

Modelagem de LAR de Armamento Inteligente para Treinamento em Solo de Tripulação

Abner Vinicius de Andrade¹

¹Embraer S.A., Gavião Peixoto/SP – Brasil

Resumo – Armamentos aéreos inteligentes, com uma interface de comunicação com a plataforma de lançamento segundo o MIL-HDBK-1760A, podem fornecer informações sobre a sua Região de Aceitabilidade de Lançamento (LAR - *Launch Acceptability Region*) para que a tripulação manobre adequadamente a aeronave para o seu emprego eficaz. É importante que a tripulação entenda como a dinâmica de voo afeta a balística do armamento, as suas capacidades de guiamento e, consequentemente, o formato geral da LAR. Este artigo apresenta um estudo de caso de construção de modelo baseado em equações lineares dependentes dos parâmetros de voo mais significativos (altitude e velocidade), para representar visualmente a LAR de um armamento inteligente com guiamento por GPS (*Global Positioning System*) em estações de treinamento em solo da tripulação, baseado em dados reais de testes do armamento em laboratório.

Palavras-Chave – Launch Acceptability Region (LAR), MIL-HDBK-1760A, Modelagem.

I. INTRODUÇÃO

A. Armamentos Inteligentes

Durante décadas, a indústria de defesa e as forças aéreas de todo o mundo têm se esforçado para aumentar a letalidade de aeronaves militares de ataque, melhorando a precisão dos armamentos empregados. Isso levou ao desenvolvimento de diversas tecnologias de guiamento para armamentos aéreos, tais como [1]:

- infravermelho;
- eletro-óptico;
- radar;
- TV (televisão);
- armamentos antirradiação;
- *beam riding*;
- *link* de comando;
- laser.

Armamentos aéreos modernos já contemplam o guiamento baseado em sistemas acoplados de GPS e de navegação inercial (GPS/INS) [2]. Com essa tecnologia de guiamento, o armamento é programado com as coordenadas do alvo (latitude, longitude e altitude) e a referência inercial do armamento é continuamente atualizada pelos sistemas da aeronave (inercial e/ou GPS). Após o lançamento, a unidade embarcada de guiamento inercial direciona o armamento para as coordenadas do alvo e uma antena GPS localizada no kit de guiamento atualiza as coordenadas atuais do armamento

em tempo real (não há nenhum sensor da aeronave envolvido no guiamento do armamento após o lançamento).

Uma desvantagem dos armamentos guiados por GPS/INS é a sua vulnerabilidade a *jamming* e *spoofing* de GPS, técnicas de guerra eletrônica cada vez mais utilizadas em cenários de combate em todo o mundo. No entanto, elas apresentam diversas vantagens, entre elas [3]:

- 1) Os armamentos guiados por GPS/INS podem ser empregados no modo *fire and forget*, ou seja, após o lançamento, dependem apenas de seus sistemas internos para manobrar em direção ao alvo (não dependem de dados da aeronave).
- 2) Como as coordenadas do alvo são conhecidas antes do lançamento, o armamento consegue corrigir a trajetória a partir do meio do curso, permitindo que a aeronave lance o armamento a uma distância maior (emprego *stand-off*), o que proporciona um aumento da sua capacidade de sobrevivência ante a defesa antiaérea inimiga.
- 3) Os armamentos guiados por GPS/INS são imunes à meteorologia, pois permitem operação eficaz independentemente das condições climáticas e de visibilidade.
- 4) O alvo não consegue perceber o ataque utilizando sistemas de alerta, como RWR (*Radar Warning Receiver*) ou LAWS (*Laser Approach Warning System*). Se o armamento também tiver uma Seção Transversal de Radar (RCS - *Radar Cross Section*) reduzida, ele pode se aproximar do alvo com maior furtividade.

Como exemplo de armamento que possui esta tecnologia de guiamento, a família de bombas Paveway inclui a bomba guiada a laser e GPS/INS GBU-49, mostrada na Fig. 1 utilizada pela Força Aérea dos EUA (USAF) [4].



Fig. 1. Bomba GBU-49, guiada por laser e GPS/INS, pertencente à família Paveway II, montada no UAV MQ-9 Reaper.

B. MIL-HDBK-1760A

O MIL-HDBK-1760A é um manual desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos EUA para suportar a implementação de um sistema padronizado de interconexão elétrica entre aeronaves e cargas externas, conforme definido pela norma MIL-STD-1760 [5]. O objetivo do MIL-HDBK-1760A é mitigar problemas de integração elétrica entre aeronaves e armamentos, especificando uma interface padrão entre ambos.

Conforme ilustrado na Fig. 2, o manual MIL-HDBK-1760A padroniza a transferência de dados através do barramento MIL-STD-1553, incluindo dados essenciais para o suporte ao guiamento GPS/INS de armas (posição e velocidade da aeronave, marcas de tempo GPS, dados de inicialização etc.). Além disso, suporta a transmissão de dados da antena GPS da aeronave para o armamento utilizando linhas de alta largura de banda e transferência massiva de dados (MDT - *Mass Data Transfer*) para transmitir blocos maiores de dados, como dados de almanaque e efemérides para constelações de satélites GPS. Sendo assim, o MIL-HDBK-1760A é um manual de interconexão adequada para uso com armamentos guiados por GPS/INS.

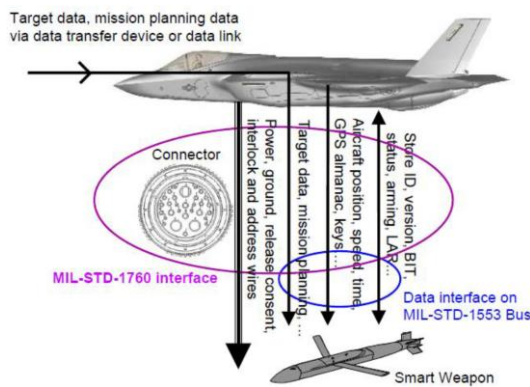


Fig. 2. Interface MIL-HDBK-1760A.

O MIL-HDBK-1760A também suporta o cálculo pelo armamento de uma Região de Aceitabilidade de Lançamento (LAR), que é a região dentro da qual o armamento pode ser lançado para efetivamente atingir o alvo, considerando a energia disponível do armamento e as suas capacidades de manobrabilidade. Essa informação pode então ser usada pelo computador de bordo da aeronave para determinar o ponto de lançamento do armamento e orientar a tripulação por meio da simbologia de pontaria nos *displays* da aeronave. O manual MIL-HDBK-1760A não padroniza o cálculo e a geometria específica da LAR, ficando, portanto, essas definições a critério dos fabricantes dos armamentos.

C. Modelagem da LAR para Treinamento

Considerando a integração de armamentos inteligentes capazes de calcular e informar sua LAR, é útil para a tripulação familiarizar-se com o formato e o comportamento geral desta região, que é dependente dos parâmetros de voo.

As estações de treinamento em solo podem ser o primeiro contato da tripulação com essas informações antes mesmo de visualizá-las na aeronave durante o voo, permitindo um planejamento de missão mais assertivo.

O principal desafio na exibição da LAR nas estações de treinamento reside no fato deste ser um cálculo interno do armamento, sendo este um segredo industrial dos fabricantes. É necessária portanto uma metodologia para modelar a LAR, considerando os parâmetros de voo como entrada e com precisão suficiente para auxiliar no treinamento e familiarização da tripulação, a fim de exibi-la nos *displays* das estações de treinamento.

Este artigo aborda um estudo de caso de modelagem de LAR para um armamento MIL-HDBK-1760A com guiamento GPS/INS de um armamento para auxiliar no treinamento em solo de tripulação. A seção de Metodologia detalha as estratégias utilizadas para determinar os principais parâmetros de voo que afetam a forma dinâmica da LAR e o modelo proposto para representá-la nos *displays* simulados da estação de treinamento em solo. A seção de Resultados apresenta uma comparação entre dados reais da LAR obtidos em testes de laboratório com o armamento e os resultados obtidos com o modelo proposto, além de uma análise estatística dos resultados.

Nota de confidencialidade: Informações e dados adicionais relacionados ao presente estudo, que não foram publicados neste artigo, são de propriedade exclusiva da organização responsável pela pesquisa. Por se tratar de dados confidenciais e estratégicos, seu acesso externo está restrito e sujeito à autorização formal da referida instituição.

II. METODOLOGIA

A. Definição da LAR

A LAR do armamento considerado é mostrada na Fig. 3, sendo definida como um polígono de nove vértices desenhado em torno de um ponto de referência calculado pelo armamento, considerando as coordenadas pré-determinadas do alvo. Os vértices são então determinados em incrementos de 40°, de 0° a 320°, sendo a referência de 0° o Norte verdadeiro tendo cada vértice um *offset* calculado a partir do ponto de referência. As linhas que conectam os vértices determinam os limites da LAR. Esta região é então mostrada no formato de navegação dos *displays* do cockpit da aeronave para suportar a tripulação, conforme ilustrado na Fig. 4.

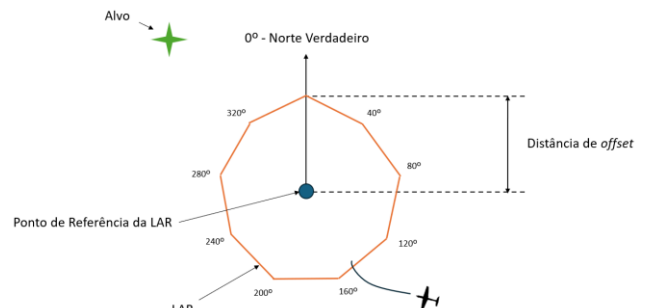


Fig. 3. Definição da LAR do armamento de referência.

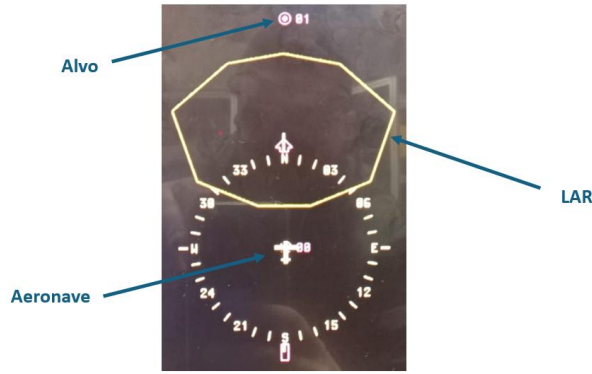


Fig. 4. LAR mostrada no formato de navegação do display da aeronave.

B. Variáveis Dependentes e Independentes do Modelo

Considerando que a LAR é a região em que o armamento pode ser lançado, ela está associada ao nível necessário de energia (potencial e cinética) para que o armamento alcance e atinja o alvo; desta forma, o formato geral da LAR necessariamente depende dos parâmetros de voo da aeronave. Um modelo com alta precisão poderia depender de diversos parâmetros de entrada; no entanto, considerando o objetivo do modelo de prover treinamento e familiarização, não sendo, portanto, um modelo operacional de voo, as variáveis independentes do modelo foram reduzidas às principais variáveis associadas à energia do armamento, sendo estas a velocidade calibrada (AS [KCAS]) e a altitude (Alt [kft]). As coordenadas do alvo não afetam a forma geral da LAR, apenas o seu posicionamento espacial.

As variáveis dependentes do modelo foram então definidas conforme abaixo:

- 1) $RefDist$ [NM] (ver Fig. 5): distância do alvo ao ponto de referência da LAR, em milhas náuticas;
- 2) $Offset_{\theta}$ [NM] (ver Fig. 3): distância de $offset$, em milhas náuticas, calculada a partir do ponto de referência da LAR com ângulo θ , em incrementos de 40° .

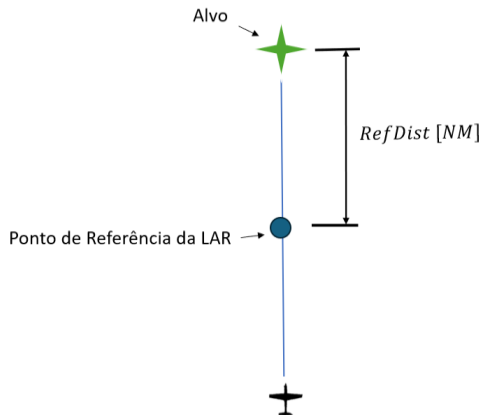


Fig. 5. Definição da variável dependente $RefDist$.

De forma a simplificar a implementação do modelo, sem prejuízo do objetivo final de prover familiarização e treinamento em solo, a referência de 0° foi trazida do Norte verdadeiro para a *ground tracking line* da aeronave. Fazendo isto, é possível considerar uma simetria da geometria da LAR em torno deste novo eixo de referência, sendo possível então impor as igualdades entre as distâncias de *offset* conforme (1) a (4).

$$Offset_{40} = Offset_{320} = Offset_{40\&320} \quad (1)$$

$$Offset_{80} = Offset_{280} = Offset_{80\&280} \quad (2)$$

$$Offset_{120} = Offset_{240} = Offset_{120\&240} \quad (3)$$

$$Offset_{160} = Offset_{200} = Offset_{160\&200} \quad (4)$$

B. Regressão de Dados

A partir de testes em laboratório com o armamento real, dados para as variáveis dependentes foram obtidos para os seguintes intervalos das variáveis independentes, considerando os envelopes de emprego do armamento e de voo da aeronave de referência considerada:

- $10 \text{ kft} \leq Alt \leq 20 \text{ kft}$
- $175 \text{ KCAS} \leq AS \leq 268 \text{ KCAS}$

Os dados foram então submetidos a uma regressão linear múltipla para explorar a relação entre as entradas e as saídas, obtendo-se equações que as correlacionam. Para essa avaliação, utilizou-se a regressão para análise de dados com um nível de confiança de 95%. As estatísticas utilizadas para avaliar a qualidade do ajuste das equações aos dados incluem [6]:

- a. R Múltiplo: coeficiente de correlação que mostra a força da relação linear entre uma variável dependente e as variáveis independentes (quanto mais próximo de 1 for o valor absoluto, mais forte será a relação);
- b. R^2 : coeficiente de determinação que informa quanto da variância da variável dependente pode ser explicado pelas variáveis independentes (quanto mais próximo de 1, maior a confiança de que nenhuma outra variável independente relevante está sendo desconsiderada no modelo e/ou que os erros de medição não são consideravelmente altos);
- c. Erro padrão: distância média que os valores observados se afastam da linha de regressão (quanto menor o erro, mais preciso é o modelo).

III. RESULTADOS

Equações (5) a (10) foram obtidas através da regressão linear múltipla. A análise estatística sobre o quão bem as

equações finais se ajustam aos dados é mostrada na TABELA I.

$$RefDist = 0.0136 \cdot AS + 0.333 \cdot Alt - 3.43 \quad (5)$$

$$Offset_0 = 0.01045 \cdot AS + 0.322 \cdot Alt - 4.18 \quad (6)$$

$$Offset_{40\&320} = 0.0123 \cdot AS + 0.375 \cdot Alt - 4.95 \quad (7)$$

$$Offset_{80\&280} = 0.0167 \cdot AS + 0.5014 \cdot Alt - 6.92 \quad (8)$$

$$Offset_{120\&240} = 0.0148 \cdot AS + 0.426 \cdot Alt - 5.84 \quad (9)$$

$$Offset_{160\&200} = 0.010901 \cdot AS + 0.314 \cdot Alt - 4.092 \quad (10)$$

TABELA I. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA REGRESSÃO

Variável	R Múltiplo	R ²	Erro Padrão
RefDist	0.9991	0.9983	0.05852
Offset ₀	0.9994	0.9988	0.04633
Offset _{40&320}	0.9996	0.9992	0.04400502
Offset _{80&280}	0.9993	0.9986	0.07713
Offset _{120&240}	0.9996	0.9991	0.05137
Offset _{160&200}	0.9997	0.9995	0.02973

As Fig. 6 a 10 mostram uma análise comparativa, nas mesmas condições de voo da aeronave, entre a LAR real, calculada e informada pelo armamento, e a LAR modelada de acordo com as equações (5) a (10) e implementada na estação de treinamento em solo.

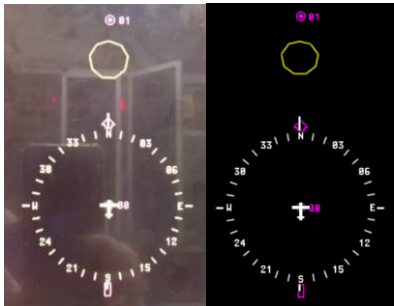


Fig. 6. Comparação da LAR real (à esquerda) com a LAR modelada (à direita), a 10kft e 175 KCAS.

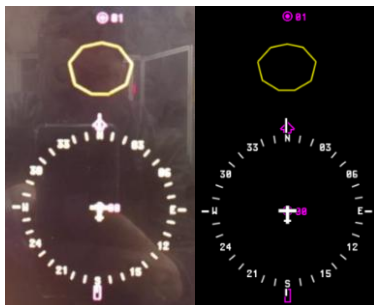


Fig. 7. Comparação da LAR real (à esquerda) com a LAR modelada (à direita), a 10kft e 210 KCAS.

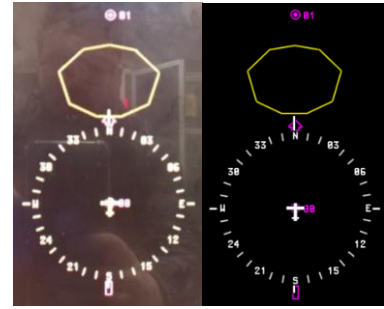


Fig. 8. Comparação da LAR real (à esquerda) com a LAR modelada (à direita), a 10kft e 268 KCAS.

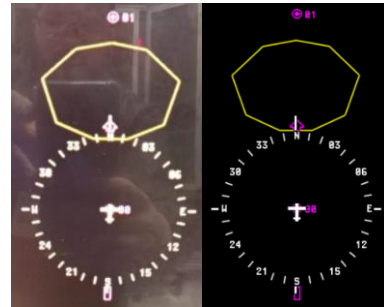


Fig. 9. Comparação da LAR real (à esquerda) com a LAR modelada (à direita), a 15kft e 175 KCAS.

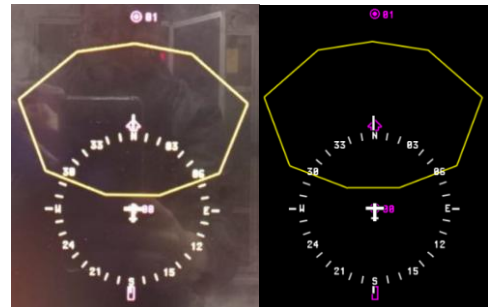


Fig. 10. Comparação da LAR real (à esquerda) com a LAR modelada (à direita), a 20kft e 175 KCAS.

IV. OBSERVAÇÕES FINAIS

As equações lineares obtidas mostram uma correlação positiva entre as variáveis dependentes e independentes (coeficientes positivos). Isto é esperado considerando que, quanto maiores a velocidade e a altitude do armamento, maiores serão as forças aerodinâmicas resultantes nas superfícies de controle, bem como maior será o seu percurso no qual correções podem ser empregadas e, portanto, maiores serão as suas capacidades de realizar manobras de correção tanto longitudinais (nariz para cima ou para baixo) quanto laterais (correções de alinhamento com o alvo).

A análise estatística do método de regressão escolhido para modelar o LAR mostra que, para todas as variáveis

dependentes do modelo, existe uma forte correlação linear entre variáveis dependentes e independentes (R múltiplo muito próximo de 1), sendo o modelo linear considerado, portanto, um modelo adequado.

Além disso, os altos valores de R^2 mostram que limitar as variáveis independentes do modelo à altitude da aeronave e à velocidade calibrada explica mais de 99% das variâncias na posição e forma do LAR; no entanto isso se explica devido ao fato dos dados de referência terem sido obtidos em condições controladas de laboratório, sendo variadas apenas as variáveis independentes escolhidas. Para a construção de um modelo mais fidedigno, novos dados deverão ser obtidos com a variação de parâmetros adicionais de voo (e.g. ângulos e taxas de arfagem, rolagem e guinada) para investigar a sua influência na geometria da LAR. Além disso, as simplificações adotadas para o modelo deverão ser revistas, de forma a representar a LAR em referência ao Norte verdadeiro de navegação, conforme comportamento do armamento real.

O maior erro padrão obtido, no valor de 0.07713 NM para a variável *Offset_{80&280}*, equivale a 8.4% do menor valor de *offset* medido de 0.9 NM (obtido para *Offset_{40&320}* a 175 KCAS e 10 kft). Apesar da falta de uma métrica advinda da literatura ou de dados históricos desse tipo de aplicação para determinar o maior erro aceitável, considerando que o modelo não exige alta precisão e que seu propósito é treinamento e familiarização, esses níveis de erro entre os valores previstos e as medições reais foram considerados aceitáveis.

Por fim, além das análises numérica e estatística, a análise comparativa da LAR modelada mostra que o modelo proposto é capaz de reproduzir a LAR real com fidelidade suficiente para proporcionar familiarização adequada à tripulação durante o treinamento nas estações de solo.

REFERÊNCIAS

- [1] EMBRAER, “Programa de Especialização em Guerra Eletrônica”, 2024, não publicado.
- [2] T. C. Westhauser, “Improving NATO’s Interoperability Through U.S. Precision Weapons”, *Maxwell Air Force Base – School of Advanced Airpower Studies*, 1998.
- [3] D. I. Blackwelder, “The Long Road to Desert Storm and Beyond: The Development of Precision Guided Bombs”, *Maxwell Air Force Base – School of Advanced Airpower Studies*, 1993.
- [4] L. McGowan. (2008, May) MQ-9 Reaper UAV Drops First GPS-Guided Weapon. Acesso em: 13/06/2026. [Online]. Available: <https://www.wpafb.af.mil/News/Article-Display/Article/400874/mq-9-reaper-uav-drops-first-gps-guided-weapon/>
- [5] Department of Defense, “MIL-HDBK-1760A: Aircraft/Store Electrical Interconnection System”, 2004.
- [6] S. Bradburn. (2021, March) How to Perform Simple Linear Regression in Excel. Acesso em: 13/06/2026. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=9wX1a1J4WOI>