

Metodologia de medição e tratamento de dados para obtenção de assinatura no infravermelho (AIV) de helicópteros

Luty Rodrigues Ribeiro¹, Marcus Vinnicius de Q. S. A. Costa², Eduarda de Proença Rosa Campos², Guilherme Prado², Rafael K. Fávero², Francisco Sircilli³

¹Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE/DCTA – Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vila Acácias – São José dos Campos/SP – CEP 12228-904

²Instituto de Aplicações Operacionais – IAOp/COMPREP – Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vila Acácias – São José dos Campos/SP – CEP 12228-904

³Instituto de Estudos Avançados – IEAv/DCTA – Trevo Cel Av Amaranante n. 1 – Putim – São José dos Campos/SP – CEP 12228-001

Resumo – O estudo da assinatura no infravermelho (AIV) de aeronaves toma cada vez mais relevância em um cenário de uso crescente de armamentos guiados no IV. Especificamente para as de asas rotativas, que realizam missões voando a baixa altura, tendo os chamados mísseis de ombro ou MANPADS como principal ameaça – armas que geralmente possuem guiamento infravermelho. A AIV é caracterizada pela intensidade radiante (W/sr) emitida por todas as partes da aeronave em cada ângulo sólido de aspecto. Além disso, diversos fatores são considerados para a medição da AIV, tais como a transmitância atmosférica, a transmitância dos equipamentos de medição e a distância real entre a aeronave e os sensores. Este artigo descreve a metodologia de extração e análise de dados desenvolvida e utilizada para medição da AIV de helicópteros, no voo pairado e com velocidade operacional à frente, utilizando como equipamentos de medição um espectrorradiômetro e uma câmera termal.

Palavras-Chave – Assinatura no infravermelho, aplicações operacionais.

I. INTRODUÇÃO

A guerra moderna se utiliza cada vez mais de artifícios sofisticados e de alta tecnologia, empenhando-se em inovar nas medidas ofensivas e defensivas. Em se tratando do espectro eletromagnético, a emissão de radiação infravermelha (IV), conhecida como assinatura no infravermelho (AIV), pelas aeronaves é utilizada como guiamento para os mísseis atuais. Conhecer a AIV das aeronaves torna-se, assim, crucial em cenários de combate contemporâneos, permitindo definir os setores mais vulneráveis das mesmas, além de estimar o alcance de detecção dos mísseis inimigos. Com estas informações é possível planejar manobras evasivas e programar corretamente o lançamento de contramedidas, tal qual o *flare*. Esta importância se torna ainda mais relevante na aviação de helicópteros, os quais geralmente cumprem missões com perfis de voo mais baixos e relativamente baixas velocidades quando comparados com caças e, portanto, tornam-se mais vulneráveis a diversos mísseis solo-ar guiados a IV.

A metodologia completa de extração e análise de dados para a obtenção da assinatura no infravermelho (AIV) é um processo complexo que poucos países do mundo detêm conhecimento. Diversos tipos de sensores podem ser

utilizados para as medições e cada um possui um processo próprio para a análise dos dados.

Na seção II discute-se a AIV de aeronave de asa rotativas. Na seção III apresentam-se as medições propostas para voos pairado e em deslocamento, assim como a instrumentação requerida. Na seção IV discute-se a metodologia de análise dos dados, além das correções necessárias para determinação dos ângulos de aspectos reais, das distâncias sensor-alvo reais, assim como subtrair o efeito da atmosfera. Na seção V, apresentam-se as conclusões.

II. ASSINATURA NO INFRAVERMELHO DE UM HELICÓPTERO

A AIV de um corpo consiste de características espectrorradiométricas inerentes a uma determinada fonte, tratando-se da intensidade radiante emitida pelo mesmo em diferentes ângulos de aspecto. Tal assinatura depende de diversos fatores, tais como temperatura, formato e dimensões do objeto em questão [1]. As características atmosféricas afetam a medição da intensidade radiante, visto que podem atenuar em maior ou menor grau a energia recebida pelos sensores. Além disso, é importante destacar que a banda utilizada pelo detector será fundamental para a determinação do envelope. Neste trabalho utilizam-se as bandas MWIR (*mid-wavelength infrared*) entre 3 μm e 5 μm e SWIR (*short-wavelength infrared*) entre 1 μm e 3 μm .

Uma aeronave possui diversas fontes de calor, tais como os gases provenientes da exaustão, as partes quentes do motor e a fuselagem. A banda MWIR, conforme previsto pela lei de Wien, está relacionada às temperaturas mais usuais dos gases de exaustão e das partes quentes do motor da aeronave (em torno de 1200°C e 600°C, respectivamente), assim como às partes da fuselagem em contato com os gases de exaustão. Já a banda SWIR está associada a temperaturas mais altas, da ordem de 2000°C, as quais são típicas de contramedidas do tipo cartuchos pirotécnicos de *flares*.

III. EXPERIMENTO PROPOSTO

A. Aeronave em voo pairado

Para determinar a AIV da aeronave em voo pairado, são planejadas medições para diversos ângulos de proa e de elevação (ângulo de aspecto – AA). A aeronave é

posicionada em frente aos sensores a uma distância D que permita que toda a aeronave esteja dentro do campo de visada (FOV, do inglês *field of view*) do equipamento de medição. As medições são realizadas de acordo com as Fig. 1 e 2.

Para cada ângulo de elevação θ são realizadas as medidas de 19 ângulos de proa ϕ , de 0° a 180° , de 10° em 10° , de forma a cobrir toda uma lateral da aeronave. Considera-se que a aeronave é simétrica em seu eixo longitudinal, de forma que as medições são realizadas apenas em uma lateral. Os ângulos θ utilizados são 5° , 10° , 20° , 30° , 40° e 50° , pois esses são os ângulos de aspecto típicos relacionados às ameaças de mísseis de ombro.[2]

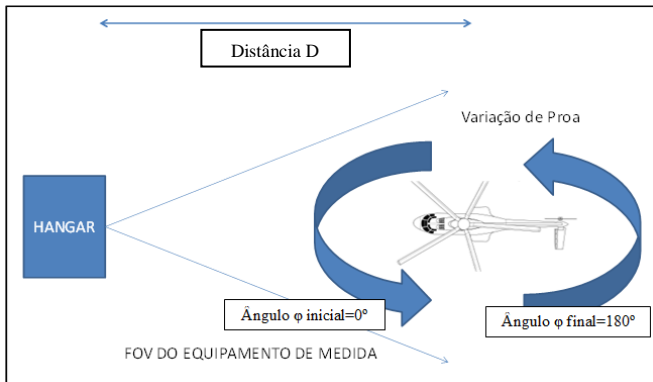


Fig. 1. Posicionamento da aeronave e variação dos ângulos de proa ϕ .

Para a configuração descrita, utiliza-se o espectrorradiômetro como equipamento de medição. A câmera FLIR também pode ser utilizada para este teste, modificando a configuração das medições para um giro contínuo de 360° da aeronave, visto que a câmera realiza uma filmagem que posteriormente tem os frames de interesse avaliados.

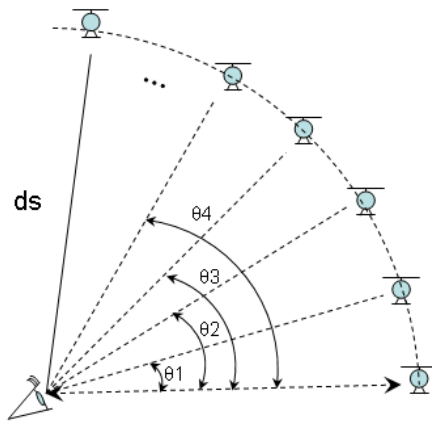


Fig. 2. Variação do ângulo de elevação θ .

B. Aeronave com velocidade à frente

Para a medição da AIV com a aeronave voando com velocidade à frente utiliza-se a câmera termal, a qual tem a capacidade de realizar uma filmagem contínua e com boa capacidade de direcionamento da câmera, de modo a possibilitar o acompanhamento da aeronave em movimento

(algo que não é possível com o espectrorradiômetro). As medições deste teste seguem o esquema da Fig. 3.

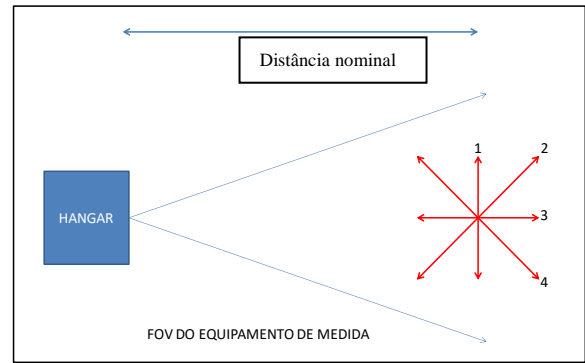


Fig. 3. Perfil de voo para o experimento proposto.

Na Fig. 3 todos os eixos concorrem em um mesmo ponto central, acima da pista e em frente aos equipamentos de medição. O eixo número 1 passa sobre o eixo da pista do aeródromo em uso e os demais variam 45° em relação à ele. Todos os eixos são percorridos nos seus dois sentidos. A câmera termal posiciona-se dentro do hangar mostrado. A aeronave deve fazer as passagens com 300ft de altura AGL.

C. Instrumentação requerida

- 1) *Espectrorradiômetros*: são usados dois equipamentos SR-5000 da CI Systems, operando um deles na banda SWIR e outro na banda MWIR. Estes equipamentos fornecem gráficos espectrais da intensidade radiante da aeronave.
- 2) *Câmera termal*: foi usada uma câmera da FLIR, modelo SC5000, que é um dispositivo eletro-óptico imageador com sensores capazes de detectar radiação infravermelha na banda MWIR, no qual a irradiância recebida pelos sensores é transformada em níveis digitais (DL) que variam com o tempo de integração (IT). O IT é uma variável ajustável, que permite determinar o tempo de exposição dos sensores à radiação recebida. Deve-se ajustar adequadamente o tempo de integração para que não ocorra a saturação dos sensores, possibilitando, desta forma, a captura de diferentes faixas de temperatura do alvo.
- 3) *DGPS*: GPS diferencial instalado na aeronave para fornecer com precisão de até 30 cm as coordenadas e a altitude da aeronave;
- 4) *Estação meteorológica*: equipamento usado para monitorar constantemente ao longo do experimento os valores de temperatura, pressão e umidade relativa do ar, com vistas a usar tais dados para o cálculo da transmitância atmosférica.

IV. METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a análise das medições realizadas, a metodologia descrita nos itens a seguir permite a obtenção da AIV da aeronave nas bandas SWIR e MWIR.

A. Correção de ângulo de aspecto e distância reais

Dado que a aeronave não permanece fixa nas coordenadas planejadas para o teste, uma correção do ângulo de aspecto real da aeronave (proa e elevação reais) deve ser traçada para que se obtenha uma análise mais precisa dos dados.

A proa real da aeronave é uma função da proa magnética fornecida pela bússola da aeronave e do ângulo entre o Norte magnético e o vetor aeronave-detector, direção esta calculada pelas latitudes e longitudes da aeronave e do detector. A Fig. 4 ilustra o layout das medições, sendo P o ponto de posicionamento dos equipamentos de medição, φ a proa magnética do vetor aeronave-detector, p a proa magnética fornecida pela aeronave e D_a distância real da aeronave até os equipamentos de medição (calculadas a partir dos pontos DGPS dos dois pontos [3]). Para exemplificar, a Fig. 4 ilustra a pista de São José dos Campos, em que o ângulo de 24° entre o Norte Magnético e a pista é um dado da Carta do Aeródromo de São José dos Campos.

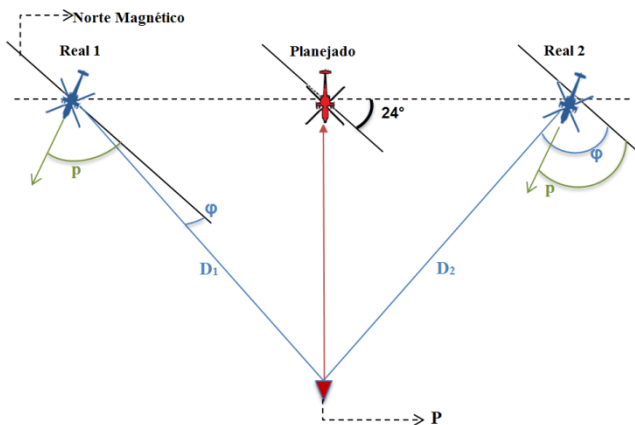


Fig. 4. Layout da vista de cima para correção do ângulo de proa.

O ângulo φ é calculado a partir dos pontos de latitude e longitude do ponto da aeronave e do ponto P (lat_P , $long_P$, lat_{anv} e $long_{anv}$ referem-se às latitudes e longitudes do ponto P e da aeronave respectivamente):

$$\varphi \equiv (\arctan \frac{y}{x}) \text{ mod}(360) \quad (1)$$

Em que y e x são dados pelas equações 2 e 3:

$$y = \sin(long_P - long_{anv}) * \cos(lat_P) \quad (2)$$

$$x = \cos(lat_{anv}) * \sin(lat_P) - \sin(lat_{anv}) * \cos(lat_P) * \cos(long_P - long_{anv}) \quad (3)$$

Para a correção do ângulo de elevação da aeronave, utiliza-se a distância real (D) e a altura da aeronave (Δh) calculados a partir dos dados de DGPS como apresentado na Fig. 5.

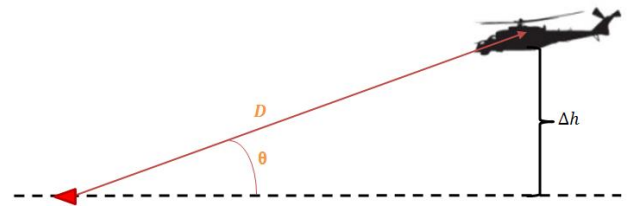


Fig. 5. Vista lateral para correção do ângulo de elevação.

O ângulo real de elevação da aeronave é calculado a partir de (4):

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\Delta h}{D} \right) \quad (4)$$

B. Correção do efeito de transmitância atmosférica

Ao propagar-se pela atmosfera, a radiação é atenuada em função de dois fenômenos: absorção e espalhamento. A absorção se deve à excitação de modos de vibração nas moléculas que compõem a atmosfera e depende fortemente do comprimento de onda. O espalhamento corresponde a mudanças na trajetória da radiação devido a interações com as moléculas e aerossóis suspensos, sendo menos significativo em comprimentos de onda maiores. Ambos os fenômenos são afetados pelas condições meteorológicas locais: temperatura, pressão e umidade.

A absorção nas faixas de interesse é dominada pelas seguintes moléculas: água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e monóxido de carbono (CO). As concentrações de CO₂, CH₄ e N₂O são razoavelmente homogêneas na atmosfera e podem ser consideradas constantes. É importante atentar-se que a concentração de CO varia significativamente em função do dia e do local.

Para cada ângulo de elevação θ e ângulo de aspecto φ geram-se curvas de transmitância espectral com auxílio computacional – sugere-se o *software* MODTRAN – levando-se em conta a distância real e a elevação corrigidas com relação aos sensores, bem como as condições atmosféricas locais. A Fig. 6 ilustra uma curva típica de transmitância atmosférica.

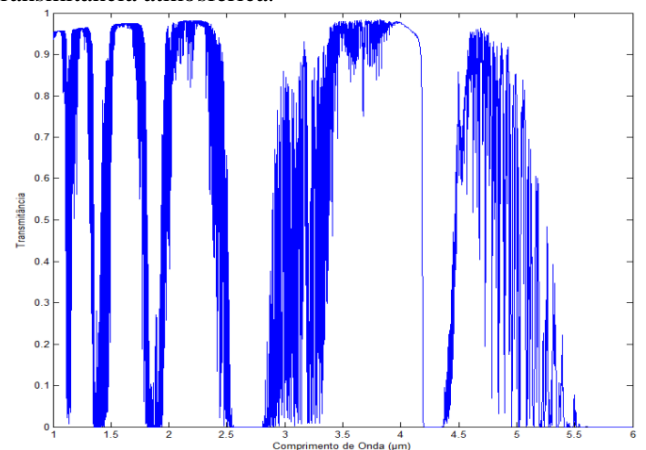


Fig. 6. Curva típica transmitância atmosférica.

A compensação da atenuação atmosférica é realizada por meio da divisão do sinal medido pela transmitância atmosférica no comprimento de onda de interesse.

C. Análise de dados do espectrorradiômetro

De acordo com a nomenclatura do manual do espectrorradiômetro [4], o tipo de medição adotada para este tipo de teste é uma medida espectral de alvos que não preenchem o FOV do equipamento (*Spectral Measurement of Targets not Filling the FOV*). Além disso, deve ser observado que a área de emissão exata do alvo medido é desconhecida. Assim a expressão que determina a intensidade espectral, a partir da medição realizada pelo equipamento, é apresentada em (5).

$$I(\lambda) = \frac{S_V^{target}(\lambda) - S_V^{bkg,target}}{S_V^{BB}(\lambda) - S_V^{bkg}(\lambda)} \Phi(T_{BB}, \lambda) A_{BB} \left(\frac{D_{target}}{D_{BB}} \right)^2 \quad (5)$$

Onde: S_V^{target} , $S_V^{bkg,target}$, S_V^{BB} , S_V^{bkg} referem-se aos sinais elétricos lidos na medição do alvo e na medição de calibração com corpo negro e se referem respectivamente ao sinal do alvo, sinal do alvo mais background, sinal do corpo negro de referência e sinal do background; $\Phi(T_{BB}, \lambda)$ refere-se à equação de Planck, na temperatura do corpo negro utilizado na calibração; A_{BB} refere-se à área observada do corpo negro, durante a calibração; D_{BB} é a distância em que o corpo negro foi observado durante a calibração; D_{target} é a distância do alvo em relação aos equipamentos, inserida no momento da medição.

Durante as medições não é possível obter a distância alvo-equipamento real, portanto deve-se inserir no equipamento a distância nominal planejada. A distância real fornecida pelo DGPS é inserida posteriormente na análise de dados.

Assim, para corrigir os valores de intensidade com utilização da distância real, deve-se multiplicar cada valor de intensidade pelo fator $\left(\frac{D_{real}}{D_{target}} \right)^2$. A intensidade radiante correta para a distância real é dada por (6):

$$I_{D_{real}} = I_{target} \cdot \left(\frac{D_{real}}{D_{target}} \right)^2 \quad (6)$$

Este processo está ilustrado na Fig. 7, onde a seguinte nomenclatura é adotada: DGPS – GPS diferencial; MODTRAN – *software* utilizado para cálculo da transmitância atmosférica; λ – comprimento de onda; τ_{atm} – transmitância atmosférica; ER – espectrorradiômetro; D_{real} – distância real fornecida pelo DGPS; $D_{nominal}$ – distância planejada para o teste; MATLAB – ambiente de programação de alto nível, utilizado para o processamento de dados.

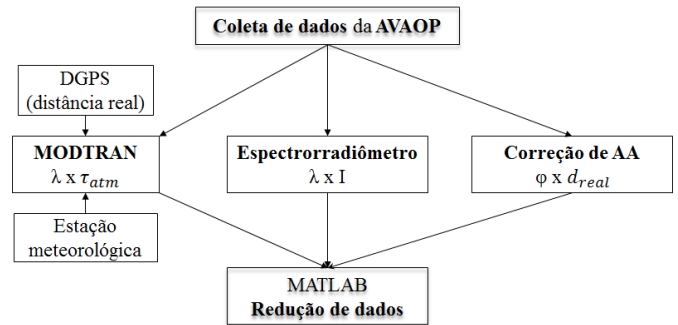


Fig. 7. Obtenção da AIV através do espectrorradiômetro.

Após este processo utiliza-se o *software* MATLAB para a geração dos gráficos da AIV da aeronave, integrando-se a intensidade radiante na banda de interesse, conforme o exemplo abaixo referente à banda SWIR:

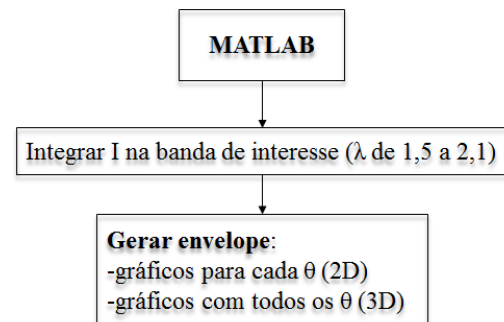


Fig. 8. Obtenção dos gráficos de AIV.

D. Análise de dados da câmera termal

Para os testes com a câmera termal, primeiramente deve-se determinar os IT que permitem a cobertura dos diversos setores da aeronave (cada um para uma faixa de temperatura diferente), atentando para não ultrapassar o limite de saturação dos sensores em nenhum dos setores determinados. A frequência de amostragem do *frame* sugerida é de 25 Hz para que os filmes gerados possuam tamanho adequado para análise (gira em torno de 1500 *frames*).

Passo 1: inicialmente, para a análise dos dados, é necessário encontrar a proa e a distância reais da aeronave em relação à câmera FLIR em cada momento (*frame*). As informações de posição e proa da aeronave são tiradas respectivamente do DGPS e dos sistemas específicos de cada aeronave. Para isso é necessário que todos os equipamentos estejam todos sincronizados em tempo (GPS). O diagrama abaixo descreve este processo:

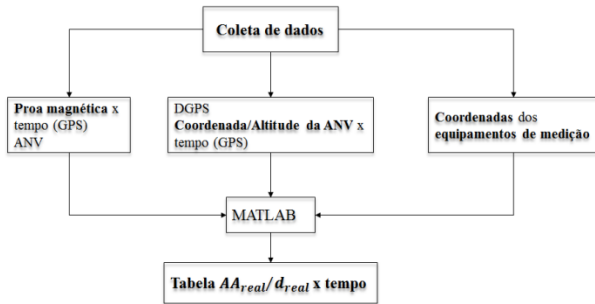
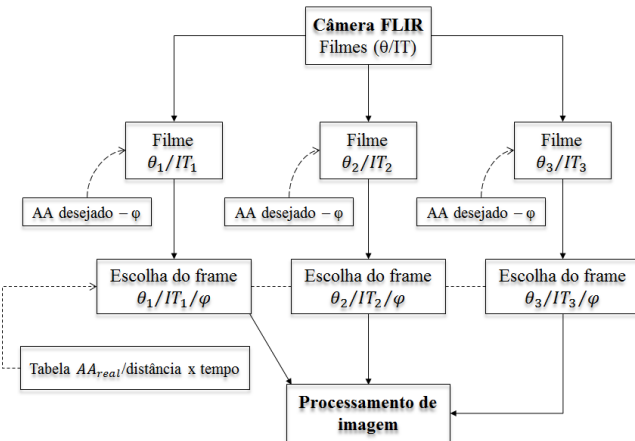


Fig. 9. Ângulo de aspecto e distâncias reais.

Passo 2: uma vez que exista uma tabela relacionando o ângulo de aspecto real e distância real, deve-se então selecionar, em cada filme gerado, quais os *frames* que correspondem aos ângulos de aspecto desejado. Dessa forma, para cada IT utilizado determina-se o *frame* que possui as condições de aspecto mais semelhantes às desejadas, para que sejam processados juntos de forma a obter a intensidade radiante total da aeronave em cada ângulo de aspecto. O diagrama da Fig. 10 ilustra este processo (para um exemplo com três tempos de integração):


 Fig. 10. Seleção dos *frames* de cada vídeo.

Uma vez determinados os *frames* a serem analisados, tem início a etapa de processamento de imagens. Os *frames* de cada IT são utilizados para completar o desenho da aeronave, de forma a contemplar adequadamente todas as emissões provenientes da aeronave, sem perdas nem sobreposições. Este processo está representado no fluxograma da Fig. 11, onde é adotada a seguinte legenda: IT - Tempo de integração; DL – nível digital, que é o sinal elétrico gerado pela câmera em função da energia IR recebida pelos seus sensores; Tbb – temperatura de corpo negro; Grafula – software utilizado para obter uma tabela de valores a partir da imagem de um gráfico; L – radiância, em $W/(sr.m^2)$; τ_{atm} – transmitância atmosférica; τ_{inst} – curva de resposta espectral do instrumento de medição; D_{real} – distância real fornecida pelo DGPS; Cedip/MATLAB – função fornecida pelo fabricante da câmera para o processamento das imagens obtidas; I – intensidade radiante, em W/sr .

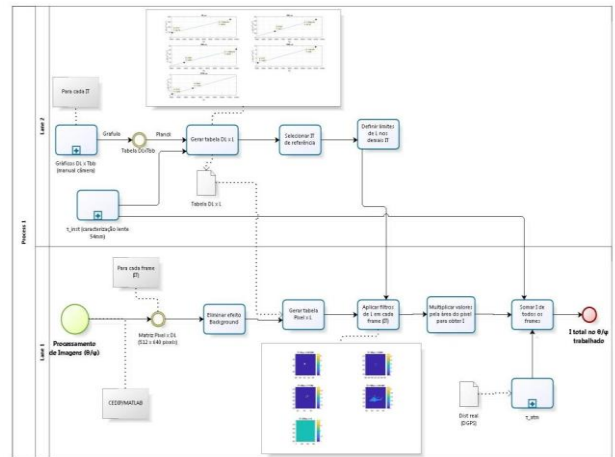


Fig. 11. Processamento de imagens da câmera termal.

Passo 3: primeiramente, utilizando-se os gráficos existentes no manual da câmera, é associado para cada tempo de integração, um *digital level* (DL) em função de uma temperatura de corpo negro. O software Grafula, em seguida, fornece tabelas com esses valores (DLxTbb) para cada IT. Obtém-se no MATLAB, aplicando-se a equação de Planck, uma nova função que passa a associar o DL da câmera a um valor de radiância (L). Esta nova função deve ser corrigida pela curva de resposta do instrumento de medição (τ_{inst}), obtida pela caracterização da lente da câmera. A Fig. 12 apresenta alguns gráficos obtidos nesse processo.

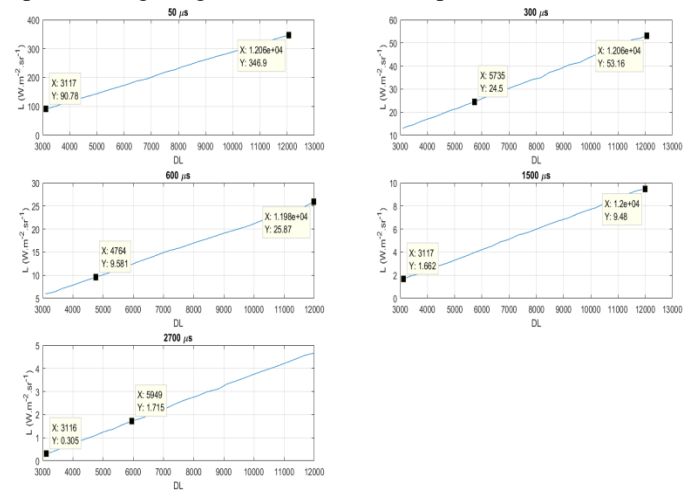


Fig. 12. Gráficos típicos de radiância L em função de DL.

Passo 4: nos gráficos obtidos na etapa anterior (um para cada IT), existem valores sobrepostos de radiância (eixo Y). Dessa forma, é necessário estipular um filtro de radiância para cada IT, para que todas as faixas de radiância sejam cobertas sem que haja sobreposição. Para isso, um dos gráficos é tidocomo referência, o qual será utilizado na sua faixa de radiância completa. Os limites de radiância deste gráfico de referênciasão utilizados para estipular os filtros dos outros gráficos.

Passo 5: utiliza-se a função CEDIP no MATLAB para a obtenção do DL em cada *frame* analisado. Como resultado, é

obtida uma matriz de 512x640 (número de pixels por *frame*) com o valor de DL de cada pixel.

Passo 6: feito isso, é necessário realizar a eliminação do efeito do background. Este processo é feito aplicando-se um filtro de DL ao *frame* correspondente ao maior IT (dentro os que retornaram respostas não nulas). Este filtro deve ser selecionado manualmente de forma a eliminar os DL não nulos de pixels externos à aeronave (background), sem anular os pixels correspondentes à aeronave.

Passo 7: utiliza-se a curva DLxL obtida no passo 3 para fazer uma nova matriz de radiância (L) de cada pixel. Com esta matriz, através do CEDIP, é possível obter imagens para cada tempo de integração como as representadas na Fig. 13.

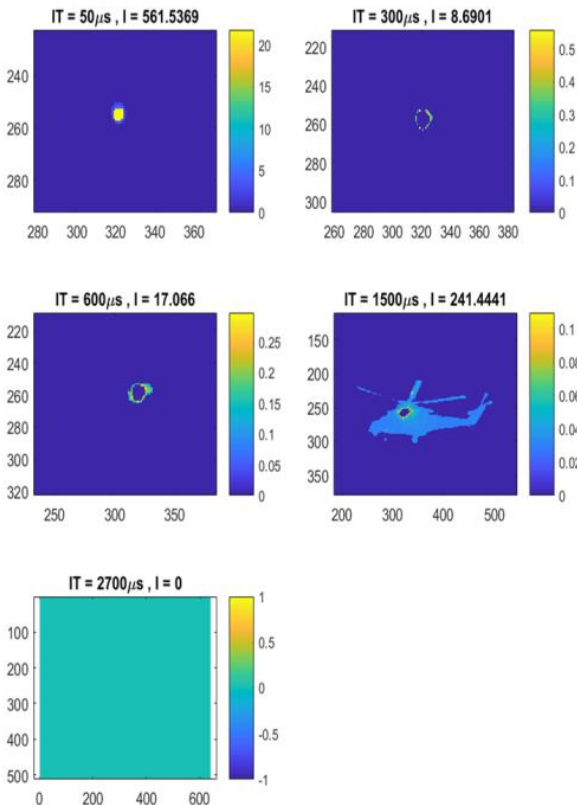


Fig. 13. Imagens típicas de radiância para vários IT.

Aplica-se então as curvas de radiância, como exemplificadas na Fig. 12, para cada IT definido no passo 4 para que as imagens não possuam áreas sobrepostas. Dessa forma, gera-se um “quebra-cabeça” perfeito, onde os valores de radiância total de cada frame podem ser somados para se obter o valor de radiância total para o ângulo de aspecto analisado, ou seja, para cada par (θ, φ) medido.

Passo 8: para se obter o valor de intensidade radiante (W/sr) é necessário multiplicar os valores obtido pela área do pixel. Na sequência multiplica-se o valor obtido pelos fatores de correção das transmitâncias atmosférica (τ_{atm}) e da transmitância do equipamento (τ_{inst}). Por fim os valores de intensidade radiante de todos os frames são somados para se obter a intensidade radiante (I) total no ângulo de aspecto analisado (θ/φ) , que é o resultado final buscado.

A AIV é, então, obtida juntando-se os valores obtidos em todos os ângulos de aspecto medidos.

V. CONCLUSÕES

A obtenção da assinatura no infravermelho de uma aeronave envolve diversas etapas, tanto estágios de planejamento e coleta de dados, quanto a posterior análise das medições realizadas. Dentro desta etapa de análise, podem-se distinguir metodologias para o espectrorradiômetro e para a câmera termal. Enquanto a análise dos dados do espectrorradiômetro apresenta processos mais automáticos, a análise dos dados pela câmera termal envolve etapas menos diretas, como a determinação do *frame* a ser utilizado, determinação de background, escolha dos tempos de integração, análise de curvas DLxL, todos esses processos ainda não automatizados. Por outro lado, apesar da maior complexidade para a extração da AIV pela câmera termal, comparado ao espectrorradiômetro, a câmera é um equipamento portátil e de fácil utilização, não demandando nitrogênio líquido para sua refrigeração.

Desta forma, o trabalho apresenta metodologias para extração da AIV de aeronaves pelo espectrorradiômetro e pela câmera termal, cabendo a futuros estudos o refinamento das metodologias elaboradas, tomando por base as considerações embarcadas neste estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] Rao G.A., Mahulikar S.P. Effect of atmospheric transmission and radiance on aircraft infrared signatures. *Journal of aircraft*, Vol. 42, No. 4, 2005.
- [2] RAVAOP Envelope Infravermelho do AH-2, de 10 de Julho de 2018.
- [3] C.G.Carlson; D.E. Clay. *The Earth Model – Calculating Field Size and Distances Between Points using GPS Coordinates*. SSMG-11 (Site Specific Management Guidelines). Potash & Phosphate Institute, 1999.
- [4] CI Systems. *Spectroradiometer (SR-5000/SR-5000W), Operation and Maintenance Manual*, Manual P/N: 605-4302 REV C, March 2004.