

# AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA FLIR EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA

## RANGE PERFORMANCE EVALUATION OF A FLIR SYSTEM

O Maj Av Raphael Efísio da Silva concluiu o COAv em 2004 e é piloto da Aviação de Caça. Possui especialização em Análise de Ambiente Eletromagnético pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2012); MBA em Gestão Pública e Emprego da Força pela Universidade da Força Aérea (2016). É mestre em Ciências e Tecnologias Espaciais pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2018).

Contato: efisiores@fab.mil.br



O Maj Esp Fot Robert Cardoso Fernandes de Almeida concluiu o CFOE em 2007. É técnico em Informação de Reconhecimento (TIR) pelo 1º/10º GA. Possui especialização em Geoprocessamento pela Universidade de Brasília (2009), especialização em Análise de Ambiente Eletromagnético pelo ITA (2014). Mestre em Ciências e Tecnologias Espaciais pelo ITA (2016) e MBA em Gestão Pública e Emprego da Força pela Universidade da Força Aérea (2018).

Contato: robertocfa@fab.mil.br



O Dr. Alvaro José Damião concluiu a graduação em Física (1977), mestrado em Física (1982) e doutorado em Física (2002), todos pela Universidade de Campinas (UNICAMP). Foi Pesquisador Titular III do Instituto de Estudos Avançados. Foi coordenador da Área de Física e Matemática Aplicadas do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais (PG-CTE/ITA). É professor dos PG-CTE nas áreas de Física e de Sensores.



### RESUMO

A otimização da utilização de Sistemas Eletro-Ópticos Termiais em operações aéreas demanda sua caracterização em termos de sensibilidade e resolução espacial. Com isso, é possível determinar o desempenho em distância do equipamento. Para a determinação das características específicas do Imageador Termal, é fundamental a identificação de suas figuras de mérito, tais como: o MRTD (*Minimum Resolvable Temperature Difference*), MTF (*Modulation Transfer Function*), NETD (*Noise Equivalent Temperature Difference*) e SiTF (*Signal Transfer Function*). Ao se considerar a utilização de um sistema termal aeroembarcado em helicópteros para ações de Busca e Salvamento, neste trabalho teve-se por objetivo propor uma metodologia de caracterização e avaliação do desempenho em distância. Para tanto, foi estudado um imageador termal, modelo FLIR STAR SAFARI III, utilizando apenas um Corpo Negro e softwares de processamento de imagens para a parametrização das figuras de mérito.

**Palavras-Chave:** Sistemas Eletro-Ópticos Termiais, Caracterização e Desempenho em Distância.

### ABSTRACT

The use of Thermal Electro-Optical Systems in air operations demands its characterization in terms of sensitivity and spatial resolution. In this way, it is possible to determine the equipment's range performance. In order to determine the specific characteristics of the Thermal Imager, it is essential to identify figure of merit such as MRTD (*Minimum Resolvable Temperature Difference*), MTF (*Modular Transfer Function*), NETD (*Noise Equivalent Temperature Difference*) and SiTF (*Signal Transfer Function*). Based on use of an aerial thermal system employed in helicopters for Search and Rescue actions, the aim in this work was to propose a methodology for characterization and evaluation of range performance. To do this, a FLIR STAR SAFARI III model was studied, using only a black body and image processing software for figures of merit's parameterization.

**Keywords:** Thermal Electro-Optical Systems, Characterization and Range Performance.

## I – INTRODUÇÃO

Dentre os diversos equipamentos que auxiliam a consecução das missões atribuídas à FAB [1], os sistemas eletro-ópticos (EO) termais são fundamentais para atividades militares em ambientes noturnos ou sob condições atmosféricas restritivas para o alcance visual. Os FLIR (*Forward Looking Infrared*) (Figura 1) são modernos sistemas de câmeras indispensáveis para aplicações operacionais. O referido imageador contribui para a detecção, reconhecimento e identificação de alvos em que fatores como distância e ambiente de fundo prejudicam a percepção visual [2].



Figura 1 – Sistema FLIR STAR SAFIRE III instalado em uma aeronave H-36.  
Fonte: site defesa.net.

Para o aprimorado emprego destes sistemas por parte do operador, é fundamental que, durante todo o ciclo de vida útil do imageador termal, esses dispositivos sejam periodicamente caracterizados e avaliados quanto ao seu desempenho [3]. Isso permite verificar a eficiente operação do mesmo e analisar se está em acordo com os critérios de funcionamento estabelecido pelo fabricante da câmera.

Como exemplo, considerando a ação de força aérea de Busca e Salvamento [1], qual seria a distância considerada, em termos de planejamento, para que um operador de FLIR no helicóptero H-36 [4] pudesse identificar um bote salva-vidas de um avião após uma ejeção em alto-mar?

Mediante o questionamento anterior, no presente estudo teve por objetivo apresentar um método de caracterização e avaliação de desempenho em distância de um equipamento FLIR, por meio de *softwares* específicos para o processamento de imagens, utilizando apenas um Corpo Negro (CN) para geração dos dados para análise.

Tal técnica é o estado da arte no momento, principalmente no que diz respeito à caracterização de câmeras embarcadas em satélites [5].

## II – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No que diz respeito à qualidade da imagem, a resolução espacial e a sensibilidade são elementos determinantes para caracterizar o desempenho do sistema [6]. Enquanto a primeira característica implica no conhecimento do menor detalhe identificável, a segunda representa a menor diferença de sinal (temperatura) detectável pela câmera termal, ambos para uma dada distância [3].

Ao se considerar dispositivos eletro-ópticos termais como o FLIR, os elementos fundamentais de caracterização que expressam a resolução e sensibilidade são: MRTD (*Minimum Resolvable Temperature Difference*), MTF (*Modulation Transfer Function*), NETD (*Noise Equivalent Temperature Difference*) e SiTF (*Signal Transfer Function*). Por meio desses dados, é possível avaliar o desempenho do equipamento e, conseqüentemente, identificar parâmetros de alcance na identificação de alvos na superfície [2][6].

A Função de Responsividade representa a resposta do sistema detector à variação de um sinal entrada. A Função de Transferência de Sinal, do inglês *Signal Transfer Function* (SiTF), consiste na parte linear de uma Função de Responsividade da câmera termal. Essa característica é determinada pela tangente do ângulo na região linear da SiTF como função da variação da temperatura [3][6].

A Diferença de Temperatura Equivalente ao Ruído, do inglês *Noise Equivalent Temperature Difference* (NETD), representa a sensibilidade de um sistema imageador. Essa característica é definida como a diferença de temperatura, entre um alvo e o cenário de fundo, necessária para gerar um sinal que reconhecido pelo sensor da câmera [3].

Ao se utilizar recursos de *software* para processamento da imagem, o NETD pode ser obtido pelo cálculo do desvio padrão da variação temporal do nível digital (ND) dos pixels obtida pela análise estatística de vários quadros do imageamento de um alvo estático [3]. Tal parâmetro pode ser descrito conforme a equação:

$$NETD = \frac{\sigma_{TVH}}{SiTF} \quad (1)$$

onde:

$\sigma_{TVH}$  – representa o ruído aleatório tridimensional (eixos verticais e horizontais da matriz de imagem mais a variação temporal – TVH).

A Função de Transferência de Modulação, MTF, representa a característica de resolução de imagem, por meio da qual um sistema eletro-óptico consegue perceber pequenos sinais ou detalhes, com suficiente contraste, em elementos de uma cena de imageamento [7]:

$$MTF(f_x) = \frac{ND_{m\acute{a}x}(f_x) - ND_{m\acute{i}n}(f_x)}{ND_{m\acute{a}x}(f_x) + ND_{m\acute{i}n}(f_x)} \quad (2)$$

onde:

NDmáx: nível digital máximo em determinada frequência espacial ( $f_x$ ); e

NDmín: nível digital mínimo em determinada frequência espacial ( $f_x$ ).

A Frequência Espacial é uma grandeza física utilizada para caracterizar espacialmente as dimensões do alvo. Pela conceituação de modulação,  $f_x$  representa a taxa com que a imagem varia entre os níveis digitais máximos e mínimos [3][8].

O MRTD é considerado um parâmetro fundamental de caracterização de câmeras termais, pois essa única figura de mérito representa o desempenho em resolução espacial e sensibilidade [6]. Ele pode ser obtido pela expressão:

$$MRTD(f_x) = K \frac{NETD}{MTF(f_x)} \quad (3)$$

onde:

K: constante de proporcionalidade (representa características específicas da câmera, como: óptica, resposta espectral e radiométrica, dentre outros). Seu valor mínimo é um ( $K=1$ ) [3];

MTF: Função de Transferência de Modulação do Sistema; e

NETD: Diferença de Temperatura Equivalente ao Ruído.

Como os dados específicos de K – equação (3) – são de difícil parametrização [3][6], foi atribuído o valor 1 (um). Como esse não possui valores inferiores a 1, o MRTD estimado permite determinar valores em distância adequados para planejamento de missões em que se utilize imageadores como o FLIR [3].

O limite de resolução espacial de uma câmera é determinado pela frequência de Nyquist ( $f_N$ ), que é identificada como a razão do total de pixels da matriz do detector por duas vezes o valor do campo de visão (FOV – *Field of View*) referente à óptica do equipamento [8].

Como fator de desempenho em distância, considerou-se o Critério de Johnson. Esse critério considera que o alcance de identificação é aquele em que o alvo pode ser visualmente e precisamente descrito pelo observador por meio de um sensor eletro-óptico [9-10].

Pela equação (4) é possível converter  $f_x$  em distância de identificação ( $R_{ident}$ ), de modo a obter um MRTD em termos de alcance [9-10]:

$$R = \frac{D_{alvo} \cdot f_x}{PPx} \quad (4)$$

onde:

Dalvo: dimensão de um alvo em um formato quadrado (em metros); e

PPx: pares de pixel por dimensão do alvo, conforme o Critério de Johnson[9-10]. No caso da identificação  $PPx=6$ .

A Figura 2 apresenta exemplo de apresentação em uma tela de operador de FLIR de um bote no mar na distância de identificação.



Figura 2 – Exemplo de apresentação de um bote na tela do operador de um FLIR na distância de identificação.

Fonte: FLIR Systems.

A atenuação atmosférica do sinal do alvo, em função da distância entre o objetivo (ou cena imageada) e a câmera é determinada conforme a equação [8]:

$$\Delta T = \Delta T_0 \cdot e^{[-\sigma R_{ident}]} \quad (5)$$

onde:

$\Delta T_0$ : diferencial de temperatura entre alvo e cenário de fundo em que a câmera estaria praticamente na mesma posição do alvo; e

$\sigma$ : coeficiente de transmitância, sendo  $\sigma=0,2$  km<sup>-1</sup> para condições favoráveis de transmitância e  $\sigma=1$  km<sup>-1</sup> para condições limitadas de transmitância.

### III – MATERIAIS E MÉTODOS

Na pesquisa foi utilizado uma câmera termal FLIR STAR SAFIRE III, que equipa os helicópteros H-36 do Comando de Aviação de Exército (CAvEx) em Taubaté-SP. A Tabela I apresenta as especificações fornecidas pelo fabricante [4]:

Tabela 1 - Dados Técnicos do Sistema Star Safire III.

DADOS GERAIS	
Sensor Termal	FPA Refrigerada
Resolução Termal	640 X 480
Resolução em ND	8 bits (0 a 255)
FOV Termal	25° X 19°
Faixa Espectral	3 – 5 $\mu$ m
INTERFACE	
Vídeo Analógico	NTSC/PAL

No estudo foram analisadas as características da câmera operando no FOV mais amplo (WFOV: 25° por 19°) [4].

A coleta dos parâmetros da câmera foi realizada no hangar de helicópteros do CAVEx (Figura3). As caracterizações consistiram na aquisição e análise dos níveis digitais (ND) dos pixels das imagens. Para tanto, foi utilizado um Corpo Negro com as seguintes características: modelo SR800, de 11 pol., emissividade de 0,97, da CI Systems. A temperatura ambiente média foi de 21°C. A faixa de temperatura absoluta (Tabs) avaliada foi de 14°C a 36°C, em intervalos de 2°C. Em cada Tabs, foram analisadas 150 imagens.



Figura 3 – Configuração montada para as medições. A foto apresenta um helicóptero com FLIR instalado visualizando um Corpo Negro.

O processamento das imagens foi realizado por meio dos *softwares* de código aberto mageJ, para identificação de valores de SiTF e NETD, e SFRMAT3, para a obtenção da MTF [11]-[13].

No estudo foram utilizados dois alvos de alumínio, que foram acoplados na frente do Corpo Negro de área extensa (Figura 4), um quadrado vazado e outro padrão Quatro Barras com quatro frequências espaciais. Também foi utilizado um termopar acoplado à parte inferior de cada alvo para obter a temperatura e comparar com a do CN.



Figura 4 – Alvos utilizados para aquisição das imagens (padrão 4 Barras a esquerda e quadrado vazado a direita), com um termopar acoplado à base dos mesmos.

A MTF representativa das componentes vertical e horizontal foi obtida por meio do imageamento do alvo quadrado, cujas dimensões são 30 cm por 30 cm com uma área quadrada vazada no centro de 15 cm por 15 cm inclinada 6° em relação ao plano vertical da placa. Essa angulação foi considerada nos cálculos realizados pelo programa SFRMAT3, que utiliza o método do degrau inclinado (*Slanted-Edge Method*) para a caracterização da MTF [12]-[13].

A Figura 5 apresenta as áreas selecionadas na imagem obtida da composição Corpo Negro e alvo quadrado para análise da MTF vertical e horizontal. A dimensão da área de análise foi um retângulo de 130 pixels por 105 pixels, sendo esse os valores máximos possíveis para identificação da MTF pelo método *Slanted-Edge* [13].

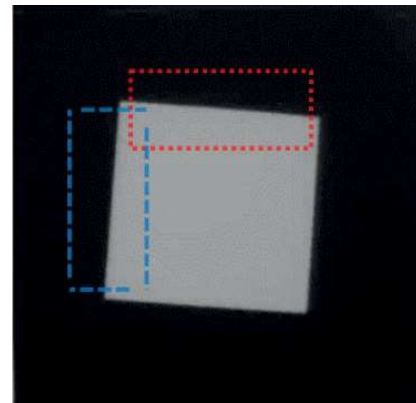


Figura 5 – Imagem do FLIR do alvo quadrado. Observa-se retângulos de 130 pixels por 105 pixels para análise da MTF. Em vermelho representa a avaliação para MTF vertical e em azul para MTF horizontal.

O alvo padrão Quatro Barras possuiu dimensões de 30 cm por 30 cm com quatro padrões de furação representando diferentes frequências espaciais. As medidas totais da aresta da composição das barras são: 98 mm, 40 mm, 25 mm e 21 mm. Esse alvo foi utilizado para confirmar se, nas distâncias a serem calculadas, seria possível identificar os padrões de Quatro Barras para, assim, confirmar a efetividade das medições [2][5]. Ou seja, a uma determinada distância de identificação, o operador do sistema deve possuir a capacidade de distinguir as quatro barras em uma frequência espacial específica.

#### IV– RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi identificada a resposta termal da câmera FLIR conforme gráfico da Figura6. O valor representativo para SiTF, ou seja, o coeficiente angular da reta em azul correspondente a parte linear da curva, foi de 19 ND/°C com um valor de R2 de 0,9997.

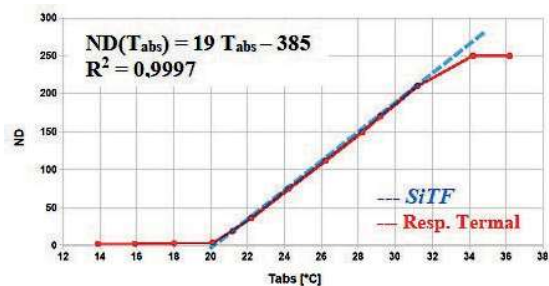


Figura 6 – SiTF caracterizada da câmera.

Foram obtidos dados de NETD para a faixa de temperaturas analisadas (Figura 7).

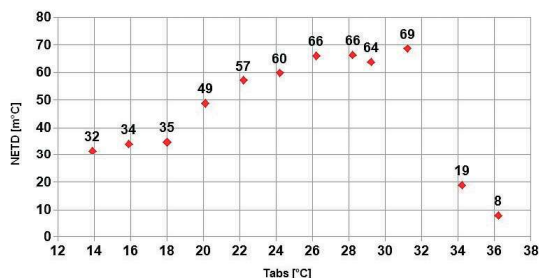


Figura 7 – NETD caracterizada na câmera.

Os resultados da Figura 7 permitem determinar uma NETD característica para a câmera de 0,069 °C (para Tabs = 31°C). Esse valor representa o máximo de sensibilidade obtido na faixa de temperatura estudada, ou seja, representa a pior condição dentro da região linear da curva de resposta termal do equipamento (SiTF – Figura 6).

A Figura 8 apresenta os resultados da MTF vertical e horizontal representativas da câmera. Observa-se que o desempenho de modulação espacial do FLIR é melhor verticalmente, pois apresenta valores de modulação superiores à MTF horizontal na região de 0,4 mrad-1 a 0,75 mrad-1.

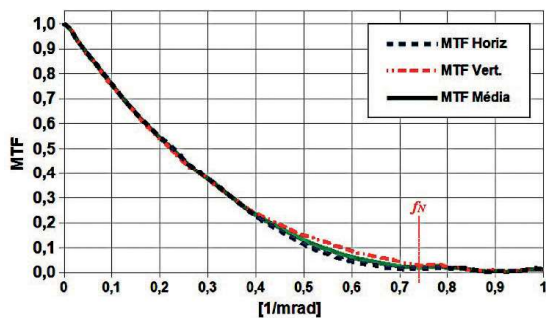


Figura 8 – MTF caracterizada câmera.

A Figura 8 apresenta a frequência de Nyquist,  $f_N = 0,74$  mrad-1, que indica o limite de resolução. Com isso, para o cálculo do MRTD estimado para o FLIR, não foram apresentados dados de frequência espacial ( $f_x$ ) superiores a  $f_N$ .

A Figura 9 apresenta os dados de desempenho em distância de identificação da câmera. Como exemplo, foi considerado um alvo de

dimensões de 2,3 m por 2,3 m (alvo padrão conforme STANAG 4347 [10]) com um diferencial de temperatura de 10 °C em relação ao cenário de fundo ( $\Delta T = 10^\circ C$ ). Foi considerada uma atmosfera com condições de máxima transmitância (ou transmitância favorável).

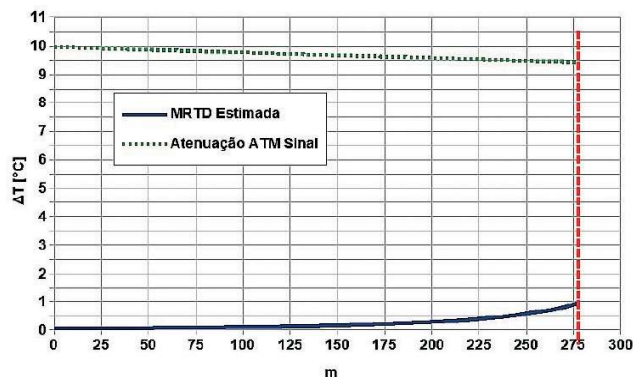


Figura 9 – Desempenho em distância de identificação.

Na Figura 9, a curva tracejada em verde representa a atenuação atmosférica do sinal em função da distância entre alvo e câmera (5). Como a atenuação é mínima para uma pequena distância, esta parece ser linear. Em função dessa atenuação do sinal do alvo não interceptar a curva de MRTD estimada (Figura 9), o valor da distância de identificação de 277 m foi a máxima obtida. Esse alcance foi limitado pela capacidade de resolução espacial da câmera, para o campo de visão (FOV) mais amplo do FLIR.

Para avaliar a conformidade nas medições, foi utilizado o alvo padrão 4 Barras com dimensões de 40 mm por 40 mm (alvo da Figura 4). O diferencial de temperatura ajustado foi de  $\Delta T = 1^\circ C$ . A Figura 10 apresenta o desempenho em distância de identificação para o alvo considerado.

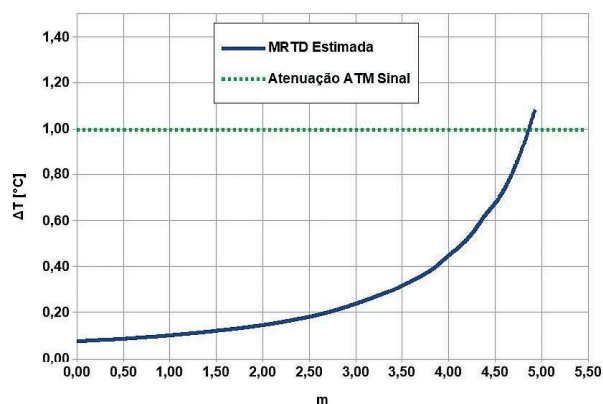


Figura 10 – Alcance para um alvo de 40 mm por 40 mm.

A interceptação da atenuação atmosférica do sinal do alvo com a MRTD estimada apresentou a limitação da sensibilidade de diferenciação termal da câmera, que foi de 4,8 m (Figura 10).

Foi obtida uma imagem termal do alvo de 40 mm por 40 mm, posicionado a 5 m da câmera FLIR (Figura 11).

Apesar de a distância ser 0,2 m além do limite de sensibilidade termal e resolução espacial da câmera, foi possível distinguir as 4 barras como uma distância de identificação. Esse fato pode estar associado ao fator K, conforme apresentado em (3), que permitiu uma melhoria de 5% no desempenho em alcance do equipamento imageador.

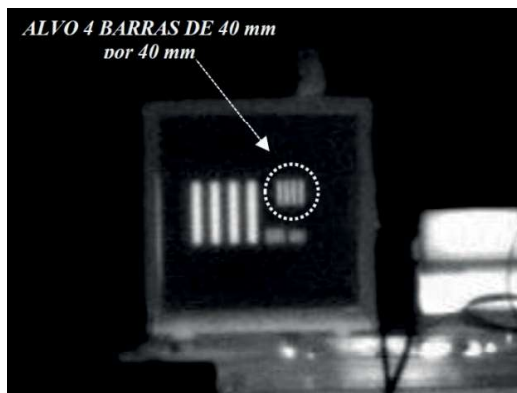


Figura 11 – Imagem termal do alvo padrão 4 barras de 40 mm por 40 mm posicionado a 5 m da câmera FLIR.

## V – CONCLUSÃO

No presente estudo foram determinados, a partir de medições em campo, os parâmetros SiTF, NETD e MTF de uma câmera FLIR termal, utilizando *softwares* específicos para processamento de imagens de um Corpo Negro.

Por meio desses parâmetros caracterizados de SiTF, NETD e MTF, foi possível traçar dados da MRTD estimada em função da distância de acordo com as dimensões e diferencial de temperatura de um alvo de interesse.

Com isso, respondendo ao questionamento mencionado na Introdução, o FLIR do H - 36 pode identificar um bote salva-vidas de 2,3 m por 2,3 m, à uma temperatura de 10 °C acima da temperatura do mar, à distância de 277 m. Importante observar que o alcance obtido foi estimado para o campo mais amplo de abertura (FOV) da câmera, no caso WFOV.

Pelos resultados obtidos, foi possível avaliar que o método utilizado no estudo se mostrou eficiente para a avaliação das características e do desempenho de uma câmera termal, o que pode contribuir com o planejamento de operações aéreas de Busca e Salvamento em alto-mar. Para tanto, a utilização de apenas um Corpo Negro e *softwares* para análise de imagens permitem verificar as condições de funcionamento e desempenho de sistemas de detecção como o FLIR STAR SAFIRE III do helicóptero H - 36.

## REFERÊNCIAS

[1] Brasil, Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica, **DCA 1-1 Doutrina Básica da Força Aérea Brasileira**. 2012.

[2] HOLST, G. C. **Electro-optical Imaging System Performance**. 5nd ed. Bellingham: SPIE, 2008.

[3] CHRZANOWSKI, K. **Testing Thermal Imagers. Practical Guide**. Military University of Technology. 00-908. Warsaw, Poland. 2010.

[4] FLIR. **STAR SAFIRE III: Operator's Manual**. FLIR Systems. Wilsonville. USA. 2009.

[5] KAMECHE, M.; BENMOSTEFA, S. **In-flight MTF stability assessment of ALSAT-2A satellite**. *Advances in Space Research*, v. 58, n. 1, p. 117-130, 2016.

[6] CHRZANOWSKI, K. **Radiometry in Military Applications**. *Proc. of SPIE*, Vol 4517. 2001.

[7] BOREMAN, G. D. **Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems**. Bellingham: SPIE, 2001. 110 p. SCHOTT, J. R. *Remote Sensing: The Image Chain Approach*. New York: Oxford University Press. 2007.

[8] JOHNSON, J. **Analysis of Image Forming Systems**. *Image Intensifier Symposium*. Fort Belvoir, VA, 1958. p 244-273.

[9] UNITED STATES. North Atlantic Treaty Organization. Military Agency for Standardization. *Standardization Agreement: Definition of Nominal Static Range Performance for Thermal Imaging Systems*. **STANAG N° 4347**. 1995.

[10] RASBAND, W.S., **ImageJ User Guide**. 2012. Disponível em: <<https://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/user-guide.pdf>> Acesso em 11fev. 2018.

[11] BURNS DIGITAL IMAGING. **SFRMAT3: SFR analysis cameras and scanners**. 2016. Disponível em: <<http://burnsdigitalimaging.com/software/sfledge-and-sfrmat3/>>. Acesso em 20set. 2017.

[12] SANTOS, H. K.; DAMIÃO, A. J. **Avaliação da MTF da Câmera do Quadricóptero Phantom 4**. *SIGE 2017*. p. 40-41. 2017.