Avaliação de Dominância Espacial em Simulações de Ataque ao Solo

André Negrão Costa[1], **Vitor C. F. Gomes**[1] **e Felipe Costa Holanda**[2]
[1] Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos/SP – Brasil
[2]Instituto de Aeronáutica e Espaço, São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo — A avaliação de cenários aeroespaciais simulados requer métricas interpretáveis capazes de representar dominância espacial entre times adversários. Diagramas de Voronoi clássicos oferecem uma partição geométrica simples, mas a distância euclidiana não captura completamente a influência tática em cenários de ataque e defesa de alvo terrestre com combate aéreo, nos quais velocidade, manobrabilidade, peso e custo de controle afetam a capacidade de uma aeronave influenciar uma região. Este trabalho avalia se métricas de dominância espacial derivadas de partições de Voronoi induzidas por custo, baseadas em Regulador Quadrático Linear (LQR-CIV), agregam informação sobre a ocorrência de dano ao alvo além daquela fornecida por descritores táticos e pelo Voronoi euclidiano. A avaliação é realizada em 1.920 execuções simuladas no Ambiente de Simulação Aeroespacial (ASA), distribuídas em 64 configurações táticas, com agregação por execução e inferência no nível da configuração de cenário. Os resultados indicam ganhos consistentes em perda logarítmica e escore de Brier fora da amostra.

I. INTRODUÇÃO

Em simulações de Defesa, métricas de análise operacional devem permitir não apenas comparar resultados finais, mas também compreender como a situação tática evolui ao longo do engajamento. Em cenários de ataque e defesa de alvo terrestre, essa análise envolve interações entre aeronaves atacantes, aeronaves defensoras, armamentos ar-ar e a capacidade de cada lado influenciar a região de interesse ao redor do alvo.

Uma forma natural de analisar esse tipo de interação é perguntar quais regiões do espaço estão sob maior influência de cada agente ou time. Esse raciocínio aparece em diferentes domínios: em robótica, para distribuir tarefas ou cobertura entre agentes [1]; em esportes coletivos, para estimar quais jogadores dominam determinadas regiões do campo [2]; e em cenários de Defesa, para avaliar quais times têm maior capacidade de proteger, negar ou ameaçar áreas relevantes [3]. Em todos esses casos, o particionamento espacial fornece uma representação intuitiva de influência, pois transforma a configuração dos agentes em regiões atribuídas a cada lado.

Este pôster visa apresentar os resultados de um trabalho focando em dominância espacial com uso do ASA – Ambiente de Simulação Aeroespacial [4], *framework* desenvolvido principalmente em C++ pelo Instituto de Estudos Avançados – IEAv que possibilita a modelagem e simulação de cenários militares operacionais para avaliação de táticas e doutrinas para a Força Aérea Brasileira. A Figura 1 mostra o exemplo do cenário ASA utilizado nesse cenário e a interface Web da ferramenta.

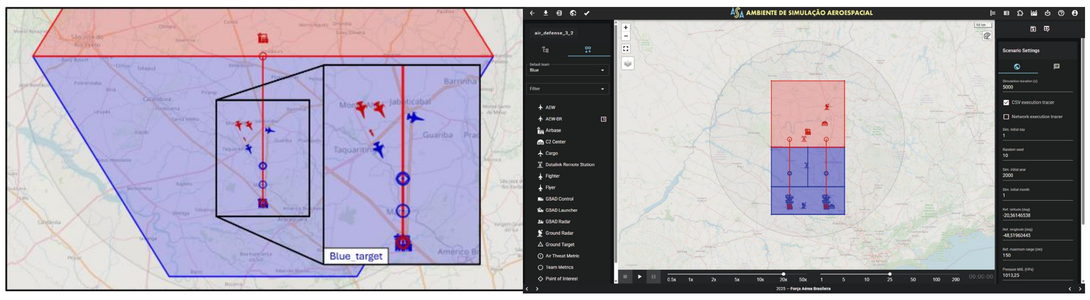


Fig. 1 Cenário utilizado no Ambiente de Simulação Aeroespacial (ASA) e respectiva interface Web

II. DIAGRAMA DE VORONOI

Diagrama de Voronoi clássico [5] é uma partição de um plano (ou espaço) em células com base na distância a pontos específicos, conhecidos como sítios ou geradores e as linhas que formam os limites entre os polígonos são equidistantes dos dois geradores vizinhos mais próximos.

Neste trabalho, além das características geométricas, foram exploradas as características dinâmicas de uma partição de Voronoi representada pelas características das aeronaves em um combate BVR (*Beyond Visual Range*), tais como velocidade e posição. A Figura 2 mostra exemplos de partições de Voronoi na análise da dominância em um jogo de futebol.

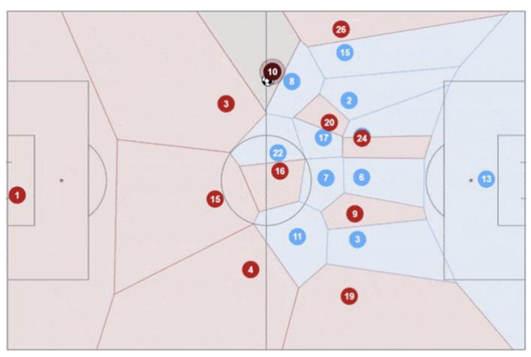


Fig. 2 Representação de partições de Voronoi em cenário de partida de futebol para análise de dominância

III. ALGORITMO *LINEAR QUADRATIC REGULATOR* (LQR)

A situação onde a dinâmica do sistema é descrita por um conjunto de equações diferenciais lineares e o custo é descrito por uma função quadrática, é denominada problema QL. A escolha do LQR [6] é conveniente neste contexto porque, para um modelo linear com custo quadrático, a solução da equação de Riccati define uma forma quadrática compacta para avaliar o custo associado a cada estado. Isso permite calcular o custo de influência de cada aeronave sobre muitos pontos da grade de forma eficiente, preservando uma interpretação física associada a posição, velocidade e custo de controle.

IV. DESENHO DE EXPERIMENTOS

A campanha de simulação compreende 1.920 execuções, distribuídas em 64 configurações de cenário. Cada configuração é definida por uma combinação fixa dos fatores táticos apresentados na Tabela 1.

Para cada configuração, foram realizadas 30 repetições com diferentes sementes aleatórias, que afetam decisões internas do comportamento das aeronaves, como instante de lançamento de mísseis, direção de manobras defensivas e elementos estocásticos associados ao resultado do engajamento.

Fator	Níveis considerados
Eixo de ataque ao solo	$\{-165°, -120°, 120°, 165°\}$
Filosofia de tiro azul	{short, long}
Filosofia de tiro vermelha	{short, long}
Quantidade de mísseis azuis	$\{4, 6\}$
Número de aeronaves vermelhas	$\{2, 4\}$

Tabela 1 – Parâmetros que variaram durante as simulações

V. RESULTADOS

O conjunto final contém 3.036.887 observações temporais, correspondentes aos quadros registrados ao longo de 1.920 execuções em 64 configurações táticas. Essas observações foram agregadas em métricas pré-impacto por execução antes da análise estatística. O alvo terrestre defendido pelo lado azul sofreu dano não nulo em 1.113 execuções, resultando em taxa positiva de 57,97%.

A Tabela 2 apresenta o desempenho preditivo do modelo de referência, baseado em variáveis de cenário e VD, e dos modelos que adicionam o resíduo CIV. Todas as variantes CIV reduziram a perda logarítmica (LL) e o escore de Brier em relação à baseline cenário + VD. As maiores reduções proporcionais foram observadas nas variantes isotrópica e linear compartilhada, com redução de aproximadamente 21% em LL e 22% em Brier, enquanto a variante anisotrópica apresentou ganho menor, mas ainda positivo.

Modelo	LL	Red. LL	Brier	Red. Brier
Cenário + VD	0,207	–	0,059	–
+ CIV isotrópica	0,164	20,8%	0,046	21,7%
+ CIV linear compartilhada	0,165	20,6%	0,046	22,1%
+ CIV anisotrópica	0,180	13,1%	0,050	15,3%

Tabela 2 – Desempenho pré-impacto e redução proporcional em relação à Baseline cenário + VD

VI. CONCLUSÃO

Os resultados indicaram que as métricas LQR-CIV acrescentam informação além da geometria euclidiana. As variantes isotrópica e linear compartilhada apresentaram os maiores ganhos em perda logarítmica e escore de Brier, enquanto a variante anisotrópica também produziu ganhos positivos, embora menores. Controles negativos, controles de estado inicial e validação LOFO reforçaram que esse ganho não decorre apenas da repetição de cenários, de desequilíbrios físicos iniciais ou da inclusão arbitrária de variáveis adicionais.

No entanto, os resultados devem ser entendidos dentro da família de cenários avaliada. O estudo não estabelece a CIV como apoio à decisão em tempo real, nem analisa a severidade contínua do dano. Trabalhos futuros devem investigar outros cenários, como a inserção de limitação de combustível para aeronaves, modelos de residualização não linear, previsão em horizonte fixo e o uso de métricas CIV como sinais de orientação para agentes autônomos.

REFERÊNCIAS

1. H. Cheng, B. Tian, X. Zhang, H. Shen, “A distributed algorithm for multi-robot task allocation via weighted buffered voronoi partition” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 71, no. 12, pp. 16 098–16 107, 2024.
2. S. Fonseca, J. Milho, B. Travassos, D. Araújo, “Spatial dynamics of team sports exposed by voronoi diagrams,” Human movement science, vol. 31, no. 6, pp. 1652–1659, 2012.
3. G. Kumar A. Ratnoo, “Cooperative target capture using voronoi region shaping,” Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 48, no. 6, pp. 1428–1438, 2025.
4. J. P. Dantas, A. N. Costa, V. C. Gomes, A. R. Kuroswiski, F. L. Medeiros, D. Geraldo, A. R. Samersla, S. R. Silva, A. F. Caetano, Y. D. Ferreira et al., “Asa: A simulation environment for evaluating military operational scenarios,” in International Conference on Computational Science and Computational Intelligence. Springer, 2024, pp. 203–215.
5. A. Okabe K. Sugihara, Spatial analysis along networks: statistical and computational methods. John Wiley & Sons, 2012.
6. B. D. Anderson J. B. Moore, Optimal control: linear quadratic methods. Courier Corporation, 2007.