

Desempenho de Sistemas GBAD em Defesa de Ponto: Uma Análise da Influência da Altitude e da Saturação de Alvos

Jackson T. Veiga¹ e Angelo Passaro²

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

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

Resumo—A crescente ameaça de aeronaves furtivas impõe desafios à eficácia dos sistemas de Defesa Antiaérea Baseada em Terra (GBAD), sobretudo na proteção de áreas sensíveis durante grandes eventos. Este estudo avalia a capacidade de resposta de uma configuração GBAD frente a ataques coordenados, utilizando o Ambiente de Simulação Aeroespacial (ASA) para modelagem, controle e visualização dos testes. A metodologia adotou simulações em lote com variação de altitude, velocidade, número de vetores ofensivos e cinco sementes randômicas. A análise estatística aplicou árvores regressivas simples, correlação linear e curvas gaussianas. As métricas principais foram a probabilidade de acerto (P_k) e o desvio padrão (σ), avaliados conforme variáveis críticas. Os resultados indicam alta eficácia da configuração ($P_k \geq 90\%$) contra até sete vetores simultâneos, com queda progressiva acima desse limiar. Em 22% dos testes, houve sobrevivência inimiga, especialmente em voos rasantes ou aproximações inferiores a 10 milhas náuticas. A introdução de vetores em alerta na base elevou a taxa média de neutralização para 59,1%. Os dados obtidos oferecem subsídios para o aprimoramento tático de sistemas GBAD, indicando que zonas de engajamento entre 8 e 12 milhas náuticas são mais eficazes em cenários simulados.

Palavras-Chave—Simulação Aeroespacial, No Flight Zone, ASA, Engajamento Defensivo, Avaliação Operacional.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de Defesa Antiaérea Baseada em Terra (*Ground-Based Air Defense – GBAD*) têm ganhado relevância internacional diante de ameaças aéreas furtivas e saturadas. Grandes eventos e infraestruturas críticas tornam-se alvos estratégicos em conflitos assimétricos ou híbridos, exigindo sistemas eficazes de negação aérea em curtos prazos [1].

No Brasil, a doutrina privilegia a defesa de ponto e área por meio da integração de sensores, armas e unidades móveis, em conformidade com o SISDABRA. O Exército Brasileiro é o principal operador terrestre de sistemas GBAD, responsável pela proteção antiaérea de forças desdobradas e estruturas sensíveis [1], [2], [3].

Apesar dos investimentos em curto alcance e mobilidade, persiste a lacuna em média e alta altitude. A ausência de sistemas de médio alcance reduz a capacidade de resposta contra vetores de maior penetração, encurtando o tempo de reação e ampliando a vulnerabilidade de pontos críticos [3], [4].

Diante dessa limitação, o estudo avalia em simulação o desempenho de uma configuração hipotética de GBAD de

médio alcance, ainda inexistente no território nacional, visando antecipar cenários operacionais e subsidiar decisões de capacitação. A investigação inclui ataques coordenados e a análise da negação aérea em uma Zona de Exclusão (*No-Fly Zone – NFZ*) de 10 milhas náuticas.

A pesquisa utiliza o ASA [5] para configuração, controle tático, registro de eventos e geração de estatísticas. O emprego de simuladores digitais permite reduzir custos, testar hipóteses operacionais e explorar limites do sistema em cenários de alto risco [6].

O artigo analisa a efetividade de uma defesa GBAD nacional na proteção de ponto sensível, considerando variações de perfis táticos inimigos e a capacidade de impedir lançamentos ofensivos. A abordagem busca fornecer subsídios técnicos à doutrina e à futura aquisição de sistemas mais robustos para a defesa antiaérea brasileira.

O artigo está organizado da seguinte forma: A Seção II traz a revisão bibliográfica. A Seção III descreve a metodologia e configurações experimentais. A Seção IV apresenta os resultados e sua análise. A Seção V expõe as conclusões, limitações e perspectivas futuras.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta a metodologia, abordando sistemas GBAD, recursos operacionais e a modelagem de cenários no ASA. Também descreve o delineamento experimental, técnicas estatísticas e análise exploratória para apoiar a interpretação dos resultados.

A. Defesa Antiaérea, Pontos Sensíveis e Zonas de Exclusão

Sistemas GBAD negam o uso do espaço aéreo por vetores hostis, protegendo pontos sensíveis e áreas críticas. O estado da arte inclui sensores integrados, mísseis guiados de curto alcance e unidades de comando e controle com apoio de inteligência artificial [7], [8]. A doutrina brasileira prevê a criação de *No-Fly Zones (NFZ)* em torno de infraestruturas estratégicas, empregando mísseis e canhões conforme planejamento tático [9], [3], [10]. Sistemas como Avenger, Pantsir-S1 e Patriot representam tecnologias de ponta globais, cobrindo ameaças de baixa a média altitude [11].

Grandes eventos, como a Copa 2014 e os Jogos 2016, confirmaram o papel da artilharia antiaérea na defesa multicamada integrada ao SISDABRA [12]. Para a COP30, em Belém (PA), projeta-se arquitetura semelhante, com ênfase em cobertura urbana e resposta a VANTs e ameaças furtivas [13].

Na Amazônia, destacam-se desafios de cobertura radar limitada, super-refração atmosférica e restrição de mobilidade terrestre [14], [15]. Em áreas urbanas, a doutrina orienta zonas de engajamento seguras, integração civil-militar e emprego de sensores móveis para mitigar obstáculos e ampliar a eficácia da defesa [16], [17].

B. Simulação como Ferramenta Experimental

A simulação é amplamente usada no contexto militar para investigação científica e operacional, reduzindo custos, riscos e limitações físicas, com aplicações de combates BVR a controle autônomo de formações [18], [19].

Plataformas consolidadas como FLAMES [20], VR-Forces [21] e OneSAF [22] oferecem modelagem avançada de cenários táticos e estratégicos, mas exigem alto nível técnico e apresentam restrições comerciais. Embora existam simuladores para treinamento tático, como COMBATER [23], e sistemas dedicados a armamentos específicos, como RBS-70 [24], ainda há lacuna no uso de ferramentas integradas para avaliar operacionalmente sistemas GBAD em cenários complexos [23].

O ASA consolidou-se como plataforma nacional para modelagem, simulação e análise de cenários tático-operacionais de defesa, de propriedade do Estado-Maior da Aeronáutica e da Força Aérea Brasileira. A ferramenta permite configurar unidades, sensores, regras de engajamento e perfis de ameaças [5], sendo empregado prioritariamente em aplicações militares, mas podendo, sob autorização, apoiar pesquisas e estudos direcionados, como neste trabalho.

No ASA, destacam-se aplicações de defesa aérea, como simulação da zona de engajamento de mísseis superfície-ar [25], uso de inteligência artificial para ampliar consciência situacional e controle autônomo de sistemas defensivos [26], [27], [28]. O ambiente também permite modelar missões ofensivas com manobras típicas de ataque ao solo, como pop-up, viabilizando análises combinadas de ameaça e resposta [29], [30].

Neste trabalho, o ASA é usado para cenários de defesa antiaérea de ponto, com parâmetros extraídos da doutrina nacional e diretrizes de emprego da artilharia antiaérea. A metodologia segue experimentação por cenários, testando variações de número de vetores, rotas e altitudes, e extraindo métricas operacionais como tempo de engajamento, taxa de acerto e sobrevivência dos alvos. A abordagem é relevante devido à estocasticidade do simulador, que modela sensores, ameaças e respostas de forma não determinística.

C. Delineamento de Experimentos

O Delineamento de Experimentos (DoE) é essencial para planejar e analisar simulações, permitindo extrair conclusões estatisticamente válidas a partir de variações estruturadas de parâmetros [31]. Em sistemas complexos e estocásticos, típicos de cenários militares, estruturas fatoriais parciais permitem avaliar múltiplos fatores com número reduzido de execuções [32].

Para capturar a variabilidade dos sistemas simulados, usam-se sementes pseudoaleatórias (seeds), gerando múltiplos cenários a partir das mesmas configurações. O delineamento combina variáveis independentes para identificar parâmetros críticos. Técnicas como planejamento fatorial parcial e Design

do Hipercubo Latino (LHD) otimizam a cobertura do espaço amostral com menor custo computacional [32].

D. Análise Exploratória dos Dados

A Análise Exploratória de Dados (EDA) é a primeira etapa do processamento, oferecendo meios visuais e estatísticos para identificar padrões, tendências e inconsistências [33]. Segue metodologias consolidadas, como a de Sargent [34], que orientam a formulação do problema, a seleção de variáveis relevantes e a validação conceitual do modelo.

Essa análise preliminar permite avaliar a consistência das simulações e orientar a escolha de variáveis críticas a serem modeladas em fases posteriores, como engajamento, tempo de resposta e sobrevivência dos vetores.

E. Modelagem Preditiva e Análise Estatística

Após a EDA, aplicam-se técnicas quantitativas para estimar e projetar o desempenho do sistema. Árvores de decisão regressiva (CART) são utilizadas para particionar o espaço de entrada, eliminar outliers e identificar variáveis de maior influência [35].

Regressão linear e coeficiente de correlação de Pearson quantificam relações entre variáveis independentes e métricas como P_k . Superfícies de resposta e gráficos de dispersão auxiliam na visualização dessas relações.

Distribuições gaussianas descrevem o comportamento estatístico de variáveis-chave. Ajuste de curvas normais sobre P_k permite estimar a variância (σ), oferecendo representação compacta da dispersão e reforçando a robustez da análise quantitativa.

F. Métricas de Avaliação e Modelagem Analítica

As principais métricas consideradas foram: - P_k , como indicador de eficácia do sistema; - σ , como medida de robustez estatística; - Faixas operacionais críticas obtidas via árvores de decisão e ajustes gaussianos. :

$$P_k = \frac{n_{\text{merodeabates}}}{n_{\text{merototaldevetoresofensivos}}} \quad (1)$$

Como complemento, o desvio padrão (σ) por faixa de ataque foi utilizado para avaliar a consistência do desempenho.

Um modelo analítico foi ajustado via regressão polinomial para estimar P_k em função da velocidade v e altitude h :

$$P_k = \alpha - \beta v^2 - \gamma h^2 + \delta v h \quad (2)$$

Esse conjunto de métricas permitiu avaliar tanto o desempenho médio quanto a variabilidade do sistema, consolidando a proposta.

III. METODOLOGIA PROPOSTA

Esta seção descreve a metodologia adotada para avaliar o desempenho de um sistema GBAD em cenário simulado de combate. O plano experimental foi estruturado em três etapas: (i) definição do planejamento experimental e da pergunta operacional; (ii) caracterização do cenário e configuração da GBAD; e (iii) descrição dos casos de teste que fundamentam a seção de Resultados.

A. Planejamento Experimental e Pergunta Operacional

O experimento adotou um *DoE* fatorial parcial, executando ciclos de simulação em lote. A estrutura combinatória equilibrada diversidade estocástica (cinco *seeds* aleatórias) e viabilidade computacional.

A pergunta operacional central é: "*Qual o desempenho e as principais fragilidades de um GBAD diante de diferentes perfis de ataque aéreo em defesa de ponto sensível, considerando parâmetros técnicos nacionais?*"

As variáveis independentes refletem parâmetros críticos da operação ofensiva: velocidade, altitude e número de vetores. Inicialmente, os cenários simularam ataques retilíneos únicos; depois, foram incluídos múltiplos vetores e perfis de voo variados.

B. Cenário de Simulação e Configuração GBAD

O cenário foi modelado no ASA, representando de maneira hipotética a defesa aérea do Estádio Mangueirão, em Belém-PA, para grandes eventos como a COP30. A NFZ foi definida com raio de 10 MN a partir da base de defesa.

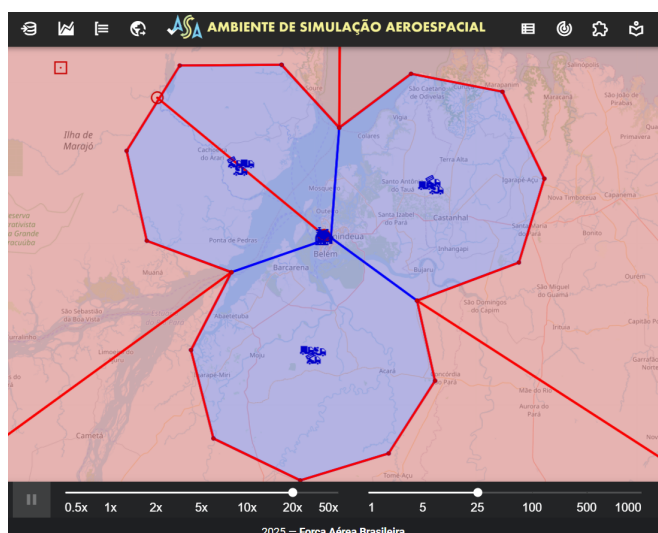


Fig. 1

CENÁRIO ASA COM TRÊS SETORES DEFENSIVOS SIMULADOS.

A configuração do sistema GBAD baseou-se em capacidades combinadas de sistemas como Avenger, Pantsir-S1 e Patriot [11]. Os parâmetros técnicos simulados estão resumidos na Tabela I.

TABELA I

REQUISITOS TÉCNICOS DA GBAD SIMULADA

Categoria	Especificação
Cobertura	10.000 km ² , até 40 km de alcance
Altitude de engajamento	50 a 15.000 m
Velocidade alvo	Até 800 m/s
Engajamento simultâneo	Até 16 alvos, com rastreamento de 150

C. Casos de Teste e Conexão com Resultados

Com base na configuração da GBAD e no *DoE* estabelecido, foram definidos diversos cenários de teste, organizados conforme parâmetros combinatórios de entrada. A Tabela II resume os intervalos utilizados.

TABELA II

INTERVALOS DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo
Velocidade (kt)	400	850
Altitude (ft)	500	45.000
Número de vetores	1	9

Os cenários variaram perfil de voo e número de vetores, simulando tentativas de saturação e evasão do GBAD. Inicialmente, foram executadas **100 simulações por cenário** em 20 cenários distintos, com *seeds* variadas para explorar parâmetros críticos. Em seguida, aplicaram-se **árvores de regressão com poda**, removendo folhas irrelevantes e mantendo apenas *seeds* críticas.

Os testes foram conduzidos em **três ciclos sucessivos**, aplicando um **critério de parada estatístico**: após a estabilização das médias de P_k e demais métricas, *seeds* redundantes foram descartadas.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados foram derivados dos três ciclos experimentais realizados para avaliar a efetividade do sistema GBAD em cenários variados de ataque aéreo. A Figura 3 ilustra a distribuição tridimensional dos abates em função da distância em relação à base, velocidade e altitude, oferecendo uma visão geral do comportamento do sistema sob diversas condições.

No cenário simulado, considera-se que a GBAD é eficaz contra alvos voando abaixo de 45.000 pés e a velocidades inferiores a 850 kt. Esses limites foram adotados como requisitos operacionais e estão representados visualmente na Figura 2.



Fig. 2

ENVELOPE DE INTERCEPÇÃO DA GBAD.

A. Ciclo 1 – Testes Iniciais

No primeiro ciclo, foram executadas simulações sucessivas variando os parâmetros críticos como velocidade, altitude e número de aeronaves. O objetivo foi estabelecer limites iniciais do envelope operacional do GBAD.

A Tabela III resume os principais resultados quantitativos, incluindo coeficiente de determinação (R^2) do modelo de regressão, correlações e cenário com menor efetividade.

TABELA III
RESUMO ESTATÍSTICO E CENÁRIO CRÍTICO – CICLO 1

Métrica	Valor
R^2 modelo de regressão	0,168
Correlação Velocidade-Distância (r)	0,290
Correlação Altitude-Distância (r)	0,347
Cenário menos efetivo (letalidade)	25%

Velocidade e Altitude vs Distância de Abate

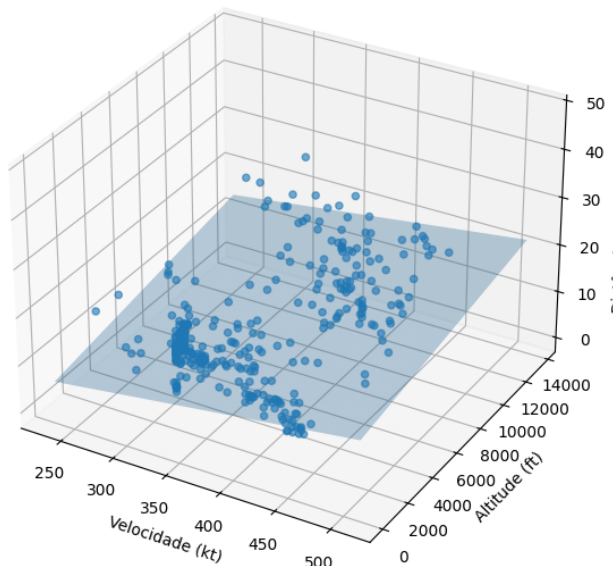


Fig. 3

DISTRIBUIÇÃO TRIDIMENSIONAL DOS ABATES: DISTÂNCIA, VELOCIDADE E ALTITUDE.

B. Ciclo 2 – Refinamento e Avaliação Estatística

Com base nos dados do Ciclo 1, avançou-se na investigação das variáveis, incluindo múltiplas variações de *seed* e análise da (P_k). Foi confirmada a influência da altitude e velocidade na efetividade do sistema, com destaque para a concentração dos abates fora do raio de 10 NM da base, conforme Figura 4.

A Tabela IV apresenta os valores médios de P_k obtidos, evidenciando queda de desempenho conforme o aumento do número de aeronaves.

C. Ciclo 3 – Avaliação com Alerta em Base e Análise de Distribuição

No terceiro ciclo, adicionou-se aeronaves em alerta na base para aumentar a capacidade de resposta. Com as faixas críticas de velocidade e altitude definidas nos ciclos anteriores, o foco passou a ser a variação do número de vetores. Novas simulações foram realizadas com diferentes sementes para garantir a consistência e avaliar a robustez operacional do sistema.

A Tabela V resume os ajustes nas *seeds* e os respectivos valores de P_k observados.

A Figura 5 apresenta o gráfico final relacionando a variância (σ) dos resultados com os valores de P_k , incluindo uma curva de ajuste Gaussiana que evidencia a distribuição estatística dos experimentos.

Posição das Aeronaves em Relação à Airbase (semiesfera de 10 NM)

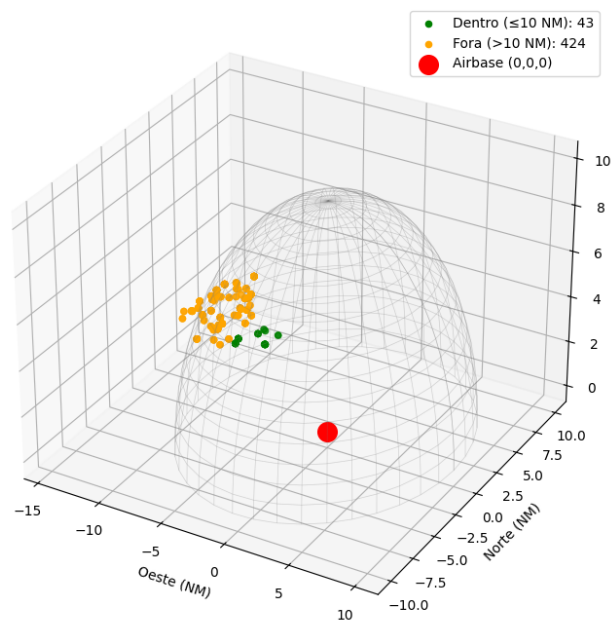


Fig. 4

(P_k) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA ATÉ A BASE.

TABELA IV
VALORES MÉDIOS DE (P_k) – CICLO 2

Número de Aeronaves	P_k Médio (%)
Até 7	93,4
8	87,5
9	77,8

Os resultados indicam que a combinação de GBAD com alerta em base amplia a capacidade de defesa, porém a saturação ainda representa um desafio a ser considerado em estratégias futuras.

D. Resumo Consolidado dos Resultados

A Tabela VI resume a efetividade do sistema GBAD em três etapas experimentais.

A pesquisa avaliou a eficácia do GBAD em três etapas experimentais. O sistema manteve alta eficiência até sete vetores simultâneos (P_k médio 93,4%), decrescendo para 87,5% com oito vetores e 77,8% com nove. Na terceira fase, o P_k médio geral caiu para 63%, evidenciando efeito da saturação. Os resultados refletem o cenário e parâmetros específicos do experimento.

Em 18% dos testes, todos os vetores hostis foram eliminados; nos demais, sobreviveram até quatro em média. A análise espacial mostrou 572 bombas dentro do raio de 10 NM, com

TABELA V
AJUSTE DE *Seeds* E VALORES DE LETALIDADE (P_k) – CICLO 3

<i>Seed</i>	P_k Observado (%)
1	62,5
2	59,1
3	65,0
4	61,2
5	63,3

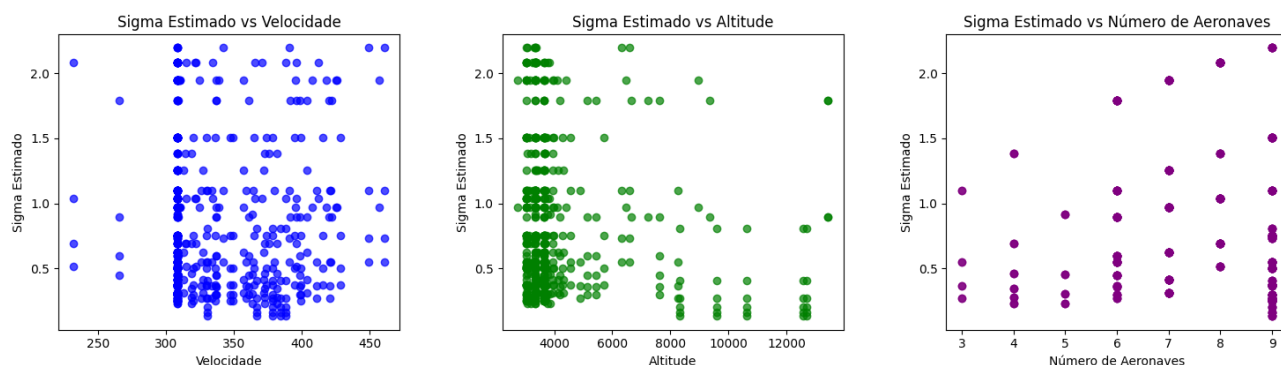


Fig. 5

DISTRIBUIÇÃO DE P_k EM FUNÇÃO DA VARIÂNCIA E AJUSTE GAUSSIANO.

TABELA VI

RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS POR ETAPA EXPERIMENTAL COM CRITÉRIO DE PARADA

Variável / Métrica	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Crítério de Parada
Número de aeronaves	1 a 4	1 a 9	Com alerta de base	Seeds estabilizadas
Velocidade (kt)	400, 600, 900	400 a 900	Controlada	Pk normalizado por faixa
Altitude (ft)	100 a 60.000	100 a 60.000	Controlada	Variabilidade < 5%
Pk média	100% (até 600 kt)	93,4% (até 7 aeronaves)	63%	Convergência média
Pk com 8 aeronaves	–	87,5%	–	Seeds críticas mantidas
Pk com 9 aeronaves	–	77,8%	–	Seeds críticas mantidas
Testes com sobreviventes	–	22%	82%	Distribuição estabilizada
Bombas lançadas dentro de 10 NM	–	572 (92% a 8,65 NM)	14% dos testes	Normalização de seeds
Máximo de aeronaves sobreviventes	–	–	Até 8	Consistência garantida

92% próximas a 8,65 NM do ponto de interesse (POI) e 22% entre 3,9 e 4,4 NM, indicando concentração próxima ao alvo. Houve redução média de 14% no desempenho na fase 3, reforçando a necessidade de estratégias complementares em cenários de alta intensidade.

A inclusão de vetores em alerta na base aumentou a complexidade e reduziu a eficácia média, mas contribuiu para conter parcialmente os ataques, evidenciando a importância de defesa integrada terrestre e aérea.

A maioria dos abates ocorreu fora da zona de 10 NM, indicando contenção antecipada. No entanto, a concentração de impactos ainda dentro da área sensível reforça a necessidade de medidas adicionais.

Recomenda-se, nesses cenários, uma segunda camada GBAD entre 8 e 12 NM e emprego de vetores aéreos rápidos para ampliar cobertura além do alcance da defesa terrestre.

V. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a proteção de pontos sensíveis em grandes eventos, usando simulações no ASA para medir o desempenho de um GBAD frente a ameaças furtivas. O cenário foi estruturado com base em uma configuração realista de defesa de ponto, e os experimentos ocorreram em três etapas, com ajustes progressivos no DoE e nos parâmetros operacionais.

Para cada um dos 20 cenários, inicialmente foram realizadas 100 simulações com seeds variadas, aplicando poda de folhas irrelevantes nas árvores de regressão, mantendo apenas

seeds críticas nos três ciclos subsequentes, com critérios de parada baseados na estabilização estatística das métricas operacionais.

Os resultados indicam que, para as condições simuladas, a GBAD apresenta boa capacidade de neutralização de ameaças em ataques de baixa a média saturação, mas pode ser superada em cenários de alta concentração de vetores. Uma importante constatação foi a viabilidade de adotar um anel externo de defesa, com cobertura SHORAD entre 8 e 12 milhas náuticas (NM) [36], a fim de forçar o engajamento antecipado e evitar lançamentos de armamentos dentro da zona crítica de 10 NM.

A. Trabalhos Futuros

Futuras investigações devem ampliar o volume amostral e aplicar análises estatísticas mais robustas, aumentando a significância dos resultados e permitindo estimativas mais precisas do desempenho da GBAD frente a diferentes perfis de ataque. Isso inclui a evolução dos casos de teste com base nos pontos críticos identificados, bem como a reestruturação do cenário com maior aderência às condições operacionais reais.

Além da métrica P_k , recomenda-se incorporar indicadores operacionais como consumo de combustível, número de mísseis disparados, impacto logístico, tempo de resposta, cobertura temporal e custo por unidade de área protegida. Tais métricas permitem uma avaliação mais ampla e sistêmica da eficácia da defesa, alinhada ao ciclo de missão.

Por fim, sugere-se explorar estratégias complementares, como o aumento do número de unidades GBAD, a ampliação da cobertura angular dos canisters e a otimização da posição tática com base em risco geoespacial. Naturalmente, essas análises foram limitadas ao vetor de ataque controlado disponível; espera-se que no futuro seja possível utilizar o simulador em larga escala, com múltiplos vetores e análise de variáveis mais robustas, sob orientação de especialistas reais de voo e defesa de solo. O objetivo é avançar rumo a um modelo adaptativo, capaz de responder dinamicamente a diferentes ameaças com suporte de simulações e modelagens probabilísticas mais sofisticadas.

VI. AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos instrutores da disciplina de Modelagem e Simulação, ao ITA, DCTA e IEAv pelo suporte acadêmico e confiança na utilização do ASA, que possibilitou este estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] E. R. dos Santos Junior, "A Estruturação da AAAe de Média Altura no Exército Brasileiro: Desenvolvimento e Implantação," *Informativo Antiaéreo: Publicação científica*, vol. 3, no. 3, pp. 39–52, 2024. [Online]. Available: <https://ebrevistas.eb.mil.br/IA/article/view/12585>
- [2] Exército Brasileiro - Comando de Defesa Antiaérea. (2025) Comando de Defesa Antiaérea do Exército. Acesso em: 29 jun. 2025. [Online]. Available: <https://www.eb.mil.br/web/cdaex>
- [3] Exército Brasileiro, *Manual de Campanha: Operações de Defesa Antiaérea – EB70-MC-10.235*, Brasília, 2017, acesso em: 11 jun. 2025. [Online]. Available: <https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/1/1194/1/EB70-MC-10.235.pdf>
- [4] D. A. Oliveira, G. A. Nascimento *et al.*, "Uso de Radares Antiaéreos no Combate Moderno: As Possibilidades da Defesa Antiaérea Brasileira," *Informativo do Centro de Armas e Munições do Exército (CAEx)*, 2022, artigo técnico disponível no repositório institucional BDEX. [Online]. Available: <https://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/12176>
- [5] J. P. A. Dantas *et al.*, "Asa: a simulation environment for evaluating military operational scenarios," *arXiv preprint arXiv:2207.12084*, 2022.
- [6] R. L. B. C. Amorim and A. W. P. dos Santos, "As Inovações Tecnológicas de Simulação Aplicada no Processo Ensino-Aprendizagem: A Experiência do Exército Brasileiro," *Military Review — Edição Brasileira, Artigos Exclusivamente On-line*, janeiro 2022, publicado em 11 de janeiro de 2022. [Online]. Available: <https://www.armyupress.army.mil/Journals/Edicao-Brasileira/Artigos-Exclusivamente-On-line/Artigos-Exclusivamente-On-line-de-2022/Amorim-POR-OLE-Jan-2022/>
- [7] S. A. Leventopoulos, "Ground Based Air Defense Systems: New Challenges and Prospective," *Journal of Computations & Modelling*, vol. 9, no. 2, pp. 179–192, 2019.
- [8] A. J. Vick, S. M. Zeigler, J. Brackup, and J. S. Meyers, "Air Base Defense: Rethinking Army and Air Force Roles and Functions," RAND Corporation, Santa Monica, CA, Technical Report RR-4368-AF, 2020, disponível no Defense Technical Information Center (DTIC). [Online]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/html/tr/AD1100920/>
- [9] Ministério da Defesa, *Estratégia Nacional de Defesa*, Brasília, 2020, documento oficial do governo brasileiro.
- [10] H. C. Marques and V. Abdurahman, "Ambientes virtuais distribuídos – apoiando o desenvolvimento de doutrinas de combate para a aviação militar," in *Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (SIGE)*, São José dos Campos, Brasil, 2006, disponível online. [Online]. Available: <https://www.sige.ita.br/edicoes-antiores/2006/st/C2010.pdf>
- [11] J. F. Antal, *Next war: Reimagining how we fight*. Casemate, 2023.
- [12] J. K. G. da Justa Menescal, "Análise da Geopolítica de Estado e a Defesa Aérea na Amazônia Legal Brasileira," Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, Tech. Rep., 2016, trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Ciências Militares, com ênfase em Defesa.
- [13] C. R. T. Caldeira, L. Polidori, M. El Hage, M. C. O. Caldeira, E. B. Gorgens, and J. P. H. B. Ometto, "Comparação entre os modelos digitais de terreno gerados por radar em banda p e lidar na amazônia, um estudo de caso no amapá (brasil): Comparison between digital terrain models generated by p-band radar and lidar in the amazon, a case study in amapá (brazil)." *Revista de Geociências do Nordeste*, vol. 9, no. 1, pp. 59–70, 2023.
- [14] F. N. H. Jasper and A. F. Nunes, "Soberania e controle do espaço aéreo: uma visão brasileira," 2022.
- [15] T. d. Nascimento, R. F. Frogeri, and L. Á. Prado, "Gestão de segurança da informação (gsi) no segundo centro integrado de defesa aérea e controle de tráfego aéreo (cindacta ii)," *IV Simpósio Mineiro de gestão, educação, comunicação e tecnologia da informação*, pp. 1–30, 2018.
- [16] N. I. S. Junior, "A Evolução da Artilharia Antiaérea Brasileira, Desde a Década de 1930 até 2020," *Revista da AHIMTB*, p. 41.
- [17] C. A. R. L. Junior, "Emprego de mísseis e foguetes na defesa antiacesso e de negação de Área," *A Defesa Nacional*, vol. 849, 2022. [Online]. Available: <http://www.ebrevistas.eb.mil.br/ADN/article/download/11259/9004>
- [18] A. N. Costa, J. P. A. Dantas, E. Scukins, F. L. L. Medeiros, and P. Ögren, "Simulation and machine learning in beyond visual range air combat: A survey," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 76 755–76 774, 2025.
- [19] L. S. Lima, R. H. Giannico, D. D. C. Brito, A. G. S. Dantas, and J. P. A. Dantas, "Aprendizado de Máquina para a Otimização da Obtenção de Resultados em Simulações de Defesa Aeroespacial," in *XIX Congresso Acadêmico sobre Defesa Nacional (CADN)*, Escola Naval, Rio de Janeiro, julho 2024, 22–26 de julho.
- [20] Ternion Corporation, "Flames simulation framework," <https://flamesframework.com/>, Huntsville, AL, 2024, accessed: July 9, 2025.
- [21] MAK Technologies, "Vr-forces: the mak one multi-domain computer generated forces," <https://www.mak.com/mak-one/apps/vr-forces>, Cambridge, MA, 2024, accessed: July 9, 2025.
- [22] R. L. Wittman Jr and C. T. Harrison, "Onesaf: a product line approach to simulation development," 2001.
- [23] A. M. De Almeida, P. G. C. Pochmann, A. D. F. Amaral, A. E. Jansen, and E. B. Neves, "The use of constructive simulation based on combater software to enhance the learning of brazilian army officers at the tactical level," in *2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. IEEE, 2023, pp. 1374–1379.
- [24] C. A. P. G. C. Pochmann, "O emprego da bateria de artilharia antiaérea dotada do míssil portátil rbs-70 em operações militares em ambiente urbano nos conflitos de 4ª geração."
- [25] J. P. A. Dantas *et al.*, "Real-time Surface-to-Air Missile Engagement Zone Prediction Using Simulation and Machine Learning," *arXiv preprint arXiv:2311.11905*, 2023.
- [26] J. P. A. Dantas, A. N. Costa, D. Geraldo, M. R. O. A. Maximo, and T. Yoneyama, "PoKER: a Probability of Kill Estimation Rate Model for Air-to-Air Missiles Using Machine Learning on Stochastic Targets," *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 2025, 15485129241309675.
- [27] J. P. A. Dantas *et al.*, "Machine learning to improve situational awareness in beyond visual range air combat," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, no. 8, pp. 2039–2045, 2022.
- [28] A. N. Costa *et al.*, "Formation control method based on artificial potential fields for aircraft flight simulation," *Simulation*, vol. 98, no. 7, pp. 575–595, 2022.
- [29] J. P. A. Dantas, M. R. O. A. Maximo, and T. Yoneyama, "Autonomous aircraft tactical pop-up attack using imitation and generative learning," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 81 204–81 217, 2025.
- [30] M. V. Filho *et al.*, "Manobra Winding: Defesa Contra Mísseis Passivos e Semiativos Superfície-Ar," *Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa*, vol. 25, no. 1, pp. 12–17, 2024.
- [31] J. P. Kleijnen, "An overview of the design and analysis of simulation experiments for sensitivity analysis," *European Journal of Operational Research*, vol. 187, no. 3, pp. 1109–1123, 2008.
- [32] R. T. Johnson, G. T. Hutto, and J. R. Simpson, "Designed experiments for the defense community," *Quality Control and Applied Statistics*, vol. 58, no. 2, pp. 193–209, 2013.
- [33] A. M. Law, W. D. Kelton, and W. D. Kelton, *Simulation modeling and analysis*. McGraw-hill New York, 2007, vol. 3.
- [34] R. G. Sargent, "Verification and validation of simulation models," in *Proceedings of the 2010 winter simulation conference*. IEEE, 2010, pp. 166–183.
- [35] L. Breiman, J. Friedman, R. Olshen, and C. Stone, "Classification and regression trees. wadsworth int," *Group*, vol. 37, no. 15, pp. 237–251, 1984.
- [36] J. Fraga, "A integração do novo sistema de artilharia antiaérea shorad no grupo de artilharia antiaérea: Contribuições futuras para o sistema de defesa aéreo nacional," 2021.