

Caracterização Espectral de Dispositivo Eletro-óptico Imageador

Geraldo M Lima Filho¹, Francisco Sircilli² e Ruy M Castro²

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos – SP

²Instituto de Estudos Avançados - IEAv, São José dos Campos – SP

Resumo — Sensores eletroópticos são utilizados para auxiliar na identificação de alvos, especificamente em cenários de busca e salvamento. Para se obter medições confiáveis é necessário que se tenha conhecimento apropriado sobre o funcionamento desses equipamentos e que eles estejam devidamente aferidos. Dentre os equipamentos atualmente disponíveis no Laboratório de Guerra Eletrônica (LAB-GE/ITA/DCTA) há uma câmera comercial de imageamento térmico no infravermelho médio, de alto desempenho, para uso industrial, educacional e termografia. O objetivo deste trabalho é a caracterização espectral dessa câmera, sendo que para atingi-lo é necessário familiarizar-se com o funcionamento e recursos da câmera. Com este trabalho, dá-se, também, início ao desenvolvimento de uma metodologia que permita caracterizar sistemas eletro-ópticos semelhantes.

Palavras-Chave — infravermelho, caracterização espectral, câmera no infravermelho.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente a maioria das aeronaves empregadas em busca e salvamento dispõe de sensor infravermelho de visada frontal - FLIR (do inglês *Forward Looking InfraRed*), amplamente empregado na localização de tripulações e embarcações em situação de perigo. A eficácia de detecção e identificação dos alvos de interesse por sensores FLIR depende, em geral, da capacitação, estado de alerta do operador, e principalmente do perfeito funcionamento do sensor.

Considerando que as missões de busca e salvamento podem estender-se por um longo período de tempo, a fadiga do mais experiente operador pode resultar na perda de um contato, atrasando o processo de salvamento, ou mesmo levando ao fracasso da missão. Para evitar este tipo de ocorrência é interessante utilizar o processamento digital de imagens para indicar ao operador os possíveis alvos de interesse, principalmente quando estes possuem dimensões da ordem de grandeza da resolução espacial do sensor.

Para que se tenha certeza do perfeito funcionamento dos sensores e para permitir uma utilização confiável, eles devem ser adequadamente caracterizados e periodicamente calibrados, possibilitando medições precisas dos alvos de

interesse e que o operador tenha conhecimento dos parâmetros reais do equipamento, sem confiar cegamente no manual do fabricante.

Um dos equipamentos eletro-ópticos de imageamento termal disponível no Laboratório de Guerra Eletrônica (LAB-GE/ITA/DCTA) para uso em avaliações operacionais é uma câmera comercial que captura imagens na faixa do espectro eletromagnético conhecida como infravermelho médio, nominalmente entre 2500 a 5100 nm.

Assim como ocorre com todos os equipamentos de medição que devem ser adequadamente caracterizados e periodicamente calibrados, essa câmera necessita ser devidamente caracterizada a fim de possibilitar medições precisas e confiáveis de mapas de distribuição de temperatura de cenas e alvos de interesse.

Deste modo, o objetivo deste trabalho é realizar a caracterização espectral da câmera através da medição da sua curva de resposta espectral, e comparando-a com a curva nominal indicada pelo fabricante. Para isso, é necessário familiarizar-se com o funcionamento e recursos da câmera de alto desempenho. A metodologia desenvolvida para o levantamento da curva de resposta espectral será aplicada na caracterização de outros dispositivos eletro-ópticos, imageadores ou não.

Na seção II apresenta-se as características da câmera e como é avaliada a curva de resposta espectral. A metodologia experimental é apresentada na seção III. Na seção IV são apresentados os resultados obtidos, os quais são discutidos na seção V. As conclusões a esse trabalho estão na seção VI.

II. CÂMERA E RESPOSTA ESPECTRAL

Características da câmera

A câmera avaliada é um equipamento de imageamento térmico de alto desempenho para uso industrial, educacional e termografia. A imagem é obtida por meio de uma matriz de 640 x 512 pixels, com frequência de 5 a 100 hertz. Os detectores são de antimoneto de índio (InSb) arrefecidos, com resposta espectral nominal na faixa de 2500 a 5100 nm. Suas lentes possuem um sistema de autofoco integrado.

Segundo o catálogo do fabricante [1], a câmera possui alta resolução espacial, alta sensibilidade e precisão, mantendo uma excelente linearidade, que permite que diferenças de temperatura de 20 mK (0,02 °C) possam ser detectadas. Ainda segundo o fabricante, a câmera deve ser capaz de realizar medições de temperatura entre -20 °C a 3000 °C,

Geraldo M Lima Filho, geraldolmi@hotmail.com; Francisco Sircilli, sircilli@ieav.cta.br, Tel +55-12-39475518; rmcastro@ieav.cta.br, Tel. +55-12-39475350.

sendo que o tempo de integração é ajustável em incrementos de nanossegundos. Além disso, acompanha a câmera um *software* que gerencia as curvas de calibração disponíveis na memória da câmera (*flash memory*), que são necessárias, juntamente com o uso de tempo de integração apropriado e correção de não uniformidade dos pixels (NUC), para se obter boas imagens com medição estável e precisa.

A câmera disponível no LAB-GE possui uma roda de filtro removível motorizada de 4 posições. Isso permite que sejam capturadas imagens de eventos em uma desejada banda do espectro eletromagnético.

Resposta espectral da câmera

A resolução espectral ou resposta espectral corresponde à sensibilidade de um detector, ou até mesmo um sistema sensor, com o comprimento de onda da radiação incidente.

Para a determinação da resposta espectral existem dois métodos disponíveis. O primeiro método, chamado de absoluto, envolve o conhecimento da energia irradiada pela fonte emissora, em cada comprimento de onda, e o respectivo sinal medido no equipamento, levando em conta a atenuação atmosférica e outros aspectos intervenientes. No segundo método, chamado relativo, a resposta espectral do sensor é determinada de forma indireta, quando comparado com a resposta um detector calibrado, quando submetidos a mesma radiação incidente.

Para este trabalho foi escolhido o segundo método, utilizando um detector de banda larga como referência, cuja resposta espectral será tomada como padrão na comparação com as medições da câmera, a fim de inferir a resposta espectral dessa câmera. Portanto, a caracterização espectral por comparação compreende: uma fonte de radiação eletromagnética na região do infravermelho; um monocromador; e um detector com resposta espectral conhecida.

A equação matemática que relaciona estes parâmetros com a medição realizada por um detector pode ser definida por:

$$V_{det}(\lambda) = M_{Iv}(\lambda, T_{Iv}) \cdot \varepsilon_{Iv}(\lambda) \cdot MONO(\lambda) \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \tau_{Atm}(H, T_{amb}, P_{amb}, C_{gases}, \lambda) \cdot FRE_{det}(\lambda) \cdot fator_{det} \quad (1)$$

onde: V_{det} é a tensão medida por um detector, M_{Iv} é a exitância da fonte de Iv e ε_{Iv} é a emissividade da fonte de Iv, que dependem do comprimento de onda, λ , de interesse e da temperatura, T_{Iv} , do elemento de Iv; r é a distância entre a fonte e o detector; $MONO$ representa a interação da luz com os elementos do monocromador (reflectância dos espelhos e eficiência da grade de difração); τ_{Atm} corresponde a atenuação da atmosfera, que depende da umidade relativa do ar, H , da temperatura ambiente, T_{atm} , da pressão, P_{atm} , do comprimento de onda de interesse e da concentração dos gases, C_{gases} ; FRE_{det} é a função de resposta espectral do detector; e $fator_{det}$ é uma constante relacionada a parâmetros (área do detector, ganho, etc.) do detector de infravermelho.

Calculando a razão entre a resposta de um detector de referência e a resposta da câmera e considerando que nas medições realizadas com o detector padrão e a câmera: a) a geometria pode ser a mesma; b) que são utilizados os mesmos equipamentos (monocromador); c) que os parâmetros atmosféricos não se alteram significativamente; e d) que a temperatura da fonte de Iv é a mesma, obtém-se:

$$\frac{V_{det\ ref}(\lambda)}{ND_{cam}(\lambda)} = \frac{FRE_{det\ ref}(\lambda) \cdot fator_{det\ ref}}{FRE_{cam}(\lambda) \cdot fator_{cam}} \quad (2)$$

III. METODOLOGIA

O diagrama esquemático de um arranjo experimental envolvido em uma caracterização pode ser observado na Fig. 1.

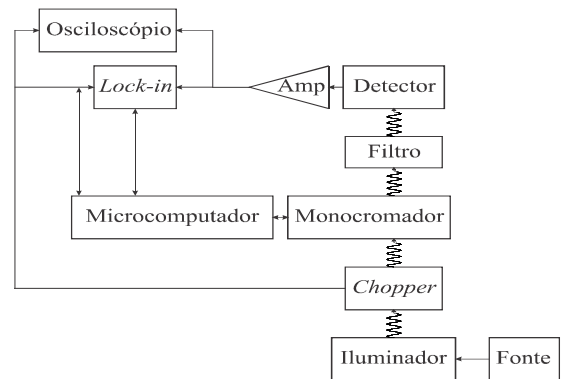


Fig. 1. Diagrama esquemático do arranjo utilizado na medição com o detector de banda larga.

No Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletroópticos – LaRaC, do Instituto de Estudos Avançados – IEAv, o arranjo disponível para a caracterização espectral envolve: monocromador Acton SpectraPro 2500i [2]; detector de banda larga de telureto de cádmio - mercúrio, marca Judson [3]; amplificador *lock-in* SR510 [4]; iluminador Iv Newport 6363 [5]; e fonte de tensão Newport [6]. Neste arranjo, o caminho óptico fonte-detector é de 1,15 m, sendo 1,0 m interno ao monocromador. Além desse arranjo foi utilizado um termohigrômetro. A utilização do monocromador associada a detectores sensíveis a uma ampla faixa de comprimentos de onda causa a interferência, em comprimentos de onda mais altos, de “harmônicos” destas radiações. Portanto, para eliminar a contribuição destes harmônicos é necessária a utilização de filtros passa alta. Assim, neste arranjo experimental foram utilizados dois filtros: o filtro 1 [7] com comprimento de onda de corte igual a 4500 nm, e o filtro 2 [8] com comprimento de onda de corte em 2500 nm. A utilização destes filtros teve como objetivo estimar a contribuição dos harmônicos gerados no monocromador.

Medições com o detector de referência

Para a caracterização espectral foi utilizado como referência o detector de banda larga da empresa Judson [3]. Para isto foi montado o arranjo experimental conforme o

diagrama de blocos apresentado na Fig. 1. Vale destacar que o detector foi posicionado a 8 cm do filtro, e que ele foi alinhado de forma que a tensão de saída fosse máxima.

A curva de resposta, em tensão, é obtida quando o detector está iluminado pela radiação proveniente do monocromador.

Para o detector de referência foram realizadas medições de tensão, de forma automatizada, para comprimentos de onda de 2000 a 7000 nm, em intervalos de 50 nm, em três séries de medições: sem filtro, com o filtro 2 e com o filtro 1.

Caracterização espectral da câmera

Para esta medição foi utilizado o arranjo experimental apresentado na Fig. 1, trocando-se o conjunto Amp+detector pela câmera. Neste arranjo, a câmera também foi posicionada a 8 cm do filtro. O sistema foi configurado e alinhado para que a saída do monocromador iluminasse o centro da lente da câmera.

A intenção inicial era fazer medições entre 2500 e 6300 nm, em intervalos de 100 nm. Porém, uma grande absorção do dióxido de carbono (CO_2) em torno de 4200 nm, levou à necessidade de realizar mais medições em comprimentos de onda entre 4100 e 4400 nm. Assim, para esta região, foram realizadas medições em intervalos de comprimento de onda de 50 nm. Deste modo, foram selecionados 42 comprimentos de onda entre 2500 e 6300 nm.

A câmera possui um sistema que permite selecionar uma subárea da imagem total apresentada. Usando esse recurso, foi possível selecionar somente a área mais homogênea representada pelos pixels apresentados na imagem da câmera. A área foi constituída dos pixels X: 339 ao 345 e Y: 250 ao 273.

Portanto, para cada um dos comprimentos de onda selecionados foram realizadas quatro tomadas de dados: a) fechado, ou seja, a fonte de radiação eletromagnética bloqueada por completo pelo *chopper*; b) sem filtro; c) com Filtro 2; e d) com Filtro 1.

IV. RESULTADOS

Detector Judson

Conforme descrito anteriormente, nas medições com o detector de referência foram realizadas medições de tensão, para comprimentos de onda de 2000 a 7000 nm, em intervalos de 50 nm, em três séries de tomada de dados: sem filtro, com o filtro 2 e com o filtro 1. Em cada uma destas três séries o tempo de medição foi de 15 minutos. Na Fig. 2, são apresentados os resultados obtidos.

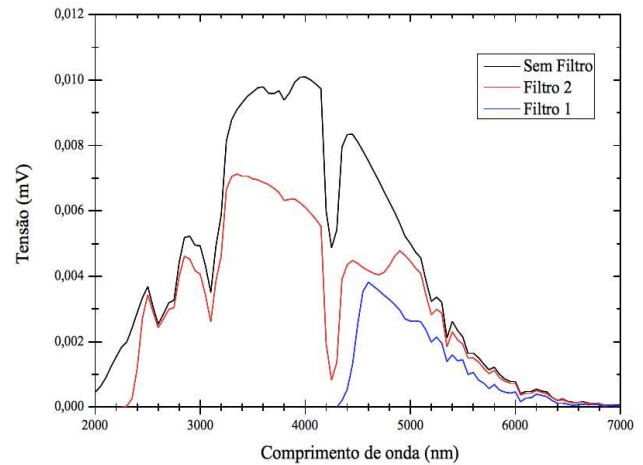


Fig. 2. Curvas de Tensão obtidas com o Detector Judson.

Como podemos observar na Fig. 2, a curva de tensão sem filtro apresentou um valor superior a curva com filtro 2, que por sua vez foi superior do que a com filtro 1. Com isso podemos confirmar a interferência construtiva das harmônicas. Visto isso, foi confeccionada, uma curva de tensão, ver Fig. 3, subtraindo as interferências das harmônicas e levando em consideração as curvas espectrais de transmitância dos filtros [7,8].

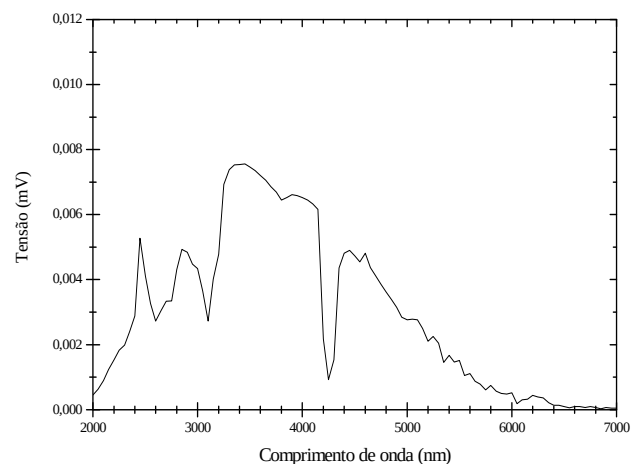


Fig. 3. Curva de tensão, corrigida dos efeitos dos harmônicos, obtida com o detector de referência.

Câmera

Para a câmera foram confeccionadas as curvas de resposta de níveis digitais em função do comprimento de onda do monocromador entre os comprimentos de onda de 2500 a 6300 nm, com intervalos de 100 nm, e entre 4100 a 4400 nm as medições foram feitas com intervalo de 50 nm. Neste experimento, o tempo total de medição foi de 1,5 h. Os resultados são apresentados na Fig. 4.

Como podemos observar a curva de resposta sem filtro apresentou um valor superior do que a curva com filtro 1. Com isso podemos confirmar a interferência construtiva das harmônicas, e visto isso foi confeccionada uma curva de resposta em níveis digitais subtraindo as interferências das harmônicas. A curva obtida é apresentada na Fig. 5.

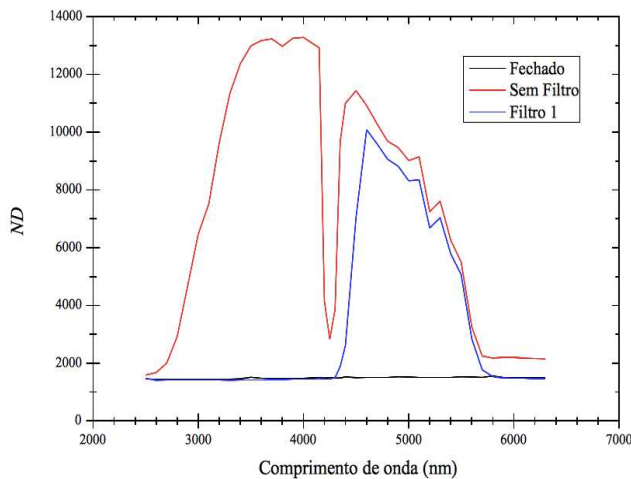


Fig. 4. Curvas de Resposta em Níveis Digitais da câmera.

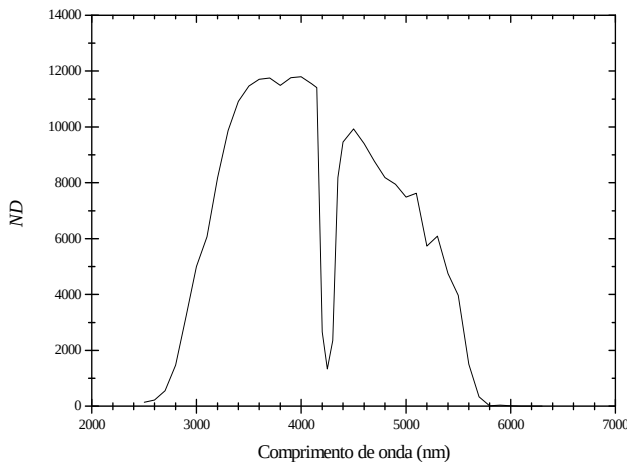


Fig. 5. Curva de resposta em níveis digitais da câmera, corrigida dos efeitos dos harmônicos gerados no monocromador.

Assumindo que os resultados obtidos para o detector de referência e para a câmera foram obtidos em condições experimentais semelhantes, nas quais os parâmetros atmosféricos não diferiam significativamente (a umidade relativa do ar foi em torno de 60% e a concentração de CO₂, mesmo não sendo medida, só influencia a região de 4,2 μm), e utilizando-se a metodologia proposta, foi confeccionada a curva de resposta espectral da câmera, apresentada na Fig. 6. Para comparação, na Fig. 7 apresenta-se a curva fornecida pelo fabricante [1].

Podemos verificar que a curva de resposta espectral obtida neste trabalho difere da indicada pelo fabricante, pois o mesmo informa que a câmera possui resposta espectral entre aproximadamente 3500 a 6000 nm, tendo o seu pico em 3800 nm e mantendo esta resposta praticamente constante até 5000 nm, onde decresce até 6000 nm. Porém, neste trabalho verificou-se que a câmera possui resposta espectral entre aproximadamente 2500 a 6000 nm, com crescimento não linear até 5250 nm, onde tem o seu pico, e depois decresce. Pode-se observar também uma depressão em torno de 4200 nm, possivelmente devida à absorção da radiação emitida pelo monocromador pelo CO₂ presente na atmosfera do LaRaC durante as medições.

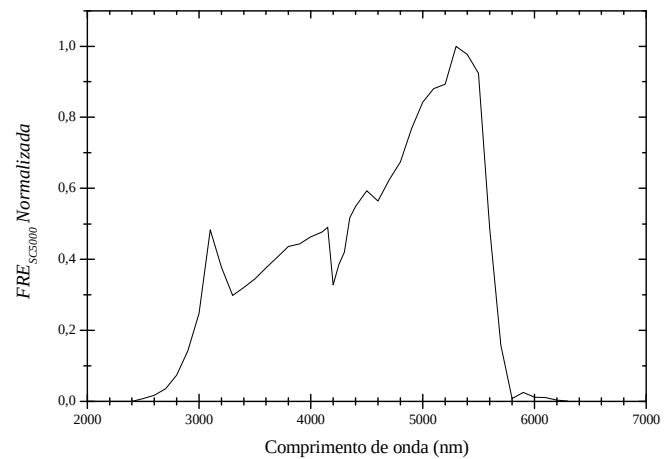


Fig. 6. Curva de resposta espectral da câmera medida neste trabalho.

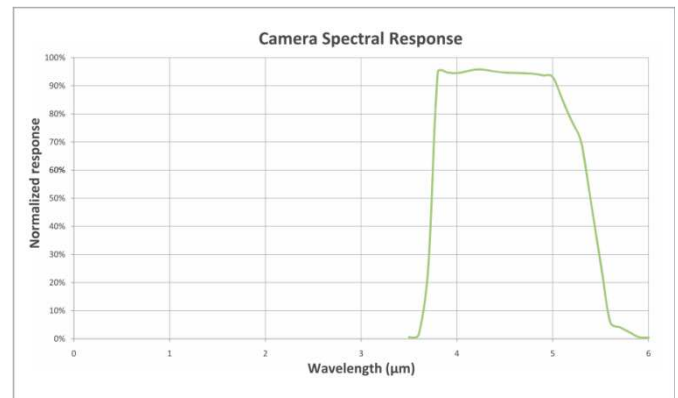


Fig. 7. Curva de resposta espectral da câmera, indicada pelo fabricante [1].

V. DISCUSSÃO

Observou-se que a Curva da Função de Resposta Espectral da câmera indicada pelo fabricante é diferente da curva medida neste trabalho. Porém, como o fabricante propõe que a câmera tenha resposta espectral de 2,5 a 5,1 μm [9], é coerente a curva obtida neste trabalho, pois ela responde bem nesta faixa e possui maior sensibilidade nos maiores comprimentos de onda, os quais tem um menor nível de energia.

Contudo, vale ressaltar que a Curva da Função de Resposta Espectral indicada pelo fabricante no catálogo da câmera [1] mostra que a câmera possui resposta espectral entre aproximadamente 3500 a 6000 nm, o que vai de encontro com o próprio manual [9] que garante que a câmera possui resposta espectral entre 2500 a 5100 nm. Com isto vemos a necessidade da caracterização espectral desta câmera e, de uma maneira geral, de qualquer sistema eletro-óptico, imageador ou não.

Esta diferença (ou parte dela) pode ter diversas origens, como o fator geométrico da câmera e do detector, porém é necessário um estudo mais aprofundado da câmera, bem como realizar investigações sobre a origem das radiações espúrias (de faixa espectral ampla).

VI. CONCLUSÃO

A câmera avaliada é de alta tecnologia e de última geração, possuindo vários recursos que foram explorados neste trabalho.

A metodologia desenvolvida neste trabalho para caracterização espectral da câmera a infravermelho baseada em uma matriz de detectores semi-condutores (matriz de antimoneto de índio) foi proposta e aplicada e suas condições de contorno foram explicitadas. As características dos equipamentos utilizados também foram analisadas e as particularidades não citadas anteriormente em manuais ou trabalhos foram discriminadas e tratadas no decorrer deste estudo. Essa metodologia é útil para caracterização de dispositivos eletro-ópticos similares.

Verificou-se que a curva de resposta espectral medida é diferente da indicada pelo fabricante, o que implica que a caracterização ainda não é conclusiva.

Por isso, deve-se explorar outros recursos da câmera, avaliar os fatores que limitaram o método de análise de dados e as restrições dos equipamentos. No entanto, diversos resultados subsidiários foram obtidos e analisados ao longo do trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] FLIR SYSTEMS, Inc. Catálogo da SC5600. Disponível em: http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography_APAC/Products/Product_Literture/AU_SC5600-M_Leaflet_APAC.pdf. Acesso em 25 de Outubro de 2013.
- [2] ACTON RESEARCH CORPORATION. Spectrapro-2500i operating instructions. ACTON, 2003.
- [3] JUDSON TECHNOLOGIES LLC. Mercury cadmium telluride detectors. Montgomeryville, 2002.
- [4] <http://www.thinksrs.com/products/SR510530.htm> . Acesso em 02 de Julho de 2014.
- [5] NEWPORT CORPORATION. 6363: IR Emitter. Bozeman, MT.2012. Disponível em: <http://search.newport.com/?x1=sku&q1=6363>. Acesso em 15 de Outubro de 2012.
- [6] NEWPORT. 300W Radiometric Power Supply: MODEL 69931. Stratford, CT, EUA, 2002.
- [7] EDMUND OPTICS, Inc, 2009. Disponível em: http://www.edmundoptics.com/techsupport/resource_center/product_docs/curv_68655.pdf. Acesso em 15 de Novembro de 2013.
- [8] EDMUND OPTICS, Inc, 2009. Disponível em: http://www.edmundoptics.com/techsupport/resource_center/product_docs/curv_68653.pdf. Acesso em 15 de Novembro de 2013.
- [9] FLIR SYSTEMS, Inc. SC5000 User Manual, 2009.