

Análise das Formaturas Operacionais no Combate Aéreo Além do Alcance Visual para Infiltração em Território Inimigo

Francisco Henrique Figueiredo Araujo¹, Murillo Santilli Szvaticsek¹, Marco Antonio Pacheco da Silva¹, João P. A. Dantas², Christopher Shneider Cerqueira¹ e Cesar A. C. Marcondes¹

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

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

Resumo – O desempenho de aeronaves de caça em missões depende diretamente das táticas empregadas, como a escolha de formaturas operacionais. Este artigo analisa o impacto de diferentes formaturas da Aviação de Caça no combate aéreo além do alcance visual (*Beyond Visual Range* – BVR) para infiltração em território inimigo. Utilizou-se o Ambiente de Simulação Aeroespacial (ASA) para avaliar um cenário com quatro formaturas: *Line Abreast*, *Lead Trail*, *Fighting Wing* e *Wedge*. Os resultados indicaram desempenho superior das formações *Lead Trail* e *Fighting Wing* na métrica composta de eficácia *Mission Integrated Result Value* (MIRV), que avalia a missão quanto à ofensividade, sobrevivência e uso eficiente de armamentos. A formação *Lead Trail* destacou-se por maior efetividade ofensiva e racionalização de recursos. A análise estatística baseada em simulação estocástica, teste de Kruskal-Wallis e reamostragem *bootstrap* conferiu robustez às conclusões. O estudo visa apoiar a tomada de decisão tática de Unidades Aéreas da Aviação de Caça brasileira, contribuindo para sua eficácia operacional.

Palavras-Chave – Formaturas Operacionais, Aviação de Caça, Ambiente de Simulação Aeroespacial.

I. INTRODUÇÃO

A operação de aeronaves militares em combate é estudada desde os primórdios da Primeira Guerra Mundial, e o conceito de sua sobrevivência nos conflitos surgiu como uma disciplina de *design* formal para aeronaves militares desde então [1]. A sobrevivência das aeronaves operando em ambientes hostis, de modo a cumprir missões com sucesso, depende diretamente das táticas empregadas [2].

Dentre a larga gama de táticas operacionais, a tática de utilização de formaturas operacionais integra a doutrina de combate das forças aéreas mundialmente para aumentar as chances de sobrevivência dos vetores aéreos. As formaturas operacionais visam cobrir áreas vulneráveis das aeronaves isoladas, proporcionando apoio mútuo entre elas, de modo a diminuir a passividade de aeronaves advindas de pontos cegos e a incapacidade de priorização de tarefas ofensivas e defensivas no combate aéreo [3].

Dessa forma, as formaturas operacionais proporcionam ambiente mais seguro à aplicação coordenada da agressividade, confiança, articulação de poder de fogo ofensivo e defensivo, bem como o apoio mútuo desejado para cumprimento das tarefas previstas nas missões [4].

De modo a desenvolver e refinar as táticas e doutrinas de emprego, a Modelagem e Simulação (M&S) militar pode prever e avaliar os resultados de cenários potenciais, identificar pontos fortes e fracos de modo a realizar ajustes necessários e otimizar sua eficácia no campo de batalha [5].

Nesse contexto, a utilização de simulações computacionais tem se consolidado como uma ferramenta essencial no apoio à tomada de decisões estratégicas e táticas em ambientes de defesa [5]. As simulações permitem avaliar cenários complexos, testar doutrinas operacionais e otimizar o emprego de recursos antes da execução real das missões, reduzindo custos e riscos associados [5].

Diante desse contexto, este artigo propõe a análise comparativa do impacto de formaturas operacionais da Aviação de Caça brasileira em cenários de combate BVR 2x2 para infiltração em território inimigo por meio do *framework* de simulação Ambiente de Simulação Aeroespacial (ASA) [5]-[6], desenvolvido pelo Instituto de Estudos Avançados (IEAv) da Força Aérea Brasileira (FAB).

Este artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção II apresenta a fundamentação teórica que sustenta o estudo, abordando as formaturas operacionais, o ambiente de simulação utilizado e os métodos estatísticos empregados. A Seção III descreve a metodologia adotada, incluindo a construção dos cenários experimentais, a definição da métrica de avaliação e os procedimentos estatísticos aplicados. A Seção IV discute os principais resultados obtidos a partir das simulações. Por fim, a Seção V apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

II. REVISÃO DE LITERATURA

A presente seção apresenta a fundamentação teórica do artigo, abordando os conceitos principais acerca das formaturas operacionais, suas características no ASA, a simulação como ferramenta de experimentação em contextos de defesa, os métodos de delineamento experimental e análise exploratória de dados do estudo.

A. Formaturas Operacionais na Aviação de Caça

Para a Aviação de Caça, voar em formação significa fornecer o apoio mútuo necessário para cumprimento de determinada missão, de modo a garantir um dos principais objetivos em operações militares: a superioridade aérea, em que aeronaves amigas podem efetivamente cumprir suas missões desvencilhando-se da ameaça com defesas ativas e eficazes [1]-[3].

Diferentes missões atribuídas à aviação de caça exigem formaturas operacionais distintas, a depender de seu perfil

F. H. F. Araujo, figueiredofha@ita.br; M. S. Szvaticsek, szvaticsek@ita.br; M. A. P. Silva, marcoa829@gmail.com; J. P. A. Dantas, jpdantas@ita.br; C. S. Cerqueira, chris@ita.br; C. A. C. Marcondes, cmarcondes@ita.br.
Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

tático. Fatores como flexibilidade, detectabilidade e simplicidade influenciam diretamente na escolha do tipo de formatura escolhida para uma missão, de modo que as formaturas operacionais têm diferentes eficiências na otimização do uso de armas, radares, bem como na manobrabilidade e capacidade de vigilância [7], a depender da missão a serem desempenhadas pelas aeronaves.

Durante uma missão, a escolha da formatura operacional adequada é vital para aumentar as chances de sucesso, bem como para proporcionar maior poder de fogo em missões ofensivas, ou maior capacidade de proteção em missões defensivas [8].

As formaturas operacionais detêm características de distanciamento lateral/longitudinal, relativa angular entre as aeronaves e separação vertical. As aeronaves envolvidas na formação detêm diferentes responsabilidades, de modo a promover cooperação na divisão de tarefas atribuídas à missão.

B. Formaturas Operacionais no ASA

Quatro diferentes formaturas operacionais são possíveis para 2 aeronaves (elemento) no ASA: *Line Abreast*, *Lead Trail*, *Fighting Wing* e *Wedge*. As características das formaturas propostas pelo ASA encontram-se expressas na Fig.1.

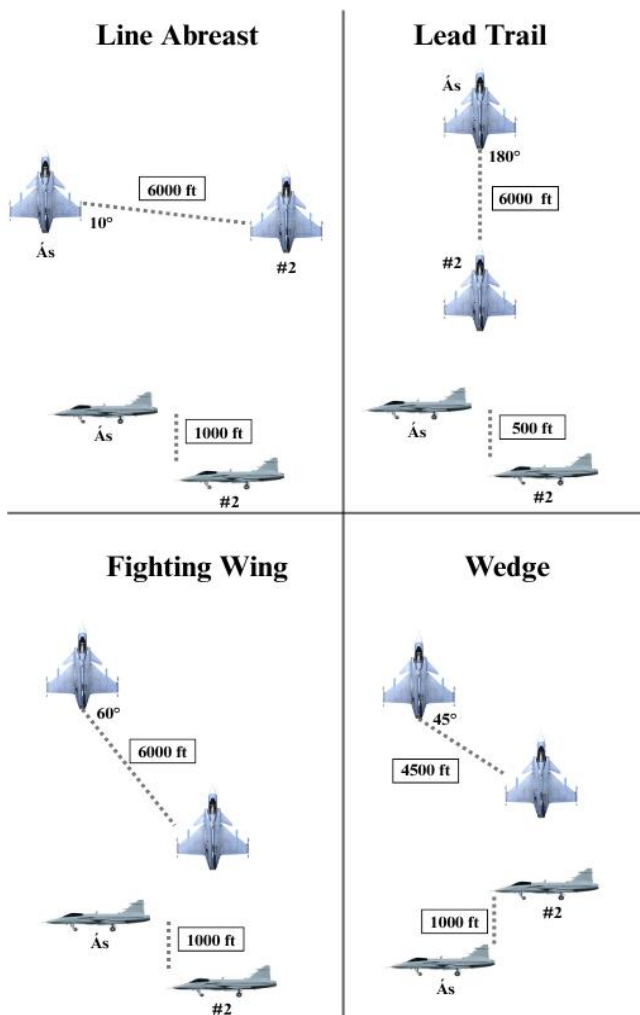


Fig. 1. Características das formaturas operacionais no ASA

Line Abreast: Aeronaves distantes 6000ft lateralmente, com 10° de relativa angular entre elas, e líder (Às) 1000ft acima do ala (#2). Visa proporcionar, para líder e ala, uma visão semelhante do hemisfério traseiro [4], auxiliando no apoio mútuo defensivo. Fornece, assim, excelente capacidade de observação [7]. Devido ao avanço angular do ala, pode não ser completamente eficiente em caso de manobras agressivas inesperadas [4].

Fighting Wing: Aeronaves distantes 6000ft, com 60° de relativa angular entre elas, e Às 1000ft acima do #2. Busca a realização de manobras de engajamento conjunto do elemento, ao mesmo tempo em que proporciona posição fluida ao ala, que se estende por um espaço aéreo em forma de cone, estendendo-se num cone de 60° do setor traseiro do líder. Essa formatura possibilita manobras agressivas por parte do líder [4], dotando liberdade ao ala para acompanhamento em curvas de qualquer amplitude.

Lead Trail: Aeronaves distantes 6000ft longitudinalmente, com 180° de relativa angular entre elas, e Às 500ft acima do #2. É uma formatura utilizada em situações de engajamento que possibilita liberdade de ação para tomadas de decisão do líder, enquanto o ala manobra facilmente em seu setor traseiro para segui-lo e apoiá-lo [4].

Wedge: Aeronaves distantes 4500ft, com 45° de relativa angular entre elas, e Às 1000ft abaixo do #2. É uma formatura que permite maior energia potencial ao ala, em posição alta e externa ao voo do líder, proporcionando apoio mútuo [8]. Assim, permite manobras rápidas do líder com assistência da outra aeronave.

A maior parte dos ataques a baixa altitude costumam ser realizados com a formatura *Wedge* ou *Lead Trail* [8]. *Fighting Wing* e *Line Abreast* são amplamente utilizados no combate Ar-Ar, pela manobrabilidade e capacidade de vigilância aérea, respectivamente.

Este artigo explorou um cenário com as particularidades do combate Ar-Ar e de ataque ao solo, simultaneamente, de modo a investigar estatisticamente a eficiência dessas formaturas operacionais do ASA para o cumprimento de missões multiobjetivo da Aviação de Caça.

C. Simulação como Ferramenta de Experimentação

A realização de experimentos no contexto da defesa aérea impõe desafios logísticos e financeiros consideráveis, devido aos elevados custos associados ao emprego de aeronaves, armamentos e sistemas reais. Nesse cenário, as simulações computacionais surgem como uma alternativa viável, permitindo a replicação de operações militares de forma controlada, flexível e de baixo custo [9]-[10].

No âmbito da análise operacional, simuladores como o ASA têm sido empregados para modelar com precisão cenários de combate BVR, possibilitando a avaliação de táticas ofensivas e defensivas, o desenvolvimento de doutrinas e a capacitação de operadores em contextos de alta complexidade [6]-[11]. Além disso, o ASA permite múltiplas execuções sob diferentes condições controladas, favorecendo a coleta de dados estatisticamente representativos e a reprodução de variabilidade operacional.

Cenários reais são intrinsecamente incertos, sujeitos a variações ambientais, limitações de sensores e diferentes níveis de desempenho humano. Para refletir essas incertezas, as simulações incorporam modelos estocásticos, representando de maneira mais fidedigna os fenômenos

envolvidos nas operações aéreas [6]-[9]. Assim, a simples análise de uma única execução não é suficiente para capturar a distribuição completa dos resultados possíveis. É necessário adotar estratégias que garantam robustez estatística nas respostas, assegurando a confiabilidade dos resultados inferidos.

Por fim, o uso integrado de técnicas estatísticas, modelos preditivos e algoritmos de otimização em ambiente de simulação amplia significativamente a capacidade de análise. Essa sinergia entre simulação, aprendizado de máquina e métodos de pesquisa operacional tem sido empregada com sucesso para desenvolver táticas inovadoras, como a manobra *winding*, e avaliar sua efetividade frente a ameaças [9]-[11].

D. Delineamento do Experimento

O delineamento de experimentos (DoE) é uma abordagem metodológica essencial para o planejamento e análise de simulações em ambientes estocásticos, como os de combate aéreo [12]. Essa técnica permite extrair informações de forma eficiente, assegurando que as conclusões obtidas sejam estatisticamente válidas e operacionalmente relevantes [13]-[14].

A técnica de amostragem por hipercubo latino (*Latin Hypercube Sampling – LHS*), conforme proposta por McKay, Beckman e Conover [15] é estratégia eficiente para a amostragem de variáveis de entrada em simulações computacionais. Essa abordagem divide o domínio de cada parâmetro em faixas de igual probabilidade e realiza a amostragem de forma a assegurar maior dispersão dos pontos experimentais no espaço amostral, contribuindo para a generalização dos resultados. Assim, o LHS permite obter estimativas mais precisas com menor número de execuções, característica desejável em experimentos computacionais de alto custo [15].

E. Análise Exploratória dos Dados

A análise exploratória de dados constitui uma etapa fundamental em estudos experimentais e de simulação [12]-[13]. No caso de dados obtidos que apresentam comportamento não normal, o uso de testes não paramétricos se torna necessário. Isso é particularmente comum em ambientes de simulação militar, onde a dinâmica do cenário e os múltiplos fatores envolvidos dificultam a obtenção de distribuições gaussianas [12].

Para essas situações, um dos testes recomendados para comparação entre três ou mais grupos independentes é o teste de Kruskal-Wallis, que se baseia na análise das medianas e posições relativas dos dados (*ranks*), em vez da média [12]-[13]. A estatística H do teste de Kruskal-Wallis é dada por:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) \quad (1)$$

Onde:

N : número total de observações

k : número de grupos

n_i : número de observações no grupo i

R_i : soma dos ranks do grupo i

Essa estatística se aproxima de uma distribuição qui-quadrado com $k-1$ graus de liberdade. Se o valor de p obtido for menor que o nível de significância que foi definido

($\alpha=0,05$), será rejeitado a hipótese nula. Isso indica que, estatisticamente, pelo menos um grupo teve um desempenho diferente dos demais [13]. A aplicação do teste de Kruskal-Wallis neste trabalho segue as práticas estabelecidas na literatura científica [16], onde utilizou-se uma metodologia semelhante para analisar critérios de performance em treinamentos de aviação militar.

III. METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi estruturada com objetivo de responder a seguinte pergunta operacional: Quais os impactos das diferentes formaturas operacionais no Combate Aéreo Além do Alcance Visual 2x2 para infiltração em território inimigo? Para isso, foi desenvolvido um cenário tático hipotético, definida métrica de desempenho composta e aplicadas técnicas estatísticas apropriadas à natureza estocástica dos dados, buscando a validação das análises realizadas.

A. Descrição do cenário hipotético do experimento

Com o objetivo de avaliar o impacto de diferentes formações operacionais no desempenho de missões aéreas com combate BVR, foi concebido um cenário hipotético em ambiente de simulação computacional. O experimento foi estruturado a partir de um conflito simulado entre dois países fictícios, doravante denominados país Azul e país Vermelho, em contexto de disputa pelo controle de zonas de fronteira.

O cenário parte da premissa que fontes de inteligência do país Azul indicaram a presença de um radar de solo do país Vermelho instalado no interior de sua Zona de Identificação de Defesa Aérea (ZIDA) [17], região que se estende por até 80 milhas náuticas a partir da linha de fronteira. Tal radar representa um ponto estratégico por fornecer vigilância de tráfego aéreo e proteção às pistas de pouso avançadas, atuando como elo logístico junto aos Pontos Remotos de Abastecimento e Municiação (FARP – *Forward Arming and Refueling Points*).

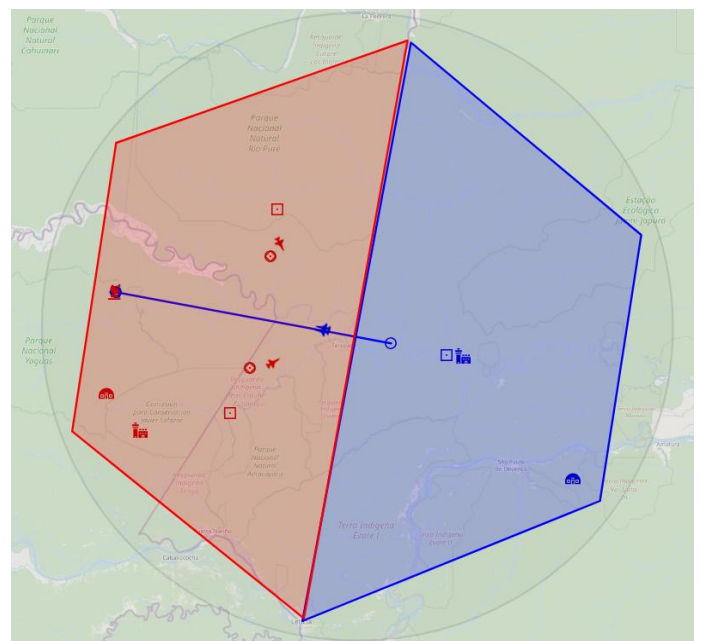


Fig. 2. Cenário fictício simulado representando os territórios, as aeronaves e os pontos de interesse dos times azul e vermelho.

Diante dessa ameaça, foi proposta uma operação, com o objetivo de neutralizar o radar terrestre, etapa considerada fundamental para viabilizar ações posteriores contra os pontos FARP e ampliar a liberdade de ação do país Azul na região. A missão simulada consiste em uma incursão ofensiva (infiltração) realizada por duas aeronaves do país Azul, com a finalidade de penetrar o espaço aéreo inimigo, superar a defesa aérea composta por duas aeronaves do país Vermelho as quais estão em alerta em voo e executar o ataque ao radar antes de retornar à base, conforme apresentado na Fig.2.

A simulação adota um modelo de combate BVR, em que ambas as equipes operam sob condições iniciais idênticas, incluindo: tipos de vetor aéreo, configuração de armamentos ar-ar, altitude de cruzeiro, velocidade, e tempo de missão, conforme a Tabela I. O consumo de combustível foi desconsiderado pela configuração *fuel freeze* do ASA, a fim de isolar as variáveis críticas ao desempenho da missão.

TABELA I. PARÂMETROS INICIAIS USADOS NA SIMULAÇÃO

| Parâmetro | Valor | Tipo/Unidade |
|----------------------|-------|------------------|
| Aeronaves | 2 | F-16 |
| Mísseis por Aeronave | 4 | Generic F3 AAM 1 |
| Altitude | 5000 | ft |
| Velocidade | 420 | kt |
| Tempo de Missão | 1800 | s |

O fator experimental da pesquisa consiste na variação das formações operacionais adotadas pelas aeronaves do time Azul. Foram testadas quatro formações padronizadas em doutrina de emprego tático: *Fighting Wing*, *Lead Trail*, *Line Abreast* e *Wedge*.

As execuções foram repetidas para cada formação, com sementes de aleatoriedade (*random seed*) controladas, a fim de permitir a condução de análises estatísticas sobre o desempenho.

Cabe destacar que o cenário é inteiramente fictício, não guardando relação com eventos reais, sendo empregado unicamente como instrumento de pesquisa para fins de simulação militar, avaliação tática e apoio à decisão operacional.

B. Métrica de Avaliação da Eficácia do Ataque

Para mensuração da eficácia da missão, optou-se pela formulação de índices compostos, com intuito de integrar múltiplas variáveis relevantes ao contexto analisado. Nesse sentido, em [2] propuseram uma métrica integrada de avaliação de desempenho em simulações de ataque, utilizando indicadores como a proporção de aeronaves atacantes que permanecem operacionais ao final da missão e a proporção de munições lançadas com sucesso sobre o alvo em relação ao total alocado, compondo uma visão mais abrangente da efetividade tática das ações ofensivas.

A métrica utilizada neste estudo, aqui denominada *Mission Integrated Result Value* (MIRV), foi concebida para avaliar a eficácia global das missões ofensivas simuladas, definindo o sucesso na missão baseado prioritariamente na sobrevivência das aeronaves em território inimigo. Inspirada em abordagens integrativas propostas em [2], essa métrica agrega quatro componentes em uma única expressão ponderada, expressa em (2).

$$MIRV = 0,3 \cdot Pd + 0,5 \cdot Pp + 0,1 \cdot Pa + 0,1 \cdot Pm \quad (2)$$

Na composição da métrica foram considerados os seguintes componentes: dano causado ao alvo terrestre (Pd), representado pela fração de destruição do objetivo principal; proporção de sobrevivência das aeronaves atacantes (Pp), calculada por $Pp = (N_a - A_a)/N_a$, onde N_a é o número total de aeronaves de ataque e A_a o número abatido; proporção de neutralização de vetores defensivos (Pa), dada por $Pa = A_d/N_d$, sendo A_d o número de aeronaves de defesa abatidas e N_d o total inicial; e proporção de economia de armamento ar-ar (Pm), expressa como $Pm = (A_T - A_U)/A_T$, em que A_T é o total de mísseis disponíveis, A_U o número de mísseis utilizados. Cada componente contribui, dentro de uma escala de 0 a 1, para o valor final da MIRV.

C. Estatística aplicada aos dados da Simulação

Neste estudo, a análise estatística verificou se diferentes formações operacionais das aeronaves de ataque (time Azul) influenciaram de forma significativa a capacidade de cumprimento dos objetivos da missão (dano ao alvo, sobrevivência, ofensividade e utilização de recursos), medida por meio da métrica composta MIRV.

A variabilidade intrínseca das simulações foi controlada pela alteração sistemática do parâmetro *Random Seed*, representando diferentes execuções estocásticas para cada cenário tático avaliado. Para garantir consistência estatística e uma adequada cobertura do espaço amostral, adotou-se a técnica de amostragem por hipercubo latino (*Latin Hypercube Sampling* – LHS).

A quantidade de execuções (tamanho da amostra) previstas de simulações para cada um dos três cenários baseou-se na fórmula clássica (3) para estimação da média populacional [13].

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{E} \right)^2 \quad (3)$$

Onde:

n: Número de amostras

$Z_{\alpha/2}$: Valor crítico que corresponde ao grau de confiança desejado.

σ : Desvio-padrão populacional da variável estudada.

E: Margem de erro ou Erro Máximo de Estimativa.

A coleta dos dados foi feita por meio da gravação das mensagens *Team Metrics*, gerada pelo Ambiente de Simulação Aeroespacial, contendo informações agregadas de desempenho de cada equipe ao final de cada simulação.

A abordagem adotada contempla inicialmente a verificação da normalidade dos dados (teste Shapiro-Wilk), etapa necessária para determinar o tipo de teste estatístico mais apropriado. Caso os dados não atendam aos pressupostos de normalidade, será empregada uma técnica não paramétrica (teste Kruskal-Wallis) mais robusta frente à variabilidade característica de simulações estocásticas. Esse procedimento assegura a consistência metodológica e a validade das conclusões extraídas do experimento.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram analisadas quatro formações táticas: *Lead Trail*, *Fighting Wing*, *Line Abreast* e *Wedge*. A eficácia das missões foi medida por meio da métrica composta MIRV.

Considerando que amostras desnecessariamente grandes implicam em desperdício de tempo e consumo de AsaCoins — unidade de esforço computacional utilizada pelo ASA — e que amostras pequenas podem comprometer a confiabilidade dos resultados, adotou-se um grau de confiança de 95% ($\alpha=0,05$) com erro máximo de estimativa de 2%. O desvio padrão amostral estimado com 10 execuções foi de 0,195, o que resultou na definição de 400 simulações por formação, com custo aproximado de 1500 AsaCoins.

Cada formação foi submetida a execuções independentes, com diferentes sementes aleatórias (*random seed*) controladas, garantindo variabilidade estatística e confiabilidade nas comparações. A Fig. 3 apresenta a média da métrica MIRV para cada formação avaliada.

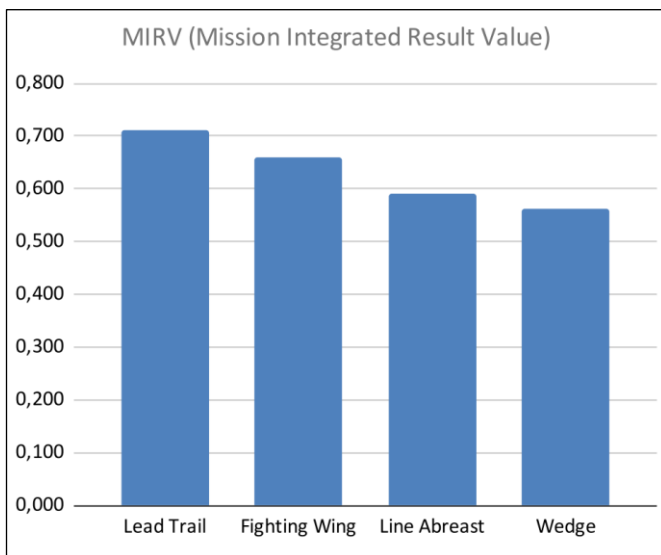


Fig. 3. Ranking da média da *Mission Integrated Result Value* obtida em cada tipo de formação.

Como ilustrado, a formação *Lead Trail* apresentou o melhor desempenho médio, seguida por *Fighting Wing*, *Line Abreast* e *Wedge*. Essas diferenças refletem a influência das formações na capacidade de ataque ao solo após a infiltração, sobrevivência por intermédio da proteção mútua, ofensividade no combate BVR e racionalização de recursos das aeronaves.

TABELA II. RESULTADOS DOS COMPONENTES DA MÉTRICA: MIRV

| Cenário | <i>Pd</i> | <i>Pp</i> | <i>Pa</i> | <i>Pm</i> | MIRV |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| Lead Trail | 0,928 | 0,745 | 0,093 | 0,507 | 0,711 |
| Fighting Wing | 0,895 | 0,670 | 0,119 | 0,444 | 0,660 |
| Line Abreast | 0,805 | 0,604 | 0,100 | 0,384 | 0,592 |
| Wedge | 0,793 | 0,560 | 0,114 | 0,347 | 0,563 |
| Média | 0,855 | 0,645 | 0,104 | 0,420 | 0,631 |
| Desvio Padrão | 0,066 | 0,081 | 0,011 | 0,070 | 0,067 |

A Tabela II apresenta o resultado dos valores médios obtidos para cada um dos componentes da métrica MIRV, assim como a média geral e o desvio padrão entre as formações

analisadas. Observa-se que as formações *Lead Trail* e *Fighting Wing* obtiveram alto dano ao radar inimigo ($Pd \geq 0,89$) e taxas elevadas de sobrevivência das aeronaves atacantes ($Pp \geq 0,69$), além de maior eficiência no uso de mísseis ($Pm \geq 0,44$) do que as demais formaturas. Por outro lado, as formações *Line Abreast* e *Wedge* apresentaram desempenhos inferiores, especialmente nos fatores *Pp* e *Pm*, influenciando negativamente em seu resultado da métrica. As médias da Tabela II resumem o comportamento geral dos dados, enquanto os desvios padrão indicam baixa variabilidade entre as formações, a dispersão observada no fator *Pp* (0,08) sugere maior sensibilidade de sobrevivência das aeronaves atacantes entre as diferentes configurações táticas.

Vale destacar que a definição do número de execuções por cenário levou em consideração tanto a necessidade de precisão estatística quanto às limitações práticas de custo computacional. A análise estatística dos resultados foi conduzida para verificar se as formaturas operacionais influenciam significativamente as variáveis de desempenho no combate BVR 2x2. Considerando estudos baseados em simulações estocásticas [15], formulou-se a Hipótese Nula (H_0) de que as distribuições da métrica MIRV são idênticas entre todos os grupos de formaturas, para assim verificar existência de diferenças entre as distribuições da métrica MIRV em cada formação.

Inicialmente, aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos dados da métrica MIRV em cada uma das formações avaliadas. Os resultados indicaram violação da suposição de normalidade em todos os grupos ($p < 0,05$), o que inviabiliza o uso da Análise de Variância tradicional (ANOVA). Diante disso, optou-se pela aplicação do teste de Kruskal-Wallis, apropriado para dados não paramétricos. O teste revelou um p-valor de $1,46 \times 10^{-10}$, permitindo rejeitar a hipótese nula de que todas as formações possuem a mesma distribuição da métrica MIRV. Esse resultado indica que existe diferença estatisticamente significativa no desempenho entre pelo menos duas das formações avaliadas.

Como complemento à análise de Kruskal-Wallis, que indicou diferença estatisticamente significativa entre pelo menos duas formações ($p < 0,001$), foi realizada uma análise *bootstrap* com 10.000 reamostragens para investigar com maior precisão quais pares de formações apresentaram diferenças relevantes.

TABELA III. COMPARAÇÃO DAS FORMAÇÕES PAR A PAR COM BOOSTRAP

| Comparação | Diferença Média | p-Valor |
|-------------------------------|-----------------|---------|
| Lead Trail vs Line Abreast | 0,119 | 0,000 |
| Lead Trail vs Fighting Wing | 0,051 | 0,005 |
| Lead Trail vs Wedge | 0,148 | 0,000 |
| Line Abreast vs Fighting Wing | -0,068 | 0,001 |
| Line Abreast vs Wedge | 0,029 | 0,198 |
| Fighting Wing vs Wedge | 0,0969 | 0,000 |

Os resultados do teste *bootstrap*, expressos na Tabela III, reforçaram os achados da análise não paramétrica anterior, evidenciando diferenças estatisticamente significativas entre diversas formações. A formação *Lead Trail* destacou-se com desempenho superior nas comparações par a par, apresentando maior valor médio da métrica MIRV quando confrontada com

Line Abreast ($p = 0,000$), *Fighting Wing* ($p = 0,005$) e *Wedge* ($p = 0,000$). Além disso, *Fighting Wing* também se mostrou mais eficaz que *Wedge* ($p = 0,000$), enquanto não se observou diferença significativa apenas entre *Line Abreast* e *Wedge* ($p = 0,198$).

V. CONCLUSÃO

Este estudo avaliou, por meio de simulações estocásticas no ASA, o impacto de diferentes formaturas operacionais da Aviação de Caça em missões BVR 2x2 com infiltração em território inimigo. A eficácia das formações foi medida por uma métrica composta (MIRV), que agregou indicadores de dano ao alvo, sobrevivência das aeronaves, neutralização de vetores inimigos e uso racional de armamentos. Os resultados demonstraram que as formações *Lead Trail* e *Fighting Wing* apresentaram desempenho significativamente superior às formações *Line Abreast* e *Wedge*, tanto em termos de efetividade ofensiva quanto de eficiência tática na utilização dos recursos no combate BVR.

A utilização do teste de Kruskal-Wallis, seguido de análises pós-hoc por meio de reamostragem *bootstrap*, permitiu detectar diferenças estatisticamente significativas entre os grupos avaliados, superando as limitações associadas à não normalidade dos dados oriundos da simulação estocástica. Essa abordagem analítica conferiu robustez à inferência estatística e possibilitou a identificação de pares de formações com desempenhos distintos, oferecendo subsídios objetivos à seleção de táticas mais eficazes.

Dessa forma, no contexto do cenário proposto, os resultados obtidos permitiram classificar as formaturas operacionais quanto à sua efetividade no cumprimento da missão simulada. A formatura *Lead Trail* apresentou o melhor desempenho global, seguida por *Fighting Wing*, *Line Abreast* e, por fim, *Wedge*. Essa hierarquia reflete as diferenças observadas na métrica composta MIRV, destacando-se a *Lead Trail* como a mais adequada para operações do tipo BVR 2x2 com infiltração em território inimigo. Essa conclusão é sustentada por sua elevada média na métrica composta MIRV, aliada à superioridade estatística verificada nas análises não paramétricas e de reamostragem, o que confere robustez às evidências de sua maior eficácia no cumprimento dos objetivos da missão.

É importante destacar, no entanto, que os resultados obtidos são específicos ao cenário construído e aos parâmetros fixados, como a configuração das aeronaves, armamentos disponíveis, modelo de ameaça e regras de engajamento. Além disso, embora o ambiente de simulação tenha buscado representar aspectos realistas do combate aéreo, as conclusões ainda carecem de validação empírica em contextos reais de treinamento ou operação, o que constitui uma limitação relevante. Conclui-se, portanto, que a simulação baseada em métricas integradas de desempenho das formaturas operacionais pode contribuir de forma direta à melhoria do processo decisório tático e ao fortalecimento da capacidade operacional da FAB.

REFERÊNCIAS

- [1] R. E. Ball, *The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability: Analysis and Design*, 2nd ed. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003.
- [2] M. Viscardi, J. P. A. Dantas, D. Geraldo, e A. Passaro, "Manobra Winding: Defesa Contra Mísseis Passivos e Semiativos Superfície-Ar," in *Anais do XXV Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (SIGE)*, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, Brasil, out. 2024.
- [3] Y. Kong, W. Wei, L. Zhang, Y. Chen, H. Zhang, and B. Chen, "Hierarchical reinforcement learning from competitive self-play for dual-aircraft formation air combat," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 36, no. 10, pp. 281–292, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.cja.2023.06.016.
- [4] R. L. Shaw, *Fighter Combat: Tactics and Maneuvering*. Annapolis, Maryland: Naval Institute Press, 1985.
- [5] J. P. A. Dantas, D. Geraldo, A. N. Costa, M. R. O. A. Maximo, e T. Yoneyama, "ASA-SimaaS: Advancing Digital Transformation through Simulation Services in the Brazilian Air Force" in *Anais do Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (SIGE)*, São José dos Campos, Brasil, 2023.
- [6] J. P. A. Dantas, A. N. Costa, V. C. F. Gomes, A. R. Kuroswiski, F. L. L. Medeiros, e D. Geraldo, "ASA: A Simulation Environment for Evaluating Military Operational Scenarios," arXiv preprint arXiv:2207.12084, 2022.
- [7] United States. Department of the Air Force. "T-38C Flying Fundamentals. AETC Manual 11-251". 10 set. 2024. 203 p. Disponível em: <<https://static.e-publishing.af.mil/production/1/aetc/publication/aetctman11-251/aetctman11-251.pdf>>. Acesso em: 09/06/2025.
- [8] United States. Department of the Air Force. "Tactical Doctrine – T-38C Employment Fundamentals/Introduction to Fighter Fundamentals (IFF)". AETC Tactics, Techniques, and Procedures 11-1, 31 dez. 2024. 166 p. Disponível em: <<https://static.e-publishing.af.mil/production/1/aetc/publication/aetcttp11-1/aetcttp11-1.pdf>>. Acesso em: 08/06/2025.
- [9] A. Gosavi, *Simulation-Based Optimization*, 2nd ed., vol. 55. in *Operations Research/Computer Science Interfaces Series*, vol. 55. Boston, MA: Springer US, 2015.
- [10] A. R. Kuroswiski, F. L. L. Medeiros, M. M. De Marchi, and A. Passaro, "Beyond visual range air combat simulations: validation methods and analysis using agent-based models," *The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, Nov. 2023.
- [11] M. Viscardi, J. P. A. Dantas, D. Geraldo, and A. Passaro, "Advanced Defensive Tactics: Integrating Simulation and Machine Learning in Aerial Warfare," *Spectrum - The Journal of Operational Applications in Defense Areas*, vol. 25, no. 1, pp. 12–17, 2024. doi: 10.55972/spectrum.v25i1.403.
- [12] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- [13] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 7th ed., Hoboken, NJ: Wiley, 2018.
- [14] Davis, Robert. "Forward Arming and Refueling Points for Fighter Aircraft: Power Projection in an AntiAccess Environment". *Air & Space Power Journal*, v. 28, n. 5, set./ out, p. 5-28, 2014. Disponível em: <https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/ASPJ/journals/Volume-28_Issue-5/F-Davis.pdf>. Acesso em: 04/04/2024.
- [15] M. D. McKay, R. J. Beckman, and W. J. Conover, "A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code," *Technometrics*, vol. 21, no. 2, pp. 239–245, May 1979, doi: 10.2307/1268522.
- [16] A. L. Dideriksen. "Enhancing performance criteria to improve U.S. military aviation training". Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) – The University of Iowa, Iowa City, 2021. Disponível em: <<https://iro.uiowa.edu/esploro/outputs/doctoral/Enhancing-performance-criteria-to-improve-US/9984097369002771/filesAndLinks?index=0>>. Acesso 17/06/2025.
- [17] Brasil. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento do Controle do Espaço Aéreo. "Mudança nos critérios de apresentação de plano de voo: AIC N 16/17". Rio de Janeiro, 4 ago. 2017. Disponível em: <<https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/aic-n-1617>>. Acesso em: 30/05/2025.