é a medição da energia eletromagnética radiante, especialmente aquela associada ao espectro infravermelho. Pode ser definido de forma mais simples como uma medida absoluta do fluxo radiante. A unidade de medida típica para radiometria de imagem é a radiância, que é expressa em unidades de Watts/(sr-cm<sup>2</sup>). (A abreviação “sr” significa esterradiano; uma razão geométrica adimensional que expressa o ângulo sólido (cônico) que envolve uma porção da superfície de uma esfera equivalente ao quadrado do raio.)

Em termos simples, pode-se pensar na termografia como “quão quente” é um objeto, enquanto a radiometria é “quanta energia” o objeto está liberando. Embora esses dois conceitos estejam relacionados, eles não são a mesma coisa. As câmeras de infravermelho medem inerentemente a irradiância, não a temperatura, mas a termografia deriva da radiância. Ao calibrar termicamente um sistema de infravermelho, você está calibrando/medindo com base na radiância e na temperatura efetivas do corpo negro. Portanto, a emissividade do objeto alvo que você está medindo é vital para atingir temperaturas precisas. (Emissividade ou emitância é a propriedade radiativa de um objeto em relação a um corpo negro perfeito.)

As câmeras infravermelhas de nível básico com detectores de microbolômetro operam de acordo com princípios não quânticos. Os detectores respondem à energia radiante de uma forma que causa uma mudança de estado no material a granel (por exemplo, resistência ou capacitância). O software de calibração nessas câmeras é orientado para imagens termográficas e medições de temperatura. As câmeras infravermelhas de última geração com detectores de fótons operam de acordo com os princípios da física quântica. Embora eles também forneçam imagens de alta qualidade, seu software é tipicamente mais sofisticado, permitindo medições precisas de radiância e temperatura.

Algumas razões pelas quais as medições de radiância são importantes incluem:

- Dado um sensor linear, a radiância medida é linear com a energia incidente.  
A temperatura não é linear com contagens de imagens digitais brutas, mesmo com um sensor linear.
- Dada a radiância e a área de um objeto, a intensidade radiante pode ser calculada.  
Conhecer a intensidade radiante total de um alvo dá ao analista radiométrico a capacidade de modelar a irradiância gerada pelo alvo em várias condições geométricas e atmosféricas. • A relação entre bandas espectrais de interesse pode ser muito mais fácil de determinar se você estiver trabalhando em unidades radiométricas.

- A comparação entre diferentes objetos em termos radiométricos tende a ter menos incerteza porque a emissividade não é uma preocupação. (Ainda é preciso considerar os efeitos de passagem de banda atmosféricos e espectrais.) • Pode-se normalmente converter uma assinatura radiométrica de radiância em temperatura efetiva de corpo negro, dadas algumas suposições ou dados de medição auxiliares. Tende a ser mais difícil passar da temperatura para a radiância.

#### Principais relações físicas na operação da câmera

Existem cinco etapas básicas na produção de medições radiométricas e termográficas com um sistema de câmera IR:

1. O objeto alvo tem uma certa assinatura de energia que é coletada pelo câmera IR através de sua lente.
2. Isso envolve a coleta de fótons no caso de um detector de fótons ou a coleta de energia térmica com um detector térmico, como um microbolômetro.
3. A energia coletada faz com que o detector produza uma tensão de sinal que resulta em uma contagem digital por meio do conversor A/D do sistema.  
(Por exemplo, uma câmera FLIR ThermoVision® SC6000 IR tem uma faixa dinâmica de 14 bits em seu conversor A/D, que cria valores de contagem variando de 0 a 16.383. Quanto mais energia IR incidente no detector da câmera (dentro de sua banda espectral), maior a contagem digital.)
4. Quando a câmera está devidamente calibrada, as contagens digitais são transformadas em valores de radiância.
5. Por fim, os componentes eletrônicos da câmera calibrada convertem os valores de radiância em temperatura usando a emissividade conhecida ou medida do objeto alvo.

Expandindo nas Etapas 4 e 5, uma medição efetiva de temperatura de corpo negro pode ser derivada de uma medição de radiância aplicando uma calibração radiométrica, modelo de temperatura versus radiância e emissividade do objeto ou cena alvo. Cada câmera IR projetada para medições sérias é calibrada na fábrica. No laboratório de calibração, a câmera faz várias medições de corpo negro em temperaturas conhecidas, níveis de radiância, emissividade e distâncias. Isso cria uma tabela de valores com base nas contagens A/D da temperatura/

medidas de radiância.

Depois que as contagens para cada medição de temperatura de corpo negro são inseridas no software de calibração, os dados são passados por um algoritmo de ajuste de curva de radiância em banda para produzir os valores de contagem e radiância em banda apropriados, dada a função de resposta espectral normalizada do sistema da câmera. Isso produz uma calibração radiométrica da radiância dentro da banda  $[W/(sr-cm^2)]$  versus as contagens digitais obtidas durante a visualização de um corpo negro em uma faixa de temperaturas. O resultado é uma série de curvas de calibração. Um exemplo de como os pontos de calibração são capturados é mostrado na Figura 1.

As curvas de calibração são armazenadas na memória do sistema da câmera como uma série de tabelas numéricas de ajuste de curva que relacionam valores de radiância com temperaturas de corpo negro. Quando o sistema faz uma medição, ele pega o valor digital do sinal em um determinado momento, vai para a tabela de calibração apropriada e calcula a temperatura. A devida consideração é dada a outros fatores como atenuação atmosférica, temperatura ambiente refletida e variação da temperatura ambiente da câmera antes que o resultado final seja apresentado.

# Capítulo 3

Compensação de desvio de ambiente (ADC). Outra consideração importante no processo de calibração é a radiação causada pelo aquecimento e resfriamento da própria câmera. Quaisquer oscilações na temperatura interna da câmera causadas por mudanças no ambiente ou pelo aquecimento e resfriamento dos componentes eletrônicos da câmera afetarão a intensidade da radiação no detector. A radiação que resulta diretamente da câmera é chamada de radiação parasita e pode causar imprecisões na saída de medição da câmera, especialmente com câmeras calibradas termicamente. Certas câmeras de infravermelho (como a linha de produtos FLIR ThermoVision®) possuem sensores internos que monitoram as mudanças na temperatura da câmera. Como parte do processo de calibração, essas câmeras são colocadas em uma câmara ambiental e focadas em uma referência de corpo negro. A temperatura da câmara e do corpo negro é então variada e os dados são coletados dos sensores internos. Os fatores de correção são então criados e armazenados na câmera. Na operação em tempo real, os sensores da câmera monitoram continuamente a temperatura interna e enviam feedback ao processador da câmera. A saída da câmera é então corrigida para quaisquer influências de radiação parasita. Essa funcionalidade é comumente chamada de compensação de desvio do ambiente.

Em última análise, a câmera deve calcular a temperatura de um objeto com base em sua emissão, emissão refletida de fontes ambientais e emissão da atmosfera usando a Lei de Radiação Total. A potência de radiação total recebida pela câmera pode ser expressa como:

$$W_{tot} = e \cdot t \cdot W_{obj} + (1 - e) \cdot t \cdot W_{amb} + (1 - t) \cdot W_{atm},$$

onde  $e$  é a emissividade do objeto,  $t$  é a transmissão através da atmosfera,  $T_{amb}$  é a temperatura (efetiva) dos arredores do objeto ou a temperatura refletida do ambiente (fundo) e  $T_{atm}$  é a temperatura da atmosfera.

Os melhores resultados são obtidos quando um usuário é diligente em inserir valores conhecidos para todas as variáveis pertinentes no software da câmera. As tabelas de emissividade estão disponíveis para uma ampla variedade de substâncias comuns. No entanto, em caso de dúvida, as medições devem ser feitas para obter os valores corretos.

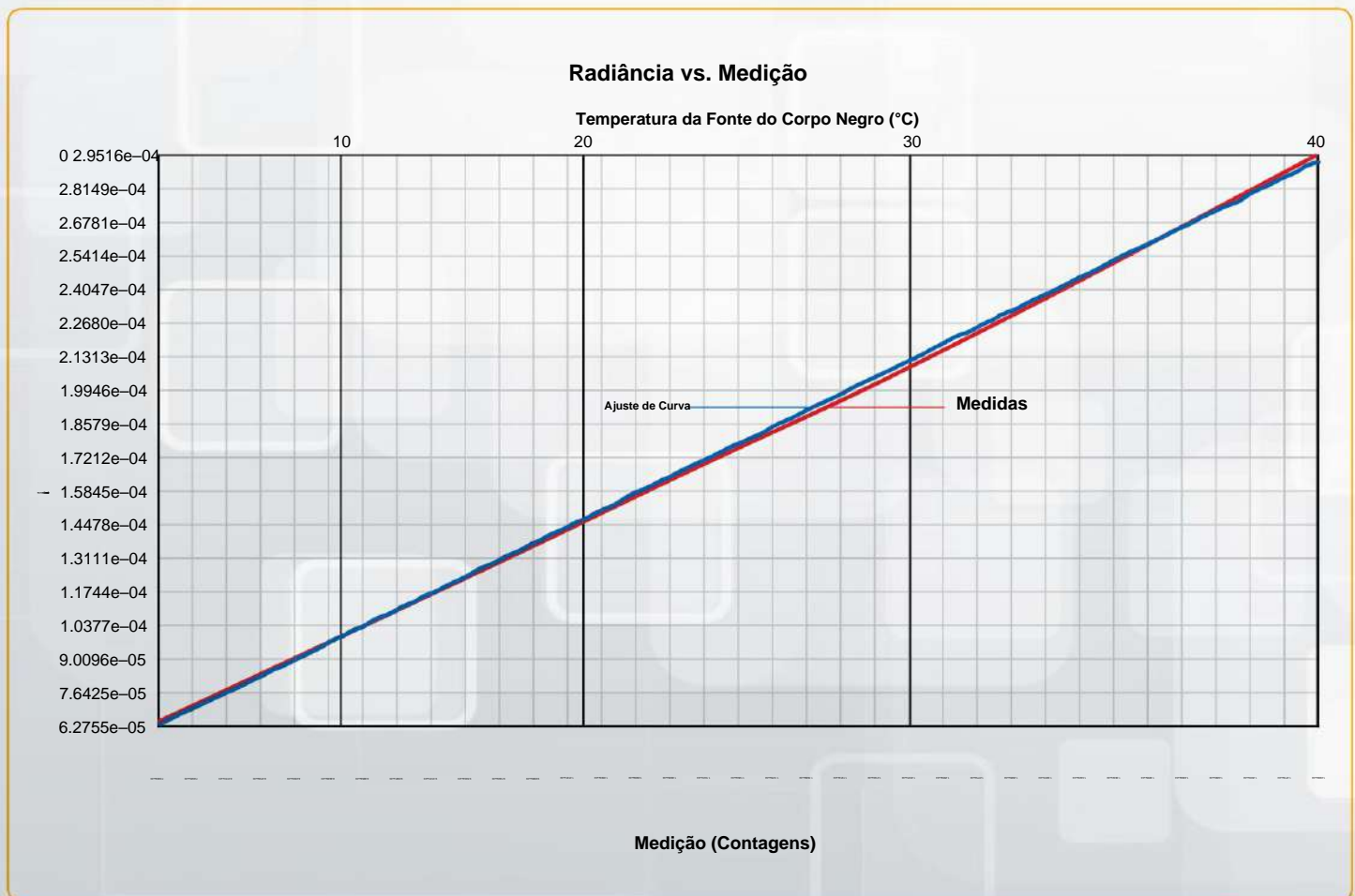


Figura 1. Exemplo de medições de câmera e valores correspondentes de radiação dentro da banda para determinadas temperaturas de corpo negro com radiação resultante versus curva de medição.

## Obtendo o máximo de sua câmera IR

As ferramentas de software de calibração e análise disponíveis para os usuários nem sempre estão contidas na câmera. Embora as câmeras de última geração tenham muitas funções de software integradas, outras dependem de software externo executado em um PC. Mesmo câmeras de última geração são conectadas a PCs para expandir seus recursos internos de calibração, correção e análise. Por exemplo, o software ThermaCAM® RTools™ da FLIR pode atender a uma ampla variedade de funções, desde a aquisição de imagens em tempo real até a análise pós-aquisição.

Quer o software esteja na câmera ou em um PC externo, os pacotes mais úteis permitem que o usuário modifique facilmente as variáveis de calibração.

Por exemplo, o ThermaCAM RTools da FLIR oferece a capacidade de inserir e modificar emissividade, condições atmosféricas, distâncias e outros dados auxiliares necessários para calcular e representar a temperatura exata do objeto, tanto ao vivo quanto por meio de dados salvos. Este software fornece uma capacidade de pós-medição para modificar ainda mais as condições atmosféricas, responsividade espectral, mudanças na transmissão atmosférica, filtros internos e externos e outros critérios importantes conforme necessário.

As discussões a seguir destinam-se a representar as funções de firmware e software da câmera interna e externa. Onde essas funções residem depende da câmera.

**Funções típicas de medição de câmera** As câmeras de infravermelho

têm vários modos de operação para garantir medições de temperatura corretas sob diferentes condições de aplicação. Funções de medição típicas incluem:

- Medidor de pontos
- Área
- Perfil
- Isoterma
- Faixa de temperatura
- Configurações de cor ou escala de cinza

As funções do cursor permitem a seleção fácil de uma área de interesse, como o retículo das leituras pontuais na Figura 2. Além disso, o cursor pode selecionar áreas de círculo, quadrado e polígono de formato irregular ou criar uma linha para uma temperatura perfil. Depois que uma área é selecionada, ela pode ser "congelada" para que a câmera possa tirar uma foto dessa área. Alternativamente, a imagem da câmera pode permanecer ao vivo para observação de mudanças de temperatura.

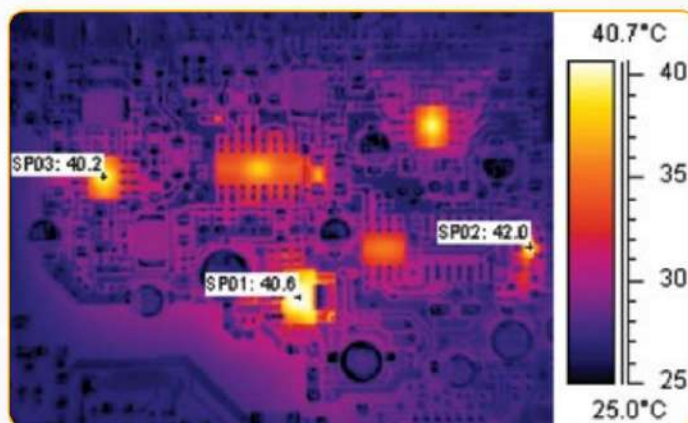
O medidor de ponto encontra a temperatura em um determinado ponto.

Dependendo da câmera, esta função pode permitir dez ou mais pontos móveis, um ou mais dos quais podem encontrar automaticamente o ponto mais quente da imagem. A função de área isola uma área selecionada de um objeto ou cena e encontra as temperaturas máxima, mínima e média dentro dessa área. A função isotérmica permite retratar a distribuição de temperatura de uma área quente. Múltiplas isotermas podem ser permitidas. O perfil da linha é uma forma de visualizar a temperatura ao longo de alguma parte do objeto, que também pode ser apresentada em forma de gráfico (Figura 3).

A faixa de medição de temperatura normalmente é selecionável pelo usuário. Este é um recurso valioso quando uma cena tem uma faixa de temperatura mais estreita do que a faixa de escala total da câmera. Definir uma faixa mais estreita permite melhor resolução das imagens e maior precisão nas temperaturas medidas. Portanto, as imagens serão

ilustrar melhor diferenças menores de temperatura. Por outro lado, uma escala mais ampla e/ou faixa de temperatura máxima mais alta pode ser necessária para evitar a saturação da porção da imagem na temperatura mais alta.

Como complemento à seleção da faixa de temperatura, a maioria das câmeras permite que o usuário configure uma escala de cores ou escala de cinza para otimizar a imagem da câmera. A Figura 4 ilustra duas possibilidades de escala de cinza.



**Figura 2. Imagem IR de uma placa de circuito impresso indicando três leituras de temperatura pontual. As cores da imagem correspondem à escala de temperatura à direita.**

Na Figura 2, uma chamada "escala de ferro" foi usada para uma renderização de cores. De maneira semelhante à escala de cinza usada na Figura 4, as temperaturas mais quentes podem ser reproduzidas como cores mais claras ou mais escuras.

Outra possibilidade é renderizar imagens com o que é conhecido como escala de arco-íris (Figura 5). Em algumas imagens coloridas, o cinza é usado para indicar áreas onde o detector da câmera ficou saturado (isto é, temperaturas bem acima do topo da escala).

Embora a escolha da escala de cores geralmente seja uma questão de preferência pessoal, pode haver momentos em que um tipo de escala é melhor do que outro para ilustrar a faixa de temperaturas em uma cena.

No caso de medições isotérmicas, as áreas com a mesma radiância térmica são destacadas. Se usarmos uma escala de cores com dez cores, obteremos de fato dez isotermas na imagem. Essa escala às vezes torna mais fácil ver a distribuição de temperatura sobre um objeto. Na Figura 6, a escala de temperatura é selecionada de modo que cada cor seja uma isotérmica com largura de 2°C.



**Figura 3. Gráfico de temperatura ao longo de uma área selecionada de um objeto alvo usando a função de perfil de uma câmera**

# Capítulo 3

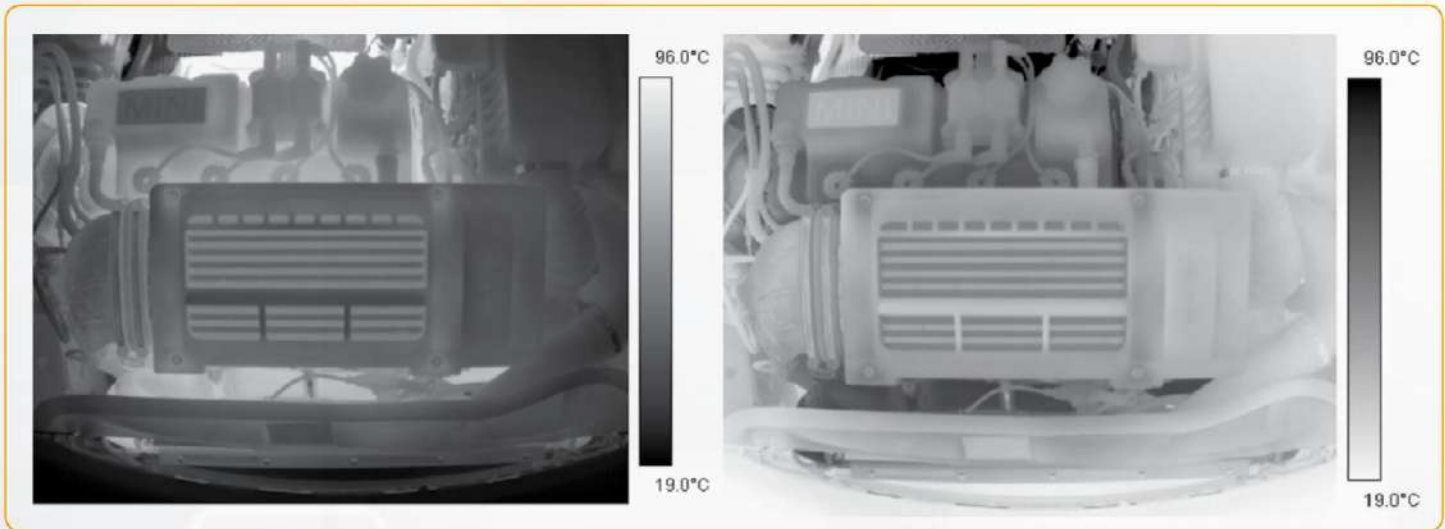


Figura 4. Imagens em escala de cinza do motor do carro; vista esquerda tem branco como a temperatura mais quente; vista direita mostra preto como o mais quente

Ainda assim, é importante perceber que uma renderização de escala de temperatura isotérmica não será precisa, a menos que toda a área destacada tenha a mesma emissividade e as temperaturas ambientes sejam as mesmas para todos os objetos dentro da área. Isso aponta problemas comuns para usuários de câmeras IR. Frequentemente, a emissividade varia em um objeto ou cena, junto com variações nas temperaturas ambientes, acompanhadas por condições atmosféricas que não correspondem aos valores padrão de uma câmera. É por isso que as câmeras IR incluem funções de correção de medição e calibração.

### Correções de emissividade Na maioria

das aplicações, a emissividade de um objeto é baseada em valores encontrados em uma tabela. Embora o software da câmera possa incluir uma tabela de emissividade, os usuários geralmente têm a capacidade de inserir valores de emissividade para um objeto variando de 0,1 a 1,0. Muitas câmeras também fornecem correções automáticas com base na entrada do usuário para temperatura ambiente refletida, distância de visualização, umidade relativa, transmissão atmosférica e ótica externa.

Conforme descrito anteriormente, a câmera IR calcula uma temperatura com base nas medições de radiância e na emissividade do objeto. No entanto, quando o valor da emissividade é desconhecido ou incerto, o processo inverso pode ser aplicado. Conhecendo a temperatura do objeto, a emissividade pode ser calculada. Isso geralmente é feito quando são necessários valores exatos de emissividade. Existem dois métodos comuns de fazer isso.

O primeiro método estabelece uma temperatura conhecida usando uma caixa de equalização. Esta é essencialmente uma câmara de temperatura rigidamente controlada com ar quente circulante. O tempo na caixa deve ser suficiente para permitir que todo o objeto esteja em uma temperatura uniforme. Além disso, é absolutamente necessário que o objeto se estabilize em uma temperatura diferente do ambiente onde as medições reais ocorrerão.

Normalmente, o objeto é aquecido a uma temperatura de pelo menos 10°C acima do ambiente para garantir que a termodinâmica das medições seja válida.

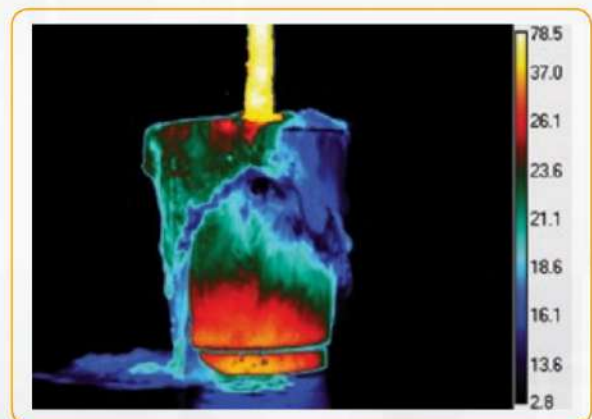


Figura 5. Escala do arco-iris mostrando temperaturas mais baixas na extremidade azul do espectro

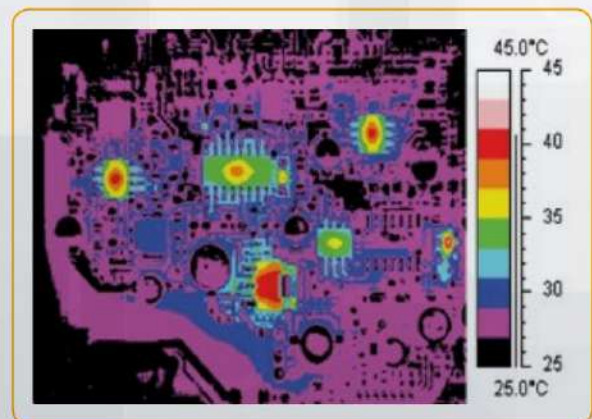


Figura 6. Escala de cores isotérmicas com cada cor tendo uma largura isotérmica de 2°C

## Obtendo o máximo de sua câmera IR

Assim que o objeto atinge a temperatura definida, a tampa é retirada e um termograma é capturado do objeto. A câmera e/ou software para processamento de termogramas podem ser usados para obter o valor de emissividade.

Outro método ("ponto adjacente") é muito mais simples, mas ainda fornece valores razoavelmente exatos da emissividade. Ele usa uma área de emissividade conhecida. A ideia é determinar a temperatura do objeto com a câmera da maneira usual. O objeto é ajustado para que a área com emissividade desconhecida fique muito próxima de uma área de emissividade conhecida. A distância que separa essas áreas deve ser tão pequena que se possa assumir com segurança que elas têm a mesma temperatura. A partir desta medição de temperatura, a emissividade desconhecida pode ser calculada.

O problema é ilustrado na Figura 7, que é uma imagem de uma placa de circuito impresso (PCB) aquecida a uma temperatura uniforme de 68,7°C. No entanto, áreas de emissividades diferentes podem, na verdade, ter temperaturas diferentes, conforme indicado na legenda da Figura 7a. Usando a técnica que acabamos de descrever, a correção da emissividade prossegue encontrando um ponto de referência onde uma temperatura de 68,7°C é indicada e calculando a emissividade naquele local. Conhecendo a emissividade do ponto de referência, a emissividade dos pontos alvo pode ser calculada. As temperaturas corrigidas são mostradas na Figura 7b.

Conforme ilustrado nestas figuras, esta técnica pode ser utilizada com a função de seleção de área da câmera ("AR" nas figuras) e utilizando a temperatura média daquela área. A razão para usar a temperatura média na área de referência é que geralmente há uma dispersão de temperaturas dentro da área, especialmente para materiais com baixa emissividade. Nesse caso, usar um medidor de ponto ou um valor máximo de área daria um resultado menos estável. A função isotérmica também não é recomendada, pois não é possível obter o efeito de média com ela.

Também pode ser possível usar um sensor de contato para encontrar a temperatura de uma área de emissividade desconhecida, mas essas medições apresentam outros problemas que podem não ser fáceis de superar. Além disso, nunca é possível medir a emissividade de um objeto cuja temperatura é a mesma que a temperatura ambiente refletida de seus arredores.

Geralmente, um usuário também pode inserir outras variáveis necessárias para corrigir as condições do ambiente. Isso inclui fatores para temperaturas ambientes e atenuação atmosférica ao redor do objeto alvo.

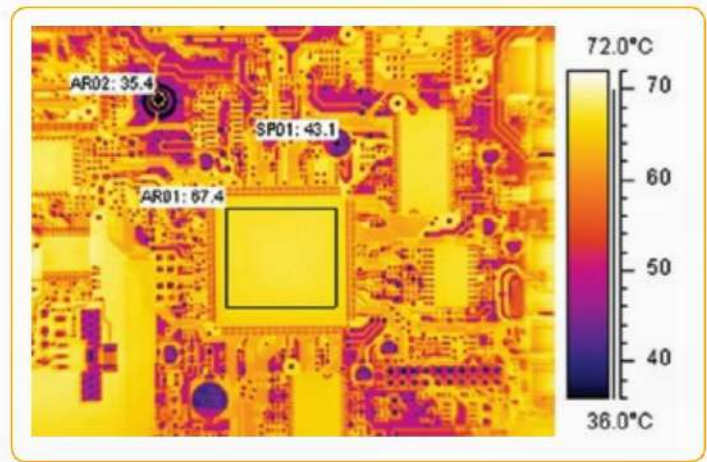


Figura 7a. PCB aquecido a 68,7°C uniforme, mas as leituras digitais estão incorretas.

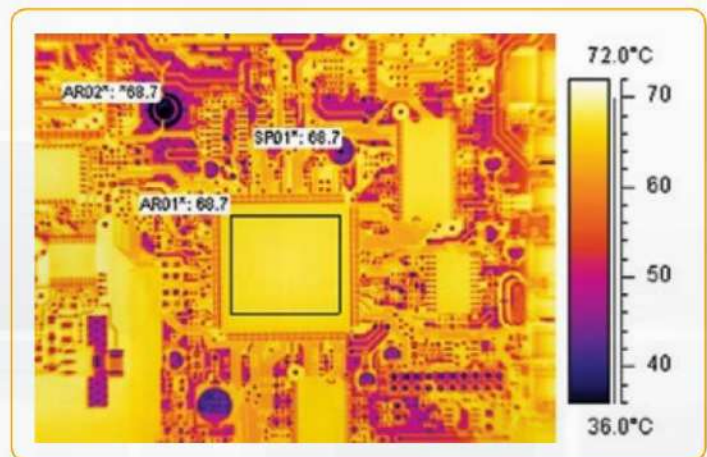


Figura 7b. PCB com correção de emissividade usando a técnica "ponto adjacente". As leituras digitais agora indicam as temperaturas corretas em todos os locais.

# Capítulo 3

## Usando as especificações da câmera Ao

considerar o desempenho da câmera IR, a maioria dos usuários está interessada em quão pequeno um objeto ou área pode ser detectado e medido com precisão a uma determinada distância. Conhecer as especificações do campo de visão (FOV) de uma câmera ajuda a determinar isso.

**Campo de visão (FOV).** Este parâmetro depende das dimensões da lente da câmera e do plano focal e é expresso em graus, como  $35,5^\circ \times 28,7^\circ$  ou  $18,2 \times 14,6^\circ$ . Para uma determinada distância de visualização, isso determina as dimensões da área de superfície total "vista" pelo instrumento (Figura 8). Por exemplo, uma câmera FLIR ThermoVision SC6000 com uma lente de 25 mm tem um FOV de  $0,64 \times 0,51$  metros a uma distância de um metro e  $6,4 \times 5,1$  metros a uma distância de dez metros.

**Campo de Visão Instantâneo (IFOV).** Esta é uma medida da resolução espacial do detector de matriz de plano focal (FPA) de uma câmera. A configuração do FPA no FLIR ThermoVision SC6000 é de  $640 \times 512$  detectores, o que perfaz um total de 327.680 elementos de imagem individuais (pixels).

Suponha que você esteja olhando para um objeto a uma distância de um metro com esta câmera. Ao determinar o menor objeto detectável, é importante conhecer o IFOV da área coberta por um pixel individual na matriz. O FOV total é de  $0,64 \times 0,51$  metros a uma distância de um metro. Se dividirmos essas dimensões de FOV pelo número de pixels em uma linha e linha, respectivamente, descobrimos que o IFOV de um pixel é uma área de aproximadamente  $1,0 \times 1,0$  mm a essa distância. A Figura 9 ilustra esse conceito.

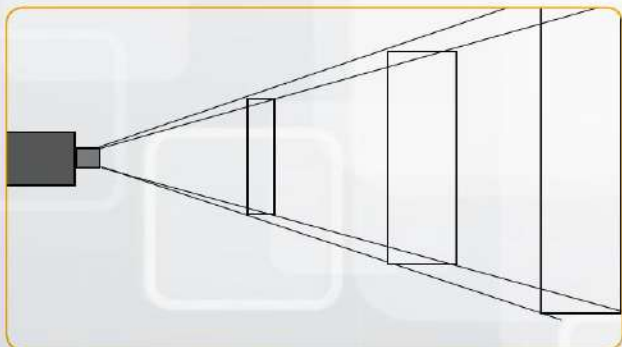


Figura 8. O campo de visão (FOV) de uma câmera varia com a distância de visualização.

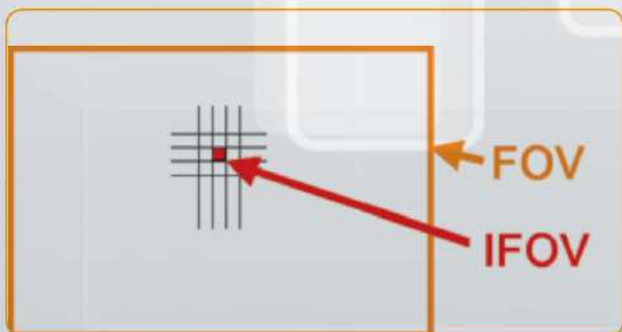


Figura 9. A resolução geométrica (espaçal) (IFOV) de uma câmera é determinada por sua lente e configuração FPA.

Para usar essas informações, considere o IFOV do pixel em relação ao tamanho do objeto de destino (Figura 10). Na vista esquerda desta figura, a área do objeto a ser medido cobre completamente o IFOV. Portanto, o pixel receberá radiação apenas do objeto e sua temperatura poderá ser medida corretamente.

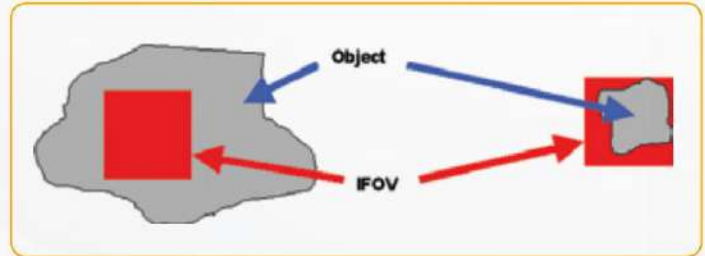


Figura 10. IFOV (quadrados vermelhos) em relação ao tamanho do objeto.

Na visão direita da Figura 10, o pixel cobre mais do que a área do objeto alvo e capta a radiação de objetos estranhos. Se o objeto estiver mais quente que os objetos ao lado ou atrás dele, a leitura da temperatura será muito baixa e vice-versa. Portanto, é importante estimar o tamanho do objeto alvo em comparação com o IFOV em cada situação de medição.

**Relação de tamanho de ponto (SSR).** No início de uma sessão de medição, a distância entre a câmera e o objeto alvo deve ser considerada explicitamente. Para câmeras que não possuem um tamanho de ponto calibrado, o método de proporção de tamanho de ponto pode ser usado para otimizar os resultados da medição. SSR é um número que informa a que distância a câmera pode estar de um objeto alvo de um determinado tamanho para obter uma boa medição de temperatura. Um valor típico pode ser 1.000:1 (também escrito 1.000/1 ou simplesmente abreviado como 1.000). Isso pode ser interpretado da seguinte forma: a 1000 mm de distância de um alvo, a câmera medirá uma temperatura média de 1 mm quadrado.

Observe que o SSR não é apenas para alvos distantes. Pode ser tão importante para o trabalho de close-up. No entanto, a distância focal mínima da câmera também deve ser considerada. Para distâncias de alvo mais curtas, alguns fabricantes oferecem lentes de close-up.

Para qualquer aplicação e combinação de câmera/lente, a seguinte equação se aplica:

$$\frac{DS}{S} = 1, \quad \text{onde } \begin{matrix} S & R \\ \text{onde} & \end{matrix}$$

D é a distância da câmera ao alvo,

S é a menor dimensão alvo de interesse, e

SSR é a razão do tamanho do ponto.

As unidades de D e S devem ser iguais.

Ao selecionar uma câmera, lembre-se de que o IFOV é uma boa figura de mérito a ser usada. Quanto menor o IFOV, melhor a câmera para um determinado campo de visão total.



### Outras ferramentas para usuários de câmeras

Como mencionado anteriormente, as câmeras IR são calibradas na fábrica e a calibração em campo não é prática. No entanto, algumas câmeras possuem um corpo negro embutido para permitir uma verificação rápida da calibração. Essas verificações devem ser feitas periodicamente para garantir medições válidas.

O software de aquisição de dados integrado e opcional disponível para câmeras de infravermelho permite fácil captura, visualização, análise e armazenamento de dados. As funções do software podem incluir saída radiométrica em tempo real de radiância, intensidade radiante, temperatura, comprimento/área do alvo, etc. Módulos de software opcionais também estão disponíveis para calibração radiométrica espacial e espectral. As funções fornecidas por esses módulos podem incluir:

- Calibração do instrumento em termos de radiância, irradiância e temperatura
- Dados radiométricos necessários para definir a sensibilidade do instrumento e a faixa espectral
- Uso de diferentes curvas ou constantes de transmissão e/ou emissividade para pontos de dados de calibração
- Ajustes para efeitos atmosféricos

Além disso, o software e o firmware da câmera IR fornecem outras entradas do usuário que refinam a precisão das medições de temperatura. Uma das funções mais importantes é a correção de não uniformidade (NUC) do detector FPA. Esse tipo de correção é necessário devido ao fato de que cada detector individual no FPA da câmera tem ganho e deslocamento zero ligeiramente diferentes.

Para criar uma imagem termográfica útil, os diferentes ganhos e deslocamentos devem ser corrigidos para um valor normalizado.

Este processo NUC de várias etapas é executado pelo software da câmera.

No entanto, alguns softwares permitem que o usuário especifique a maneira como o NUC é executado, selecionando-o em uma lista de opções de menu. Por exemplo, um usuário pode especificar uma correção de um ponto ou de dois pontos. Uma correção de um ponto lida apenas com deslocamento de pixel. As correções de dois pontos executam a normalização de ganho e deslocamento da não uniformidade pixel a pixel.

Com relação ao NUC, outra consideração importante é como essa função lida com as imperfeições que a maioria dos FPAs possui como resultado do processamento do wafer semicondutor. Algumas dessas imperfeições se manifestam como pixels ruins que não produzem sinais de saída ou como saídas muito fora de uma faixa corrigível. Idealmente, o processo NUC identifica pixels ruins e os substitui usando um algoritmo de substituição de vizinho mais próximo. Os pixels ruins são identificados com base em uma resposta e/ou nível de deslocamento fora dos pontos definidos pelo usuário da resposta média e nível de deslocamento absoluto.

Outras funções NUC podem ser incluídas neste tipo de software, que são numerosas demais para serem mencionadas. O mesmo se aplica a muitos outros módulos de software disponíveis no mercado que podem ser adquiridos para facilitar a exibição, análise, armazenamento de arquivos de dados, manipulação e edição de imagens termográficas.

A disponibilidade de software compatível é uma consideração importante ao selecionar uma câmera IR para o aplicativo ou ambiente de trabalho de um usuário.

### Conclusões

Avanços recentes em câmeras de infravermelho as tornaram muito mais fáceis de usar.

O firmware da câmera tornou a configuração e a operação tão simples quanto usar uma câmera de vídeo convencional. O software integrado e baseado em PC fornece ferramentas poderosas de medição e análise. No entanto, para obter resultados precisos, o usuário deve ter uma compreensão dos princípios ópticos da câmera de infravermelho e métodos de calibração. No mínimo, a emissividade de um objeto alvo deve ser inserida no banco de dados da câmera, se ainda não estiver disponível como uma entrada na tabela.

# Capítulo 4

## Filtros Estendem a Utilidade da Câmera IR

### Onde os filtros podem ajudar

Materiais que são transparentes ou opacos para comprimentos de onda IR apresentam problemas em medições de temperatura sem contato com uma câmera IR. Com materiais transparentes, a câmera vê através deles e registra uma temperatura que é uma combinação do próprio material e do que está por trás dele. No segundo caso, quando uma câmera IR precisa ver através de um material para medir a temperatura de um objeto atrás dele, a atenuação do sinal e os reflexos do ambiente podem dificultar ou impossibilitar leituras precisas de temperatura. Em alguns casos, um filtro IR pode ser colocado no caminho óptico da câmera para superar esses problemas.

### Resposta espectral é a chave

As câmeras IR medem inerentemente a irradiância e não a temperatura. No entanto, o software de uma câmera converte as medições de radiância em temperaturas usando a emissividade conhecida de um objeto alvo e aplicando dados de calibração interna para a resposta espectral da câmera. A resposta espectral é determinada principalmente pela lente e pelo detector da câmera. A Figura 1 mostra a resposta espectral de algumas câmeras IR com várias respostas espectrais. O desempenho espectral da maioria das câmeras pode ser encontrado no manual do usuário ou nas especificações técnicas.

Para muitos objetos, a emissividade é uma função de seu comprimento de onda de radiância e é ainda influenciada por sua temperatura, o ângulo em que são vistos por uma câmera e outros fatores. Um objeto cuja emissividade varia fortemente com o comprimento de onda é chamado de radiador seletivo. Aquela que tem a mesma emissividade para todos os comprimentos de onda é chamado de corpo cinza. Materiais transparentes, como vidro e muitos plásticos, tendem a ser radiadores seletivos. Em outras palavras, seu grau de transparência varia com o comprimento de onda. Pode haver comprimentos de onda de infravermelho onde eles são essencialmente opacos devido à absorção. Como, de acordo com a Lei de Kirchhoff, um bom absorvedor também é um bom emissor, isso abre a possibilidade de medir a radiância e a temperatura de um radiador seletivo em algum comprimento de onda.

### Adaptação Espectral

Inserir um filtro espectral no caminho óptico da câmera é chamado de adaptação espectral. A primeira etapa desse processo é analisar as propriedades espectrais do material semitransparente que você está tentando medir.

Para materiais comuns, os dados podem estar disponíveis em dados publicados. Caso contrário, isso requer análise com um espectrofotômetro. (O fabricante da câmera ou uma empresa de consultoria podem fornecer esse serviço.) Em ambos os casos, o objetivo é encontrar a localização espectral de uma banda de absorção completa que caia dentro da curva de resposta da câmera IR.

Os detectores de microbolômetro têm curvas de resposta bastante amplas, de modo que provavelmente não apresentarão problemas a esse respeito. No entanto, adicionar um filtro diminui a sensibilidade geral devido ao estreitamento da faixa espectral da câmera. A sensibilidade é reduzida aproximadamente pela proporção da área sob a curva espectral do filtro para a área sob a curva espectral da câmera. Isso pode ser um problema para os sistemas de microbolômetro, pois eles têm uma sensibilidade relativamente baixa para começar e uma ampla curva espectral. Usar uma câmera com, por exemplo, um detector QWIP fornecerá maior sensibilidade com uma curva espectral mais estreita. Ainda assim, essa faixa estreita pode limitar a aplicação de tais câmeras para adaptação espectral.

Por fim, deve-se selecionar um filtro óptico (IR) que bloqueie todos os comprimentos de onda, exceto a banda onde o objeto absorve. Isso garante que o objeto tenha alta emissividade dentro dessa banda.

Além de sólidos semitransparentes, a adaptação seletiva também pode ser aplicada a gases. No entanto, um filtro muito estreito pode ser necessário para selecionar um "pico" de absorção em um gás. Mesmo com filtragem adequada, a medição da temperatura dos gases é difícil, principalmente devido à densidade desconhecida do gás. A adaptação seletiva para um gás tem mais chance de sucesso se o objetivo for meramente a detecção de gás, pois há requisitos menos rigorosos para precisão quantitativa. Nesse caso, a sensibilidade seria mais importante e alguns gases com absorção muito alta ainda poderiam ser mensuráveis.

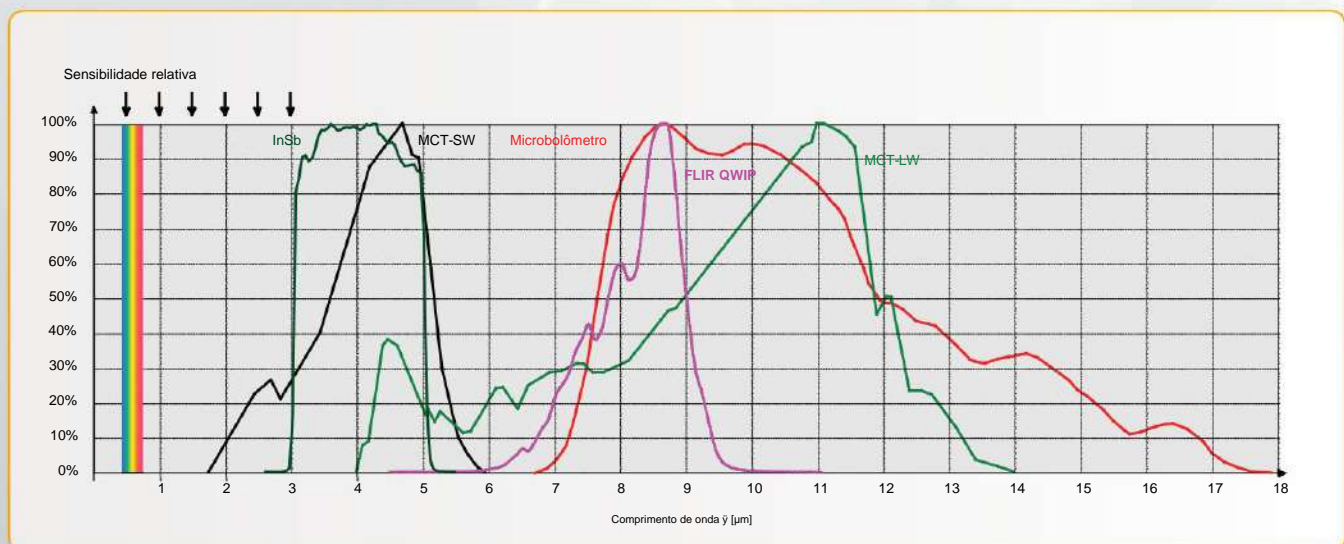


Figura 1. Curvas de resposta relativas para várias câmeras de infravermelho

A adaptação espectral também pode ser aplicada de maneira oposta, ou seja, seleção de uma banda espectral onde a transmissão através de um meio seja a mais alta possível. O objetivo seria permitir a medição de um objeto vindo através do meio sem qualquer interferência. O meio pode ser a atmosfera comum, a atmosfera dos gases de combustão dentro de uma fornalha ou simplesmente uma janela (ou outro sólido) através da qual se deseja medir.

## Tipos de filtro

Os filtros mais simples são do tipo densidade neutra de banda larga, usados apenas para reduzir a transmissão óptica e evitar a saturação do detector em altas temperaturas. Embora às vezes seja necessário, isso não é uma adaptação espectral.

Na adaptação espectral, filtros são usados para suprimir ou transmitir certos comprimentos de onda. Para fins de discussão, os filtros podem ser descritos como passa-curta (SP), passa-longa (LP), passa-banda (BP) e passa-banda estreita (NBP). Consulte a Figura 2. Os filtros SP e LP são especificados com comprimento de onda de corte e corte. Os filtros BP e NBP são especificados com um comprimento de onda central e um comprimento de onda de meia largura (meia potência), sendo este último a largura onde a resposta espectral diminuiu para 50% do seu máximo.

Para medições de temperatura em materiais transparentes, o filtro selecionado deve fornecer uma faixa de absorção essencialmente completa.

Absorção incompleta pode ser usada, pelo menos teoricamente, desde que tanto a absorptância quanto a refletância sejam conhecidas e estáveis na banda de absorção. Infelizmente, a absorção geralmente varia com a temperatura e a espessura do material.

Um exemplo de aplicação de um filtro NBP para a medição da temperatura do filme de polietileno é mostrado na Figura 3. A curva azul na figura mostra a banda de absorção do filme de polietileno. A curva vermelha mostra a transmitância de um filtro NBP de 3,45 µm, projetado para combinar com o filme de polietileno. A curva verde mostra a transmissão resultante através do filme mais o filtro. Essa curva, logo acima da linha zero, indica uma excelente adaptação do filtro, ou seja, o filme parece opaco para a câmera e nenhuma radiação de fundo atrapalharia a medição da temperatura do filme.

Os filtros também podem ser classificados de acordo com a temperatura de aplicação. Tradicionalmente, os filtros frios, filtros que são estabilizados na mesma temperatura ou próximo da temperatura do detector, são os filtros mais precisos e desejados para assinaturas térmicas. Filtros quentes, filtros aparafusados na parte traseira da lente óptica fora do conjunto detector/resfriador, também são comumente usados, mas tendem a fornecer mais incerteza de calibração radiométrica devido à variação da emissão de infravermelho com as mudanças de temperatura ambiente.

Depois que um filtro é selecionado para uso com uma câmera específica, a combinação câmera/filtro precisa ser calibrada pelo fabricante da câmera.

Em seguida, o desempenho do sistema deve ser caracterizado, pois a precisão e a sensibilidade serão afetadas devido a uma redução na energia que vai para o detector.

**Técnicas de Medição de Material Transparente** A produção de folhas de vidro e

filmes plásticos finos requer um controle de temperatura bastante rígido para maximizar a qualidade e o rendimento da produção. Tradicionalmente, os sensores de temperatura foram embutidos no orifício da extrusora, o que fornece informações bastante grosseiras sobre a temperatura da folha/filme.

Um sistema de visão de máquina IR pode fazer temperatura sem contato

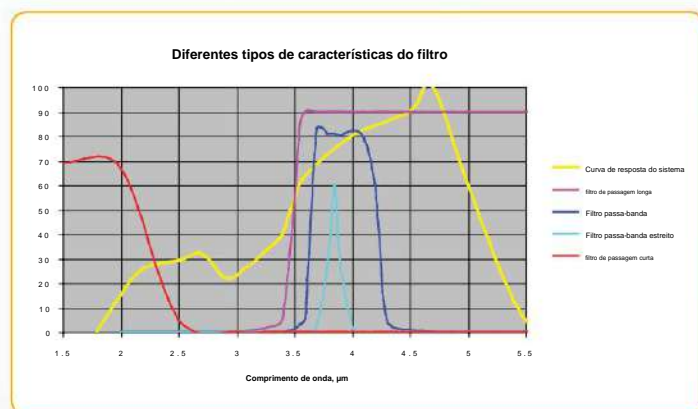


Figura 2. Curvas de resposta para diferentes tipos de filtros

medições e fornecer dados mais utilizáveis sobre o material à medida que ele é extrudado. No entanto, conforme descrito acima, um filtro apropriado é necessário para que a câmera de infravermelho torne o material opaco.

Para garantir que o filtro adequado foi selecionado, curvas de resposta espectral para o sistema de filtro/câmera podem ser criadas pelo fabricante da câmera.

(Veja a curva verde na Figura 3.) Na verdade, isso geralmente é necessário para instalações permanentes de filtro frio para validar a resposta do filtro. Caso contrário, (com dados espectrais de suporte), o usuário pode prosseguir verificando a emissividade. Esta é uma verificação da eficiência de emissividade para a resposta geral do sistema, incluindo o material alvo e a câmera com filtro instalado. Lembrando a lei de Kirchhoff,

$$r_l + e_l + t_l = 1, \text{ ou } e_l = 1 - t_l - r_l,$$

é claro que, para obter um valor de emissividade, a transmitância e a refletância na banda de passagem do filtro devem ser conhecidas. A transmitância,  $t_l$ , pode ser obtida diretamente de um diagrama de transmissão como o da Figura 3 (um valor de cerca de 0,02 nesse exemplo).

A refletância é menos fácil de caracterizar e geralmente é uma função da espessura do material. No entanto, um diagrama de transmissão como o da Figura 4 fornece alguma indicação do valor desse parâmetro. Usando a curva azul para o material de polietileno mais fino da Figura 4, que tem a menor absorção, a transmissão entre bandas de absorção é de aproximadamente 90%. Se não houvesse nenhuma banda de absorção, poderíamos concluir que a reflexão seria de 10%. Como existem algumas bandas de absorção estreitas sob a curva, podemos estimar que a reflexão seja de 8% nas regiões espectrais onde a absorção é muito baixa.

No entanto, estamos interessados na refletância onde a absorção é alta (ou seja, onde o material parece ser opaco).

Para estimar a refletância desse filme de polietileno, devemos primeiro fazer a suposição razoável de que a refletância de sua superfície permanece constante ao longo das bandas de absorção. Agora reconheça que o valor de 8% é o resultado de reflexões de ambos os lados do filme, ou seja, aproximadamente 4% por superfície. Na banda de absorção, no entanto, como a absorção no material é quase completa, temos reflexão apenas de um lado. Assim  $r_l = 0,04$ .

# Capítulo 4

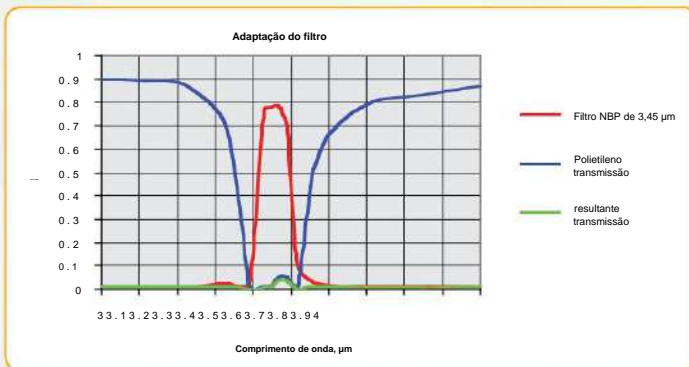


Figura 3. Aplicação de um filtro NBP para obter absorção quase completa e alta emitância do filme de polietileno, permitindo a medição de sua temperatura

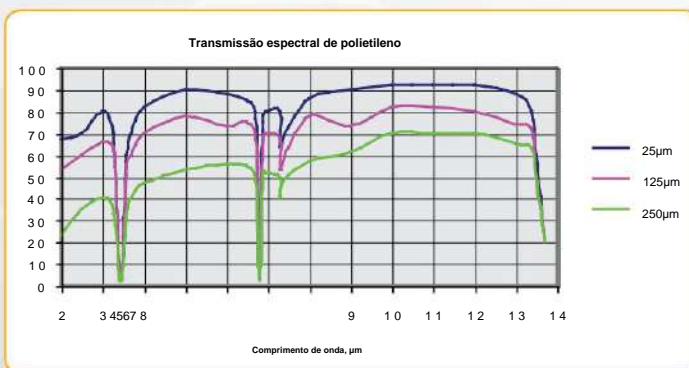


Figura 4. Bandas de transmissão para filmes de polietileno de três espessuras diferentes

A partir deste  $t_l$ , e o valor  $t_l$  obtido do gráfico de transmissão (Figura 3 neste exemplo), a emissividade pode ser calculada:

$$e_l = 1 - 0,02 - 0,04 = 0,94.$$

Este valor é inserido no banco de dados de medição da câmera antes de calcular as temperaturas das observações de radiação.

A produção de chapas e placas de vidro tem requisitos de medição de temperatura semelhantes. As variedades industriais mais comuns são variações do vidro soda-cal-silica. Embora possam variar em composição e cor, suas características espectrais não mudam muito. Olhando para a transmitância espectral de tal vidro com diferentes espessuras (Figura 5), pode-se concluir que a medição de temperatura IV deve ser restrita a comprimentos de onda acima de 4,3 µm. Dependendo da espessura do vidro, isso pode exigir uma câmera/detector de comprimento de onda médio (MW) ou comprimento de onda longo (LW). As câmeras MW cobrem uma parte do espectro de 2 a 5 µm, e as câmeras LW cobrem uma parte de 8 a 12 µm.

Ao selecionar um filtro, a tentação pode ser escolher um tipo LP com comprimento de onda próximo ao ponto em que a transmitância cai para zero.

No entanto, existem outros fatores a serem considerados. Por exemplo, as características do filtro LP podem interferir na inclinação negativa da curva de resposta espectral dos detectores de HgCdTe (MCT) resfriados termicamente, que são usados em câmeras MW e LW. Uma escolha melhor pode ser um filtro NBP.

Na Figura 6, as características de transmissão de um vidro, uma câmera SW e dois filtros são sobrepostas. A curva verde representa a curva de resposta do filtro LP, enquanto a resposta do filtro NBP é mostrada em azul.

O último foi selecionado para a localização espectral onde o vidro se torna "preto" e tem um comprimento de onda central de 5,0 µm.

A refletância deste vidro é mostrada na Figura 7. Observe o pico entre 8 e 12µm, que deve ser evitado ao usar uma câmera LW para medir o vidro.

Outra consideração é o ângulo de visão da câmera, porque a refletância do vidro pode mudar com o ângulo de incidência. Felizmente, a refletância não muda muito até um ângulo de cerca de 45° em relação à incidência normal (Figura 8).

Da Figura 8, um valor de 0,025 para a refletância do vidro é válido ao usar o filtro LP de 4,7µm ou o filtro NBP de 5,0µm (Figura 6), porque ambos operam na região de 5µm. Consequentemente, um valor adequado para a emissividade do vidro nesses casos seria  $1 - 0,025 = 0,975$ .

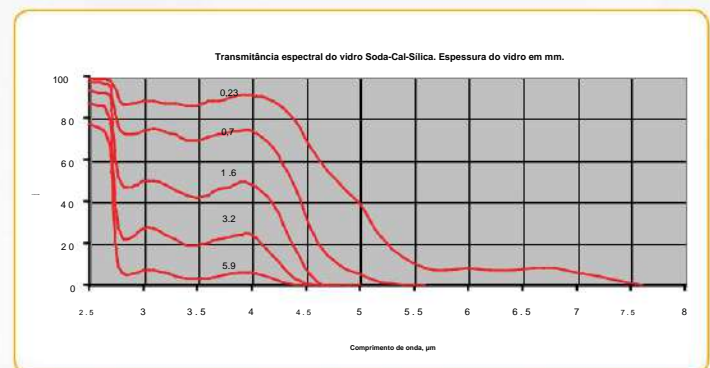


Figura 5. Curvas de transmissão para um vidro industrial comum em cinco espessuras de 0,23 a 5,9mm

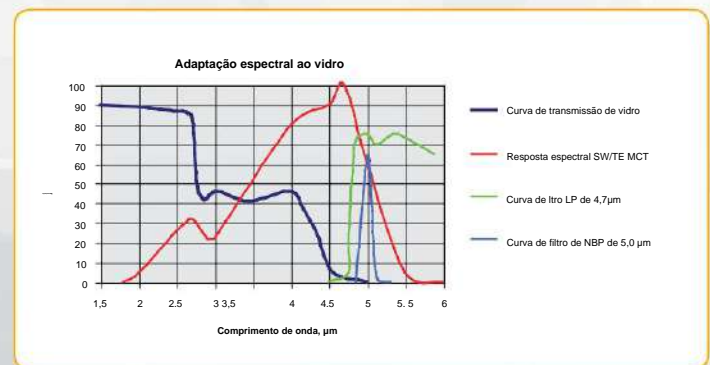


Figura 6. Dois filtros alternativos para medição de vidro com uma câmera SW



Figura 7. Refletância de um vidro comum na incidência normal (perpendicular)



Figura 8. Refletância do vidro em função do ângulo de visão da câmera em relação à incidência normal

#### Aplicações de banda de transmissão Para

muitas aplicações, o usuário precisará encontrar uma banda espectral onde o meio através do qual a câmera está olhando tenha influência mínima na medição. O objeto de interesse está no final de um caminho de medição no outro lado do meio. O meio é, na maioria dos casos, a atmosfera comum, mas também pode ser um gás ou uma mistura de gases (por exemplo, gases de combustão ou chamas), uma janela ou um material sólido semitransparente.

Como é o caso em aplicações de banda de absorção, uma medição de transmissão espectral do meio real seria o ponto de partida ideal. O objetivo é encontrar uma banda dentro da curva de resposta da câmera onde o meio tenha influência mínima na transmissão de infravermelho do objeto alvo. No entanto, muitas vezes é impraticável realizar tal medição, particularmente para gases em altas temperaturas. Nesses casos, pode ser possível encontrar as propriedades espectrais dos constituintes do gás (ou outros meios) na literatura IR, revelando um espectro adequado para a medição.

Na maioria dos casos, os fabricantes de câmeras IR anteciparam o problema de atenuação atmosférica. Os fabricantes de câmeras geralmente adicionam um filtro que reduz os erros de medição devido a parâmetros atmosféricos imprecisos e/ou variáveis, evitando bandas de absorção dos gases constituintes e vapores de água. Isso é especialmente necessário em distâncias de medição longas e comprimentos de onda mais curtos. Para câmeras MW, um filtro apropriado utiliza a janela atmosférica entre as bandas de absorção de H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub> em torno de 3µm ou CO<sub>2</sub> em 4,2µm.

Os efeitos atmosféricos em uma câmera LW são muito menores, pois a atmosfera tem uma excelente janela de 8 a 12µm. No entanto, câmeras com uma ampla curva de resposta atingindo o espectro MW podem exigir um filtro LP. Isso é particularmente verdadeiro para medições de alta temperatura, onde a radiação é deslocada para comprimentos de onda mais curtos e a influência atmosférica aumenta. Um filtro LP com cut-on de 7,4 µm bloqueia a parte inferior da curva de resposta da câmera.

Uma aplicação interessante da banda de transmissão são as medições de temperatura em um forno a gás, forno ou equipamento de aquecimento similar. Os objetivos podem ser a medição da temperatura da chama ou a medição dos componentes internos através das chamas. No último caso, uma câmera IR não filtrada será sobrecarregada pela intensa radiação das chamas, impossibilitando a medição da radiação muito mais fraca de objetos internos. Por outro lado, qualquer transmissão através das chamas de objetos internos mais frios fará com que as medições de temperatura da chama sejam imprecisas.

# Capítulo 4

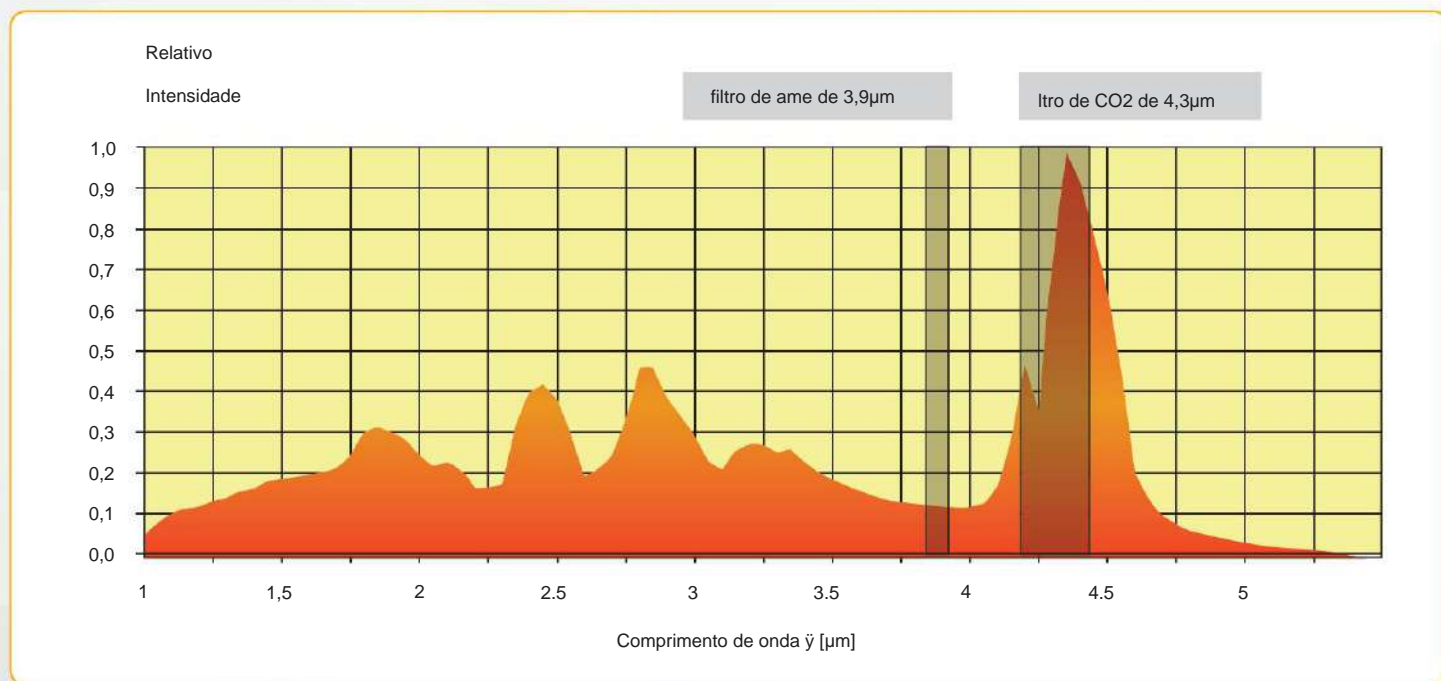


Figura 9. Espectro de absorção de chama de um forno a gás com dois tipos de filtros para diferentes aplicações de medição

O espectro de absorção da chama na Figura 9 revela as regiões espectrais onde esses dois tipos de medição podem ser feitos. Há muito pouca radiação das chamas na área de  $3,9\mu\text{m}$ , enquanto há muita radiação entre a faixa de  $4,2$  e  $4,4\mu\text{m}$ . A ideia é empregar filtros que utilizem essas janelas espectrais para as medidas desejadas.

Para medição de componentes internos, é preciso evitar bandas de absorção fortes, pois elas atenuam a radiação do objeto alvo e emitem intensamente devido à alta temperatura do gás, ofuscando a câmera. Embora os gases de combustão a gás consistam principalmente de  $\text{CO}_2$  e vapor d'água, um filtro atmosférico não é adequado porque as concentrações de gás e as temperaturas são muito mais altas. Isso torna as bandas de absorção mais profundas e mais amplas. Um filtro de chama é necessário para esta aplicação. Consulte a Figura 9. Este é um filtro de BP transmitindo entre  $3,75$  e  $4,02\mu\text{m}$ . Com esse filtro instalado, a câmera produzirá uma imagem onde as chamas ficam quase invisíveis e a estrutura interna da fornalha é apresentada com clareza (Figura 10).

Para obter a temperatura máxima das chamas, um filtro de  $\text{CO}_2$  mostrará que elas chegam a  $1400^\circ\text{C}$ . Em comparação, as paredes da fornalha vistas com o filtro de chama são relativamente frias de  $700^\circ\text{C}$ .

## Conclusões

Os filtros podem estender a aplicação de câmeras de infravermelho em áreas que, de outra forma, poderiam restringir seu uso. Ainda assim, algumas medições preliminares do espectrofotômetro podem ser necessárias nos objetos e meios de interesse se as informações espectrais não puderem ser encontradas na literatura IR. Depois que um filtro é selecionado e instalado, o sistema de filtro/câmera deve ser calibrado pelo fabricante da câmera. Mesmo com um sistema bem calibrado, é uma boa ideia evitar erros ao não usar regiões espectrais de absorção incerta ou variável em relação ao espectro de resposta do sistema de filtro/câmera.

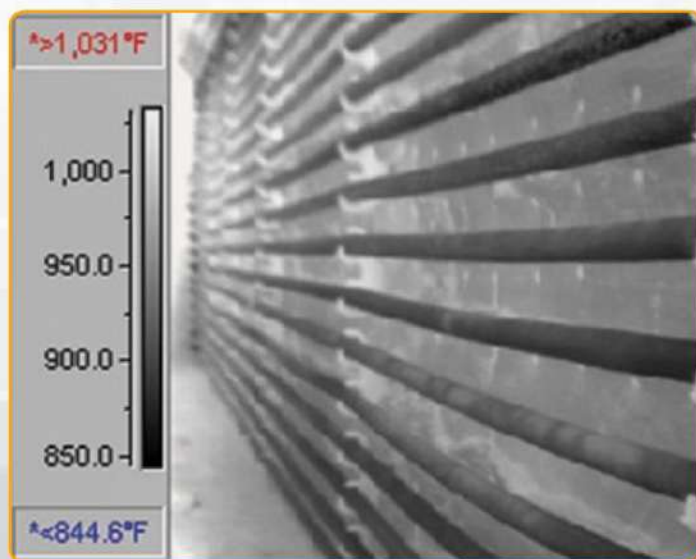


Figura 10. Imagem FLIR ThermaCAM® de tubos de forno com filtro de chama para permitir medição precisa de temperatura

# capítulo 5

## Termografia de ultra alta velocidade

### Termografia de ultra alta velocidade

#### Avanços recentes em imagens térmicas

Todos nós já vimos imagens de alta velocidade em algum momento de nossas vidas, seja um vídeo de um míssil em voo ou um beija-flor batendo suas asas em câmera lenta. Ambos os cenários são possibilitados por câmeras visíveis de alta velocidade com tempos de exposição ultra curtos e iluminação estroboscópica acionada para evitar o desfoque da imagem e geralmente exigem altas taxas de quadros para garantir que o vídeo capturado seja reproduzido sem problemas. Até recentemente, a capacidade de capturar imagens dinâmicas de alta velocidade não era possível com as câmeras IV comerciais tradicionais. Agora, avanços recentes em tecnologias de câmeras de infravermelho, como leituras rápidas de detectores de câmeras e componentes eletrônicos de alto desempenho, permitem imagens de alta velocidade.

Os desafios que proibiam as câmeras IR de alta velocidade foram baseados principalmente em designs eletrônicos de leitura, relógios de pixel da câmera e sistemas de aquisição de dados de back-end muito lentos. Projetos de leitura mais antigos permitiam apenas tempos mínimos de integração de cerca de 10  $\mu$ s, que em alguns casos eram insuficientes para interromper o movimento em um alvo em movimento rápido sem desfoque da imagem. Da mesma forma, os alvos com mudanças de temperatura muito rápidas não podem ser amostrados em uma taxa de quadros adequada para caracterizar com precisão o objeto de interesse. Mesmo com o advento de câmeras infravermelhas mais rápidas, ainda resta o obstáculo de como coletar dados de alta resolução e alta velocidade sem sobrecarregar seu sistema de coleta de dados e perder quadros de dados.

Nem todos os desafios para câmeras de infravermelho de alta velocidade se devem a limitações de tecnologia. Alguns foram impulsionados por requisitos adicionais que restringiam as taxas máximas de quadros permitidas. Por exemplo, as câmeras que exigiam saída de vídeo analógico naturalmente restringiam a taxa de quadros máxima devido aos requisitos de formato NTSC e PAL de 30 Hz ou 25 Hz, respectivamente.

Isso é verdade independentemente das capacidades de taxa de pixel da matriz de plano focal do detector (FPA), porque as taxas de pixel do monitor de vídeo são definidas pelos parâmetros de temporização NTSC ou PAL (períodos de apagamento vertical e horizontal).

No entanto, com novas melhorias em tecnologias de câmeras de P&D comerciais de ponta, todos esses desafios foram superados e podemos começar a explorar os muitos benefícios da tecnologia de câmeras de infravermelho de alta velocidade.

Os principais benefícios são a capacidade de capturar alvos em movimento rápido sem desfoque de imagem, adquirir dados suficientes para caracterizar adequadamente os alvos dinâmicos de energia e aumentar a faixa dinâmica sem comprometer o número de quadros por segundo.

#### Reduzindo o desfoque da imagem com curtos

**tempos de integração** Com circuitos integrados de

leitura FPA avançados (ROIC), as câmeras IR podem ter tempos de integração (análogos ao tempo de exposição ou velocidade do obturador em câmeras visíveis) tão curtos quanto 500 ns. Além disso, os novos designs de ROIC mantêm a linearidade até o final de seus limites de tempo de integração; isso não era verdade para ROICs desenvolvidos apenas alguns anos atrás.

O principal benefício novamente é evitar o desfoque de movimento à medida que o alvo se move ou vibra no campo de visão da câmera. Com tempos de integração abaixo de microssegundos, essas novas câmeras são mais do que suficientes para alvos em movimento rápido, como mísseis ou, no exemplo a seguir, uma bala em voo.

#### Mais rápido que uma bala

No experimento a seguir, uma câmera IR de alta velocidade foi usada para capturar e medir a temperatura de uma bala de fuzil calibre 0,30 em voo. No ponto de captura da imagem, a bala viajava a velocidades supersônicas (800 a 900 metros por segundo) e era aquecida pelo atrito dentro do cano do rifle, pela carga do propelente e pelas forças aerodinâmicas da bala. Devido a esta carga de calor, a câmera IR pode facilmente ver a bala mesmo no tempo de integração muito curto de 1  $\mu$ s; portanto, ao contrário de uma câmera visível, nenhuma fonte estroboscópica é necessária.

Um gatilho era necessário para iniciar o tempo de integração da câmera para garantir que o marcador estivesse no campo de visão (FOV) da câmera no momento da captura do quadro. Isso foi feito usando um gatilho acústico do tiro do rifle, que localiza a bala ao longo do eixo do tiro a uma distância de vários centímetros.

A Figura 1a mostra uma imagem de infravermelho aproximada da bala viajando a 840m/s (~1900 mph); ainda usando o tempo de integração de 1  $\mu$ s, reduziu efetivamente o desfoque da imagem para cerca de 5 pixels.

A Figura 1b mostra uma imagem de referência de uma bala idêntica fotografada com uma câmera de luz visível configurada para operar com um tempo de integração de 2 microssegundos. A orientação dos marcadores nas duas imagens é idêntica – ambos viajam da esquerda para a direita. O brilho intenso visto na cintura da imagem é um reflexo das luzes brilhantes do estúdio necessárias para iluminar adequadamente a bala durante a exposição. Ao contrário da imagem térmica, a imagem visível exigia iluminação ativa, pois a bala não estava quente o suficiente para brilhar intensamente na região visível do espectro.

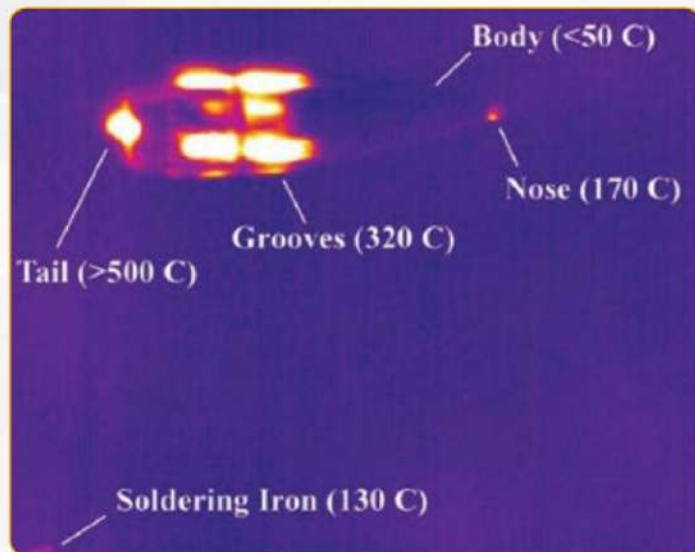


Figura 1a. Imagem infravermelha de uma bala de calibre 0,30 em voo com temperaturas aparentes

# Capítulo 5

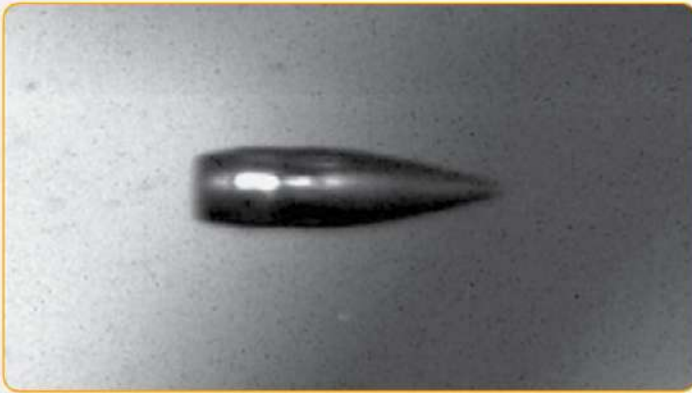


Figura 1b. Imagem de luz visível de uma bala idêntica de calibre 0,30 em vôo

## Geração de imagens de alta velocidade para transientes rápidos

Tempos de integração curtos e taxas de quadros de alta velocidade nem sempre são combinados em câmeras de infravermelho. Muitas câmeras têm taxas de quadros rápidas, mas não tempos de integração rápidos ou vice-versa. Ainda assim, taxas de quadros rápidas são críticas para caracterizar adequadamente os alvos cujas temperaturas mudam muito rapidamente.

Uma aplicação em que tanto o tempo de integração curto quanto a taxa de quadros rápida são necessários é o teste de sobrecarga de circuitos integrados (ICs). Veja a Figura 2. O objetivo deste teste é monitorar a carga térmica máxima que o IC experimenta quando polarizado e polarizado reversamente com níveis de corrente fora dos limites do projeto. Sem a tecnologia IR de alta velocidade, dados suficientes podem não ser capturados para caracterizar os verdadeiros transientes de calor no IC devido à subamostragem. Isso não apenas forneceria dados mínimos para analisar, mas também forneceria leituras incorretas da temperatura máxima real.

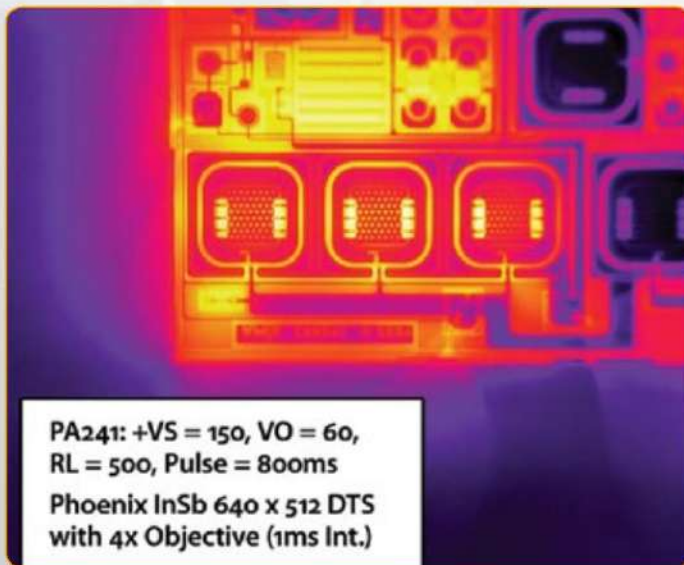


Figura 2. Circuito integrado com pulso de sobrecorrente de 800ms

Quando o IC foi amostrado a uma taxa de quadros de 1000 Hz, foi relatada uma temperatura máxima de 95°C. No entanto, quando amostrados em apenas 500 Hz, a temperatura máxima verdadeira foi perdida e um máximo falso de 80°C foi relatado (Figura 3).

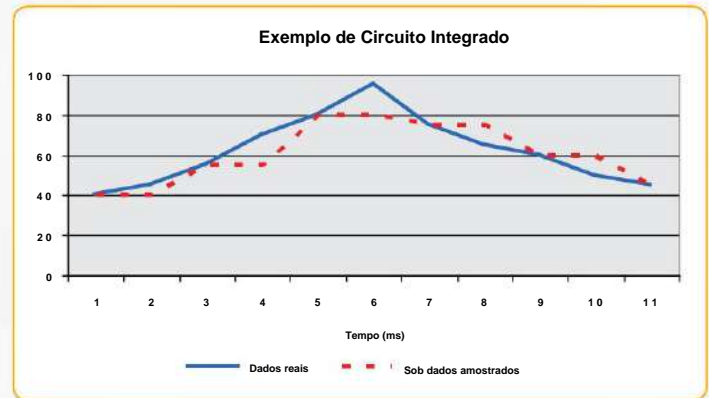


Figura 3. Dados máximos de temperatura do IC - real vs. subamostrado

Este é apenas um exemplo de por que as câmeras infravermelhas de alta velocidade podem ser tão valiosas até mesmo para aplicações simples que não parecem necessariamente se beneficiar da alta velocidade à primeira vista.

## Clock de pixel versus Taps analógicos para digitais

As câmeras IR de alta velocidade exigem como pré-requisito uma combinação de um clock de pixel rápido e um número maior de conversores analógicos para digitais (A/D), comumente chamados de canais ou taps. Como quadro de referência, a maioria das câmeras de baixo desempenho tem dois canais ou conversores A/D e funciona com taxas de clock inferiores a 40 megapixels/segundo. Isso pode parecer rápido, mas quando você considera a quantidade de dados, isso se traduz em cerca de 60 Hz na maioria dos casos.

As câmeras infravermelhas de alta velocidade, por outro lado, normalmente têm um mínimo de quatro canais e velocidades de clock de pelo menos 50 megapixels/segundo. Por sua vez, eles oferecem dados digitais de 14 bits em taxas de quadros de mais de 120 Hz em tamanhos de janela de 640 x 512. Para aumentar ainda mais as taxas de quadros, as câmeras IR geralmente permitem que o usuário reduza o tamanho da janela ou o número de pixels lidos do FPA. Como há menos dados por quadro para digitalizar e transferir, a taxa geral de quadros aumenta. A Figura 4 ilustra o aumento nas taxas de quadros em relação aos tamanhos de janela definidos pelo usuário.

Os designs de câmera mais recentes oferecem 16 canais e clocks de pixel acima de 205 megapixels/segundo. Isso permite taxas de quadros muito rápidas sem sacrificar o tamanho da janela e a resolução geral.

## O sequenciamento predefinido aumenta o alcance dinâmico

As câmeras de infravermelho de alta velocidade têm um benefício adicional que não se relaciona a alvos de alta velocidade, mas sim ao aumento do alcance dinâmico da câmera. Acoplando uma câmera infravermelha de alta velocidade com um método de captura de dados conhecido como superenquadramento, você pode efetivamente aumentar a faixa dinâmica da câmera de 14 bits para cerca de 18 a 22 bits por quadro.



## Termografia de ultra alta velocidade

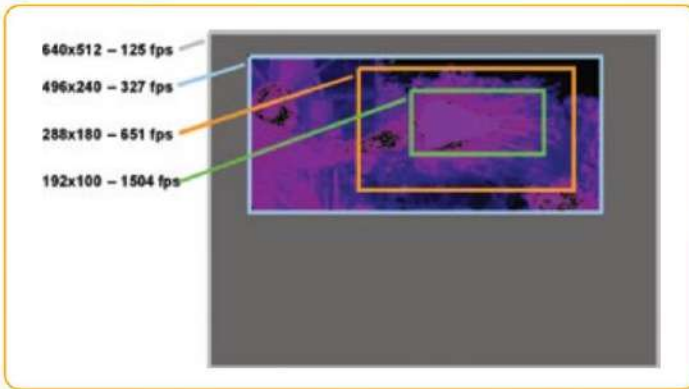


Figura 4. Exemplo de tamanhos de janela FPA relativos a taxas de quadros

O superenquadramento envolve o ciclo da câmera IR por até quatro tempos de integração múltipla (predefinições), capturando um quadro em cada predefinição. Isso resulta em vários arquivos de filme de dados exclusivos, um para cada predefinição. Esses dados são então combinados usando o software ABATER disponível no mercado. O software seleciona o melhor pixel resolvido de cada quadro único para construir um quadro resultante composto de dados de todos os arquivos de filme de dados coletados em tempos de integração variados.

Este método é especialmente benéfico para imagens de cenas com objetos quentes e frios no mesmo campo de visão. Normalmente, uma câmera de 14 bits não pode gerar imagens simultaneamente de objetos quentes e frios com um único tempo de integração. Isso resultaria em superexposição no objeto quente ou subexposição no objeto frio.

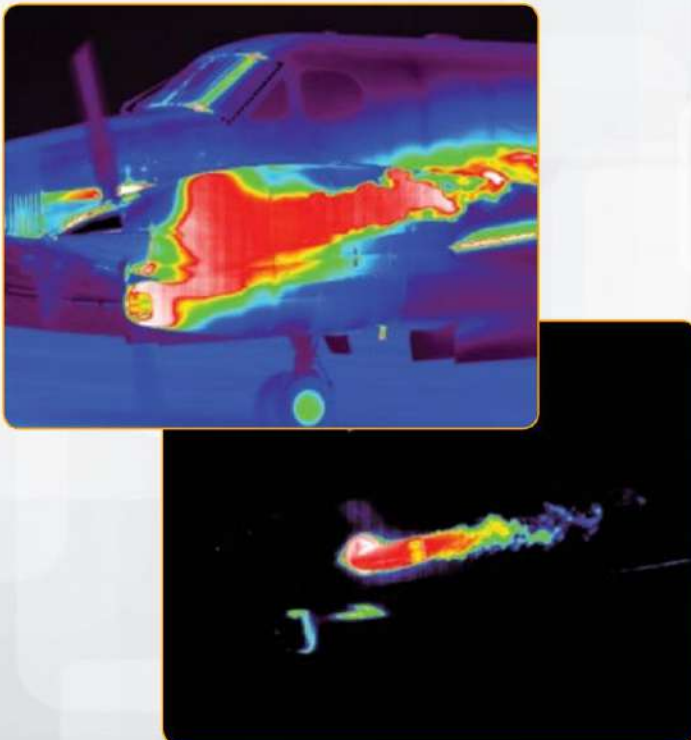


Figura 5. Motor de aeronave ativo com taxas de integração de 2ms (superior) e 30µs (inferior)

Os resultados do superenquadramento são ilustrados nas imagens da aeronave Beechcraft King Air na Figura 5, capturadas em dois tempos de integração diferentes. Embora a aeronave possa ser vista claramente na imagem à esquerda (Predefinição 0 = tempo de integração de 2ms), há partes do motor que estão claramente superexpostas. Por outro lado, a imagem da direita na Figura 5 (Preset 1 = 30µs de tempo de integração) mostra os detalhes da entrada e saída do motor com o restante da aeronave subexposta.

Quando as duas imagens na Figura 5 são processadas no software ABATER, os pixels com melhor resolução são selecionados e usados para construir uma única imagem superframe resultante sem super ou subexposição de pixels (Figura 6).

Como você deve ter percebido, o lado negativo desse método de coleta e análise de dados é a redução na taxa de quadros pelo número de predefinições cicladas. Aplicando alguns cálculos simples, uma câmera de 100 Hz com duas predefinições fornecerá uma taxa de quadros geral de 50 Hz, bem abaixo dos limites de nossa discussão sobre imagens de infravermelho de alta velocidade. Isso apenas reforça a necessidade de uma câmera de alta velocidade. Se uma câmera de 305 Hz for superframe como no exemplo acima, uma taxa de mais de 150 Hz por taxa de quadro predefinida será alcançada. Essa taxa está bem dentro dos limites da imagem infravermelha de alta velocidade.

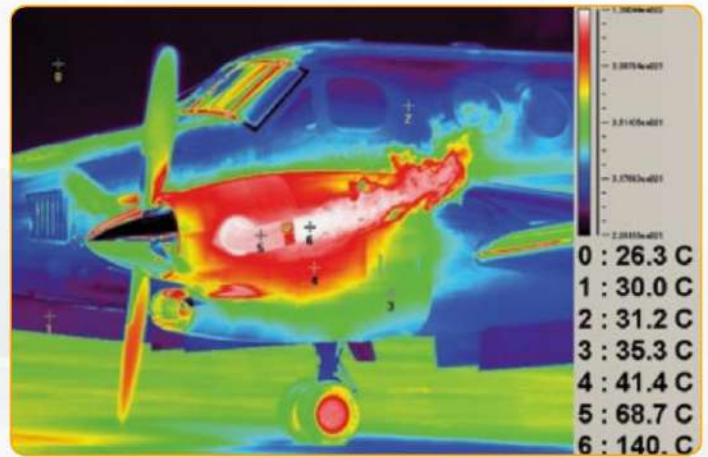


Figura 6. Imagem superframed criada com o software ABATER a partir dos dados do Preset 0 e Preset 1.

## Conclusões

Câmeras infravermelhas sofisticadas estão agora disponíveis com leitura eletrônica avançada e relógios de pixel de alta velocidade, que abrem a porta para imagens infravermelhas de alta velocidade. Isso nos permite expandir os limites de quais aplicativos podem ser resolvidos usando soluções de câmera IR. Além disso, permite-nos começar a capturar mais dados e aumentar nossa precisão para aplicações exigentes com alvos em movimento rápido, transientes de temperatura rápidos e cenas de ampla faixa dinâmica. Com o lançamento desta nova tecnologia no mercado de IR comercial, podemos agora começar a perceber os benefícios da captura de dados em alta velocidade, antes disponível apenas para o domínio da câmera visível.

# Câmeras

## Câmeras básicas para pesquisa e ciência



	Entrada		
	A325sc	Série T400	A655sc
<b>Descrição da câmera</b>	O A325sc transita perfeitamente do laboratório de pesquisa para a linha de produção com várias opções óticas, software de gravação e análise de dados disponível e conectividade Gigabit Ethernet simples.	Altamente ergonômico com uma câmera térmica inclinável e interface de tela sensível ao toque, a série T400 portátil é o sistema portátil perfeito para testes de bancada no laboratório ou testes dinâmicos em campo.	A câmera A655sc oferece resolução de imagem ultranítida de 640 x 480, sub-janelas de alta velocidade, conectividade Gigabit Ethernet e USB e filtragem.
<b>Banda de onda</b>	LWIR	LWIR	LWIR
<b>Tipo de Sensor</b>	Microbolômetro	Microbolômetro	Microbolômetro
<b>Resolução de pixels</b>	320 x 240	320 x 240	640 x 480
<b>Passo do pixel</b>	25 $\mu$ m	25 $\mu$ m	17 $\mu$ m
<b>Faixas Espectrais</b>	7,5 $\mu$ m - 13,0 $\mu$ m	7,5 $\mu$ m - 13,0 $\mu$ m	7,5 $\mu$ m - 14,0 $\mu$ m
<b>NETD</b>	<50 mK	<45mK	<50 mK
<b>NEI (baixo ganho, alto ganho)</b>			
<b>Alcance Dinâmico</b>	14 bits	14 bits	14 bits
<b>Calibração de temperatura da câmera</b>	x	x	x
<b>Câmera padrão</b>	-20°C a 350°C	-20°C a 650°C	-40°C a 650°C
<b>Faixa de calibração</b>			
<b>Câmera opcional</b>	Até 2.000°C	Até 1.200°C	Até 2.000°C
<b>Faixa de calibração</b>			
<b>Compensação de desvio de ambiente</b>	x	x	x
<b>Funcionalidade Hypercal / CNUC</b>			
<b>Taxa de quadro digital completa</b>	60 Hz	60 Hz	50 Hz
<b>Transmissão de dados digitais</b>	Gigabit Ethernet	USB	USB, Gigabit Ethernet
<b>Vídeo Analógico</b>		NTSC	
<b>Controle da câmera</b>	Gigabit Ethernet	USB	USB, Gigabit Ethernet
<b>Janelas FPA</b>			Tamanho Fixo e Localização
<b>Foco tátil manual</b>			x
<b>Foco Motorizado</b>	x	x	x
<b>Auto-foco</b>	x	X	x
<b>Temporização IRIG-B integrada</b>			
<b>Opções de Acionamento</b>	x	x	x
<b>Câmera visual integrada</b>		3.1 megapixels	
<b>GPS integrado</b>			
<b>Armazenamento de imagens na câmera</b>		Instantâneo e Vídeo	
<b>Suporte SDK</b>	x	x	x
<b>f/#</b>	f/1.3	f/1.3	f/1.0
<b>Opções de filtragem</b>			Único por trás das lentes

# Câmeras

## Câmeras de nível de desempenho para pesquisa e ciência



Desempenho				
	Série T600	A2600sc	Série SC7000	GF335 MWIR
Descrição da câmera	A Série T600 oferece qualidade de imagem térmica e visual superior, resolução de tamanho de ponto e precisão de medição de temperatura — a um custo acessível.	O A2600sc é a escolha ideal para pesquisa, espectroscopia, astronomia, detecção de água ou gelo, perfilamento a laser, medicina, inspeção de células solares, processamento de wafer de silício e muitas aplicações de fabricação.	A FLIR SC7000 Series oferece excelentes imagens térmicas em taxas de quadros rápidas, preservando a precisão e a sensibilidade da temperatura. Disponível com uma roda de filtro motorizada substituível em campo e uma ampla variedade de opções	O GF335 portátil, de alta sensibilidade e baixo ruído é ideal para a detecção de assinaturas de calor fracas e adequado para uma ampla variedade de alcance, detecção de dispositivos clandestinos, não destrutivos, aplicações científicas e de pesquisa.
Banda de onda	LWIR	SWIR	MWIR, LWIR	MWIR
Tipo de Sensor	Microbolômetro	InGaAs	InSb, MCT	InSb
Resolução de pixels	640 x 480	640 x 512	320 x 256, 640 x 512	320 x 240
Passo do pixel	17 $\mu\text{m}$	25 $\mu\text{m}$ , 15 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$ , 16 $\mu\text{m}$ , 30 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$
Faixas Espectrais	7,5 $\mu\text{m}$ - 14 $\mu\text{m}$	0,9 $\mu\text{m}$ - 1,7 $\mu\text{m}$ 0,5 $\mu\text{m}$ - 1,9 $\mu\text{m}$	3,0 - 5,0 $\mu\text{m}$ ou 1,5 - 5,1 $\mu\text{m}$ (InSb) 7,7 - 9,3 $\mu\text{m}$ (MCT) 7,7 - 11,5 $\mu\text{m}$ (MCT)	3,0 $\mu\text{m}$ - 5,0 $\mu\text{m}$
NETD	<35 mk		<25 mK (InSb), <20 mK (MCT)	<25mK
NEI (baixo ganho, alto ganho)		<2,5 x 10 <sup>9</sup> ph/s/cm <sup>2</sup> , <0,75 x 10 <sup>10</sup> ph/s/cm <sup>2</sup> 14		
Alcance Dinâmico	14 bits	bits	14 bits	14 bits
Calibração de temperatura da câmera	x		x	x
Câmera padrão				
Faixa de calibração	-40°C a 650°C		5°C a 300°C (InSb) 5°C a 150°C (MCT)	-40°C a 300°C
Câmera opcional				
Faixa de calibração	Até 2.000°C		Até -80°C Até 3.000°C	
Desvio de ambiente				
Compensação	x		x	x
Hiperical / CNUC			x	
Funcionalidade				30 Hz
Taxa de quadro digital completa	30 Hz	30 Hz	100, 115, 235 Hz	
Transmissão de dados digitais	USB	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet, link de câmera	USB
Vídeo Analógico	NTSC, DVI	NTSC, PAL, Composto	Composto ou S-Vídeo	HDMI
Controle da câmera	USB	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet, link de câmera	USB
Janelas FPA		Usuário definido	Usuário definido	
Foco tátil manual	x	x	x	x
Foco Motorizado	x			x
Auto-foco	x			x
Temporização IRIG-B integrada			Opcional	
Opções de Acionamento	x	x	x	
Câmera visual integrada	5.0 Mega Pixel X			3.2 Mega Pixel X
GPS integrado				
Imagem na câmera				
Armazenar	Instantâneo e Vídeo			Instantâneo e Vídeo
Suporte SDK	x	x	x	
f/#	f/1.0	Dependente da Lente	f/2.5 , f/3.0	f/1.5
Opções de filtragem		Único por trás das lentes	Roda de filtro motorizada de 4 posições Alta velocidade opcional de 8 posições Roda de Filtro (Módulo Orion)	

# Câmeras





Câmeras de nível avançado para pesquisa e ciência








Avançado			
	Série SC6000	Série SC8000	Série RS6700
Descrição da câmera	A versátil série SC6000 oferece alta velocidade, alta resolução e flexibilidade com uma roda de filtro de 4 posições configurável pelo usuário integrada e várias configurações de lente.	A série SC8000 traz a ciência e a termografia de P&D para o mundo da alta definição com detectores InSb resfriados altamente sensíveis, resolução excelente e taxas de quadros e dados extremamente rápidas para extrema flexibilidade de imagem e captura de dados.	O RS6700 robusto, completo e de alto desempenho foi projetado especificamente para aplicações de rastreamento de alcance e assinatura de alvo e é construído para prosperar em ambientes de alcance de teste
Banda de onda	MWIR	MWIR	MWIR
Tipo de Sensor	InSb	InSb	InSb
Resolução de pixels	640 x 512	1024 x 1024, 1344 x 784	640 x 512
Passo do pixel	25 $\mu$ m, 15 $\mu$ m	18 $\mu$ m, 14 $\mu$ m	15 $\mu$ m
Faixas Espectrais	1,0 $\mu$ m – 5,0 $\mu$ m 1,5 $\mu$ m – 5,0 $\mu$ m 3,0 $\mu$ m – 5,0 $\mu$ m	1,0 $\mu$ m – 5,0 $\mu$ m 3,0 $\mu$ m – 5,0 $\mu$ m	3,0 $\mu$ m - 5,0 $\mu$ m
NETD	<20 mK (InSb)	<20mK	<20mK
NEI (baixo ganho, alto ganho)			
Alcance Dinâmico	14 bits	14 bits	14 bits
Calibração de temperatura da câmera	x	x	
Câmera padrão	-10°C a 350°C (f/2.5)	-10°C a 500°C	
Faixa de calibração	-10°C a 500°C (f/4.1)		
Câmera opcional	Até 2.000°C	Até 2.000°C	-10°C a 350°C
Faixa de calibração			
Compensação de desvio de ambiente	x	x	
Funcionalidade Hypercal / CNUC			
Taxa de quadro digital completa	125 Hz	47, 132 Hz	126 Hz
Transmissão de dados digitais	Gigabit Ethernet Simultâneo, & Ligação da Câmera	Gigabit Ethernet Simultâneo, Link da Câmera Cheio	Gigabit Ethernet Simultâneo, & Ligação da Câmera
Vídeo Analógico	NTSC, PAL, S-Video, SVGA	NTSC, PAL, S-Video, SVGA	NTSC, SVGA
Controle da câmera	USB, Gigabit Ethernet, RS-232, Câmera Link	USB, Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet, RS-232, link de câmera
Janelas FPA	Usuário definido	Usuário definido	Usuário definido
Foco tátil manual	x	x	
Foco Motorizado			x
Auto-foco			x
Temporização IRIG-B integrada	x	x	x
Opções de Acionamento	x	X	x
Câmera visual integrada			
GPS integrado			
Armazenamento de imagens na câmera			
Suporte SDK	x	x	x
f/#	f/2.5, f/4.0, f/4.1	f/4.0	f/4.0
Opções de filtragem	Único por trás das lentes e Roda de filtro motorizada de 4 posições	Único por trás das lentes	




## Lentes



## Detalhes da lente da câmera

Detalhe da lente da câmera de entrada								
Câmera	Lente	Comprimento focal	FOV	IFOV	f Número	mín. Dist. de Trabalho	Banda Espectral	
 	T197411	4,0 mm	90° × 73°	6,25 milhões	f/1.3	20 mm	7,5 - 13 $\mu$ m	
	1196960	9,7 mm	45° × 33,8°	2,58 mrad	f/1.3	0,2 m	7,5 - 13 $\mu$ m	
	Construídas em	18,0 mm	25° × 18,8°	1,39 milhões	f/1.3	0,4 m	7,5 - 13 $\mu$ m	
	1196961	30,4 mm	15° × 11,25°	0,82 mrad	f/1.3	1,2m	7,5 - 13 $\mu$ m	
	T197407	76,0 mm	6° × 4,5°	0,33 mrad	f/1.3	4,0 m	7,5 - 13 $\mu$ m	
	T197215	Primeiro plano 100 $\mu$ m 32 × 24 mm 100 $\mu$ m				f/1.3	79 mm	7,5 - 13 $\mu$ m
	T197214	Primeiro plano 50 $\mu$ m 16 × 12 mm			50 $\mu$ m	f/1.3	33 mm	7,5 - 13 $\mu$ m
T197415	Primeiro plano 25 $\mu$ m	8 × 6 mm		25 $\mu$ m	f/1.3	20 mm	7,5 - 13 $\mu$ m	
 	T198065	6,5 mm	80° × 64,4°	2,62 mrad	f/1.3	65 mm	7,5 - 14 $\mu$ m	
	T197915	13,1 mm	45° × 33,7°	1,23 milhões	f/1.3	150 mm	7,5 - 14 $\mu$ m	
	T197922	24,6 mm	25° × 19°	0,68 mrad	f/1.0	250 mm	7,5 - 14 $\mu$ m	
	T197914	41,3 mm	15° × 11,3°	0,41 mrad	f/1.0	Ligue para mais detalhes	7,5 - 14 $\mu$ m	
	T198165	88,9 mm	7° × 5,3°	0,19 mrad	f/1.3	2,0 m	7,5 - 14 $\mu$ m	
	T198060	Primeiro plano 100 $\mu$ m 64 × 48 mm			100 $\mu$ m	f/1.0	172 mm	7,5 - 14 $\mu$ m
	T198059	Primeiro plano 50 $\mu$ m 32 × 24 mm			50 $\mu$ m	f/1.0	84mm	7,5 - 14 $\mu$ m

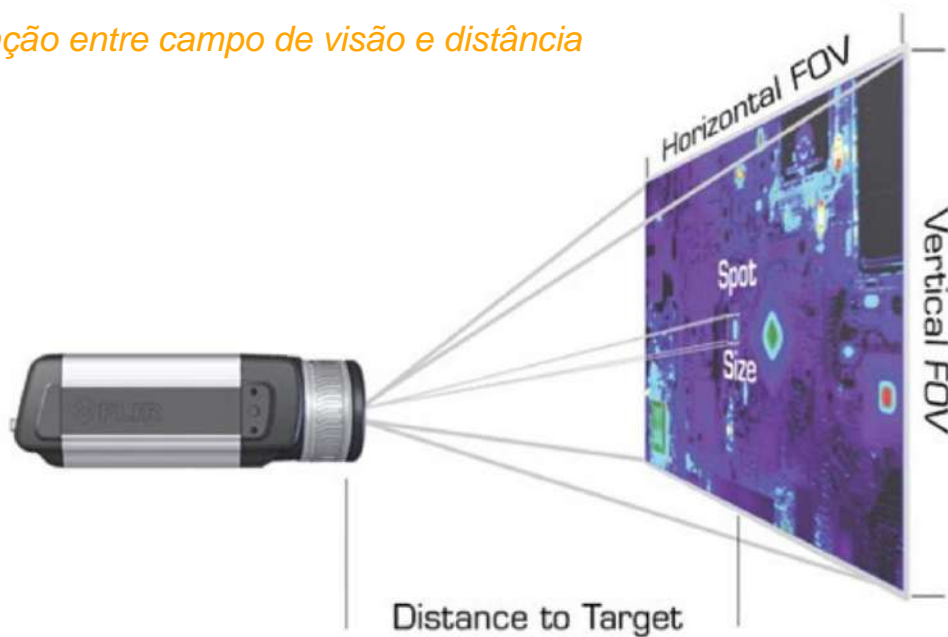
Detalhe da lente da câmera de desempenho								
Câmera	Lente	Comprimento focal	FOV	IFOV	f Número	mín. Dist. de Trabalho	Banda Espectral	
	4122782	25 mm	35,5° × 28,7°	1,0 mrad	n/D	n/D	Visível - NIR	
	4122784	50mm	18,2° × 14,6°	0,5 mrad	n/D	n/D	Visível - NIR	
	L0315	12 mm	44° × 36°	0,56 mrad	f/2.0	0,1 m	3,5 - 5,0 $\mu$ m	
	L0116	25 mm	22° × 17°	0,60 mrad	f/2.0	0,5 m	3,7 - 5,15 $\mu$ m	
	L0106	50mm	11° × 8,8°	0,30 mrad	f/2.0	1,5m	3,7 - 5,15 $\mu$ m	
	L0118	100 mm	5,5° × 4,4°	0,15 mrad	f/2.0	2,0 m	3,7 - 5,15 $\mu$ m	
	L0804	200 mm	2,75° × 2,2°	0,075 mrad	f/2.0	5,0 m	3,5 - 5,0 $\mu$ m	
	L0120	Primeiro plano 15 $\mu$ m	9,6 × 7,7 mm		15 $\mu$ m	f/2.0	45 mm	3,5 - 5,0 $\mu$ m
	L0120E	Primeiro plano 5 $\mu$ m	3,2 × 2,6 mm		5 $\mu$ m	f/2.0	39mm	3,5 - 5,0 $\mu$ m
	L0905	Primeiro plano 15 $\mu$ m	9,6 × 7,7 mm		15 $\mu$ m	f/3.0	300 mm	3,7 - 5,15 $\mu$ m
	L0709T	27 mm	20° × 16°	0,56 mrad	f/3.0	0,5 m	1,75 - 4,9 $\mu$ m	
	L0608T	50mm	11° × 8°	0,30 mrad	f/3.0	1,0 m	1,75 - 4,9 $\mu$ m	
	L0604T	100 mm	5,5° × 4,4°	0,15 mrad	f/3.0	5,0 m	1,75 - 4,9 $\mu$ m	
	L0701	200 mm	2,75° × 2,2°	0,075 mrad	f/3.0	10,0 m	1,75 - 4,9 $\mu$ m	
	L0306	12 mm	44° × 36°	2,5 milhões	f/ 2.0	0,05 m	7,5 - 11,75 $\mu$ m	
	L0324	25 mm	22° × 17°	1,2 mrad	f/2.0	0,5 m	7,5 - 11,75 $\mu$ m	
	L0302	50mm	11° × 8,8°	0,6 mrad	f/2.0	1,0 m	7,5 - 11,75 $\mu$ m	
	L0201	100 mm	5,5° × 4,4°	0,3 mrad	f/2.0	2,8 m	7,5 - 11,75 $\mu$ m	
	L0113T	200 mm	2,75° × 2,2°	0,15 mrad	f/2.0	10,0 m	7,5 - 11,75 $\mu$ m	
	L0215	Primeiro plano 30 $\mu$ m	9,6 × 7,7 mm		30 $\mu$ m	f/2.0	45,0 mm	7,5 - 10,0 $\mu$ m
	L0115E	Primeiro plano 10 $\mu$ m	3,2 × 2,6 mm		10 $\mu$ m	f/2.0	38,8 mm	7,5 - 10,0 $\mu$ m
	L0306	12 mm	46,2° × 37,7°	1,25 milhões	f/ 2.0	0,05m	7,5 - 11,75 $\mu$ m	
	L0324	25 mm	23,2° × 18,6°	0,6 mrad	f/2.0	0,5 m	7,5 - 11,75 $\mu$ m	
	L0302	50mm	11,7° × 9,4°	0,3 mrad	f/2.0	1,0 m	7,5 - 11,75 $\mu$ m	
	L0201	100 mm	5,9° × 4,7°	0,15 mrad	f/2.0	2,8 m	7,5 - 11,75 $\mu$ m	
	L0113T	200 mm	2,93° × 2,35°	0,075 mrad	f/2.0	10 m	7,5 - 11,75 $\mu$ m	
	L0215	Primeiro plano 15 $\mu$ m	9,6 × 7,7 mm		15 $\mu$ m	f/2.0	45mm	7,5 - 10,0 $\mu$ m
	L0115E	Primeiro plano 5 $\mu$ m	3,2 × 2,6 mm		5 $\mu$ m	f/2.0	38,8 mm	7,5 - 10,0 $\mu$ m
	T197387	23 mm	24° × 18°	1,30 mrad	f/1.5	0,3 m	3,0 - 5,0 $\mu$ m	
	T197385	38 mm	14,5° × 10,8°	0,79 mrad	f/1.5	0,5 m	3,0 - 5,0 $\mu$ m	
	T197388	92 mm	6,0° × 4,5°	0,33 mrad	f/1.5	2,0m	3,0 - 5,0 $\mu$ m	

## Detalhe avançado da lente da câmera

Câmera	Lente	Comprimento focal	FOV	IFOV	f Número	Dist. trabalho mín.	Banda Espectral
	322-0005-01	13 mm	63,2° x 52,4°	1,9 mrad	f/2.3	50mm	3,0 - 5,0 µm
	322-0005-02	25 mm	35,5° x 28,7°	1,0 mrad	f/2.4	200 mm	3,0 - 5,0 µm
	4113445	50mm	18,1° x 14,6°	0,5 mrad	f/2.3	500 mm	3,0 - 5,0 µm
	4113446	100 mm	9,1° x 7,3°	0,25 mrad	f/2.3	1,75m	3,0 - 5,0 µm
	23517-000	100 mm	9,1° x 7,3°	0,25 mrad	f/4.1	3,0 m	3,0 - 5,0 µm
	4110813	200 mm	4,6° x 3,7°	0,13 mrad	f/4.1	7,0 m	3,0 - 5,0 µm
	26921-000	350 mm	2,6° x 2,1°	0,07 mrad	f/4.1	10,0 m	3,0 - 5,0 µm
	26959-201	500 mm	1,8° x 1,5°	0,05 mrad	f/2.3	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 µm
	25333-201	1 metro	0,9° x 0,7°	0,025 mrad	f/4.0	100m	3,0 - 5,0 µm
	322-0005-06	50/250 mm	18,1° x 14,6° 3,7° x 2,9°	0,5 mrad 0,1 mrad	f/2.3	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 µm
	26509-201	50/250/500 mm	18,1° x 14,6° 3,7° x 2,9° 1,8° x 1,5°	0,5 mrad 0,1 mrad 0,05 mrad	f/4.0	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 µm
	26509-204	50/500 mm Contínuo	18,1° x 14,6° 1,8° x 1,5°	0,5 mrad 0,05 mrad	f/4.0	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 µm
	222-0009-05	Primeiro plano 25 µm	16 x 12,8 mm	25 µm	f/2.3	60,3 mm	3,0 - 5,0 µm
	222-0009-06	Primeiro plano 10 µm	6,4 x 5,12 mm	10 µm	f/2.3	25,4 mm	3,0 - 5,0 µm
	222-0009-07	Primeiro plano 6,25 µm	4,0 x 3,2 mm	6,25 µm	f/2.3	12,7 mm	3,0 - 5,0 µm
	4110439	Primeiro plano 5 µm	3,2 x 2,56 mm	5 µm	f/4.1	11,75 mm	3,0 - 5,0 µm
	322-0005-11	25 mm	35,5° x 28,7°	1,0 mrad	f/2.3	200 mm	1,5 - 5,0 µm
	322-0005-08	50mm	18,1° x 14,6°	0,5 mrad	f/2.3	500 mm	1,5 - 5,0 µm
	322-0005-07	100 mm	9,1° x 7,3°	0,25 mrad	f/2.3	2,5 m	1,5 - 5,0 µm
	26981-200	250 mm	3,7° x 2,9°	0,1 mrad	f/2.3	Ligue para mais detalhes	1,5 - 5,0 µm
	26498-000	25 mm	21,7° x 17,5°	0,6 mrad	f/2.3	125 mm	3,0 - 5,0 µm
	4107599-000	50mm	10,9° x 8,8°	0,3 mrad	f/2.3	500 mm	3,0 - 5,0 µm
	4107601-000	100 mm	5,5° x 4,4°	0,15 mrad	f/2.3	1,5 m	3,0 - 5,0 µm
	26509-202	50/250/500 mm	21,7° x 17,5° 2,2° x 1,8° 1,1° x 0,9°	0,6 mrad 0,06 mrad 0,03 mrad	f/4.0	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 µm
	26509-205	50/500 mm Contínuo	21,7° x 17,5° 1,1° x 0,9°	0,6 mrad 0,03 mrad	f/4.0	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 µm
	26959-202	500 mm	1,1° x 0,9°	0,03 mrad	f/2.3	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 µm
	25333-202	1 metro	0,6° x 0,4°	0,015 mrad	f/4.0	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 µm
	27660-000	25 mm	21,7° x 17,5°	0,6 mrad	f/2.3	200 mm	1,0 - 5,0 µm
	27660-001	50mm	10,9° x 8,8°	0,3 mrad	f/2.3	500 mm	1,0 - 5,0 µm
	27660-002	100 mm	5,5° x 4,4°	0,15 mrad	f/2.3	1,5m	1,0 - 5,0 µm
	4110796	17 mm	56,9° x 56,9°	1,06 mrad	f/4.0	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 µm
	23898-000	25 mm	40,4° x 40,5°	0,72 mrad	f/4.0	125mm	3,0 - 5,0 µm
	23899-000	50mm	20,9° x 20,9°	0,36 mrad	f/4.0	500 mm	3,0 - 5,0 µm
	23900-000	100 mm	10,5° x 10,5°	0,18 mrad	f/4.0	1,5m	3,0 - 5,0 µm
	26959-200	500 mm	2,1° x 2,1°	0,036 mrad	f/2.3	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 µm
	26509-200	50/250/500 mm	20,9° x 20,9° 4,2° x 4,2° 2,1° x 2,1°	0,36 mrad 0,072 mrad 0,036 mrad	f/4.0	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 µm
	26509-203	50/500 mm Contínuo	20,9° x 20,9° 2,1° x 2,1°	0,36 mrad 0,036 mrad	f/4.0	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 µm
	25333-200	1 metro	1,1° x 1,1°	0,018 mrad	f/4.0	100m	3,0 - 5,0 µm
	4109666	25 mm	40,4° x 40,5°	0,72 mrad	f/4.0	125 mm	1,5 - 5,0 µm
	4109667	50mm	20,9° x 20,9°	0,36 mrad	f/4.0	500 mm	1,5 - 5,0 µm
	4109668	100 mm	10,5° x 10,5°	0,18 mrad	f/4.0	1,5m	1,5 - 5,0 µm

Detalhe avançado da lente da câmera							
Câmera	Lente	Comprimento focal	FOV	IFOV	f Número	mín. Dist. de Trabalho	Banda Espectral
	4110796	17 mm	57,9° x 35,7°	0,82 mrad	f/4.0	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 μm
	23898-000	25 mm	41,2° x 24,8°	0,56 mrad	f/4.0	125mm	3,0 - 5,0 μm
	23899-000	50mm	21,3° x 12,5°	0,28 mrad	f/4.0	500 mm	3,0 - 5,0 μm
	23900-000	100 mm	10,7° x 6,28°	0,14 mrad	f/4.0	1,5m	3,0 - 5,0 μm
	26959-200	500 mm	2,1° x 1,3°	0,028 mrad	f/2.3	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 μm
	26509-200	50/250/500 mm	21,3° x 12,5° 4,3° x 2,5° 2,1° x 1,3°	0,28 mrad 0,056 mrad 0,028 mrad	f/4.0	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 μm
	26509-203	50/500 mm Contínuo	21,3° x 12,5° 2,1° x 1,3°	0,28 mrad 0,028 mrad	f/4.0	Ligue para mais detalhes	3,0 - 5,0 μm
	25333-200	1 metro	1,1° x 1,1°	0,014 mrad	f/4.0	100m	3,0 - 5,0 μm
	4109666	25 mm	40,4° x 40,5°	0,56 mrad	f/4.0	125 mm	1,5 - 5,0 μm
	4109667	50mm	20,9° x 20,9°	0,28 mrad	f/4.0	500 mm	1,5 - 5,0 μm
4109668	100 mm	10,5° x 10,5°	0,14 mrad	f/4.0	1,5m	1,5 - 5,0 μm	
	26052-210	50/250 mm	10,9° x 8,8° 2,2° x 1,76°	0,3 mrad 0,06 mrad	f/4.0	1m/3m	3,0 - 5,0 μm
	26052-211	100/500 mm	5,5° x 4,4° 1,1° x 0,9°	0,15 mrad 0,03 mrad	f/4.0	5m/10m	3,0 - 5,0 μm
	26052-212	150/750 mm	3,7° x 2,9° 0,7° x 0,6°	0,1 mrad 0,02 mrad	f/4.0	20m/ 20m	3,0 - 5,0 μm

### Relação entre campo de visão e distância



O SPOT SIZE representa o que um único elemento detector (pixel) verá a uma determinada distância.

O IFOV é o ângulo sólido subtendido por um único pixel do sistema de imagem. Varia de acordo com as dimensões do FPA da câmera e a combinação de lentes.

TAMANHO DO PONTO = IFOV x Distância até o Alvo



**BOSTON**

FLIR Systems, Inc.  
9 Townsend West  
Nashua, NH 03063  
EUA PH: +1  
866.477.3687 PH: +1  
603.324.7600

[www.flir.com](http://www.flir.com)  
NASDAQ: FLIR

**Sede**

Corporativa de PORTLAND  
FLIR Systems, Inc.  
27700 SW Parkway Ave.  
Wilsonville, OR 97070 EUA  
PH: +1 866.477.3687

**CANADÁ**

FLIR Systems, Ltd.  
920 Sheldon Ct.  
Burlington, ON L7L 5L6  
Canadá PH: +1 800.613.0507

**MÉXICO/AMÉRICA LATINA**

FLIR Systems Brasil Av. Prof.  
Antonio Bardella 320 - B. Boa  
Vista- Cep: 18085-852 -  
Sorocaba - SP Brasil PH: +55 15  
3238 8070

O equipamento aqui descrito pode exigir autorização do governo dos EUA para fins de exportação. O desvio contrário à lei dos EUA é proibido. Imagens meramente ilustrativas. As especificações estão sujeitas a alterações sem aviso prévio. ©2015 FLIR Systems, Inc. Todos os direitos reservados. (Rev. 12/01/15)