

Análise das capacidades e limitações radiométricas, espectrais e espaciais de dois sistemas sensores termais em laboratório

Hermann J. H. Kux ¹
Luana Thayza de Oliveira ¹
Ruy Morgado de Castro ^{2,3}

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
(luana.oliveira@inpe.br; hermann@dsr.inpe.br)

² Instituto de Estudos Avançados - IEAv/CTA
Caixa Postal 6044 – 12.231-970 – São José dos Campos - SP, Brasil
rmcastro@ieav.cta.br

³ Universidade de Taubaté - UNITAU
Caixa Postal 515 - 12201-970 - Taubaté - SP, Brasil
rmcastro@unitau.br

Abstract. With the increase on the use of thermal infrared sensor systems onboard airplanes and more recently in RPAs (Remotely Piloted Aircrafts), also known as Drones, it is of fundamental importance to know the radiometric, spectral and spatial characteristics of these cameras, in order to optimize its use. In this study, these characteristics of 2 cameras were analyzed in laboratory conditions, to evaluate its capacities and limitations, regarding the specifications from the respective manufacturers. Furthermore the similarities and differences between the OPTRIS PI Lightweight (A) and FLIR A 310 (B) cameras are presented and discussed. Through the methodological procedures described in this work, the spectral response function curve of the two sensors was obtained. The uncertainties of the radiometric measurement of the sensors were analyzed and it was found that the sensor A presents uncertainties greater than those specified by the manufacturer and that the measurements carried out by the sensor B have remained within the specified uncertainties. In both sensors, the Effective Instantaneous Field of View (EIFOV) was found to be larger than the Instantaneous Field of View (IFOV) values reported by the manufacturers. The observed results demonstrated the importance of the characterization procedures in order to recognize the real capacities and limitations of a thermal sensor system.

Palavras-chave: Thermal cameras, Radiometric calibration, Spectral camera analysis, Calibração radiométrica, Análise espectral de câmeras, Análise espacial de câmeras.

1. Introdução

Para a maioria dos objetos do mundo real há uma alta correlação positiva entre a temperatura termodinâmica um objeto e a quantidade de fluxo radiante emitida por ele, o que permite a utilização de radiômetros colocados a alguma distância de um objeto para medir sua a temperatura aparente (JENSEN, 2009). Assim, conhecendo as condições ambientais e geométricas de aquisição, bem como a emissividade da superfície observada, é possível estabelecer uma correlação com a temperatura aparente que permita estimar a temperatura cinética de um objeto.

Na faixa de espectral onde são adquiridos dados termais (3 a 15 μm) há uma baixa relação sinal/ruído (RSR). Assim, em sensores termais orbitais, a opção por um sensor com campo de visada instantâneo (IFOV, *Instantaneous Field Of View*) grande é uma forma de reduzir o ruído o que, no entanto, contribui para que a resolução espacial destes sensores seja insuficiente para determinadas aplicações. Uma alternativa é o uso de sensores termais embarcados em aeronaves e em veículos aéreos não tripulados (VANT's) a fim de se obter dados termais com melhor precisão.

Para que a correlação entre o valor medido remotamente por estes sensores e a verdadeira temperatura termodinâmica do objeto na superfície seja precisa é necessário um amplo conhecimento quanto às capacidades e incertezas do sistema sensor utilizado.

A caracterização do sensor permite conhecer os seus limites reais de operação. Assim, a etapa de caracterização de um sensor é importante, pois permite “estabelecer uma relação, mais precisa e fiel possível, entre uma dimensão real e sua estimativa realizada a partir de um sensor ou instrumento qualquer.” (PONZONI et. al., 2007).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização espectral, radiométrica e espacial de dois sensores termais que operam na mesma faixa do espectro eletromagnético (7,5 – 13,0 μm) a fim de avaliar as capacidades e limitações destes equipamentos quanto às especificações apresentadas pelos fabricantes, além das semelhanças e diferenças entre si.

2. Metodologia de Trabalho

A metodologia aplicada neste experimento está baseada nos procedimentos adotados por LIMA FILHO (2015) e ALMEIDA (2007) e está descrita de maneira mais detalhada no trabalho: “Metodologia para a caracterização de sistemas sensores termais” também submetido a este Simpósio. Tais procedimentos foram utilizados para caracterizar a câmera PI450 da fabricante alemã OPTRIS® e A310 da fabricante norte-americana FLIR®. Para as medições foram utilizadas as instalações e equipamentos do Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletroópticos -LaRaC, do Instituto de Estudos Avançados - IEAv, em São José dos Campos/SP.

2.1. Materiais

Os sensores caracterizados foram: OPTRIS PI 450 W (Figura 1) e FLIR A310 (Figura 2), que serão denominados adiante como sensores A e B, respectivamente.



Figura 1. Kit Optris PI LightWeight (a) Microprocessador e (b) sensor IV termal Optris PI450 LW. Fonte: OPTRIS (2016).



Figura 2. Sensor FLIR modelo A310. Fonte: FLIR SYSTEMS (2016).

O sensor A possui características específicas como o peso (220 g) e dimensões (46 x 56 x 84 mm) que o permite ser embarcado em VANT's. Já o sensor B tem peso (700g) e dimensões (170 x 70 x 70 mm) maiores e é mais indicado para ambientes laboratoriais e/ou ser embarcado em aeronaves tripuladas.

Apesar de projetados para diferentes aplicações estes sensores térmicos detectam a radiação eletromagnética infravermelha termal na mesma faixa espectral, de 7,5 a 13,0 μm . O Sensor A possui uma matriz de imagem de 382x288 *pixels* e o Sensor B de 320x240 *pixels*. As imagens térmicas obtidas por ambos os sensores são armazenadas na resolução radiométrica de 16 bits e, de acordo com as especificações dos fabricantes, os sistemas possuem precisão de $\pm 2^\circ\text{C}$ ou $\pm 2\%$. (OPTRIS, 2016; FLIR SYSTEMS, 2016). As especificações dos dois sistemas sensores estão apresentadas na tabela 1.

É conveniente lembrar que estes sensores permitem a entrada de dados: da emissividade da superfície que está sendo medida; e da temperatura ambiente. Com isto, segundo

informações dos fabricantes, estes equipamentos são capazes de inferir a temperatura termodinâmica da superfície que está sendo medida.

Tabela 1. Especificações dos sensores a serem calibrados.

Dados de imageamento e ópticos	Sensor A	Sensor B
Número de pixels	382×288	320×240
Campo de visada (FOV)	38° x 29°	25° × 18.8°
Distância focal	15 mm	18 mm (0,7 in.)
Resolução espacial (IFOV)	1,81 mrad	1,36 mrad
Sensibilidade térmica/NETD	0,04 K	0,05 K
Frequência	80 Hz	9 Hz
Dados do detector		
Tipo do detector	UFPA, microbolometro	UFPA, microbolometro
Faixa espectral	7,5–13 μm	7,5 -13 μm
Tamanho do pixel	25 μm	25 μm
Medição		
Faixa de temperatura do objeto	0...250 °C (utilizada)	-20... +120°C (utilizada)
Exatidão	±2°C ou ±2%	±2°C ou ±2 %

FONTES: OPTRIS (2016), FLIR SYSTEMS (2016).

2.2 Caracterização espectral

A sensibilidade de um sensor em relação ao comprimento de onda da radiação incidente e é obtida pela sua curva de resposta espectral. O procedimento de determinação desta curva é denominado ‘caracterização espectral’ (DINGUIRARD & SLATER, 1999). Esta é importante pois permite conhecer a faixa específica do espectro eletromagnético na qual o sensor opera. A determinação desta curva de resposta espectral ou Função de Resposta Espectral – FRE, pode ser realizada utilizando uma fonte emissora e um sensor já calibrado, comparando a resposta do sensor de referência com a do sensor que se deseja caracterizar. Dessa forma, desde que as medições ocorram nas mesmas condições atmosféricas, geométricas e de iluminação, é possível derivar a curva resposta de espectral. (LIMA FILHO, 2015).

Com isto, a caracterização espectral se utiliza de uma relação matemática entre os parâmetros conhecidos do sensor de referência, condições ambientais e a medição realizada pelo sensor a ser caracterizado. Assim, considerando que as medições com o sensor a ser caracterizado e com o sensor de referência foram realizadas: a) na mesma geometria; b) com os mesmos equipamentos (monocromador, fonte de infravermelho, filtros, etc.); c) nos mesmos parâmetros atmosféricos (que não se alteraram significativamente); e d) que a temperatura da fonte de infravermelho é a mesma, a equação utilizada para a determinação da função de resposta espectral do sensor é:

$$FRE_{sens}(\lambda) = \frac{S_{sens}(\lambda)}{S_{ref}(\lambda)} \cdot FRE_{ref}(\lambda) \quad (1)$$

onde: FRE_{sens} é a função de resposta espectral do sensor a ser caracterizado; $S_{sens}(\lambda)$ é o sinal medido pelo sensor a ser caracterizado; $S_{sens}(\lambda)$ é o sinal medido pelo sensor de referência; e FRE_{ref} é a função de resposta espectral do sensor de referência.

O arranjo experimental envolvido na caracterização espectral conta com: uma fonte de infravermelho (elemento resistivo denominado Globalbar); um monocromador Acton SpectraPro 2500i; um *chopper*, que tem por objetivo impedir (*chopper* fechado) ou permitir (*chopper* aberto) a passagem da radiação eletromagnética da fonte infravermelha e um sensor de referência J15D16 da empresa Judson (JUDSON TECHNOLOGIES LLC, 2002). Além disso, durante as medições, foi utilizado um termo-higromêtro para monitorar as condições de temperatura, umidade, concentração de CO₂ e pressão.

Na caracterização espectral, para cada sensor a ser caracterizado, foram tomados dois conjuntos de medições, um para o sensor a ser caracterizado e outro para o sensor de referência. Cada um dos sensores foi posicionado de modo que o centro da lente fosse iluminado pela saída do monocromador. Foram obtidas medidas duplas (*chopper* aberto e fechado) de 6,5 a 14,0 μm , com intervalo de 0,1 μm , resultando em 76 diferentes comprimentos de ondas.

2.3. Caracterização radiométrica

A caracterização radiométrica objetiva estabelecer uma relação entre os valores radiométricos medidos por um sensor e o fluxo radiante que chega até ele (LIMA FILHO, 2015). Assim, o arranjo experimental típico utiliza uma fonte de radiação infravermelha termal, chamada de Corpo Negro – CN. Em especial um Corpo Negro de Área Extensa possui uma superfície cuja emissividade é conhecida e sua temperatura termodinâmica pode ser ajustada.

O valor da radiância proveniente do CN que chega ao sensor pode ser realizada com a integração da equação de Planck levando-se em consideração a FRE do sensor:

$$L_{sens} = \int_{\lambda_{inicial}}^{\lambda_{final}} \frac{M(\lambda, T_{CN})}{\pi} \cdot \varepsilon_{CN}(\lambda, T_{CN}) \cdot FRE_{sens}(\lambda) \cdot \tau_{atm}(H, T_{amb}, P_{amb}, C_{gases}, d, \lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

onde: L_{sens} é a radiância proveniente do corpo negro que chega ao sensor; T_{CN} é a temperatura do CN; e ε_{CN} é a emissividade do CN.

Deste modo, na caracterização radiométrica foi utilizado um corpo negro de área extensa, modelo SR800 da CI Systems (CI SYSTEMS, 2004), que permite ajuste de temperaturas termodinâmicas entre 10 e 80 °C. Também foi utilizado um termo-higromêtro para monitorar as condições de temperatura, umidade, concentração de CO₂ e pressão, durante as medições.

Nesta caracterização, para cada sensor a ser caracterizado, foram realizadas medições da radiância proveniente do CN. Os sensores A e B foram posicionados perpendicularmente a superfície do CN a uma distância de 1,70 e 1,57 m, respectivamente. A temperatura termodinâmica CN foi ajustada de 10 a 80 °C, de 5 em 5 °C, respeitando-se um intervalo de tempo de 15 minutos entre as coletas para a estabilização da temperatura termodinâmica da superfície do equipamento.

2.4. Caracterização espacial

A caracterização espacial de um sensor permite verificar sua capacidade de “enxergar” e manter a integridade geométrica. Assim, utiliza-se o conceito de EIFOV (*Effective Instantaneous Field of View*) para representar a real resolução do sensor. Esta medida em ângulo representa quanto o sistema sensor resolve efetivamente os detalhes de uma cena (LIMA FILHO, 2015). Para a caracterização espacial de um sensor é utilizada comumente a função transferência de contraste, CTF (*Contrast Transfer Function*), descrita por SCHOTT (2007). Ela permite estabelecer uma relação entre o tamanho real dos objetos e o seu contraste na imagem obtida pelo sensor. Neste caso, o contraste é obtido pela diferença entre os valores máximo e mínimo do sinal na imagem. Assim para a obtenção desses valores utiliza-se o alvo USAF 1951 (APPLIED IMAGE, 2005), acoplado ao corpo negro.

Com isto, para a Caracterização Espacial, o arranjo experimental envolveu, além do corpo negro de área extensa, um alvo padrão USAF 1951, construído no próprio IEAv (LIMA FILHO, 2015). Assim, o sensor a ser caracterizado foi posicionado perpendicularmente, a uma distância conhecida, da superfície alvo, que está fixado ao corpo negro de área extensa.

Para a caracterização espacial, foram obtidas imagens a partir dos sensores a serem caracterizados utilizando o alvo padrão USAF 1951 (APPLIED IMAGE, 2005) acoplado ao corpo negro. A temperatura termodinâmica do corpo negro de área extensa foi ajustada entre 30 e 80 °C, com intervalos de 10 °C

3. Resultados e Discussão

Os resultados dos procedimentos metodológicos de caracterização estão apresentados separadamente nos itens abaixo.

3.1. Caracterização Espectral

De acordo com as especificações dos fabricantes (Tabela 1) os dois sensores caracterizados operam na faixa espectral de 7,5 a 13,0 μm . Assim, teoricamente espera-se que nesta faixa espectral ambos tenham resposta próxima ou igual a 1 e nos valores inferiores a 7,5 μm e superiores a 13 μm , igual a 0.

O sinal do sensor a ser caracterizado, $S_{sens}(\lambda)$ (ver equação 1), para cada comprimento de onda medido, foi calculado pela diferença de temperatura entre a imagens obtidas com o *chopper* aberto e fechado. O sinal do sensor de referência é obtido automaticamente por um sistema de aquisição de dados. Uma vez que a FRE do sensor de referência é conhecida, a FRE do sensor a ser caracterizado é calculada utilizando a equação (1).

As curvas da resposta espectral dos sensores A e B, obtidas através da metodologia especificada no item 2.2, estão representadas no gráfico da Figura 3.

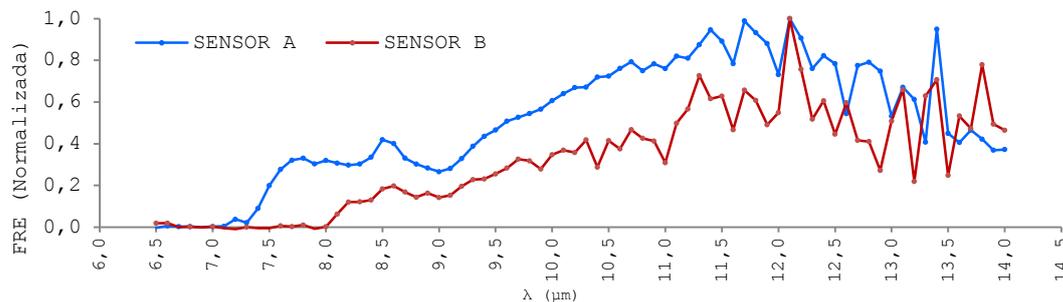


Figura 3. Curvas de resposta espectral do sensor A (linha azul) e sensor B (linha vermelha).

O sensor A apresenta sensibilidade a partir de 7,4 μm . O sensor B passa a detectar o fluxo incidente a partir de 8,1 μm . Ambos apresentam um pico em 8,5 μm , depois decrescem até os 9 μm e passam a apresentar, novamente, um aumento suavizado a partir deste comprimento de onda. No sensor A este aumento segue suave até os 10,8 μm quando se observam ruídos. O sensor B apresenta ruídos a partir dos 10 μm . Em ambos os sensores o ruído permanece até os 14 μm , o maior comprimento de onda medido. Este comportamento pode estar relacionado à presença de pequenas zonas de absorção de H_2O a partir dos 11 μm e de uma larga faixa de absorção de CO_2 que se inicia aos 13 μm , estendendo-se até próximo a 17 μm . Também se observa que a máxima sensibilidade dos dois sensores se situa em 12,1 μm .

3.2. Caracterização Radiométrica

Na caracterização radiométrica, quando possível, são realizadas duas análises: uma envolvendo a diferença de temperatura entre o valor obtido com o sensor e o valor da temperatura termodinâmica ajustada no corpo negro; outra com os valores de radiância, ver equação 2.

Para a análise da diferença de temperatura, é escolhida uma região da imagem em temperatura do CN com maior uniformidade entre os *pixels*. Para esta região é calculada a

média e o desvio padrão dos *pixels*. Em seguida é calculada a diferença de temperatura entre o valor ajustado no CN e a medida pelo sensor;

Ao analisarmos as diferenças de temperatura, ver Figura 4, observa-se que as obtidas para o sensor A foram maiores que as diferenças do sensor B. No que se refere ao sensor A, apenas entre 30°C e 45 °C há diferenças dentro da incerteza de $\pm 2\%$. Para as temperaturas de 65°C, e superiores, as diferenças do sensor A são maiores que as incertezas especificadas pelo fabricante de $\pm 2\%$ ou $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$, ver Tabela 1. O sensor B apresenta variações da ordem de $\pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$, sendo que apenas quando o CN foi ajustado à 10°C houve diferença superior a 2% do valor medido. Todas as diferenças de temperatura oriundas das observações do sensor B ficaram dentro da incerteza especificada de $2\text{ }^\circ\text{C}$. Além disso, vale ressaltar o comportamento sistemático da diferença, em módulo, obtida com sensor A, que se tornam maiores com o aumento da temperatura termodinâmica do corpo negro. No sensor B este efeito não foi observado, sendo que a diferença se manteve sem grande variação.

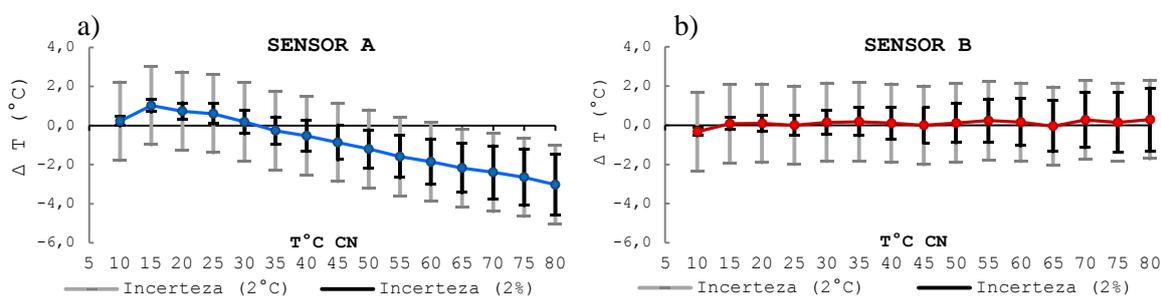


Figura 4. a) Diferença entre valores de temperatura ajustados no CN e medidos pelo sensor A; b) Diferença entre valores de temperatura ajustados no CN e medidos pelo sensor B.

Para contornar as incertezas relativas a emissividade do CN (0,98), na segunda análise, a radiação emitida pelo CN e a radiação medida pelos sensores foram analisadas permitindo verificar o comportamento radiométrico de ambos sensores. Esta foi realizada partir da diferença entre os valores de radiação calculadas com base nas temperaturas medidas pelos dois sensores e a radiação do corpo negro, corrigida pela emissividade do CN e adicionada à radiação do ambiente refletida no CN (Figura 5).

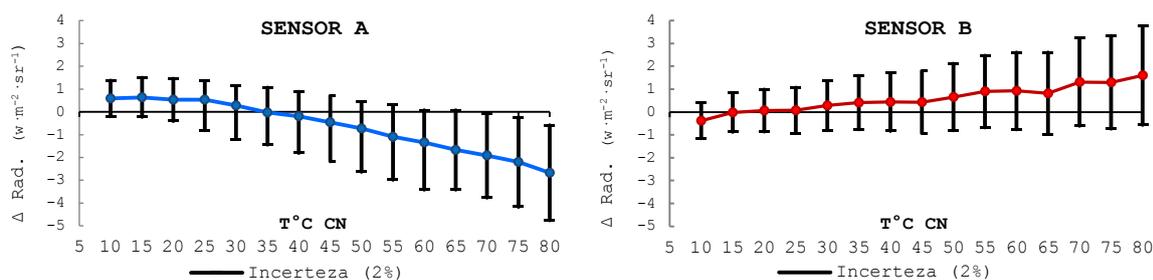


Figura 5. Diferença entre valores de radiação do CN e radiação calculada a partir das temperaturas medidas pelos sensores: a) sensor A e b) sensor B. As incertezas envolvidas nesta análise referem-se a 2% do valor da radiação, conforme especificação dos fabricantes.

O sensor A apresentou diferenças da ordem de $\pm 0,5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ quando o CN foi ajustado com temperaturas de 10 a 45°C, e a partir deste limite os valores medidos foram sempre inferiores à radiação que chegou ao sensor e, conforme o aumento da temperatura do CN, essa diferença ficou ainda mais expressiva. Com a temperatura do CN ajustada ao valor igual ou maior que 70°C observa-se que a diferença foi superior à 2%, sendo assim, superiores a incerteza declarada pelo fabricante. Vale ressaltar que neste experimento só foram consideradas as incertezas relativas dos sensores A e B.

Das variações observadas entre os valores da radiância medida pelo sensor B e aquela que chegou até ele, 87% das diferenças foram inferiores às observadas no experimento do sensor A. Apenas para as temperaturas de 35°C e 40°C as medidas realizadas pelo sensor A foram mais precisas.

Todas as medidas realizadas pelo sensor B ficaram dentro das incertezas especificadas.

3.3. Caracterização Espacial

Os gráficos apresentados nas Figuras 7 e 8 apresentam as curvas de CTF obtidas a partir de medidas do alvo USAF 1951 sobre o corpo negro com a temperatura ajustada em 80°C, realizadas pelos sensores A e B, respectivamente. Entretanto a análise efetuada envolveu as temperaturas de 30 a 80 °C.

O tamanho do pixel do sensor A foi calculado utilizando o número total de pixels (148), que compreende a imagem do alvo de 0,3035 m (tamanho real) a uma distância de 0,75 m do sensor. O tamanho efetivo do pixel calculado foi de 0,002050 m, e a partir deste calculou-se que a frequência de Nyquist para a caracterização do sensor A, sendo 244 ciclos/m. No sensor B o número total de pixels que compreendia a imagem do alvo é 156, à uma distância de 1,57 m da câmera e o valor do tamanho efetivo do pixel 0,001945 m, assim, calculou-se que a frequência de Nyquist para o sensor B é de 257 ciclos/m.

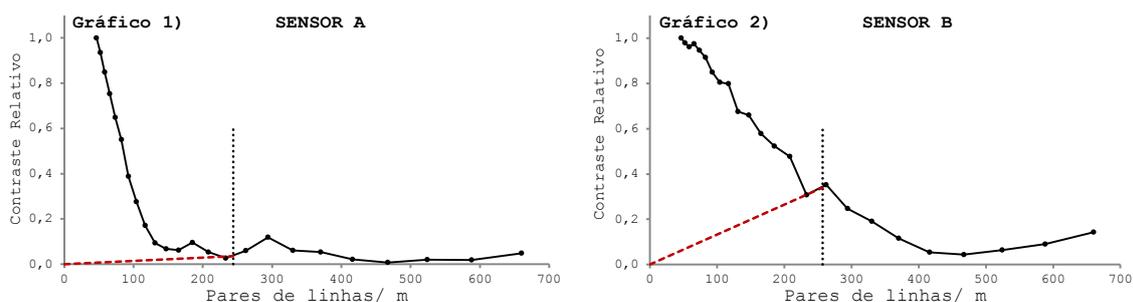


Figura 7. CTF dos sensores A (Gráfico 1) e B (Gráfico 2) (CTF: linha de cor preta, contínua e com pontos; Frequência de Nyquist: linha de cor preta tracejada; AIM: linha de cor vermelha tracejada).

A partir do gráfico 1 da Figura 7 observou-se que todos os elementos de tamanho menor do que o 15º elemento ficaram abaixo do limite da resolução do sensor (frequência de Nyquist), e o 15º foi cortado no alvo por falta de contraste, estando abaixo da menor quantidade de modulação detectável pelo sistema, isto é, o limiar AIM. Assim o 14º elemento foi o último resolvido dentro da limitação de resolução do sistema e com contraste suficiente. Neste elemento cada linha possui aproximadamente 2,4 mm de largura, e como a distância da câmera para o alvo foi de 0,75 m, constatou-se que cada pixel da matriz do sensor A fornece um campo de visada de 0,367° (6,4 mrad).

No gráfico 2 da Figura 7 observa-se que todos os elementos com tamanho menor que o do 15º elemento ficaram abaixo do limite da resolução do sensor (frequência de Nyquist). Com relação ao limite estabelecido pelo contraste que é indicado pelos elementos abaixo da menor modulação detectável pelo sistema, observou-se que o 14º foi o último resolvido pelo sensor. Cada par de linha deste elemento contém aproximadamente 2,4 mm de largura, como a distância da câmera para o alvo foi de 1,57 m, cada pixel da matriz do sensor fornece um campo de visada de 0,175° (3,05 mrad).

4. Conclusões

Na caracterização espectral foi obtida a curva de função de resposta espectral dos dois sensores e se constatou que a máxima sensibilidade nos dois sensores situa-se em 12,1 µm.

Tal informação, de extrema relevância para estudos de sensoriamento remoto termal, não foi disponibilizada por nenhum dos fabricantes destes sensores.

Ao analisar a capacidade radiométrica dos sensores caracterizados constatou-se que para temperaturas de 70°C e superiores o sensor A apresentou incertezas maiores que aquelas especificadas pelo fabricante. As medidas realizadas pelo sensor B ficaram dentro das incertezas especificadas.

O EIFOV dos sensores foi calculado com base na caracterização espacial realizada. Concluiu-se que o sensor A possui um campo de visada efetivo de 0,367° (6,4 mrad) e o sensor B de 0,175° (3,05 mrad). Nas suas respectivas especificações apenas o campo de visada instantâneo dos sensores (IFOV) foi informado, sendo 1,81 mrad para o sensor A e 1,36 mrad para o sensor B. A resolução espacial, no entanto, não depende apenas do IFOV já que o espaçamento entre os sensores e a taxa de amostragem também influenciam nas capacidades de resolução do sensor. Os valores de EIFOV encontrados demonstram a importância dos procedimentos de caracterização a fim de reconhecer as reais capacidades e limitações de um sistema sensor.

Apesar das inconsistências entre as capacidades verificadas e as especificações dos sensores serem significativas, outros procedimentos como a determinação das incertezas envolvidas nas medições, podem ser realizadas para conferir maior precisão na análise.

Referências

ALMEIDA, M. H. **Desenvolvimento de um software para avaliação de desempenho do sistema óptico em equipamento para retinografia digital**. 2007. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Carlos, São Carlos.

APPLIED IMAGE. **USAF 1951**. Rochester, NY, 2005. Disponível em: <[https://www.appliedimage.com/files/8sYYLo/USAF 1951 Test Target T-20_v1-04.pdf](https://www.appliedimage.com/files/8sYYLo/USAF%201951%20Test%20Target%20T-20_v1-04.pdf)>. Acesso em: 11 julho 2016.

CI SYSTEMS. **SR-800 extended area blackbody**. Simi Valley, 2004

DINGUIRARD, M.; SLATER, P.N., Calibration of space-multispectral imaging sensor: a review, **Remote Sensing of Environment**, v. 68, p. 194-205. 1999

FLIR SYSTEMS. **THE FLIR A310 Automation Thermal Camera**. Disponível em: <<http://www.flir.eu/automation/display/?id=41099>>. Acesso em 20 de maio de 2016.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2011.

JUDSON TECHNOLOGIES LLC. **Mercury cadmium telluride detectors**. Montgomeryville, 2002

LIMA FILHO, G. M. de. **Metodologia de caracterização de sistema eletro-óptico para missões de busca e patrulha marítima**. 2015. 106f. Dissertação de mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

OPTRIS, GMBH. **Infrared Cameras: The most portable infrared online cameras in the world**. Disponível em: <http://www.optris.com/pi-lightweight-netbox?file=tl_files/pdf/Downloads/Infrared%20Cameras/PI_Brochure.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2016

PONZONI, F. J.; ZULLO JR., J.; LAMPARELLI, R. A. C. **Calibração absoluta de sensores orbitais: conceituação, principais procedimentos e aplicação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. v. 1, 64 p.

SCHOTT, J. **Remote sensing: the image chain approach**. New York: Oxford University Press, 2007.