

Efeito do Controle Automático de Ganho na Caracterização e Análise do Desempenho em Distância de um Imageador Termal

Raphael Efísio da Silva^{1,2}, Augusto Cezar Gomes dos Santos^{1,2}, Ruy Morgado de Castro^{1,2}, Alvaro José Damiao^{1,2}

¹Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos/SP – Brasil

²Instituto de Tecnologia de Aeronáutica (ITA), PPGAO, São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – Para a utilização de Sistemas Eletro-Ópticos Termiais em operações aéreas de busca e salvamento é preponderante que se saiba como determinar as distâncias críticas de detecção. Para que seja possível a identificação destas distâncias, faz-se necessário a determinação de 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*). Porém, tais dados exigem que o Controle Automático de Ganho (AGC – *Automatic Gain Control*) seja desligado, o que se torna inviável em diversos equipamentos comerciais. Pensando nesta inviabilidade técnica, o presente estudo analisou a influência da temperatura de referência de um segundo Corpo Negro durante a avaliação das características citadas e, conseqüentemente, avaliou o desempenho em distância de detecção para comparação.

Palavras-chave – Controle Automático de Ganho, Figuras de Mérito, Desempenho em Distância de Detecção.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas eletro-ópticos (EO) termiais, especificamente os denominados FLIR (*Forward Looking Infrared*), são fundamentais para atividades militares em ambientes noturnos ou condições atmosféricas restritivas para o alcance visual. Esses equipamentos demonstram-se essenciais na realização de missões de busca e salvamento, pois permitem identificar um naufrago, que na imagem representa uma pequena dimensão, desde que este tenha determinado diferencial de temperatura em relação ao cenário [1].

Diante da vantagem operacional permitida pela utilização do FLIR, é fundamental que, durante todo o ciclo de vida útil do sistema, esses imageadores termiais sejam caracterizados e avaliados quanto ao seu desempenho em distância [2]. Desta forma, é possível identificar dados como alcance de detecção, de modo a contribuir para o planejamento de operações aéreas como a busca ou resgate [3]. Outra viabilidade consiste na manutenção de um histórico de medições, de modo a avaliar a degradação do equipamento.

Ao se considerar dispositivos eletro-ópticos termiais, as figuras de mérito 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*) [4]. Por meio desses dados, avalia-se o desempenho do equipamento, sendo possível identificar parâmetros de alcance de detecção de alvos na superfície [2][5].

R. E. Silva, raphaeléfisio@gmail.com; A. C. G. Santos, augusto.cezar@eb.mil.br; R. M. Castro, rmcastro@ieav.cta.br; A. J. Damiao, damiao@ieav.cta.br.

Entretanto, ao se realizar a caracterização do dispositivo EO termal por processamento de imagens, a identificação dos parâmetros pode ser influenciada pelo efeito do Controle Automático de Ganho (AGC), de modo a apresentar dados alterados para maximizar a visualização, e, conseqüentemente, determinar informações diferentes de alcance [2].

Mediante o exposto, no presente estudo avaliou-se avaliar, com auxílio de softwares específicos para o processamento de imagens, as principais figuras de mérito de um FLIR, utilizando dois Corpos Negros para a comparação do efeito do AGC. Com base nos parâmetros obtidos, foi possível identificar, graficamente, os desempenhos em distância de detecção, bem como propor uma melhor temperatura de análise de modo a diminuir o efeito do controle de ganho nas medições para caracterização do equipamento.

Na seção II apresenta-se as principais informações referentes aos dados de caracterização da câmera termal bem como o critério de resolução utilizado para o desempenho em distância de detecção. Na seção III aborda-se como foram realizadas as medições de um FLIR, aer embarcado em um helicóptero militar. Nesta parte do trabalho, foi considerado o efeito do controle automático de ganho (AGC – *Automatic Gain Control*) na aquisição de imagens, bem como a análise da variação de um segundo Corpo Negro (CN) com determinadas temperaturas. A seção IV discute-se os dados dos parâmetros obtidos, bem como os resultados das distâncias para as variações de temperatura do segundo CN. Por fim, na seção V conclui-se a apresentação da pesquisa com os resultados obtidos, apresentando a melhor temperatura mais adequada a ser ajustado no segundo CN, para caracterização do sistema termal.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A identificação da resolução e sensibilidade de dispositivos eletro-ópticos termiais são essenciais para determinação da qualidade da imagem. Enquanto a primeira característica implica no menor detalhe espacial identificável, a segunda representa a menor diferença de sinal detectável pela câmera termal, ambos para uma dada distância. Estes dois parâmetros são representados pelas seguintes figuras de mérito: SiTF, NETD, MTF e MRTD.

A função de responsividade representa a resposta do sistema detector à variação de um sinal entrada. Ela permite identificar informações de ganho, linearidade e saturação [1].

A *SiTF*, do inglês *Signal Transfer Function*, consiste na parte linear de uma função de responsividade do sistema detector da câmera termal, que nestes casos pode ser fornecida em tensão (V) ou níveis digitais (ND).

Conforme apresentado na Fig. 1, o algoritmo utilizado para a determinação do *SiTF* considera N temperaturas (T_i) e os respectivos valores dos níveis digitais (ND_i) da região linear da função responsividade:

$$SiTF = \frac{N \sum_{i=1}^N ND_i T_i - \sum_{i=1}^N ND_i \sum_{i=1}^N T_i}{N \sum_{i=1}^N (T_i)^2 - (\sum_{i=1}^N T_i)^2} \quad (1).$$

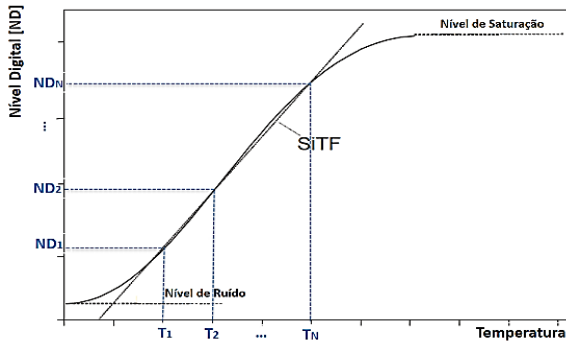


Fig.1. Representação de uma função de responsividade e *SiTF*.

Por se tratar de uma medida estatística, o *SiTF* médio de todos os *pixels* deve ser dados pelas relações (2) e (3) a seguir, em que N representa o total de *SiTF* medidas:

$$SiTF_{média} = \frac{\sum_{i=1}^N SiTF_i}{N} \quad (2), \text{ e}$$

$$\sigma_{SiTF}^2 = \frac{N \sum_{i=1}^N (SiTF_i)^2 - (\sum_{i=1}^N SiTF_i)^2}{N(N-1)} \quad (3).$$

Uma das figuras de mérito referente ao ruído, para as câmeras termais, é a diferença de temperatura equivalente ao ruído (*NETD*) que representa a sensibilidade de um sistema imageador. Essa sensibilidade é definida como a diferença de temperatura, entre um alvo e o cenário de fundo, necessária para gerar uma relação sinal ruído unitária (relação sinal-ruído superior a 1) [1].

Quando a análise para obtenção do *NETD* é realizada por processamento de imagens, é necessário que sejam avaliadas um mínimo de 100 quadros ou *frames* para desconsiderar o efeito de ruído temporal (presente em baixas frequências) provocado pela gravação do imageador [1][5].

O *NETD* pode ser obtido pelo cálculo do desvio padrão da variação temporal do nível digital (ND) dos *pixels*, pela análise estatística de vários quadros do imageamento de um objeto estático [2]:

$$NETD = \frac{\sigma_{TVH}}{SiTF} \quad (4),$$

onde σ_{TVH} representa o ruído aleatório tridimensional (eixos verticais e horizontais da matriz de imagem mais a variação temporal - TVH) [5].

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 detalhes, com suficiente contraste, em elementos de uma cena de imageamento [6]:

$$MTF(f_x) = \frac{ND_{máx}(f_x) - ND_{mín}(f_x)}{ND_{máx}(f_x) + ND_{mín}(f_x)} \quad (5),$$

onde $ND_{máx}$ e $ND_{mín}$ representam, respectivamente, o nível digital máximo e mínimo para determinada frequência espacial (f_x).

A frequência espacial é uma grandeza física utilizada para caracterizar espacialmente as dimensões do objetivo. Pela conceituação de modulação, f_x representa a taxa com que a imagem varia entre os níveis digitais máximos e mínimos [1][2].

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 [1][4][5]. Ele pode ser obtido pela expressão:

$$MRTD(f_x) = K \frac{NETD}{MTF(f_x)} \quad (6),$$

onde:

K – constante de proporcionalidade (representa características específicas da câmera, como: óptica, resposta espectral e radiométrica, dentre outros.) Seu valor mínimo é um ($K=1$) [1][5].

Como os dados específicos de K – (6) – são de difícil parametrização [1][5], foi atribuído o valor 1 (um). Desta forma, o *MRTD* estimado apresentou valores em distância adequados para planejamento de missões em que se utilize imageadores como o FLIR.

A Frequência de Nyquist, ou seja, a restrição óptica do sistema estudado, pode ser calculada da seguinte forma [7]:

$$f_N [mrad^{-1}] = \frac{n_{pixels}}{2FOV [mrad]} \quad (7),$$

onde:

n_{pixels} – número de *pixels* da matriz do detector (vertical ou horizontal); e

FOV – *Field of View* (campo de visão) consiste no ângulo sólido permitido pela óptica do sistema imageador (vertical ou horizontal).

Para o desempenho em distância, foi considerado o Critério de Johnson. Esse critério determina o alcance de detecção como aquele em que uma mínima dimensão de um alvo pode ser apresentada ao observador utilizando um sensor eletro-óptico [1][8].

Conforme (8), é possível converter f_x em distância de detecção (R_{det}), de modo a obter um *MRTD* em termos de alcance [1][5][8]:

$$R_{det} = \frac{D_{alvo} \cdot f_x}{PP_{det}} \quad (8),$$

onde:

D_{alvo} - dimensão de um alvo em um formato quadrado (em metros); e

PP_{det} - par de *pixel* por dimensão do alvo. Conforme o Critério de Johnson para detecção [8][9]: $PP_{det} = 1$.

Para se calcular o decréscimo do diferencial de temperatura ΔT entre o alvo de interesse e seu cenário de fundo, ou seja, a atenuação atmosférica do sinal do alvo, de acordo com determinada condição atmosférica (favorável ou limitada) [7]:

$$\Delta T(R_{ident}) = \Delta T_0 \cdot e^{[-\sigma R_{ident}]} \quad (9),$$

onde:

ΔT_0 -diferencial de temperatura entre alvo e cenário de fundo em que a câmera estaria praticamente na mesma posição do alvo; e

σ - coeficiente de transmitância, sendo $\sigma = 0,2 \text{ km}^{-1}$ para condições favoráveis de transmitância e $\sigma = 1 \text{ km}^{-1}$ para condições limitadas de transmitância.

Em termos de processamento de imagem, o AGC de um dispositivo EO garante que os níveis digitais da cena imageada estejam dentro da mesma faixa de responsividade. A qualidade da imagem é mantida mediante o controle constante de contraste da cena captada pelo FOV da câmera. Com isso, o efeito do AGC é influenciado pela intensidade do cenário de fundo e intensidade ou localização do alvo. Para uma maior fidelidade durante uma caracterização, o ideal seria que o ganho fosse inalterado durante as medições. Quando o dispositivo em estudo não possibilita desativar o controle automático de ganho, é necessário apresentar uma nova fonte de sinal (um Corpo Negro, por exemplo), de modo a manter uma mínima variação dos níveis digitais pelo efeito do AGC [2].

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa utilizou uma câmera termal FLIR STAR SAFIRE III que equipa helicópteros do 1º Batalhão de Aviação de Exército (1º BavEx), em Taubaté-SP. A tabela I apresenta as especificações fornecidas pelo fabricante [10]:

TABELA I. DADOS TÉCNICOS DO SISTEMA STAR SAFIRE III.

DADOS GERAIS	
Sensor Termal	FPA Refrigerada InSb
Resolução espacial	640 x 480
Resolução em ND	8 bits (0 a 255)
FOV Termal	25° a 0,35°
Faixa Espectral	3 – 5 μm
INTERFACE	
Vídeo Analógico	NTSC/PAL

A coleta dos parâmetros da câmera foi realizada no hangar de helicópteros do 1º BavEx, considerando a câmera operando no FOV mais amplo (WFOV: 25° x 19°) [10]. As caracterizações consistiram na aquisição e análise dos níveis

digitais dos *pixels* das imagens de um Corpo Negro (CN, modelo SR800, de 11 pol., emissividade de 0,97, da CI Systems) [11].

O processamento das imagens foi realizado por meio dos softwares, de código aberto, *ImageJ* [12] para identificação de valores de SiTF e NETD [13], e *SFRMAT3* para a obtenção da MTF [14-16].

No levantamento dos dados de *SiTF* e *NETD*, o estudo utilizou um alvo de alumínio, com um quadrado vazado, que foi acoplado na frente do corpo negro de área extensa (Fig. 2). Suas dimensões são de 30 cm por 30 cm, com uma área vazada de 15 cm por 15 cm, inclinado 6° em relação ao plano vertical da placa. A *MTF*, representativa das componentes vertical e horizontal, também foi obtida por meio do imageamento desse alvo. A angulação mencionada considerou os cálculos realizados pelo programa *SFRMAT3*, que utiliza o método do degrau inclinado (*Slanted Edge Method*) para a caracterização da *MTF* [6][14]-[16].

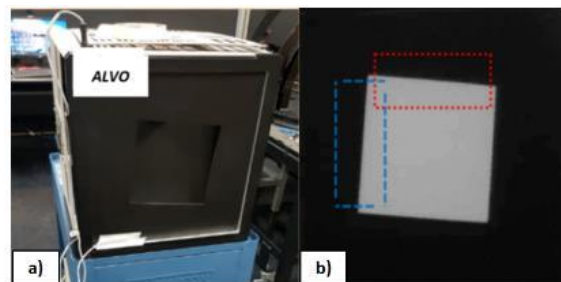


Fig.2. a) Alvo com um quadrado vazado para aquisição das imagens. b) Áreas selecionadas na imagem para análise da *MTF* vertical e horizontal.

A Fig. 2b apresenta as áreas selecionadas na imagem obtida da composição CN 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 esses os valores máximos possíveis para identificação da *MTF* pelo método *Slanted-Edge* [17].

Um termopar foi acoplado à parte inferior do alvo para medir a temperatura do mesmo em relação à ajustada pelo Corpo Negro.

Para a avaliação dos dados técnicos, considerou-se o efeito do Controle Automático de Ganho do FLIR. Como o sistema imageador em estudo não permitiu, por meio de seu menu de configurações, desabilitar o AGC, um segundo Corpo Negro foi utilizado [2]. Esse equipamento é um modelo FLUKE 4180, com cavidade redonda de 6 pol., faixa de temperatura absoluta de -10° C a 120° C e emissividade variável de 0,9 a 1 [18]. Dessa forma, a configuração montada para as medições analisou a variação de temperatura do CN FLUKE de modo a comparar os resultados. As Figs. 3 e 4 apresentam a configuração montada para o estudo.

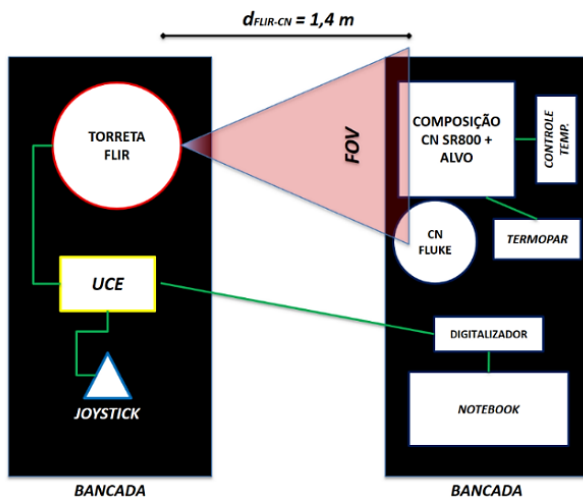


Fig. 3. Configuração para medições do FLIR STAR SAFIRE III.

Conforme Fig. 3 e Fig. 4, o controle manual do FLIR pelo operador foi realizado por um *joystick*. Uma Unidade Central de Eletrônica (UCE) foi responsável pela interface operador e Torreta do equipamento, energização e geração de interface de vídeo. Como o imageador termal fornece saída de vídeo analógica, foi utilizado um digitalizador para o processamento das imagens. A distância entre a ótica do equipamento e o alvo acoplado ao Corpo Negro foi de 1,4 m, de modo a permitir o FOV da câmera visualizar as duas fontes de sinal simultaneamente.

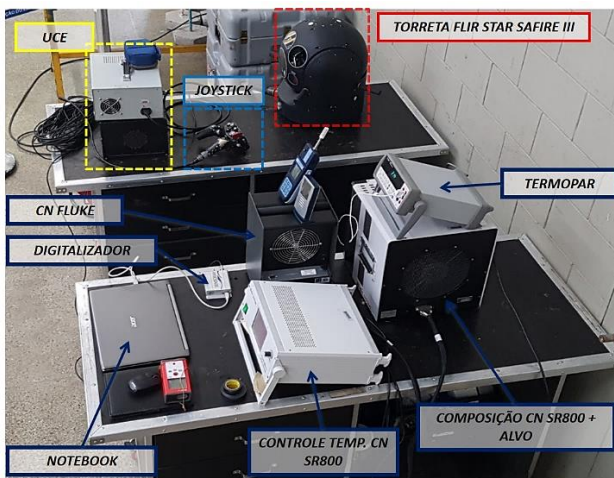


Fig.4. Bancadas montadas para medições do FLIR STAR SAFIRE III.

A Fig. 5 apresenta a imagem visualizada para análise do FLIR. O CN FLUKE, com cavidade redonda a esquerda da imagem (Fig. 5), foi utilizado para avaliar a atuação do AGC da câmera.

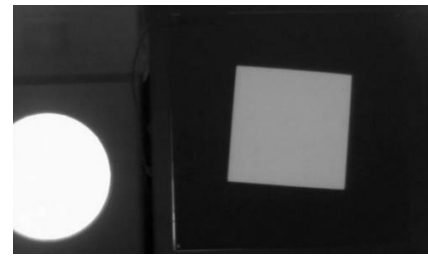


Fig. 5. Imagem obtida pelo FLIR.

Durante avaliação do FLIR, percebeu-se que a estrutura externa do sistema termal aquecia em demasia, gerando calor excessivo na proximidade da óptica e apresentando uma região de interferência em forma de halo em volta da imagem. Medindo, então, a temperatura externa do imageador, verificou-se uma temperatura média de 34°C . Tal fato foi o responsável pela escolha das temperaturas (CN FLUKE) de 40°C , 50°C e 60°C , além da temperatura ambiente (FLUKE OFF).

Para cada condição de temperatura do CN FLUKE, ao se considerar a temperatura ambiente média de 21°C , a faixa de temperatura absoluta (T_{abs}) para a composição CN SR800 mais alvo quadrado foi de 14°C a 36°C , em intervalos de 2°C . Com isso, foram registrados dados de medições considerando diferenciais de temperatura (ΔT) entre CN e a placa em alumínio de: -7°C , -5°C , -3°C , -1°C , 0°C , 1°C , 3°C , 5°C , 7°C , 8°C , 10°C , 13°C e 15°C . Para cada ΔT , foram obtidas 150 imagens.

Após a caracterização de valores de *NETD* e *MTF*, conforme (6), foi possível avaliar as curvas de *MRTD* e, por (8) e (9), identificar valores de distância de detecção, simulando um alvo padrão de dimensões 2,3 m por 2,3 m, com um diferencial de temperatura de 2°C [4][9].

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 6 apresenta as imagens obtidas, para cada condição do CN FLUKE, considerando o ΔT de 5°C ($\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$). O efeito do AGC pode ser evidenciado na diferença entre os níveis digitais médios apresentados. Observa-se também que, quanto maior a T_{abs} do CN FLUKE, menor o efeito causado pelo AGC, ou seja, menor o borrão apresentado na parte superior direita de cada imagem em função do aquecimento da estrutura externa do FLIR.

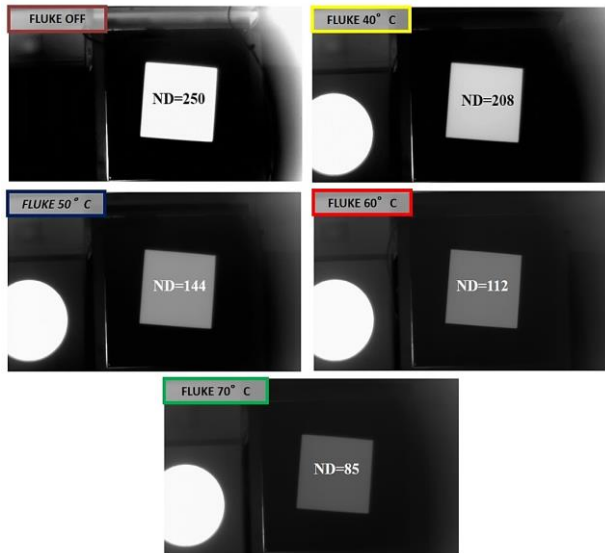


Fig. 6. Imagens obtidas pelo FLIR para cada condição do CN FLUKE. Em cada área do alvo quadrado, foi apresentado o valor ND médio obtido.

Na Fig. 7 é possível identificar a curva de resposta termal da câmera FLIR, para cada condição do CN FLUKE. O valor representativo para S_{ITF} , ou seja, o coeficiente angular, correspondente a parte linear de cada curva.

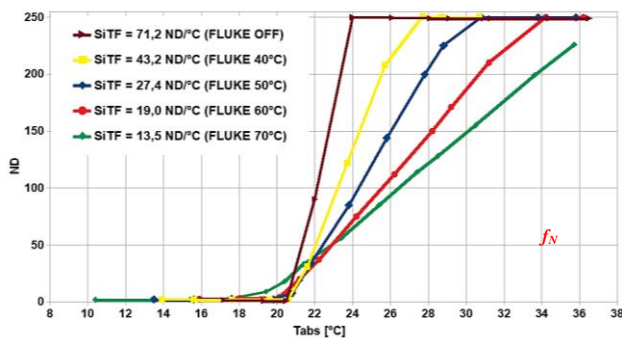


Fig. 7. S_{ITF} caracterizada para cada condição do CN FLUKE.

A Fig. 8 apresenta dados de $NETD$. Conforme o gráfico da Fig. 7, os valores de sensibilidade do equipamento foram esboçados somente quando não houve saturação de sinal de resposta por parte do equipamento (ou seja, apenas na área linear).

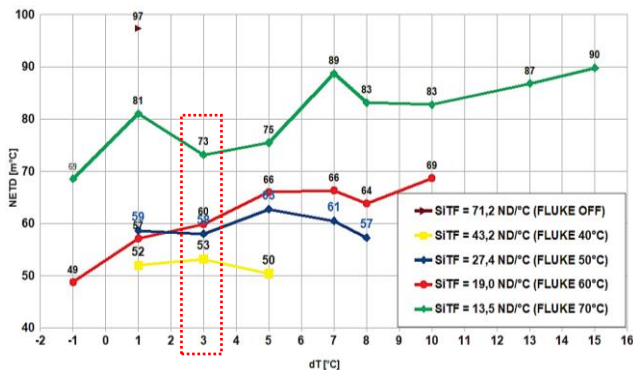


Fig. 8. $NETD$ caracterizada na câmera.

Como no ΔT de 3° C (destaque na Fig. 8) os valores de $NETD$ apresentaram-se bem próximos entre si nas condições analisadas, estes valores foram selecionados de modo a caracterizar cada situação do CN FLUKE. Observa-se que o um único valor de 0,097 °C, referente a parte linear da curva de responsividade, para FLUKE OFF. Com isso, a Tabela II define os valores de sensibilidade caracterizados para cada caso avaliado.

TABELA II. $NETD$ PARA CADA CONDIÇÃO DO CN FLUKE.

CONDIÇÃO	$NETD [m^{\circ}C]$
FLUKE OFF	97
FLUKE 40 °C	53
FLUKE 50 °C	58
FLUKE 60 °C	60
FLUKE 70 °C	73

A Fig. 9 apresenta o gráfico de MTF representativa da câmera para as diferentes condições do segundo Corpo Negro. Observa-se que o melhor desempenho de modulação espacial do FLIR foi com o CN FLUKE a 60° C. Para as condições do dispositivo desligado (FLUKE OFF) e a 40° C, identifica-se uma MTF afetada pelo ruído [1][2]. Para os valores de 50° C e 70° C, perceberam-se valores baixos de modulação quando comparados a 60° C.

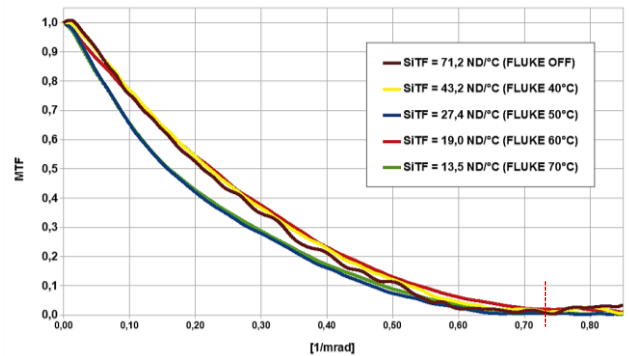


Fig. 9. $MTFs$ representativas caracterizadas na câmera.

A Fig. 9 apresentou a frequência de Nyquist ($f_N = 0,74 \text{ mrad}^{-1}$) da câmera, o que indica o seu limite de resolução. Com isso, para os cálculos do $MRTD$ estimado para o FLIR, não foram apresentados dados de frequência espacial (f_x) superiores a f_N .

A Fig. 10 apresenta os dados de $MRTD$ estimado, calculados conforme (6), para cada condição estudada.

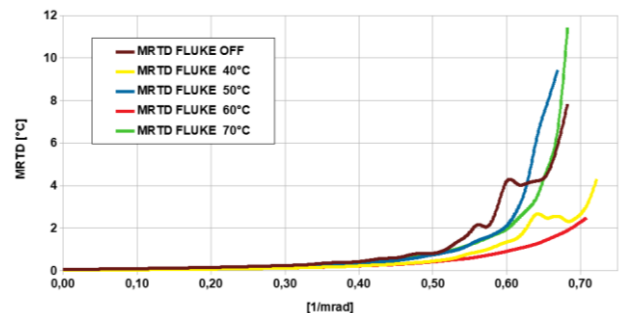


Fig. 10. $MRTDs$ caracterizadas para cada condição do CN FLUKE.

Conforme pode ser analisado na figura anterior, as condições FLUKE OFF e FLUKE 40° C apresentaram elevado ruído. Com isso, essas duas situações foram excluídas da análise de distância. O *MRTD* para FLUKE 60° C apresentou maior sensibilidade do sistema, com diferencial máximo limite de $\Delta T = 2^\circ \text{C}$. Para FLUKE 50° C, a sensibilidade máxima foi de $\Delta T = 6,9^\circ \text{C}$. A menor sensibilidade identificada no FLIR foi para FLUKE 70° C, com um $\Delta T = 11,65^\circ \text{C}$.

A Fig. 11 apresenta o desempenho em distância de detecção, para as condições do CN FLUKE de 50° C, 60° C e 70° C. 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 2° C em relação ao cenário de fundo ($\Delta T = 2^\circ \text{C}$). Em termos de curva de atenuação atmosférica do sinal do alvo, foram analisados os dados sob condições favoráveis de transmitância – vide (9).

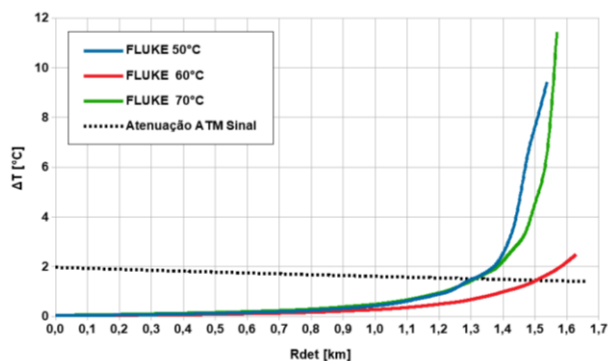


Fig. 11. Distâncias de detecção para FLUKE a 50° C, 60° C e 70° C.

Pela Fig. 11, a distância de detecção para as condições FLUKE 50° C e 70° C foi a mesma, $R_{\text{det}} = 1,33 \text{ km}$. Para a condição de FLUKE 60° C, $R_{\text{det}} = 1,53 \text{ km}$. Pelos gráficos apresentados observa-se que a curva de atenuação atmosférica do sinal do alvo foi limitada pela sensibilidade apresentada por cada situação analisada.

V. CONCLUSÃO

O presente estudo caracterizou figuras de mérito e avaliou desempenho em distância de detecção de uma câmera FLIR, embarcada em aeronaves, considerando o efeito do AGC no equipamento em estudo.

Pelos gráficos de *NETD*, as condições de FLUKE a 50° C e 60° C apresentaram respostas próximas de sensibilidade de 58 m° C e 60 m° C, respectivamente, no ΔT de 3° C.

Com relação à *MTF* dos casos testados, a situação de CN FLUKE 60° C apresentou maiores valores de modulação, para todas as frequências espaciais, evidenciando um melhor resultado. Por outro lado, as condições de FLUKE 50° C e 70° C apresentaram suas respostas de modulação inferiores para as mesmas frequências espaciais, demonstrando uma menor capacidade de . Há de se evidenciar ainda que os casos de FLUKE OFF e FLUKE 40° C apresentaram ruído anormal, inviabilizando sua análise. Tais ruídos excessivos evidenciam a importância de estudos complementares sobre o ocorrido.

Os resultados do *MRTD* confirmaram a condição de que o CN FLUKE 60° C foi a melhor condição de caracterização por apresentar maior sensibilidade e maior resolução espacial em relação às demais situações.

Por fim, para análise de distância de detecção, foi observada a diferença de 200 metros entre as condições avaliadas (comparação entre CN FLUKE 60° C – 1,53 km – em relação aos CN FLUKE 50° C e 70° C – 1,33 km).

Agradecimentos

Ao Sargento Dênis, do efetivo do IEAv, pela presteza na confecção do alvo em alumínio utilizado neste trabalho.

Os autores também agradecem ao 1° BavEx, nas pessoas do Tenente-Coronel Bomfim, Capitão Aleixo e Sargento Anderson, pelo irrestrito acesso e apoio técnico às câmeras FLIR embarcadas nos helicópteros dessa Unidade Aérea do Comando do Exército Brasileiro.

REFERÊNCIAS

- [1] HOLST, G. C. *Electro-optical Imaging System Performance*. 5nd ed. Bellingham: SPIE, 2008.
- [2] HOLST, G. C. *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems*. JCD Publishing Company, 1998.
- [3] Brasil, Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica, DCA 1-1 Doutrina Básica da Força Aérea Brasileira. 2012.
- [4] CHRZANOWSKI, K. *Radiometry in Military Applications*. Proc. of SPIE, Vol 4517. 2001.
- [5] CHRZANOWSKI, K. *Testing Thermal Imagers. Practical Guide*. Military University of Technology. 00-908. Warsaw, Poland. 2010.
- [6] BOREMAN, G. D. *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems*. Bellingham: SPIE, 2001. 110 p.
- [7] 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] FLIR. *STAR SAFIRE III: Operator's Manual*. FLIR Systems. Wilsonville. USA. 2009.
- [11] CI SYSTEMS. *SR800 Extended Area Blackbody*. Simi Valley. USA. 2004.
- [12] RASBAND, W.S., *ImageJ User Guide*. 2012. Disponível em: <<https://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/user-guide.pdf>> Acesso em 11 fev. 2018.
- [13] ZEIBEL, J. G.; LITTLETON, R. T. *Infrared Focal Plane Noise Parameter Definitions*. US Army Night Vision Electronic Sensors Directorate (NVESD). USA. 2003.
- [14] BURNS DIGITAL IMAGING. *SFRMAT3: SFR analysis cameras and scanners*. 2016. Disponível em: <<http://burnsdigitalimaging.com/software/sfredge-and-sfrmat3/>>. Acesso em 20 set. 2017.
- [15] SANTOS, H. K.; DAMIÃO, A. J. *Avaliação da MTF da Câmera do Quadricóptero Phantom 4*. SIGE 2017. p. 40-41. 2017.
- [16] SANTOS, H. M. K.; SILVA, R. E.; DAMIAO, A. J. *Avaliação por MTF da câmera CCD do FLIR da aeronave P-3*. In: XIX SIGE 2017, São José dos Campos. p. 120-124.
- [17] SANTOS, H. M. K. *Utilização do método slanted edge para caracterização e avaliação da MTF de sensores eletro-óptico aeroembarcados*. 2017. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Física e Matemática Aplicadas) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos.
- [18] FLUKE CORPORATION. *FLUKE 4180 User Guide*. Everett. USA. 2013.