

Modelo de estimativa de força para interdição de alvos lineares por sistemas de armas ar-superfície

Jean Marcel Knapp dos Santos - Cap¹, Fausto Batista Mendonca - Ten Cel², Ícaro de Oliveira Veloso - 1º Ten³

¹Comando de Operações Aeroespaciais (COMAE), Brasília/DF – Brasil

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

³1º Esquadrão do 12º Grupo de Aviação (1º/12º GAV), Santa Maria/RS – Brasil

Resumo – Este artigo apresenta uma metodologia avançada para a interdição de alvos lineares usando sistemas de armas ar-superfície, com foco em otimizar a precisão e a eficácia dos ataques. Utilizando cálculos de probabilidade de impacto e espaçamento ideal entre impactos, o estudo propõe um modelo que minimiza o uso excessivo de recursos enquanto maximiza a probabilidade de dano. Os resultados experimentais demonstram que, dependendo das características geométricas do alvo e dos erros de alcance e deflexão, a abordagem paralela aos alvos lineares tende a ser mais eficiente do que a abordagem perpendicular, especialmente em condições operacionais ideais.

Palavras-Chave – Sistemas de Armas, Letalidade, Alvos Lineares.

I. INTRODUÇÃO

A eficácia na interdição de alvos lineares, como hangares e outras estruturas alongadas, é crucial para a vantagem tática e operacional em conflitos modernos. Tradicionalmente, os modelos existentes para o cálculo da força necessária em ataques com sistemas de armas ar-superfície enfrentam desafios significativos em termos de precisão — geralmente resultando em superdimensionamento ou subdimensionamento da força aplicada.

Assume-se que um alvo linear foi interditado se houver a detonação de armamentos tal que cada segmento do alvo esteja a uma distância menor ou igual à distância eficaz do armamento para este alvo. Sendo o alvo linear, assume-se que a melhor disposição entre os pontos de impacto é em linha. É importante esclarecer que alvos lineares podem variar significativamente em suas características e necessidades de interdição. Por exemplo, um hangarete com diversas aeronaves requer impactos distribuídos ao longo de toda sua extensão, enquanto uma pista de pouso pode ser neutralizada com danos em pontos específicos.

Este artigo tem como objetivo estabelecer um método para estimar a necessidade de força para interdição de alvos que precisam sofrer dano em toda a sua extensão quando o efeito de apenas uma detonação de aramento não seja suficiente para a total cobertura do alvo, utilizando os conceitos citados anteriormente, e com base na probabilidade de impacto de tiro único em um alvo retangular e em modelos de letalidade.

Este estudo propõe uma nova metodologia que não apenas elenca essas questões com uma abordagem mais refinada do cálculo da probabilidade de impacto e cobertura de dano, mas também incorpora a disposição eficiente dos pontos de impacto para maximizar a letalidade sem desperdício de recursos militares. A estimativa de força deve considerar não apenas a distribuição de DMPIs, surtidas e de armamentos necessária para interditar o aeródromo, mas aquela que permita o mínimo uso da força para garantir uma probabilidade de dano desejada.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Definição dos pontos de impacto.

O modelo utiliza os conceitos de *PI*, *MPI*, *DPI* e *DMPI* em sua metodologia de estimativa de força.

O *PI*, em inglês Point of Impact, representa o ponto em que houve o impacto e detonação de um armamento, representado na Fig. 1.

O *MPI*, em um bombardeio em *stick*, em inglês *Medium Point of Impacts*, em que múltiplos armamentos são lançados em série com intervalo uniforme, é o ponto médio dos *PI*, ou equivale ao *PI* caso apenas um armamento seja lançado, representado na Fig. 1.

O *DPI*, em inglês *Desired Point of Impact*, é um ponto designado como impacto ideal do armamento para causar um efeito desejado, representado na Fig. 1.

O *DMPI*, em inglês *Desired Medium Point of Impacts*, é um ponto designado como o ponto médio dos *DPIs*, ideal para causar o efeito desejado [1], representado na Fig. 1.

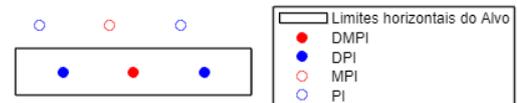


Fig. 1. Representação gráfica do *PI*, *MPI*, *DPI* e *DMPI*.

B. Erro linear provável (*REP* e *DEP*)

O erro linear provável é a mediana das distâncias entre os *PI* e *DPI* na direção de alcance (projeção paralela ao ataque) ou na direção de deflexão (projeção perpendicular ao ataque) [2]. O *REP*, em inglês *range error probable*, é o erro linear provável na direção de alcance, enquanto o *DEP*, em inglês *deflection error probable*, é o erro linear provável na direção lateral.

A partir de uma distribuição normal padronizada, o conceito de *DEP* ou *REP*, como medianas, é traduzido pela equação:

$$P(-a \leq z \leq a) = \Phi(a) - (1 - \Phi(a)) = 0,5 \quad (1)$$

sendo z uma variável aleatória normal padronizada. Resolvendo-se (1), obtém-se $\Phi(a) = 0,75$. Por meio da tabela de distribuição normal padronizada, o valor de a que satisfaz a equação é 0,6745. Com isso, os *REP* e *DEP*, que substituem z , passam a ser obtidos pelas expressões:

$$REP = \Phi^{-1}(0,75) \times \sigma_r = 0,6745 \times \sigma_r \quad (2)$$

$$DEP = \Phi^{-1}(0,75) \times \sigma_d = 0,6745 \times \sigma_d \quad (3)$$

sendo σ_r o desvio padrão populacional dos impactos na direção de alcance, σ_d o desvio padrão populacional na

direção de deflexão e Φ^{-1} a função distribuição cumulativa de uma normal padrão [2].

C. Probabilidade de acerto individual (SSP_H)

A probabilidade SSP_H de não errar um alvo retangular, em inglês, *single shot probability of hit*, com base em uma distribuição acumulada normal bivariada, é expressa por:

$$SSP_H = \text{erf}\left(\frac{\Phi^{-1}(0.75) \times x}{2\sqrt{2} \times DEP}\right) \times \text{erf}\left(\frac{\Phi^{-1}(0.75) \times y}{2\sqrt{2} \times REP}\right) \quad (4)$$

sendo erf a função erro, x a largura do alvo, y o comprimento, DEP o erro linear provável na direção lateral e REP o erro linear provável na direção longitudinal, em metros [3], [4].

D. Probabilidade de chegada (P_{ARR})

Para calcular o P_{ARR} , podem ser modelados diversos fatores de atrito, como por exemplo a probabilidade de não abortar (P_{NAB}), probabilidade de sobreviver (P_{SOB}) e probabilidade de não errar grosseiramente (P_{NEG}), dentre outros [5].

As probabilidades a serem consideradas em um cenário real são diversas. Devido à complexidade dos fatores que podem resultar em uma plataforma de armas não ter condições de empregar o armamento, cabe ao planejador escolher o modelo adequado, calcular uma probabilidade unificada de chegada, e aplicá-la a este modelo de estimativa de força [3].

E. Probabilidade de dano individual (SSP_D)

A probabilidade de dano de uma única surtida P_D , em inglês, *single shot probability of damage*, é a probabilidade de um alvo sofrer o dano desejado com base na precisão do lançamento (SSP_H), na vulnerabilidade do alvo ($P_{D\setminus H}$) e na probabilidade de chegada (P_{ARR}) [5], sendo expressa pela equação:

$$SSP_D = SSP_H \times P_{D\setminus H} \times P_{ARR} \quad (5)$$

F. Effective Miss Distance (EMD)

Considera-se que os alvos podem possuir dimensões diversas, e que um impacto suficientemente próximo ao alvo resulta no dano desejado. Existe um valor máximo para a distância de impacto que, para valores acima dela, os critérios de dano não são atendidos, conforme Fig. 2. Essa distância é o *effective miss distance*, ou EMD , obtida a partir de análises estatísticas de alvos já atacados ou a partir de ensaios.

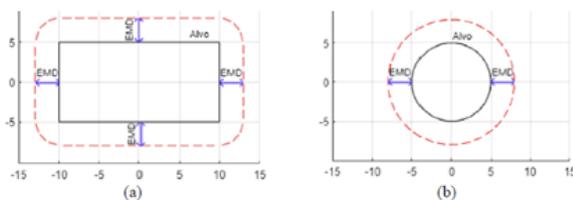


Fig. 2. (a) Exemplo de EMD de um alvo retangular; (b) Exemplo de EMD de um alvo circular.

Assim, impactos ao redor do alvo que estejam a uma distância igual ou inferior ao EMD serão considerados que atendem aos critérios de dano desejado [2]; os que estejam a uma distância superior, considera-se que não houve o efeito desejado.

III. METODOLOGIA

Hangares e tanques de combustível, por exemplo, por terem tamanhos significativamente pequenos quando considerado o uso de armamento ar-superfície, podem ser considerados como alvos pontuais. Dessa forma, para a simplificação dos cálculos, alvos de tamanhos significativamente pequenos dispostos lado a lado sobre uma reta tem seus limites no plano horizontal reduzidos a um segmento de reta de comprimento L . Assume-se que é necessário que toda sua extensão seja coberta pelo efeito de dano oriundo da detonação de armamentos, reduzidos a círculos de raio igual ao EMD , conforme Fig. 3.

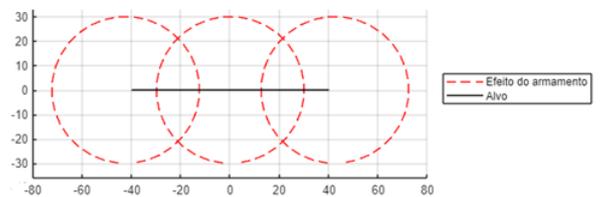


Fig. 3. Distribuição de armamentos sobre um alvo linear

O EMD é obtido a partir da análise estatística de amostras de dano oriundos da detonação de armamentos, ou então de ensaios. Este modelo assume que o EMD utilizado como dado de entrada é verdadeiro.

Quanto à direção de ataque, assume-se duas hipóteses: os ataques devem ser realizados paralelamente ao alvo, com intervalo entre os impactos equivalente à distância entre $DPIs$, denominado Hipótese A; ou perpendicularmente ao alvo, sendo cada DPI definido como $DMPI$, denominado Hipótese B.

É preciso estimar a necessidade de força para cada hipótese, e escolher aquela com menor esforço, bem como definir os $DMPIs$.

A. Intervalo entre impactos dos armamentos (*ripple*)

A geometria do efeito de dano no plano horizontal, na ausência de obstáculos, pode ser simplificada utilizando círculos. No entanto, para fins de cálculo e otimização, essa abordagem pode ser complexa. Portanto, propõe-se simplificar o conjunto de círculos como um retângulo inscrito nestes círculos, com a premissa de obter uma área quadrilátera que de fato represente a cobertura do efeito de dano, conforme Fig. 4.

Utilizando o cálculo de máximos e mínimos para calcular a distância entre os pontos de impacto de forma que a área do retângulo seja máxima, obtém-se que a distância é igual a $EMD \times \sqrt{2}$.

Conforme a distância aumenta em relação a esse valor, o comprimento do retângulo aumenta, porém sua largura reduz de forma mais significativa, reduzindo a sua área; e conforme a distância diminui em relação ao valor obtido, a largura

aumenta até o limite de $\sqrt{2} \times EMD$, porém o comprimento do retângulo também reduz, assim como sua área, até o limite de $2 \times EMD^2$.

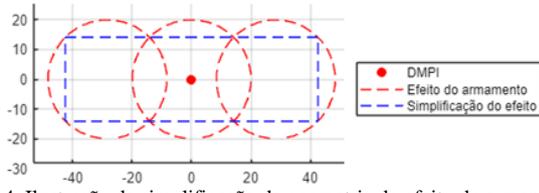


Fig. 4. Ilustração da simplificação da geometria do efeito do armamento.

A conversão das circunferências em um quadrilátero único, apesar de reduzir a área para cálculo do SSP_H , permite que seja usada a equação de probabilidade de acerto, expressa por (4).

Portanto, o espaçamento ideal entre os impactos dos armamentos, em inglês, *ripple*, de forma que a área média eficaz seja máxima é expresso por:

$$ripple = EMD \times \sqrt{2} \quad (6)$$

O comprimento efetivo do rastilho, em m , é expresso por:

$$l_{stick} = n_r \times EMD \times \sqrt{2} \quad (7)$$

sendo n_r o número de armamentos no rastilho.

A largura efetiva do stick, em m , é expressa por:

$$w_{stick} = EMD \times \sqrt{2} \quad (8)$$

B. Pontos desejados de impacto

A distância máxima entre impactos l_{max} é o comprimento máximo entre dois pontos de impacto consecutivos, de forma haja o mínimo de sobreposição entre os efeitos de dano ao longo do alvo, para que todos os segmentos do alvo estejam cobertos pelo efeito de dano de algum dos armamentos detonados, ilustrado pela Fig. 5.

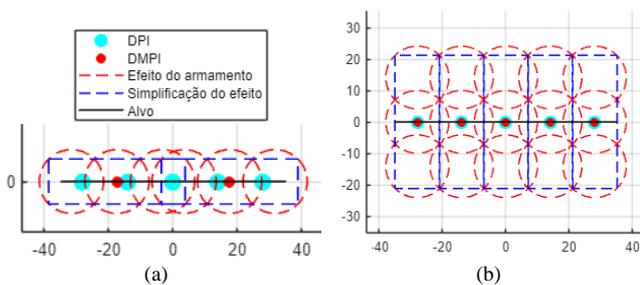


Fig. 5. (a) Distância máxima entre impactos na Hipótese A; (b) Distância máxima entre impactos na Hipótese B.

Na Hipótese A, essa distância é definida pelo próprio *ripple*, sendo o intervalo ideal entre armamentos lançados em série; na Hipótese B, é definida pela largura do rastilho w_{stick} . Em ambos os casos, l_{max} é expresso por:

$$l_{max} = ripple \quad (9)$$

O número mínimo de *DPIs* é função do comprimento o alvo L e de l_{max} , expresso por:

$$n_{DPI} = \left\lceil \frac{L}{l_{max}} \right\rceil \quad (10)$$

sendo n_{DPI} arredondado para cima caso o resultado da divisão não seja inteiro.

Dessa forma, o comprimento entre *DPIs*, denominado l , é obtido dividindo o comprimento do alvo L pelo número de *DPIs* obtido por meio de (10), que será sempre menor ou igual ao l_{max} , sendo expresso por:

$$l = \frac{L}{n_{DPI}} = \frac{L}{\left\lceil \frac{L}{l_{max}} \right\rceil} \quad (11)$$

C. Quantidade de *DMPIs*

Na Hipótese B, a quantidade de *DMPIs* será igual à quantidade de *DPIs* para qualquer comprimento de alvo L para que todo o alvo seja coberto pelo efeito de dano dos armamentos, pois os lançamentos são perpendiculares ao alvo e todos os *DPI* devem ser atingidos.

Na hipótese A, caso a quantidade de *DPIs* seja superior à capacidade da aeronave de atingir todos, são necessárias mais surtidas de forma que todo alvo seja coberto. Dessa forma, a quantidade de *DMPIs* é expressa por:

$$n_{DMPI} = \left\lceil \frac{n_{DPI}}{RP} \right\rceil \quad (12)$$

O número de armamentos lançados em série por ataque, em inglês, *release pulse* (*RP*), será um valor entre 1 e a capacidade máxima de lançamento RP_{max} . Na Hipótese A, de forma a reduzir a quantidade de sistemas de armas necessários, o *RP* pode ser um valor entre n_{DMPI} e RP_{max} , caso n_{DMPI} seja menor que RP_{max} . Isso será possível quando a redução do *RP* não implique em significativa redução do SSP_H , em casos quando o SSP_H é próximo de 100%. Caso contrário, *RP* será igual ao RP_{max} .

D. Erro de deflexão máxima

Considerando um ataque paralelo ao alvo, é importante garantir que o erro de deflexão (desvio lateral) não seja maior do que a largura efetiva do rastilho w_{stick} . Se o erro de deflexão for maior, as detonações dos armamentos não cobrirão eficientemente o alvo, resultando em segmentos não atingidos. Portanto, para garantir que todos os pontos ao longo do alvo sejam cobertos, o erro de deflexão máximo permitido D_{max} deve ser menor ou igual a metade da distância entre impactos (*ripple*). Dessa forma, na Hipótese A, D_{max} é definido por:

$$D_{max} = \frac{ripple}{2} \quad (13)$$

Observa-se na Fig. 6 que com um erro superior ao D_{max} , alguns segmentos do alvo (colorizados em verde) não são cobertos pelo efeito do armamento.

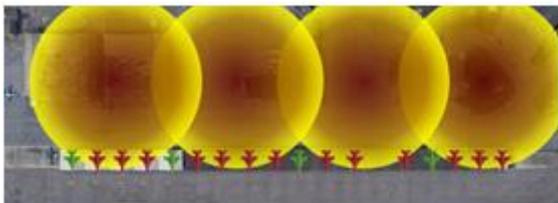


Fig. 6. Exemplo de erro de deflexão superior ao D_{max} em um lançamento de quatro armamentos em série, paralelo ao alvo

Já na Hipótese B, a distância entre dois pontos de impactos consecutivos deve ser menor ou igual ao l_{max} . Todavia, ela não pode ser muito menor que o l_{max} a ponto de o segmento subsequente ser maior que o l_{max} . Caso a distância entre cada *ponto de impacto* e os seus respectivos *DPIs* seja menor que D_{max} , não haverá segmento entre *DPIs* com comprimento maior que o l_{max} .

Dessa forma, o erro máximo de deflexão D_{max} , de forma a garantir a cobertura completa do alvo, é geometricamente expresso por:

$$D_{max} = \frac{l_{max} - l}{2} \quad (14)$$

Na Fig. 7, observa-se como um erro de deflexão superior ao D_{max} em um dos ataques resulta em um segmento do alvo não coberto pelo efeito do armamento (colorizados em verde).



Fig. 7. Exemplo de erro de deflexão superior ao D_{max} em quatro lançamentos de dois armamentos em série cada, perpendicular ao alvo

Percebe-se que os D_{max} definidos por (13) e (14) são iguais caso l seja igual a zero. Isso porque, na hipótese A, assume-se que a largura do alvo tende a zero.

E. Erro de alcance máximo

Na Hipótese A, o erro de alcance máximo R_{max} , refere-se ao quanto o *MPI* pode variar paralelamente à direção de ataque, de modo que pelo menos uma detonação dos armamentos do rastilho cause o efeito desejado em parte do alvo.

A lógica para obter R_{max} consiste em garantir que o erro de alcance (desvio longitudinal) não seja maior que metade da diferença entre o comprimento total de um rastilho ($RP \times ripple$) e o comprimento entre *DMPIs*, obtido por meio da divisão de L por n_{DMPI} , sendo expresso por:

$$R_{max} = \frac{RP \times ripple - L}{2n_{DMPI}} \quad (15)$$

Essa margem de erro é distribuída uniformemente para cada rastilho, de forma a aumentar a área de designação.

Na Fig. 8, observa-se que um erro de alcance maior que o R_{max} , pode resultar em o alvo não ser inteiramente coberto (colorizados em verde).

No exemplo, foi aplicado também um erro de deflexão para poder ser observado que quando o alvo não é coberto longitudinalmente pelo quadrilátero do efeito simplificado, existem situações em que o alvo não será coberto completamente pelo efeito do armamento, mesmo que o erro de deflexão seja menor que D_{max} .

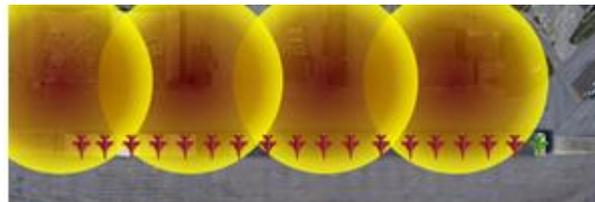


Fig. 8. Exemplo de erro de alcance superior ao R_{max} em um lançamento de quatro armamentos em série, paralelo ao alvo

Dessa forma, é mais conservativo usar o quadrilátero do efeito simplificado ao invés de tratar os círculos do efeito do armamento individualmente.

Na Hipótese B, considerando que os centros de cada rastilho são os *DPIs*, o R_{max} é equivalente a metade do comprimento do rastilho, expresso por:

$$R_{max} = \frac{l_{stick}}{2} \quad (16)$$

Na Fig. 9, observa-se como um erro de alcance superior ao R_{max} em um dos ataques resulta na incompleta cobertura do alvo pelo efeito dos armamentos (colorizados em verde).



Fig. 9. Exemplo de erro de alcance superior ao R_{max} em quatro lançamentos de dois armamentos em série cada, perpendicular ao alvo

F. Probabilidade de acerto (SSP_H)

Sendo conhecidos os erros de alcance e deflexão máximos, são estabelecidos retângulos de dimensões ao redor de cada *DMPI*. É calculada então a probabilidade de impacto SSP_H em cada retângulo, por meio de (4), sendo $x = D_{max}$ e $y = R_{max}$, conforme Fig. 10.

Dessa forma, é possível saber a probabilidade de que cada lançamento de armamento, individual ou em série, resulte em pontos de impacto capazes de danificar o determinado segmento do alvo. Assume-se, para a aplicação deste modelo, que o *REP* e *DEP* são válidos e representam a mediana de uma distribuição normal dos impactos em cada dimensão.

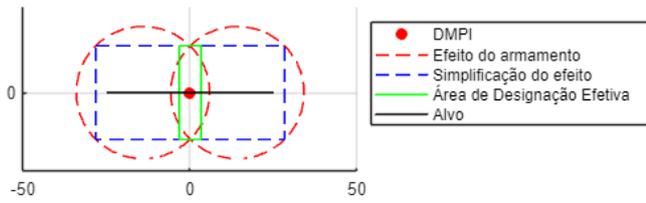


Fig. 10. Exemplo de área de designação para lançamento para um lançamento de dois armamentos em série, paralelo ao alvo

G. Probabilidade de dano (P_D)

A probabilidade P_D que toda a extensão do alvo sofra o dano desejado, além dos SSP_H , $P_{D\setminus H}$ e P_{ARR} , depende da quantidade de ataques n_{ANV} por $DMPI$.

Cada $DMPI$ precisa sofrer dano por ao menos um ataque, ou seja, é preciso que não haja evento em que nenhum ataque tenha sucesso. Além disso, é preciso que todos os $DMPIs$ sofram danos.

Considerando os lançamentos de armamentos em rastilho eventos independentes, haverá dano caso ao menos uma surtida lance com sucesso na área de designação efetiva, e que todos as áreas de designação efetiva correspondentes a cada $DMPI$ sejam atingidas. Com isso, a P_D pode ser expressa por:

$$P_D = [1 - (1 - SSP_D)^{n_{ANV}}]^{n_{DMPI}} \quad (17)$$

Caso P_D seja menor que a P_D desejada, aumenta-se o RP até o limite do sistema de armas e, após esse limite, aumenta-se n_{ANV} até que a probabilidade obtida seja aceitável.

IV. RESULTADOS

Para analisar os resultados, é preciso primeiro entender o comportamento da quantidade de $DPIs$ e distância entre eles em função do comprimento do alvo.

Na Fig. 11, observa-se como a distância entre $DPIs$ aumenta até chegar ao limite estabelecido pelo ripple, e então os $DPIs$ se aproximam novamente. Isso ocorre porque quando o comprimento do alvo cresce a ponto de precisar de um novo DPI , todos os $DPIs$ são redistribuídos no alvo, aproximando-os. Essa oscilação da distância entre $DPIs$ resultará também em uma oscilação da estimativa de força, observada na Fig. 12.

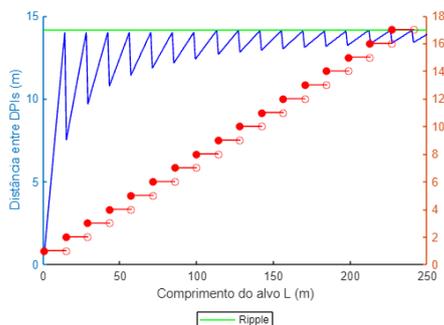


Fig. 11. Influência do ripple e comprimento do alvo na quantidade de $DPIs$ e separação entre eles.

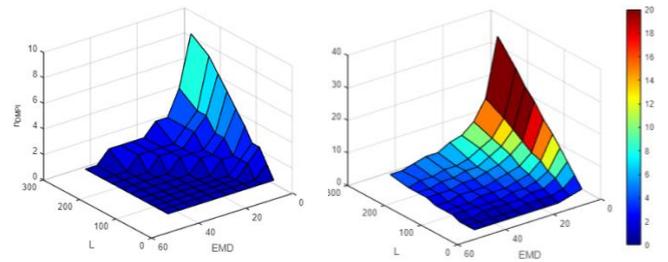


Fig. 12. Influência do comprimento do alvo e do EMD na quantidade de $DMPIs$ de lançamentos de 4 armamentos em série, (a) paralelos ao alvo (Hipótese A); e (b) perpendiculares ao alvo (Hipótese B).

A barra de cores de cada figura representa a quantidade de $DMPIs$ necessárias para cobrir o alvo com o efeito dos armamentos: quanto mais próximo do vermelho, maior a quantidade de $DMPIs$.

Na Hipótese B (emprego do armamento perpendicular ao alvo), a quantidade de $DMPIs$ é igual à quantidade de $DPIs$. Na Hipótese A (emprego de armamento paralelo ao alvo), a quantidade de $DMPIs$, em virtude de (12), será menor. Sendo n_{DMPI} função do comprimento do alvo L e do EMD , observa-se que n_{DMPI} aumenta conforme EMD aumenta, e conforme L aumenta em ambas as hipóteses. Todavia, na Hipótese A, esse aumento é menor, evidenciado pela Fig. 12.

Além da quantidade de $DMPIs$, a probabilidade de acerto individual SSP_H também influencia na estimativa de força. Foram iterados comprimentos de alvo de 20 a 250m, e REP/DEP de 2/64 a 64/2, com lançamentos em rastilho de quatro bombas, com EMD de 10m, com vistas a obter uma probabilidade de dano acima de 95%.

Na Fig. 13a, observa-se os resultados das iterações de ataques paralelos, propostos na Hipótese A; na Fig. 13b, observa-se os resultados de ataques perpendiculares, propostos na Hipótese B. A barra de cores de cada figura representa a quantidade de aeronaves necessárias para obter o dano desejado: quanto mais próximo do vermelho, maior a quantidade de aeronaves necessária.

Em primeira análise, observa-se que em ambas as hipóteses, o número de aeronaves necessário aumenta em conjunto com o comprimento do alvo. Há certos comprimentos de alvo que, pelo modelo, exigem uma quantidade menor de aeronaves.

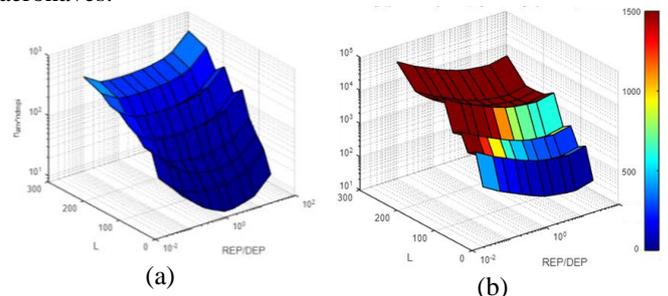


Fig. 13. Influência do comprimento do alvo e da relação entre REP e DEP na estimativa de força de lançamentos de armamentos em série, (a) paralelos ao alvo (Hipótese A); e (b) perpendiculares ao alvo (Hipótese B).

Isso ocorre devido às oscilações das distâncias entre os *DPIs*. Uma forma de remediar isso é, durante o planejamento, avaliar se a adição de um *DMPI* extra e redistribuição de todos sobre o alvo reduz a estimativa de força [6]. Nem sempre utilizar a quantidade mínima de *DMPIs* resultará na menor estimativa de força, conforme evidenciado pelas figuras.

Observa-se também, de forma mais evidente na Hipótese B, como maiores *REPs* ou *DEPs* aumentam a estimativa de força. E destaca-se que quando L aproxima-se de 0, ambas as Hipóteses apresentam a mesma estimativa de força. Isso ocorre porque, quando o alvo se aproxima de uma geometria pontual, a direção de ataque (perpendicular ou paralela), no tocante à probabilidade de acerto individual, é irrelevante.

Por fim, observa-se como erros em alcance são mais permissivos que erros em deflexão na Hipótese B, enquanto na Hipótese A isso não é tão evidente (exceto no caso em que o alvo aproxima-se de uma geometria pontual). Essa diferença se dá pelo fato de que na Hipótese B, cada rastriho cobre apenas um *DPI*, tendo metade do rastriho como margem de erro em alcance. Na Hipótese A, todavia, cada bomba do rastriho é alocada para um *DPI*, mudando a finalidade do rastriho. Essa dualidade da finalidade do rastriho é o principal fator de discussão de qual a melhor Hipótese.

V. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstram como variações nos valores de *Range Error Probable (REP)* e *Deflection Error Probable (DEP)* afetam a necessidade de força para interdição, destacando a importância de obter dados precisos para esses parâmetros. A sensibilidade do modelo a essas variáveis enfatiza a necessidade de refinamento contínuo nos métodos de coleta de dados de cada sistema de armas. Adicionalmente, as análises baseadas nas Fig. 13a e Fig. 13b ilustram que lançamentos paralelos a alvos de geometria linear são mais vantajosos do que abordagens perpendiculares em termos de estimativa de força, quando é necessário que haja mais de um ponto de impacto sobre o alvo. Isso é corroborado pela observação de que a utilização da quantidade mínima de *DMPIs* para cobertura total do alvo nem sempre resulta na menor estimativa de força, conforme evidenciado em modelos para pistas de decolagem [6]. Não foram observadas situações que abordagens paralelas fossem matematicamente mais vantajosas.

Neste modelo, assume-se uma distribuição normal bivariada para os pontos de impacto, prática padrão em modelos de *weaponering* [2]. No entanto, reconhecendo as limitações dessa suposição [7], futuras investigações poderiam explorar distribuições não-normais para aprimorar a precisão dos modelos de *REP* e *DEP* em cenários de combate diversificados.

Os valores de *REP* e *DEP* são derivados de análises estatísticas robustas [7], fundamentais para o cálculo de *DMPIs*. Para endereçar a incerteza nos dados de entrada e suas implicações na estimativa de força, uma análise de sensibilidade é recomendada, visando verificar o impacto de variações desses parâmetros nos resultados do modelo.

É crucial reconhecer que, embora o lançamento paralelo dos armamentos seja matematicamente otimizado, fatores

operacionais como ameaças na superfície e obstáculos geográficos exigem flexibilidade no planejamento de ataques. As condições variáveis do campo de batalha e a complexidade do planejamento operacional sugerem que uma abordagem flexível pode ser mais apropriada do que uma regra fixa baseada unicamente em cálculos teóricos de cobertura de impacto e eficiência de armamento.

Ressalta-se que o modelo desenvolvido neste estudo é particularmente válido para alvos que necessitam de cobertura total pelo efeito do armamento ao longo de toda a sua extensão. Essa abordagem é essencial para alvos como hangares e linhas de aeronaves, onde cada segmento precisa ser atingido para garantir a interdição eficaz. Em contrapartida, para outros tipos de alvos, como embarcações, pistas de pouso ou tanques balísticos horizontais, um dano em uma parte específica pode ser suficiente para torná-los inoperantes. Portanto, a aplicação deste modelo deve ser cuidadosamente considerada de acordo com a natureza do alvo e os requisitos operacionais específicos, assegurando que a estratégia de interdição adotada seja a mais adequada para a missão em questão.

A metodologia desenvolvida neste estudo não apenas proporciona um *framework* para a elaboração de *Target Folders* para hangares e outros alvos com geometrias similares, mas também estabelece bases para o planejamento de ataques a alvos lineares considerando as realidades e limitações do campo de batalha. Em conclusão, este estudo estabelece um novo padrão de facto para a estimativa de força em operações de interdição de alvos lineares, recomendando-se sua adoção como base para futuras operações e desenvolvimentos da doutrina de emprego.

REFERÊNCIAS

- [1] UNITED STATES. OFFICE OF THE CHAIRMAN OF THE JOINT CHIEFS OF STAFF. **DOD Dictionary of Military and Associated Terms**. Washington, DC. 2021.
- [2] DRIELS, M. R. **Weaponering Conventional Weapon System Effectiveness**. 2ª. ed. Virginia: AIAA Education Series, 2013.
- [3] KNAPP, J. M. S. Modelo de estimativa de força para sistemas de armas ar-superfície contra alvos bidimensionais, São José dos Campos, SP, p. 146, 2022.
- [4] COOK, J. D. Relating Φ and erf. **Applied Math & Data Privacy**. Disponível em: <https://www.johndcook.com/erf_and_normal_cdf.pdf>. Acesso em: 09 maio 2022.
- [5] MISCOW, P.C.F. E MENDONÇA, F. B. **Notas de aula da disciplina Análise e Seleção de Sistemas de Armas: Aula de Seleção de Armamento**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, SP. 2022.
- [6] KNAPP, J. M. S. Modelo de estimativa de força para interdição de pistas por sistemas de armas ar-superfície, 2022. Disponível em: <<https://jeankn.app/papers/105281-zenodo7331524>>. Acesso em: 25 abr. 2024.
- [7] MAIA, W. M. B. **Proposta de metodologia de cálculo de CEP para armamento ar-solo**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, p. 141. 2022.