

Avaliação por MTF da câmera CCD do FLIR da aeronave P-3

Hélio Maciel Kiyohara dos Santos¹, Raphael Efísio da Silva¹, Alvaro José Damião²

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

²Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – Em decorrência de um processo de modernização ocorrido nas duas últimas décadas, diversos sistemas imageadores aeroembarcados foram incorporados à frota de aeronaves da Força Aérea Brasileira, o que ampliou as suas capacidades nas atividades de sensoriamento remoto aplicado à defesa. Como o emprego de um sistema em sua plenitude depende do profundo conhecimento de suas características, neste trabalho foi estimada a Função de Transferência de Modulação (*Modulation Transfer Function* – MTF) da câmera CCD (*Charged Coupled Device*) do FLIR (*Forward Looking InfraRed*) de uma aeronave P-3 em voo. O método empregado foi o método do degrau inclinado (*slanted edge method*) e os alvos foram as marcações dos pontos de visada da pista de pouso do aeroporto de Aracaju. Esse tipo de medição permite conhecer a MTF do equipamento com a aeronave em condições operacionais, situação na qual a câmera estará sob influência dos parâmetros de voo da plataforma.

Palavras-Chave – Sensoriamento remoto aplicado à defesa, *Modulation Transfer Function*, *Slanted Edge Method*.

I. INTRODUÇÃO

Alguns sistemas imageadores foram incorporados às aeronaves da Força Aérea Brasileira a partir do início dos anos dois mil. A inclusão desses equipamentos permitiu que a FAB expandisse as suas atividades relacionadas ao sensoriamento remoto aplicado à defesa. No entanto, esta modernização demanda a constante avaliação destes elementos imageadores quanto ao seu real desempenho. Como exemplo há os sistemas embarcados nas aeronaves remotamente pilotadas Hermes 450 e Hermes 900, sistemas FLIR (*Forward Looking InfraRed*) presentes nas aeronaves A-29 e P-3 e também os sistemas RecceLite e LITENING incorporados às aeronaves A-1.

Apesar de já se encontrarem em operação, a maioria desses equipamentos ainda não passou por um processo de avaliação ou caracterização, o que faz com que as características e capacidades desses sensores não sejam totalmente conhecidas. Além disso, grande parte dos manuais de usuário fornecidos pelos fabricantes é pobre em fornecer as características de suas câmeras [1]. Como consequência, o desconhecimento das peculiaridades de cada sensor pode acarretar em sua subutilização, ou pior, na sua utilização sem o seu correto funcionamento por degradação do equipamento ou manutenção incorreta.

Dentre os importantes aspectos que caracterizam um sistema imageador, e que normalmente são omitidos pelos fabricantes, é possível destacar: a MTF (*Modulation Transfer Function*), a relação sinal/ruído, a fidelidade na reprodução de cores, entre outros [2].

Além disso, a qualidade das imagens de sensores aeroembarcados ainda está sujeita a outros parâmetros, tais quais a velocidade e altitude da plataforma, vibração dos motores, condições atmosféricas, turbulência, etc.

Como parte de um trabalho de caracterização de câmeras, este artigo apresenta uma estimativa da MTF da câmera CCD do FLIR Star SAFIRE II, embarcado em uma aeronave P-3. A MTF foi estimada em voo utilizando-se como alvo as marcações da pista de pouso de Aracaju.

A MTF é uma medida objetiva da qualidade da imagem gerada por um sistema imageador [3] e é detalhada a seguir.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A MTF mostra o quão eficiente é um sistema imageador em reproduzir um sinal cujo contraste varia senoidalmente com uma determinada frequência espacial [4].

Neste trabalho, a MTF da câmera CCD do FLIR Star SAFIRE II foi obtida utilizando-se o método do degrau inclinado (*Slanted Edge Method*) [5], o qual utiliza a função de resposta ao degrau (ESF – *Edge Spread Function*) como ponto de partida. A obtenção da MTF a partir da ESF é descrita a seguir [6] [7].

Considerando que o objeto imageado é representado por uma função degrau:

$$o(x) = \begin{cases} 0; & \text{se } x < 0 \\ 1; & \text{se } x \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

E que a imagem gerada é a convolução do objeto com a função de resposta ao impulso (PSF – *Point Spread Function*), obtém-se:

$$i(x) = o(x) * PSF(x) = \int_{-\infty}^{\infty} PSF(x) \cdot o(x - \alpha) d\alpha \quad (2)$$

Se o objeto $o(x)$ é uma função degrau, então a imagem $i(x)$ é a função de resposta ao degrau $ESF(x)$. Utilizando (2), quando $(x - \alpha) < 0$; $o(x) = 0$ e para todos os outros valores $o(x) = 1$. Dessa forma, têm-se:

$$ESF(x) = \int_x^{\infty} 1 \cdot PSF(\alpha) d\alpha \quad (3)$$

Tomando a derivada de (3) obtém-se a expressão para a PSF em uma dimensão:

$$PSF(x) = dESF(x)/dx \quad (4)$$

O módulo da transformada de Fourier da $PSF(x)$ é a MTF do sistema em uma dimensão:

$$MTF(v) = |\mathcal{F}[PSF(x)]| \quad (5)$$

O alvo utilizado como objeto para o método do degrau inclinado é uma transição abrupta entre claro e escuro (Fig. 1). Nesse método, o alvo é posicionado de forma ligeiramente inclinada em relação à matriz de fotodetectores do sensor imageador. Ao ser realizada a leitura dos valores dos *pixels* em cada uma das linhas da matriz, é possível realizar uma superamostragem da função de resposta ao degrau, de forma a se conseguir uma representação mais fiel da ESF [5].

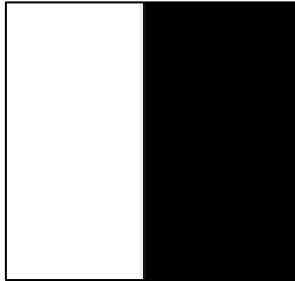


Fig. 1. Degrau utilizado como objeto para a obtenção da função de resposta ao degrau.

A superamostragem da ESF é realizada identificando-se a inclinação do alvo e projetando-se os valores de cada *pixel* paralelamente à transição claro/escuro, ao longo do eixo horizontal. Para se reduzir a ocorrência de *aliasing* durante o cálculo da MTF, este eixo é dividido em “cestos” (*bins*) com largura igual a um quarto da largura de um *pixel*. Realiza-se, então, uma média dos valores dos *pixels* coletados em cada “cesto” para se traçar um perfil superamostrado da ESF [8]. O procedimento descrito neste parágrafo está ilustrado na Fig. 2.

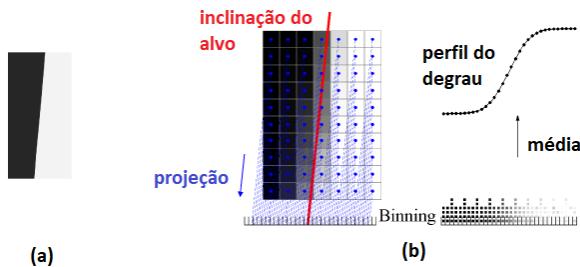


Fig. 2. Método do degrau inclinado: a) alvo inclinado, e b) passo-a-passo para a obtenção da ESF superamostrada. Adaptado de [8].

A Fig. 3 apresenta um exemplo do cálculo da MTF depois de obtida a ESF superamostrada de um alvo inclinado.

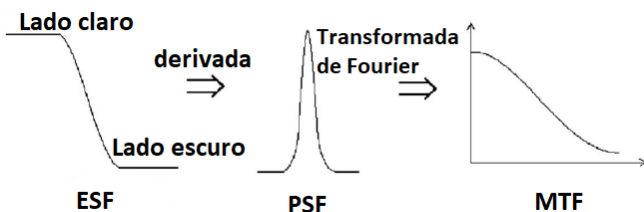


Fig. 3. Obtenção da MTF a partir da ESF. Adaptado de [6].

A caracterização da MTF em câmeras digitais é padronizada pela norma ISO 12233 e o método utilizado é o método do degrau inclinado. O algoritmo estabelecido pela norma está detalhado em [5]. Uma implementação do algoritmo, chamada Sfrmat3, foi realizada por Peter D. Burns [5] por meio de um *software plug-in* para Matlab. O Sfrmat3 está disponível em [9].

Pelo fato do método do degrau inclinado utilizar um alvo que consiste apenas de uma transição claro/escuro, ele é utilizado, entre outras finalidades, para a caracterização de câmeras embarcadas em satélites que já se encontram em órbita. Essas caracterizações utilizam, além de alvos construídos exatamente para este fim, imagens nas quais existem elementos com transição abrupta, como plantações adjacentes de duas culturas distintas ou as marcações em uma pista de pouso [10] [11].

De maneira análoga à obtenção da MTF de câmeras de satélite que já estão em órbita, neste trabalho o método do degrau inclinado foi utilizado para se estimar a MTF da câmera CCD do FLIR Star SAFIRE II embarcado em uma aeronave P-3.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados na realização dos experimentos estão descritos a seguir.

A. FLIR Star SAFIRE II [1]

O FLIR Star SAFIRE II é um equipamento desenvolvido para aplicações tanto embarcadas quanto aeroembarcadas. Ele é um sistema multi-sensores, composto por uma câmera Sony CCD e um sensor imageador na faixa do infravermelho médio, AN-AAQ-22 Star SAFIRE (Fig. 4).



Fig. 4. FLIR Star SAFIRE II [1].

Dentre as aplicações para as quais o Star SAFIRE II foi desenvolvido, destacam-se: a vigilância de fronteiras, a patrulha marítima e a busca e resgate.

A câmera CCD incluída neste sistema é capaz de operar tanto na faixa do visível como na faixa do infravermelho próximo, sendo essa última passível de ser suprimida por meio da utilização de um filtro do equipamento. O sensor possui dimensão de ¼ polegada, enquanto o conjunto de lentes oferece um zoom de 18 vezes.

Os sensores estão montados em uma torreta remotamente controlada, que pode ser operada em um campo de 360° em azimute e 150° em elevação (de +30° a -120° em relação ao eixo longitudinal da aeronave). Essa torreta é giro-estabilizada nessas duas direções.

B. Pista de Pouso de Aracaju

Os sobrevoos de imageamento foram realizados sobre a pista de pouso do aeroporto de Aracaju. A pista é de asfalto e possui 2.200 m de comprimento por 45 m de largura.

Sua orientação é 11-29, o que quer dizer que as aeronaves decolam/pousam com proa 110° ou 290°. No jargão aeronáutico, quando as aeronaves decolam/pousam na proa 110°, diz-se que a pista em uso é a pista 11. O mesmo vale para a operação no sentido oposto. Essa terminologia será utilizada no decorrer deste trabalho.

C. Alvos

Ao invés de alvos confeccionados com a finalidade exclusiva de se medir a MTF de uma câmera, esse trabalho utilizou marcações da pista do aeroporto de Aracaju para estimar a MTF da câmera CCD do FLIR Star SAFIRE II embarcado em uma aeronave P-3.

Foram escolhidas como alvo as marcações do ponto de visada das pistas 11 e 29. As marcações de ponto de visada estão localizadas a 1.000 pés (aproximadamente 330 m) de distância de cada cabeceira da pista. O ponto de visada da pista 11, ou seja, o ponto de visada distante 1.000 pés da cabeceira 11, está apresentado na Fig. 5.



Fig. 5. Ponto de visada da pista 11 do aeroporto de Aracaju.

Como a câmera CCD do FLIR Star SAFIRE II não realiza fotos, apenas vídeos (no formato MPG), foram retirados dois quadros (*frames*) do filme de um sobrevoio da aeronave P-3 a

1.000 pés de altura (aproximadamente 330 m) sobre a pista de Aracaju. Na ocasião desse sobrevoio, a câmera estava apontada diretamente para o nadir.

Os quadros contendo as marcações dos pontos de visada das pistas 11 e 29 foram salvos no formato TIFF e são apresentados na Fig. 6.

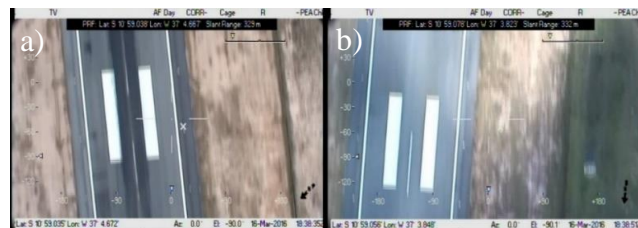


Fig. 6. a) Quadro contendo a marcação do ponto de visada da pista 11 de Aracaju e b) quadro contendo a marcação do ponto de visada da pista 29 de Aracaju.

Na Fig. 6a, percebe-se que a região de asfalto entre as duas faixas brancas da marcação de ponto de visada está contaminada com resíduos de borracha dos pneus dos trens de pouso das aeronaves, o que compromete a qualidade da borda entre a pintura e o asfalto.

Também é perceptível que a imagem sofreu um borrão na direção de voo da aeronave, fato que inviabilizou a estimativa da MTF no sentido vertical do sensor, uma vez que as extremidades superiores e inferiores das faixas brancas do ponto de visada ficaram inutilizadas.

Dessa forma, foram consideradas como alvos apenas as bordas externas das marcações do ponto de visada de ambas as pistas (Fig. 7).

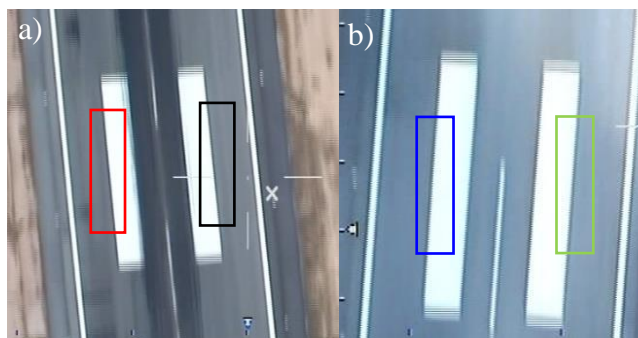


Fig. 7. Regiões utilizadas para o cálculo da MTF. a) ponto de visada da pista 11 e b) ponto de visada da pista 29.

A TABELA I representa o código de cores utilizado para identificar as regiões estudadas nas imagens da Fig. 7. Esta identificação será utilizada nas figuras a seguir.

TABELA I. IDENTIFICAÇÃO DOS ALVOS UTILIZANDO CORES.

Pista	Borda	Cor de identificação
11	Esquerda	Vermelha
11	Direita	Preta
29	Esquerda	Azul
29	Direita	Verde

D. Estimativa da MTF

Para se estimar a MTF da câmera no sentido horizontal, o primeiro passo foi realizar 30 recortes com dimensões de 50 pixels por 50 pixels, de forma aleatória, em cada uma das quatro áreas selecionadas anteriormente.

Posteriormente, foi avaliada a MTF em cada um desses recortes utilizando-se o software Sfrmat3. Para cada um dos alvos selecionados, foi calculada a média e o desvio padrão da MTF obtida em cada um dos 30 recortes realizados.

A estimativa da MTF do sistema foi obtida calculando-se a média e o desvio padrão de todos os recortes considerados válidos.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A MTF calculada utilizando-se o a borda do lado direito do ponto de visada da pista 11 está apresentada na Fig. 8.

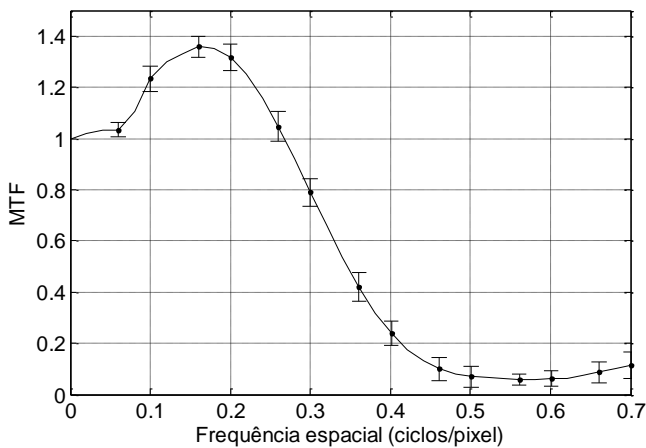


Fig. 8. MTF calculada utilizando a borda direita do ponto de visada da pista 11 de Aracaju.

Já a Fig. 9 apresenta a MTF medida utilizando-se a borda esquerda do ponto de visada da pista 11 de Aracaju.

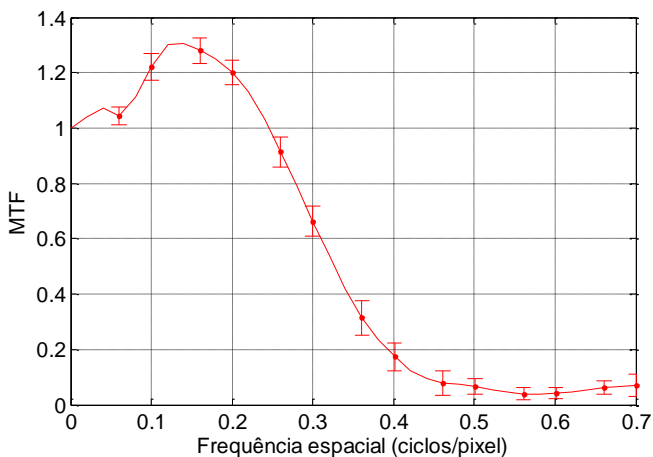


Fig. 9. MTF calculada utilizando a borda esquerda do ponto de visada da pista 11 de Aracaju.

A Fig. 10 mostra o gráfico da MTF medida na borda direita do ponto de visada da pista 29.

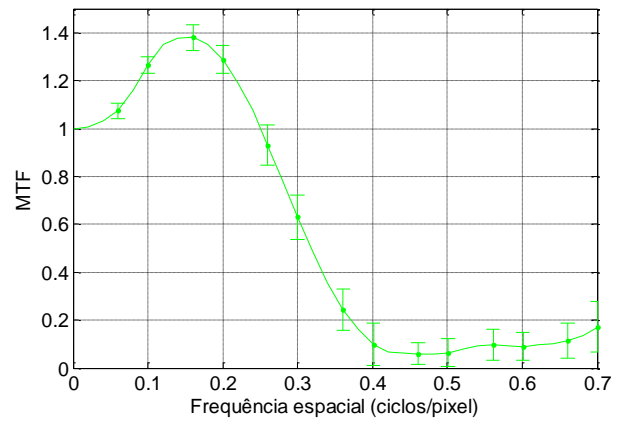


Fig. 10. MTF calculada utilizando a borda direita do ponto de visada da pista 29 de Aracaju.

Por fim, a MTF medida utilizando-se a borda esquerda do ponto de visada da pista 29 está apresentada na Fig. 11.

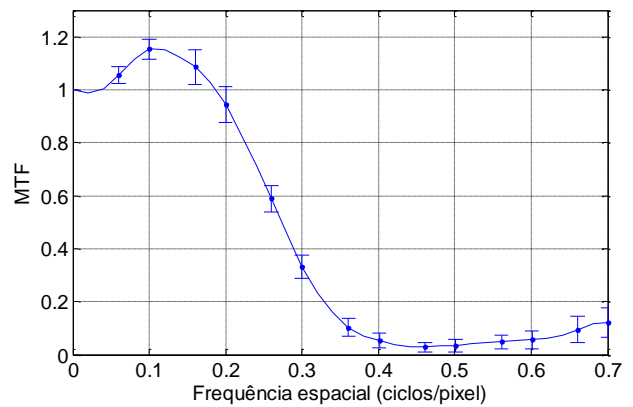


Fig. 11. MTF calculada utilizando a borda esquerda do ponto de visada da pista 29 de Aracaju.

Observando-se a Fig. 8, a Fig. 9 e a Fig. 10 é possível notar que as MTF encontradas atingem um valor máximo entre 1,3 e 1,4. Apenas a MTF medida na borda esquerda do ponto de visada da pista 29 (Fig. 11) apresenta um valor médio de pico mais baixo, não atingindo 1,2. Uma melhor observação pode ser realizada sobrepondo-se os quatro gráficos de MTF (Fig. 12).

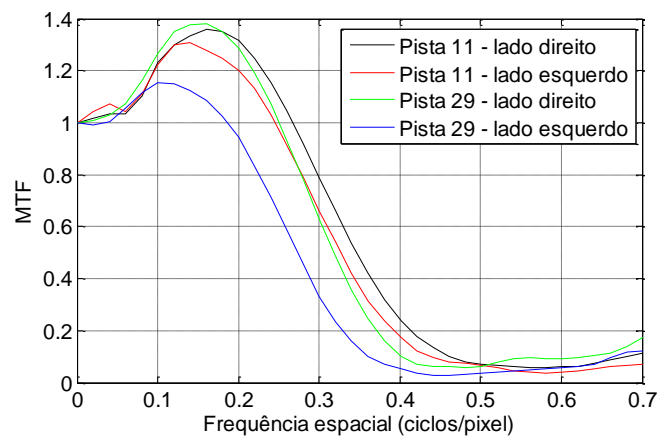


Fig. 12. Sobreposição das MTF encontradas utilizando-se as bordas dos pontos de visada da pista de Aracaju.

Pela Fig. 12, nota-se que a MTF medida na borda esquerda do ponto de visada da pista 29 apresenta, para frequências espaciais abaixo da frequência de Nyquist (0,5 ciclo/pixel), valores de MTF significativamente abaixo dos demais. Isso pode ter ocorrido pelo fato de que, entre as quatro regiões analisadas, esta é a que se encontra mais distante do centro do quadro, de forma que a presença de aberração esférica no sistema óptico possa ter influenciado a curva de MTF obtida. Outro fator que pode ter provocado essa ocorrência é simplesmente a qualidade da pintura da marca no chão, uma vez que a aplicação do método depende de uma transição a mais abrupta possível entre claro e escuro.

Por conta do citado no parágrafo anterior, as medidas realizadas na borda esquerda do ponto de visada da pista 29 não foram levadas em consideração. Dessa forma, a MTF estimada da câmera CCD do FLIR Star SAFIRE II em condições operacionais foi obtida por meio da média das MTF obtidas em cada um dos recortes realizados nas bordas esquerda e direita do ponto de visada da pista 11 e na borda direita do ponto de visada da pista 29. O resultado encontrado é apresentado na Fig. 13.

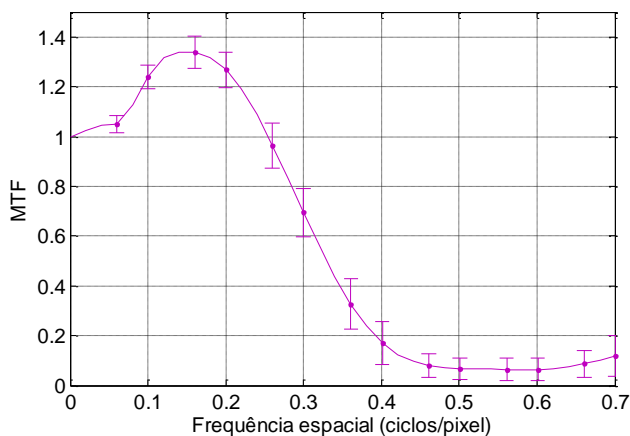


Fig. 13. MTF estimada da câmera CCD do FLIR Star SAFIRE II em condições operacionais.

Observando-se a Fig. 13, é possível perceber que as imagens fornecidas pela câmera CCD do FLIR Star SAFIRE II sofrem algum tratamento para o realce das bordas dos elementos da imagem, uma vez que a MTF atinge valores maiores que um para valores intermediários de frequência espacial [12]. A MTF de uma imagem que não sofreu esse tipo de tratamento é decrescente como função da frequência espacial.

Cabe salientar, que os 30 recortes realizados em cada borda dos pontos de visada foram realizados em apenas dois quadros do filme, um para o ponto de visada pista 11 e outro para o ponto de visada da pista 29. Um estudo utilizando mais quadros poderia chegar em um valor de MTF mais exato do que o estimado neste trabalho, uma vez que o sensor se encontra em uma situação extremamente dinâmica.

V. CONCLUSÃO

Ao longo das duas últimas décadas, a Força Aérea Brasileira incorporou diversos sistemas imageadores à sua

frota de aeronaves. O conhecimento das características desses sistemas é fundamental para que seu emprego seja realizado da maneira mais eficiente possível. Neste trabalho foi estimada a MTF, em voo, da câmera CCD do sistema FLIR Star SAFIRE II embarcado em uma aeronave P-3 da Força Aérea Brasileira.

Por ter sido realizado em voo, esse tipo de experimento permitiu conhecer o desempenho do sistema imageador levando-se em consideração a influência dos parâmetros de voo da aeronave, ou seja, permitiu conhecer o desempenho do sistema quando este encontra-se em condições operacionais.

Por meio da MTF obtida, foi possível verificar que as imagens fornecidas passam por um tratamento de realce de bordas, uma vez que o valor da MTF ultrapassa a unidade em frequências espaciais intermediárias. Além disso, o conhecimento de como o sistema realiza a transferência de modulação, permite que as missões sejam planejadas de maneira mais eficiente, evitando-se planejar voos em altitudes onde não seja possível alcançar os objetivos pretendidos, como detectar, identificar ou reconhecer um alvo.

A medição da MTF utilizando-se mais quadros do vídeo fornecido pela câmera, poderá fornecer um resultado mais exato. A confecção de um alvo maior, específico para a medição da MTF, também permitiria a medição em maiores altitudes, evitando-se o efeito da turbulência na plataforma e minimizando o borrão gerado na imagem no sentido de voo da aeronave.

REFERÊNCIAS

- [1] FLIR Systems, "Star SAFIRE II Operator's Manual Revision E", nov. 2003. 218 p.
- [2] Y. Okano, "MTF analysis and its measurements for digital still camera", IS&T's 50th Annual Conference Proceedings, p. 383-387, 1997.
- [3] D. Williams, P. D. Burns and L. Scraff, "Imaging performance taxonomy," Proceedings SPIE-IS&T Electronic Imaging Symposium, 2009.
- [4] J. R. Schott, "Remote Sensing The Image Chain Approach", 2ed, Oxford, 2007, p. 560.
- [5] P. D. Burns, "Slanted-edge MTF for digital camera and scanner analysis", Proceedings IS&T, 2000, p. 132-138.
- [6] S. Lashanky, S. Mansbach, M. Berger, T. Karasik, M. Bin-Nun "edge response revisited". SPIE Proceedings v. 6941, 2008.
- [7] G. D. Boreman, "Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems", SPIE, 2001, p. 69-76.
- [8] K. Masaoka, T. Yamashita, Y. Nishida, M. Sugawara, "Modified slanted-edge method and multidirectional modulation transfer function estimation", Optics Express, 2014.
- [9] <http://losburns.com/imaging/software/SFRedge/sfformat3_post/index.html>. Acesso em: 23/06/2017.
- [10] S. A. Morain, A. M. Budge, "Post-Launch Calibration of Satellite Sensors", ISPRS, 2004, p. 72-73.
- [11] M. Kameche, S. Benmostefa, "In-flight stability assessment of ALSAT-2A satellite", Advances in Space Research 58, 2016, p. 117-130.
- [12] D. Williams, P. D. Burns, "Diagnostics for digital capture using MTF", Proceedings IS&T, 2001, p. 227-232.