

Estudo dos efeitos de *flares* em autodiretores de primeira e segunda geração

Caio Augusto de Melo Silvestre^{1,2}, Eduarda de Proença Rosa Campos², Luty Rodrigues Ribeiro³, Luciano Barbosa Magalhães²

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

²Instituto de Aplicações Operacionais (IAOP), São José dos Campos/SP - Brasil

³Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), São José dos Campos/SP - Brasil

Resumo – O crescente emprego de mísseis infravermelhos de ombro contra alvos aéreos demanda o constante desenvolvimento de métodos de emprego de sistemas de contramedidas. Buscando analisar a efetividade das contramedidas do tipo *flares*, cenários operacionais são modelados, utilizando o *software* SIMIS nas bandas MWIR (Medium Wavelength Infrared) e SWIR (Short Wavelength Infrared). As imagens fornecidas foram empregadas em um modelo implementado em *Simulink* para se analisar os efeitos do lançamento do *flare* em autodiretores de 1ª e 2ª geração. A influência do emprego das contramedidas com dois métodos diferentes de lançamentos foi analisada. Os resultados obtidos ressaltam a importância e a necessidade do desenvolvimento de ferramentas computacionais mais complexas, visando ao desenvolvimento da doutrina de emprego de *flares*.

Palavras-Chave – *Flares*, Mísseis infravermelhos, contramedidas, Simulação.

I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento contínuo de mísseis guiados por calor, fez com que esses armamentos sejam considerados uma arma de ameaça assimétrica, pois são relativamente baratos e têm se mostrado extremamente eficazes, destruindo aeronaves modernas e sofisticadas. Portanto, não existe dúvida em relação à sua eficácia.

Os sistemas portáteis, conhecidos como mísseis de ombro (MANPADS), possuem uma relativa facilidade de emprego por sua portabilidade e mobilidade. Além disso, o processo de engajamento com o alvo é relativamente simples. O míssil guiado é autônomo depois que sai do seu lançador e passivo, já que não emite radiação para o seu guiamento. Consequentemente, a alta mobilidade, transportabilidade e relativo fácil emprego fazem com que os MANPADS, venham se proliferando cada vez mais ao redor do globo, sendo as principais armas utilizadas por grupos não-convencionais. Tais equipamentos podem ser considerados antiquados se comparados aos equipamentos atualmente empregados pelas forças armadas formais e instituídas, porém, devido à sua proliferação ilegal e ao seu elevado poder de dano quando utilizados por grupos mal-intencionados, mostram-se ainda de grande importância. Assim, o estudo desses equipamentos e da eficiência das contramedidas existentes se mostram de elevado potencial estratégico e de elevada relevância [1,2].

As gerações mais antigas de MANPADS utilizam autodiretores guiados no infravermelho com sinais modulados por meio de retículos, o que os deixa relativamente suscetíveis

e vulneráveis a diferentes formas de contramedidas eletrônicas. Estas se dividem basicamente em dois grupos, as contramedidas embarcadas e as ejetáveis, as quais são principalmente representadas pelos sistemas *Directed Infrared Countermeasures* (DIRCM) e pelos *flares* respectivamente. Os *flares* são dispositivos pirotécnicos utilizados para seduzir mísseis infravermelhos, fazendo com que este seja atraído para uma posição onde a detonação da sua cabeça de guerra não seja eficiente contra a aeronave.

Recentemente, com o objetivo de avaliar a efetividade das contramedidas, vários estudos baseados em simulação foram publicados para análise de efetividade de sistemas DIRCM [3,4] e de *flares* [5,6,7]. Estes estudos fornecem *insights* sobre as técnicas de lançamentos eficazes contra diversos tipos de mísseis infravermelhos. Apesar dos resultados substanciais, os trabalhos anteriores [6,7] não forneceram detalhes a respeito do *software CounterSim* onde as simulações foram realizadas, fazendo com que a Força Aérea Brasileira (FAB) tenha que desenvolver as suas próprias ferramentas para que possa dominar este conhecimento de grande valia.

Empregando o MATLAB, Baqar [5] desenvolveu um modelo de realidade virtual para análise de eficácia de *flare* baseado na determinação do centroide da imagem coletada por um sistema imageador do mundo virtual modelado, que pode ser aplicado somente para análise de *flares* contra sistemas imageadores.

Buscando analisar os efeitos de *flares* em autodiretores reticulares com alta fidelidade da modelagem da cena radiométrica se empregou o *software Simulation for Imaging Infrared Systems* (SIMIS) que é um ambiente de simulação desenvolvido pela Denel Dynamics. O SIMIS modela com precisão as assinaturas de objetos na faixa espectral do infravermelho e o comportamento de sistemas imageadores.

De forma a permitir a modelagem de autodiretores reticulares, emprega-se também o *software* Simulink/MATLAB para o modelamento e processamento de sinal dos sensores de mísseis de 1ª e 2ª geração que empregam autodiretores do tipo *spin scan* e *conical scan* respectivamente. Os efeitos de duas técnicas de emprego de *flares* são avaliados.

II. MODELAMENTO DO CENÁRIO INFRAVERMELHO

O *software Simulation for Imaging Infrared Systems* (SIMIS) é um ambiente de simulação desenvolvido pela Denel Dynamics, cujo contínuo desenvolvimento se iniciou em 1990 [8]. O SIMIS modela com precisão as assinaturas de objetos

na faixa espectral do infravermelho e o comportamento de sistemas imageadores.

O formato geométrico dos objetos e a topografia do terreno são descritos em termos de um objeto tridimensional, consistindo em um conjunto de polígonos. A cada polígono são atribuídas propriedades espaciais, radiométricas espectrais e temporalmente variáveis. Polígonos também podem ser parcialmente transparentes para representar nuvens, contramedidas ou plumas de aeronaves. A imagem coletada deste cenário tridimensional é coletada a partir do ponto de vista do autodiretor do míssil.

Os principais contribuintes para o cálculo da radiância de uma cena infravermelha são descritos matematicamente pela Equação 1, cujas variáveis são definidas na Tabela 1, e fornece a radiância espectral da cena infravermelha [8]:

TABELA I. PARÂMETROS RADIOMÉTRICOS [8]

Símbolo	Significado
$\alpha_s L_{bb}(5900K)$	Aproximação da radiância solar refletida
ϵ_a	Emissividade espectral do ambiente
ϵ_b	Emissividade espectral do <i>background</i>
ϵ_h	Emissividade espectral do céu
ϵ_o	Emissividade espectral da superfície objeto
ϵ_s	Emissividade espectral da superfície solar
$L_{bb}(T_a)$	Radiância espectral do corpo negro na temperatura do ambiente
$L_{bb}(T_b)$	Radiância espectral do corpo negro na temperatura
$L_{bb}(T_o)$	Radiância espectral do corpo negro na temperatura
L_p	Radiância espectral do percurso atmosférico
L_{sky}	Radiância espectral do céu
ρ_o	Reflectância espectral da superfície do objeto
S	Responsividade espectral do sensor
τ_a	Transmitância espectral atmosférica do objeto ao sensor
τ_{abo}	Transmitância espectral atmosférica do <i>background</i> ao objeto
τ_{ao}	Transmitância espectral atmosférica do ambiente ao objeto
τ_o	Transmitância espectral atmosférica do objeto
τ_{so}	Transmitância espectral atmosférica do sol ao objeto
θ_a	Ângulo entre a normal da superfície e a vertical
θ_s	Ângulo entre a normal da superfície e o ângulo solar de incidência

$$\begin{aligned}
 L_\lambda = & \underbrace{L_p S}_{\text{Emissão do background}} + \underbrace{L_{bb}(T_o) \epsilon_o \tau_a S}_{\text{Emissão térmica}} \\
 & + \underbrace{L_{bb}(T_b) \tau_o \epsilon_b \tau_{abo} \tau_a S}_{\text{Emissão térmica refletida do ambiente}} + \underbrace{L_{bb}(T_a) \rho_o \epsilon_a \tau_{ao} \tau_a S}_{\text{Emissão térmica refletida do ambiente}} \\
 & + \underbrace{\alpha_s \cos \theta_s L_{bb}(5900K) \rho_o \epsilon_s \tau_s \tau_a S}_{\text{Emissão refletida da luz solar}} \\
 & + \underbrace{\cos \theta_a L_{sky} \rho_o \epsilon_h \tau_a S}_{\text{Emissão da luz solar refletida no ambiente}}
 \end{aligned} \quad (1)$$

Os parâmetros atmosféricos são obtidos do *software* MODTRAN (*Moderate Resolution Atmospheric Transmission*), o qual realiza o cálculo da propagação de radiação na faixa espectral do ultravioleta até o infravermelho longo. O MODTRAN modela com precisão a transmissão de radiação da fonte através da atmosfera e a radiância do

percurso atmosférico que contribui para o fluxo radiante que chega ao sensor. Ele fornece modelos para várias condições atmosféricas encontradas em diferentes regiões do mundo e os efeitos de diferentes estações do ano. Estes modelos incluem o efeito de aerossóis e moléculas encontradas na atmosfera, perfis verticais de pressão e temperatura, e os efeitos da luz solar e da radiação espalhada na atmosfera. A simulação do SIMIS incorpora o escopo completo do código MODTRAN. As propriedades atmosféricas ao longo de qualquer linha de visada (míssil para alvo) podem, portanto, ser contabilizadas.

O SIMIS também calcula a radiância do *background* (céu azul ou terreno) usando o MODTRAN para determinar a assinatura de contraste de destino.

III. MÍSSEIS INFRAVERMELHOS

A Fig. 1 ilustra um típico diagrama de blocos de guiamento e navegação de um míssil infravermelho. O fator determinante para guiamento do míssil é a intensidade de radiação do alvo que chega ao autodiretor através da atmosfera. Tal radiação não é proveniente somente do alvo, mas ainda engloba o cenário em que ele está inserido (*background*) e eventuais contramedidas. Desta forma, a detecção do alvo é uma atividade extremamente complexa, a qual deve ser compreendida em suas nuances antes de podermos atuar de maneira mais eficiente possível, no intuito de dificultar/evitar o seu sucesso.

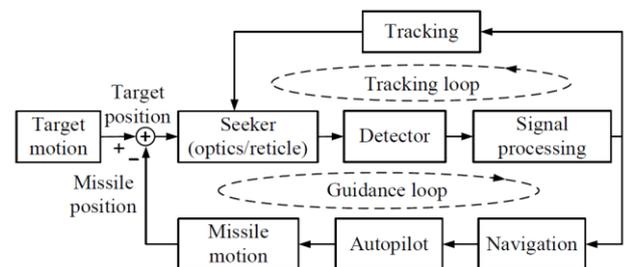


Fig. 1. Diagrama típico de guiamento de um míssil infravermelho [3].

A. Autodiretor Spin-scan e processamento do sinal

A Fig. 2 ilustra um retículo *spin-scan* do tipo *rising sun*, o qual será modelado e simulado neste trabalho, servindo de estudo de caso.

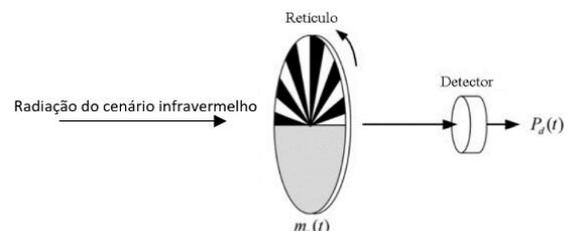


Fig. 2. Seeker Rising Sun [3].

O retículo apresentado possui 12 setores, 6 transparentes e 6 opacos. Os transparentes permitem a transmissão da radiação infravermelha dos alvos (simulando uma transmitância de 100%), enquanto os setores opacos não permitem a transmissão (transmitância de 0%). Na parte cinza, a

transmitância da radiação infravermelha é de 50%. O retículo gira a uma frequência de rotação constante, a qual, para este estudo, foi considerada como um valor de 100 Hz. A Fig. 3 apresenta o sinal gerado pelo retículo *rising-sun*, após modelamento no *Software* MatLab:

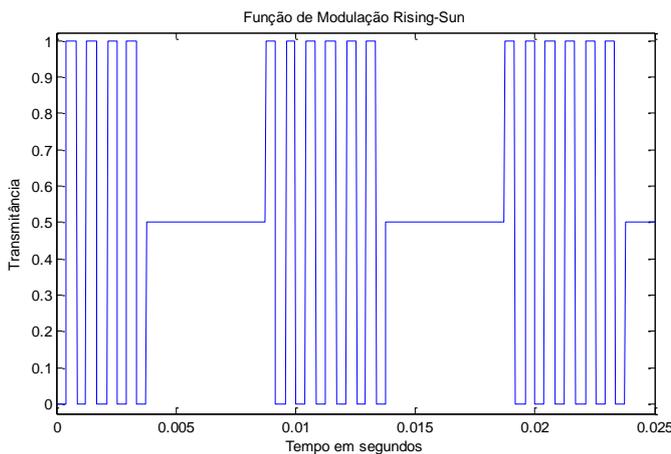


Fig. 3. Função de modulação reticular.

A imagem fornecida pelo SIMIS, L_{cena} , consiste em um *frame* em que cada *pixel* possui um valor de radiância obtido pela equação 1, é convertida para o valor de fluxo radiante no detector por meio da equação 2, a qual leva em consideração o processo de filtragem espacial realizado pelo retículo.

$$\phi_{det}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (L_{cena})_{ij} \pi}{n^2} A_D \left(\frac{D}{f}\right)^2 m_r(t) \quad (2)$$

onde, D é o diâmetro da pupila de entrada, f a distância focal do sistema óptico do míssil, A_D a área do detector e n o número de *pixels* da imagem coletada e $m_r(t)$ é a função de modulação gerada pelo retículo, ilustrada na Fig. 3.

O fluxo radiante é então convertido em sinal elétrico pelo detector, assumido como ideal, e processado de acordo com o tipo de autodiretor. Para fins de modelamento, o processamento do sinal é então representado conforme o diagrama de blocos da Fig. 4. Inicialmente o sinal é filtrado por um filtro passa-faixa, centralizado na frequência da portadora. Esta é dada pelo dobro do produto entre o número de pares de setores opacos e transparentes e a frequência de rotação do retículo [9].

Após o primeiro filtro passa-faixa, o sinal passa pelo processo de detecção de envoltória, o qual é utilizado para se detectar a amplitude do sinal, podendo assim se estimar a distância radial do alvo em relação ao centro do retículo [3,6]. Posteriormente, o sinal passa por mais um filtro passa-faixa centralizado na frequência de rotação do retículo e, por último, a fase do sinal é detectada, utilizando-se um filtro passa baixa e um sinal de referência senoidal.

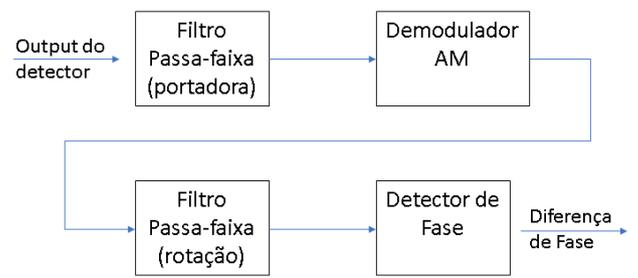


Fig. 4. Procedimento de Processamento do Sinal.

B. Autodiretor *Con-scan* e processamento do sinal

Ao contrário dos autodiretores reticulares de primeira geração, o retículo de autodiretores de segunda geração, conhecidos como *conical scan*, é estacionário. Após ser coletada, a imagem é rotacionada no retículo por um espelho inclinado a uma frequência constante, de forma a suplantar a limitação em detectar alvos no eixo óptico de autodiretores de primeira geração.

O retículo de um sistema de segunda geração modelado neste trabalho é nomeado como *wagon wheel*, sendo ilustrado na Fig. 5. Quando o alvo está no eixo óptico, um círculo de rotação centralizado é produzido, gerando uma onda quadrada sem variação de frequência. Como a frequência da portadora varia de acordo com a posição do alvo, o sinal é modulado de forma similar à modulação em frequência. A Fig. 5 ilustra esse processo, sendo composta por duas situações, das quais, na primeira o alvo está centralizado no campo de visada e na segunda o alvo está deslocado do eixo óptico, gerando assim uma variação da frequência gerada proporcional à amplitude do deslocamento.

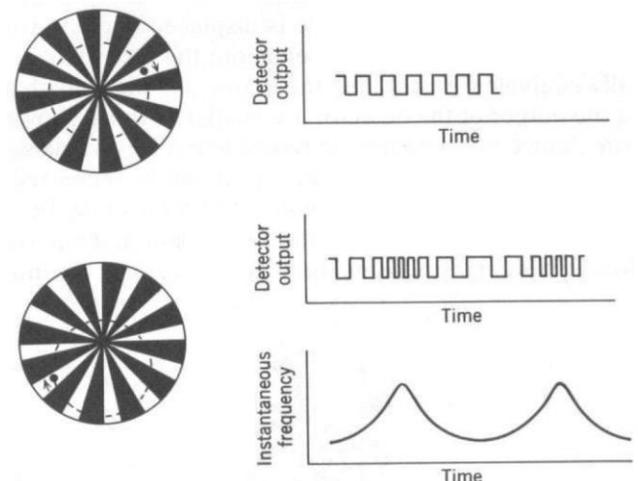


Fig. 5. Retículo Wagon-wheel [6].

O processamento do sinal de um retículo *con-scan* é ilustrado na Fig. 6. O sinal gerado pelo detector tem sua portadora extraída por um filtro passa banda com um limitador, seguido de um filtro passa alta, detectando componentes de alta frequência do sinal da portadora, e um detector de envelope. O *output* do detector de envelope é então filtrado por um filtro passa faixa centralizado na frequência de rotação do espelho inclinado que neste trabalho é de 100 Hz.

Por último, o detector de fase mede a diferença de fase gerada em relação à fase de rotação do espelho [3].

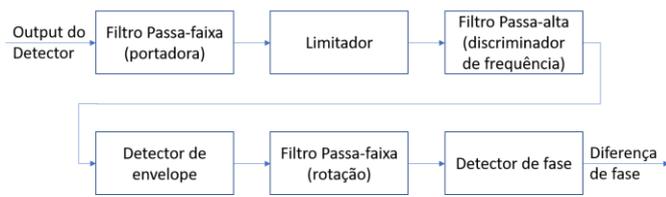


Fig. 6. Processamento de sinal de um autodiretor *con-scan*.

A diferença de fase obtida por ambos processos de processamento de sinal corresponde ao ângulo ω , doravante denominado posição azimutal, representado na Fig. 7 para ambos retículos, juntamente com a posição radial dada por σ .

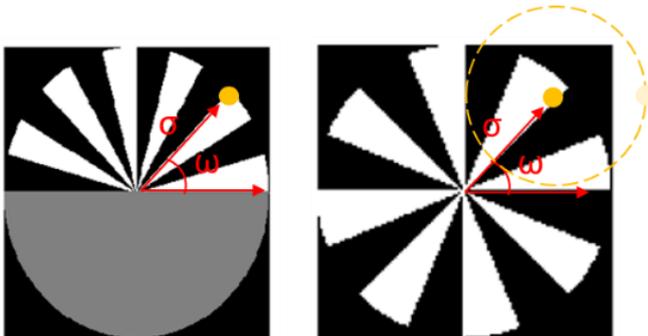


Fig. 7. Parâmetros relativos à posição do alvo em relação ao autodiretor

IV. SIMULAÇÃO

O modelo proposto para análise dos efeitos dos *flares* em autodiretores infravermelhos reticulares foi implementado no software MATLAB/Simulink versão 9.1. A arquitetura implementada é ilustrada na Fig. 8.

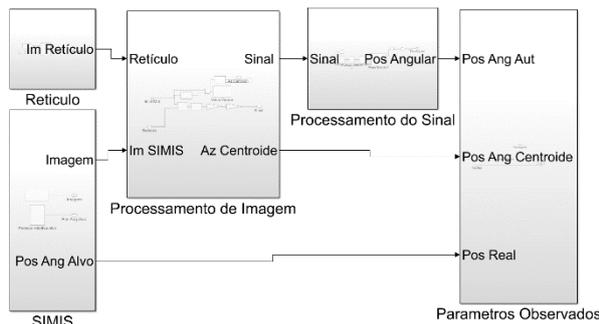


Fig. 8. Modelo implementado em Simulink.

O vídeo gerado pelo SIMIS é a entrada da simulação. As imagens são filtradas espacialmente pelo retículo e então convertidas em sinal elétrico obedecendo a equação 2 e assumindo a resposta do detector como ideal. O sinal elétrico é processado de acordo com o tipo de autodiretor. A saída do subsistema de processamento de sinal corresponde à posição angular do alvo.

Os cenários analisados consistem em uma aeronave de caça voando em linha reta lançando *flares* MTV (Magnésio,

Teflon®, Viton®). Estes são empregados com duas configurações diferentes, doravante denominadas cenário 1 e cenário 2. Esta cena é observada por um autodiretor *spin-scan* e um autodiretor *con-scan* estacionários. Os parâmetros dos cenários 1 e 2 são explicitados na Tabela II.

TABELA II. PARÂMETROS RADIOMÉTRICOS

	Cenário 1	Cenário 2
P_{alvo}^I (m)	[1000 8.75 3008.75]	[1000 8.75 3008.75]
V_{alvo}^{corpo} (m/s)	[300 0 0]	[300 0 0]
P_{mis}^I (m)	[0 0 3008.75]	[0 0 3008.75]
V_{mis}^{corpo} (m)	[0 0 0]	[0 0 0]
P_{flares}^{corpo} (m)	[0 0 0] / [0 0 0]	[0 0 0] / [0 0 0]
Ang_{flares} (°)	[0 90 45] / [0 -90 45]	[0 90 45] / [0 -90 45]
$\ V_{ej}\ $ (m/s)	30	30

Onde, P_{alvo}^I e V_{alvo}^{corpo} são a posição e velocidade da aeronave em coordenada inercial e do corpo respectivamente. P_{mis}^I e V_{mis}^{corpo} são a posição e velocidade da aeronave em coordenada inercial e do corpo respectivamente. Os *flares* são lançados de duas posições diferentes, onde P_{flares}^{corpo} é a posição de lançamentos dos *flares* em coordenadas do corpo e a orientação de ejeção é dado por Ang_{flares} que representa os ângulos de rolamento, guinada e arfagem nesta ordem. A magnitude da velocidade de ejeção dos *flares* é dada por $\|V_{ej}\|$.

No cenário 1 são utilizados 8 *flares*, sendo lançados em pares das duas posições de lançamento simultaneamente. Cada par é lançado com um intervalo de 0,5 s. No cenário 2 são utilizados 4 *flares*, lançados isoladamente, de maneira alternada, a cada 1 s. Em ambos cenários, o lançamento dos *flares* se inicia 0,5 s após o início da simulação.

As Fig. 9 e 10 ilustram as trajetórias do alvo e dos *flares* dos cenários 1 e 2 respectivamente.

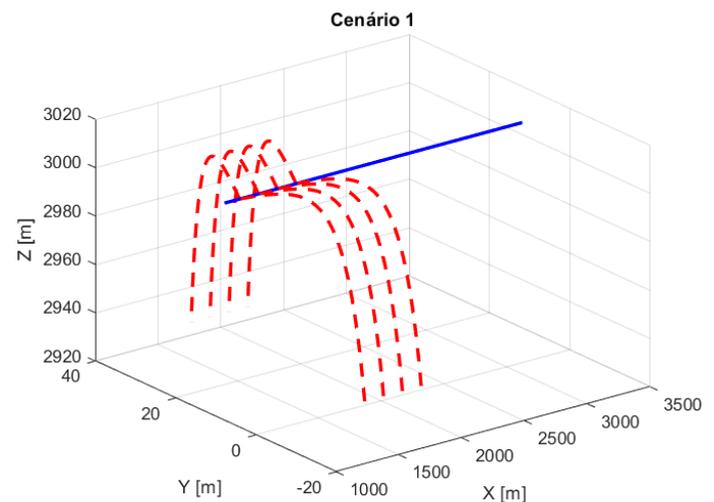


Fig. 9. Trajetórias da aeronave e dos *flares* do cenário 1.

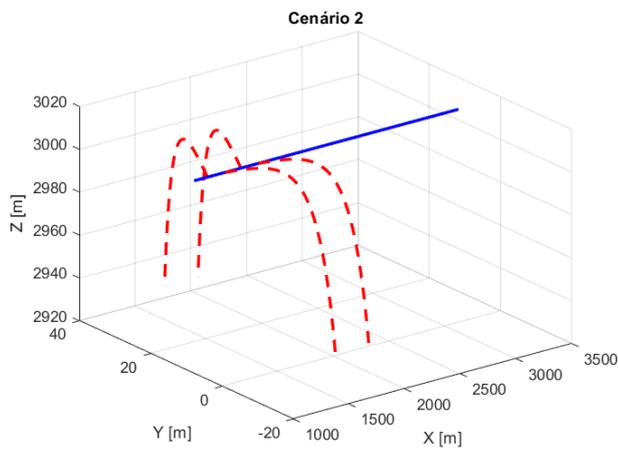


Fig. 10. Trajetórias da aeronave e dos flares do cenário 2.

As imagens são coletadas com 512×512 pixels nas faixas de 1 a 2 μm e de 3 a 5 μm , sendo denominadas de *Short Wavelength Infrared* (SWIR) e *Medium Wavelength Infrared* (MWIR) respectivamente. Considera-se a resposta espectral do sensor como unitária em ambas as faixas.

A Fig. 11 apresenta as imagens coletadas, em escala logarítmica, no instante de 0,74 segundos, em ambas as bandas espectrais e cenários. Buscando-se visualizar maiores detalhes, somente o quadrante em que o alvo e flares se encontram é apresentado. Na banda SWIR percebe-se que o contraste entre o alvo e o background é menor do que na banda MWIR. Isso ocorre devido à maior intensidade da radiação espalhada na atmosfera na banda SWIR.

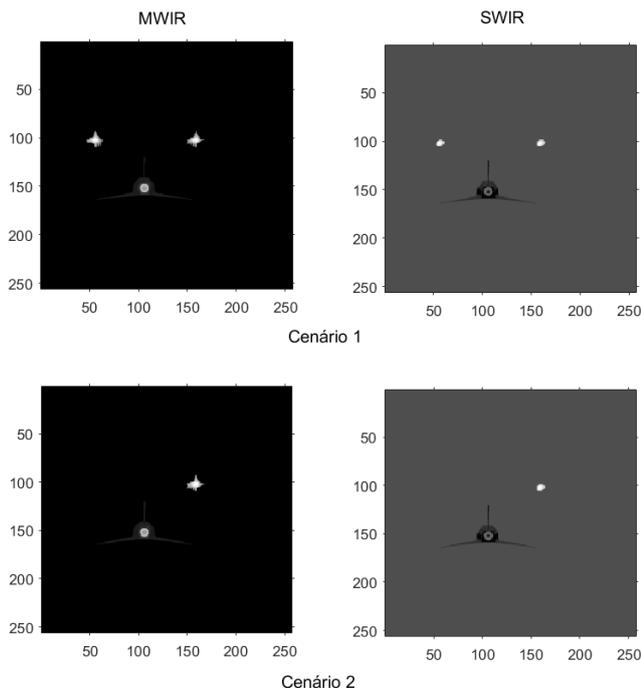


Fig. 11. Imagens coletadas em 0,74 segundos normalizadas em escala logarítmica.

As imagens coletadas na banda MWIR são utilizadas para se analisar a resposta do autodiretor de *conical-scan* de 2ª

geração. Já as imagens da banda SWIR são empregadas no autodiretor de 1ª geração *spin-scan*.

Os efeitos dos flares serão analisados por meio da média e desvio padrão do erro absoluto entre a resposta de posição angular azimutal do sensor nos cenários com flares e em um cenário sem flares.

A Fig. 12 apresenta a resposta do autodiretor *spin-scan* no cenário sem flares e nos cenários 1 e 2, a seta vermelha indica o momento de início de lançamento de flares. Além disso, apresenta-se também a posição angular azimutal real do alvo na linha hachurada. A Fig. 13 apresenta a média e o desvio padrão do erro absoluto para intervalos de tempo de 0,1 segundos.

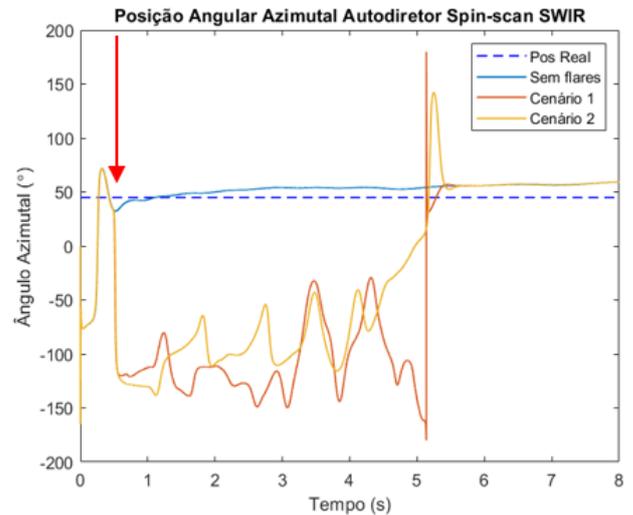


Fig. 12. Posição Angular do alvo fornecida pelo autodiretor *spin-scan*.

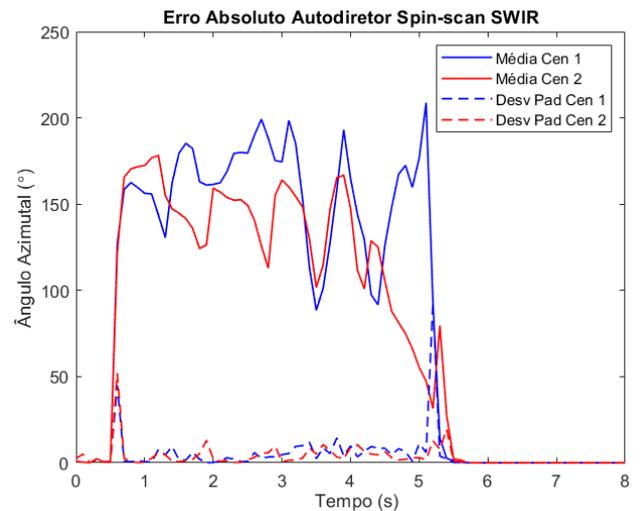


Fig. 13. Média e desvio padrão do erro absoluto gerado pelos flares no autodiretor *spin-scan*.

Observando a resposta do sensor sem a presença de flares na Fig. 12, verifica-se que o mesmo demorou cerca de 0,6 s para fornecer a posição angular do alvo de maneira estável. Este fato não ocorreu em trabalhos anteriores que empregaram o mesmo modelo de simulação [3,4]. Isto pode ter ocorrido

devido à intensidade radiante proveniente do *background*, pois esta não foi levada em consideração em [3,4].

Além disso, através das Fig. 12 e 13 percebe-se que o erro induzido dos *flares*, em ambos os cenários, possuem um grande valor médio e uma baixa variabilidade. Nota-se que o erro médio gerado no Cenário 2 é pouco maior do que o do Cenário 1 até cerca de 1 s após o lançamento dos *flares*. Já a partir de 1 s após o lançamento, observa-se que o erro gerado no Cenário 1 é maior do que o do Cenário 2.

As Fig. 14 e 15 apresentam os parâmetros observados na simulação do autodiretor *con-scan*. Analisando estas figuras, nota-se que a amplitude do erro gerado pelos *flares* aumentou consideravelmente após 4,5 s o lançamento do primeiro *flare* em ambos os cenários, que é indicado pela seta vermelha. Nota-se também que o erro gerado no cenário 2 foi maior do que no cenário 1. Este fato é interessante operacionalmente, pois no cenário 2 foram utilizados somente 4 *flares* e no primeiro utilizou-se 8.

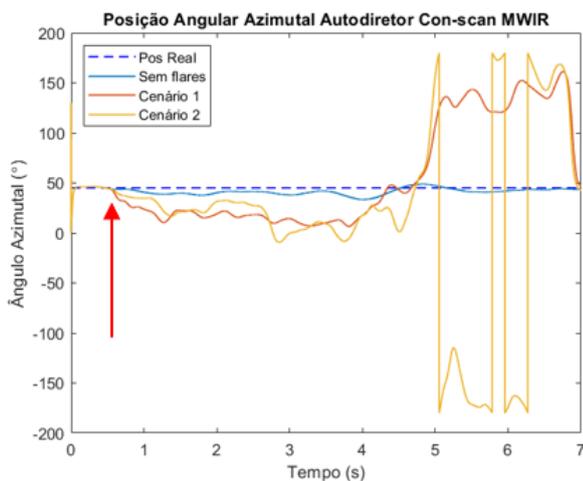


Fig. 14. Posição Angular do alvo fornecida pelo autodiretor *con-scan*.

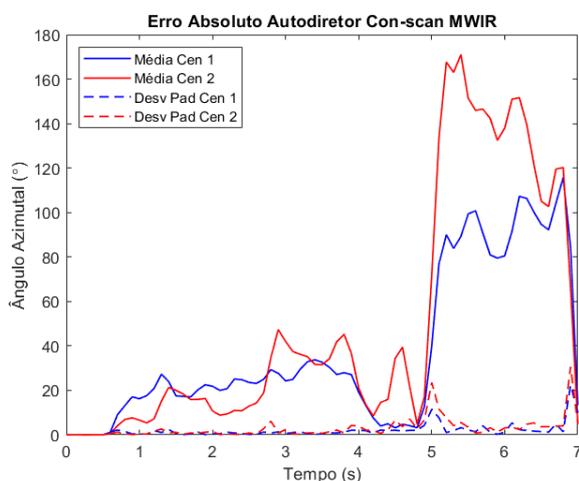


Fig. 15. Média e desvio padrão do erro absoluto gerado pelos *flares* no autodiretor *con-scan*.

Levando-se em consideração somente a situação modelada, nota-se que ambas as técnicas de lançamento de *flares* foram capazes de induzir erro na informação fornecida

por ambos sensores. Além disso, pelo fato de que metade dos *flares* foram utilizados no cenário 2 em relação ao 1, pode-se afirmar que operacionalmente o segundo método de lançamento pode ser mais vantajoso. Entretanto, para se obter maiores conclusões a respeito de qual método deva ser empregado operacionalmente, simulações do engajamento entre o míssil e o alvo devem ser realizadas em diversas situações operacionais.

V. CONCLUSÃO

A crescente ameaça e desenvolvimento de mísseis infravermelhos demanda o constante desenvolvimento das doutrinas de emprego de sistemas de contramedidas.

Visando à análise dos efeitos de contramedidas infravermelhas do tipo *flares*, a simulação de um cenário operacional foi realizada no *software* SIMIS nas faixas espectrais do MWIR e do SWIR, fornecendo imagens de uma aeronave de caça lançando *flares* com dois métodos diferentes, denominados de cenário 1 e cenário 2. Estas imagens foram empregadas em um *software* de simulação de processamento do sinal de autodiretores reticulares do tipo *spin-scan* e *con-scan*.

Os resultados decorrentes desse estudo preliminar permitem inferir que o erro induzido pelo lançamento dos *flares* é diferente para cada geração de autodiretor. Além disso, o erro gerado foi similar em ambos os cenários operacionais, permitindo se afirmar que o cenário 2 pode ser mais eficiente pois utilizou menos *flares*. Ademais, a metodologia apresentada pode ser empregada para se auxiliar a determinar os métodos de lançamento de *flares* por aeronaves militares, mediante o estudo dos efeitos de diversos cenários operacionais.

REFERÊNCIAS

- [1] Department of Foreign Affairs and Trade, "Man-Portable Air Defence Systems (MANPADS) Countering the Terrorist Threat". Commonwealth of Australia (Australia), 2009.
- [2] D. Kimball, "MANPADS at a Glance". 2013. Disponível in: < <https://www.armscontrol.org/factsheets/manpads> >. Accessed on: May, 2017.
- [3] T. Bae, B. Kim, Y. Kim, Y. Ahn, "Jamming effect analysis of infrared reticle seeker for directed infrared countermeasures". *Infrared Physics and Technology*, vol. 55, p. 431-441, 2012.
- [4] C. A. M. Silvestre, L. A. Faria. "Análisis of Open-Loop DIRCM Jamming Effects on First Generation Infrared Seekers" Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa. São José dos Campos, 2018.
- [5] S. Baqar. "Low-cost PC-based High-Fidelity Infrared Signature Modelling and Simulation". Tese de PhD, Universidade de Cranfield, 2007.
- [6] J. Jackman. "Pre-emptive Infrared Countermeasures". Tese de PhD, Universidade de Cranfield, 2011.
- [7] L. B. Magalhães, F. D. P. Alves, L. B. Ramos. "Influência da velocidade de lançamento e do ângulo de aspecto na intensidade radiante de flares MTV na faixa de 3 μm a 5 μm " Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa. São José dos Campos, 2018
- [8] C. J. Willers, M. S. Willers, F. Lapiere. "Signature Modelling and Radiometric Rendering Equations in Infrared Scene Simulation Systems". In *Proceedings SPIE 8187, Technologies for Optical Countermeasures VII*, 2011.
- [9] R. D. Hudson, "Infrared systems engineering". London, Wiley, 1969.