

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE COMBATE AÉREO ALÉM DO ALCANCE VISUAL: UMA FERRAMENTA DE MELHORIA OPERACIONAL PARA A FORÇA AÉREA

Hélcio Vieira Junior, Karl Heinz Kienitz, Mischel Carmen Neyra Belderrain

Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Praça Marechal Eduardo Gomes 50, Vila das Acácias
12228-900 - São José dos Campos - SP
e-mail: junior_hv@yahoo.com.br / kienitz@ita.br / carmen@ita.br

RESUMO

Este artigo propõe o uso de simulação computacional como solução para a determinação de melhores táticas para combates aéreos além do alcance visual que maximizem a probabilidade de derrubar as aeronaves inimigas. Utilizando-se parâmetros genéricos para modelar tanto as aeronaves quanto os mísseis em baixa resolução, foi possível demonstrar que é factível a geração de táticas aéreas para o combate aéreo além do alcance visual com a utilização de ferramentas da otimização da simulação. Com o uso da tática otimizada, foi possível aumentar a taxa de sucesso média no abate das aeronaves inimigas de 16,69% para 76,85%.

Palavras-Chaves: Simulação, Militar, Combate Além do Alcance Visual.

ABSTRACT

This paper proposes the computational simulation as a solution for the generation of better beyond visual range air-to-air tactics that maximize the probability of downing enemy aircrafts. By using generic parameters for modeling the aircrafts and missiles in a low resolution simulator, it was possible to generate aerial tactics for the beyond visual range combat by using simulation optimization techniques. By using the optimal tactic, it was possible to increase the average success rate of downing enemy aircrafts from 16.69% to 76.85%.

Keywords: Simulation, Military, BVR Combat.

1. INTRODUÇÃO

Forças Aéreas de vários países tem modernizado seus inventários de armamentos, incluindo novos mísseis ar-ar com alcance além do visual (*Beyond Visual Range - BVR*). Inexperiência no uso de tais mísseis, associada com o alto custo de testes reais, faz com que estas Forças Aéreas provavelmente não os usem de maneira ótima. Melhores táticas poderiam melhorar a efetividade destes mísseis, contribuindo para maximizar a probabilidade de derrubar as aeronaves inimigas.

Estes mísseis fazem uso de radares (tanto do radar de bordo da aeronave lançadora do míssil quanto do radar interno do míssil) para guia-los na parte final do engajamento. A parte inicial do engajamento é feita por navegação baseada em dados inerciais e/ou do GPS (*Global Positioning System – Sistema de posicionamento global*), a qual pode receber ou não atualizações por conexão de dados (*data-link*), conforme pode ser observado na Figura 1. Na parte superior da Figura 1, há um míssil **sem data-link**: ele vai para a posição prevista do alvo. Na parte inferior da Figura 1, há um míssil **com data-link**: ele vai para a posição atualizada do alvo. As linhas tracejadas representam as trajetórias das aeronaves e dos mísseis; os triângulos representam os alcances dos radares da aeronave lançadora e do míssil; e t_i representa o tempo no instante i .

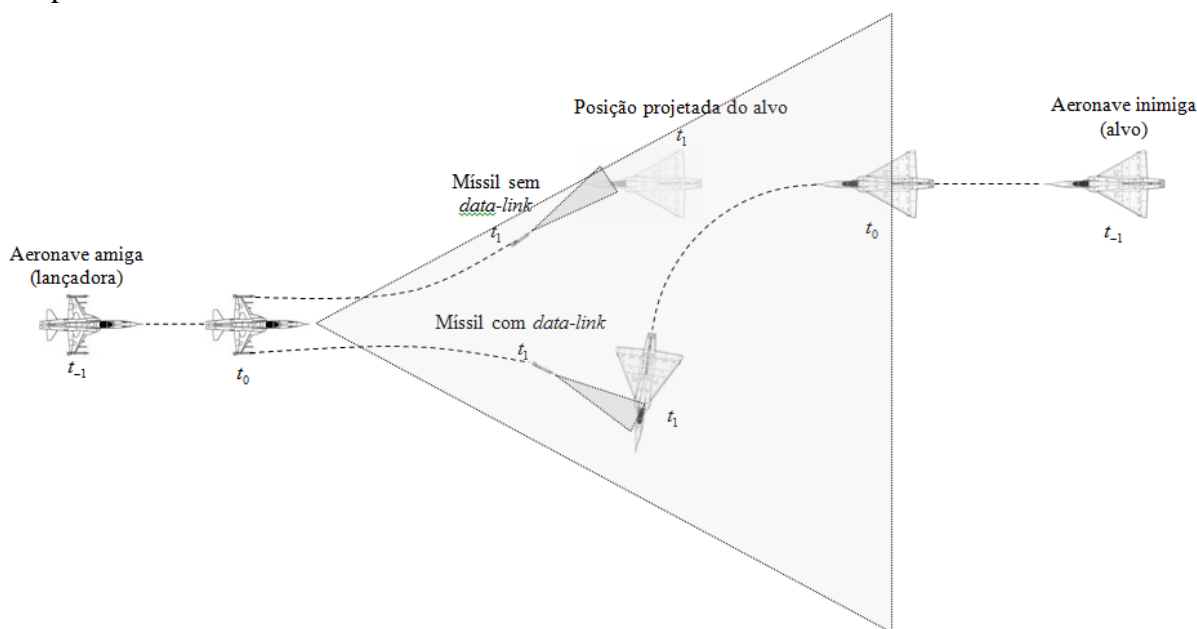


Figura 1. Engajamento BVR com e sem *data-link*.

É notório que um míssil sem *data-link* tem menor probabilidade de sucesso que um que tenha tal dispositivo. Isto é devido ao fato de que o radar da aeronave tem um alcance muito maior do que o do míssil.

Entretanto, mesmo mísseis sem *data-link* têm grande probabilidade de sucesso. A razão é a sua habilidade de procurar pelo alvo dentro do envelope do seu próprio radar. Desta forma, quanto mais rápido um míssil chegar à posição prevista do alvo, maior será sua probabilidade de achar a aeronave inimiga. Isto é verdade porque mesmo mudanças bruscas de direção por parte da aeronave alvo produzirão pequenos movimentos em relação a sua posição prevista devido ao grande diferencial de velocidade entre o míssil e o alvo – o míssil é até quatro vezes mais rápido do que a aeronave alvo.

Uma maneira de se aumentar a probabilidade de sucesso é retardar o lançamento do míssil. Agindo assim, o míssil voará uma distância menor e, conseqüentemente, dará menos

tempo para a aeronave alvo sair da posição prevista. A grande desvantagem desta tática é que a aeronave lançadora se expõe aos mísseis inimigos ao fazê-lo. Isto demonstra que a tática utilizada tem grande influência no sucesso de um engajamento BVR.

Dentre as ferramentas da Pesquisa Operacional (PO), existem duas que se destacam das demais devido ao seu poder, grande cobertura e utilização: a **Simulação** e a **Otimização**. De acordo com Fu, Chen e Shi (2008), otimização e simulação são as ferramentas da PO mais utilizadas para solução de problemas no mundo real.

Simulação é o conjunto de “técnicas para utilização de computadores para imitar, ou *simular*, as operações de vários tipos de instalações ou processos” (LAW; KELTON, 2000). Estas técnicas permitem o teste de novas ideias e propostas para melhorar o processo estudado. Elas podem ser determinísticas (e.g., simulação do comportamento aerodinâmico de uma nova asa de avião por métodos numéricos) ou estocásticas (e.g., simulação do comportamento de uma carteira de títulos da bolsa de valores dada a distribuição de probabilidades de cada título). Este trabalho foca **somente** nas simulações estocásticas, que são definidas neste artigo como qualquer simulação na qual a saída seja estocástica.

O objetivo deste artigo é propor o uso de simulação computacional como solução para a determinação de melhores táticas para combates aéreos além do alcance visual que maximizem a probabilidade de derrubar as aeronaves inimigas.

O restante deste artigo está organizado como se segue. Na segunda Seção uma revisão da literatura sobre engajamentos ar-ar será feita. A Seção três descreverá a simulação BVR implementada e a Seção quatro resumirá nossas conclusões.

2. ENGAJAMENTO AR-AR: REVISÃO DA LITERATURA

Diversas abordagens para o engajamento ar-ar foram propostas na literatura. A maioria dos artigos usa a teoria dos jogos para modelar o combate aéreo (e.g., Karelahti, Virtanen e Raivio (2006), Virtanen, Karelahti, e Raivio (2006), Mukai et al. (2003) e Davidovitz e Shinar (1989)).

Outras abordagens encontradas na literatura são as seguintes: (1) O método chamado *shooting* foi usado em cada ponto de decisão para a construção de trajetórias quase-ótimas para a evasão de mísseis inimigos (KARELAHTI; VIRTANEN; RAIVIO, 2007); (2) Redes Bayesianas Dinâmicas foram utilizadas por Poropudas e Virtanen (2007) para estudar diferentes fases do combate; (3) Akabari, Menhaj e Nikraves (2005) e Tran, Abraham e Jain (2002) propuseram a utilização de Lógica Nebulosa para modelar manobras táticas; (4) Inteligência Artificial foi usada para gerar táticas ótimas para combates aéreos BVR (DEMKIN; TISHCHENKO; FEDUNOV, 2008); (5) Heinze, Smith e Cross (1998) usam uma abordagem baseada em agentes para resolver este problema; e (6) Lin et al. (2007) propõem o uso de diagramas de influência multi-estágio para resolver o problema do combate aéreo.

Como pode ser visto, no melhor do nosso conhecimento, o uso de simulação como ferramenta básica para a otimização do problema de definir táticas (quase-)ótimas ainda não foi proposto na literatura.

3. MODELO COMPUTACIONAL DO COMBATE AÉREO ALÉM DO ALCANCE VISUAL

3.1. MODELO DINÂMICO

A simulação leva em consideração as trajetórias dinâmicas (1) das aeronaves amigas, (2) da aeronave inimiga, e (3) dos mísseis amigos e inimigos. Deste ponto adiante, as aeronaves amigas serão referenciadas como azuis e a inimiga como vermelha.

A simulação foi implementada em Java 2TM através do pacote *Simkit* (BUSS, 2010). *Simkit* foi desenvolvido para criar modelos de Simulações de Eventos Discretos, e permite a

modelagem de movimentos simples e detecções (que são usualmente modelados na literatura com o mecanismo de avanço de tempo com incremento fixo – simulação contínua) usando o paradigma de eventos discretos (BUSS; SANCHEZ, 2005). Os deslocamentos, tanto das aeronaves quanto dos mísseis, foram modelados utilizando-se movimento retilíneo uniforme. Desta forma, pode-se classificar a simulação implementada como sendo de baixa resolução.

A simulação foi construída para representar um engajamento 2×1 , i.e., duas aeronaves azuis contra uma vermelha. O cenário desenvolvido coloca o inimigo em vantagem tecnológica e as aeronaves azuis em vantagem numérica. A Tabela 1 mostra estas diferenças tecnológicas.

Tabela 1. Diferenças tecnológicas entre as aeronaves azuis e vermelhas.

<i>Característica</i>	<i>Vermelha</i>	<i>Azuis</i>
Altitude (milhares de pés)	40	10, 20 ou 30
Número de mísseis	4	2
<i>G</i> máximo	7	2
Velocidade (<i>Mach</i>)	1.2	0.9
Alcance radar (NM)	35	30

Devido à maior altitude e velocidade da aeronave vermelha, ela pode disparar seus mísseis a distâncias maiores que as aeronaves azuis podem. O motivo deste fato é a maior velocidade inicial do míssil e o fato de que em maiores altitudes a densidade do ar é menor (esta menor densidade diminui o arrasto do míssil). A aeronave vermelha pode curvar mais rápido (devido seu maior *G* máximo) e também se evadir com sucesso a menores distâncias (devido a sua maior velocidade e menor raio de curva – quanto maior o *G* máximo, menor o raio de curva) que as aeronaves azuis. As aeronaves azuis têm que escolher entre ter uma menor velocidade verdadeira, maior raio de curva e maior alcance do míssil a maiores altitudes ou ter uma maior velocidade verdadeira, menor raio de curva e menor alcance do míssil a baixas altitudes. Como é desejável ter menores valores de raio de curva e maiores valores de velocidade verdadeira e alcance do míssil, existe uma troca a ser feita pelas aeronaves azuis.

3.2. VARIÁVEIS DA SIMULAÇÃO

As variáveis da simulação BVR são divididas em controladas (também conhecidas como independentes ou de decisão) e incontroladas (também conhecidas como ruído ou aleatórias). Todas as variáveis controladas estão relacionadas com as aeronaves azuis e todas as incontroladas com a vermelha. Foram utilizados parâmetros genéricos para modelar as aeronaves e mísseis, i.e., eles **NÃO** representam nenhuma aeronave ou míssil real.

3.2.1. Variáveis Controladas (Variáveis de Decisão)

3.2.1.1. Contínuas

1. Centro da formação em relação ao inimigo: $\theta_1 \in (-100; 100)$.
2. Metade da distância lateral entre as aeronaves azuis: $\theta_2 \in (0; 200)$.
3. Distância longitudinal entre as aeronaves azuis: $\theta_3 \in (0; 200)$.

As variáveis θ_1 , θ_2 e θ_3 são exemplificadas na Figura 2, onde o triângulo vermelho representa a aeronave inimiga, os triângulos azuis representam as aeronaves amigas e a seta vermelha representa a proa do inimigo.

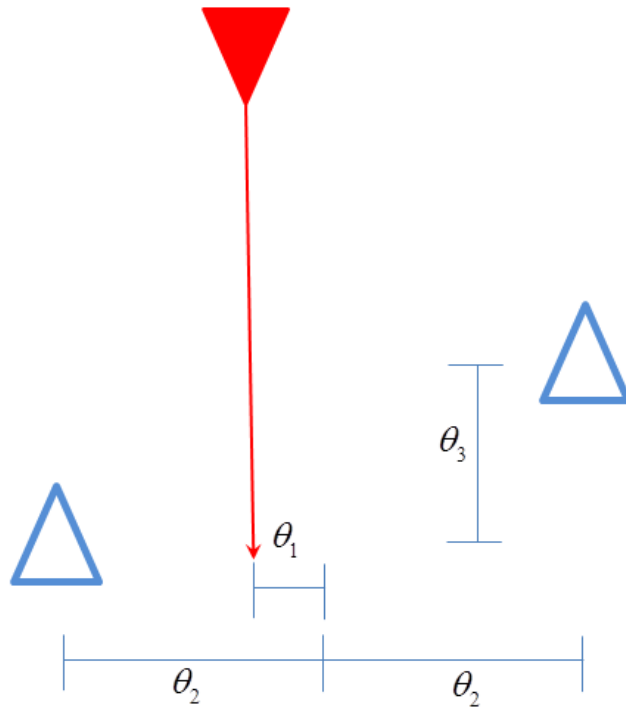


Figura 2. Ilustração das variáveis θ_1 , θ_2 e θ_3 .

4. Distância de *crank*: $\theta_4 \in (100;300)$.

A distância de *crank* é a distância entre a aeronave azul e a vermelha na qual a aeronave azul inicia uma curva para colocar o inimigo na sua posição relativa de 60° . A Figura 3 mostra um exemplo das posições das aeronaves imediatamente após a manobra de *crank*, onde o triângulo vermelho representa o inimigo, o triângulo azul representa a aeronave azul, a seta vermelha representa a proa do inimigo e a seta azul representa a proa da aeronave azul.

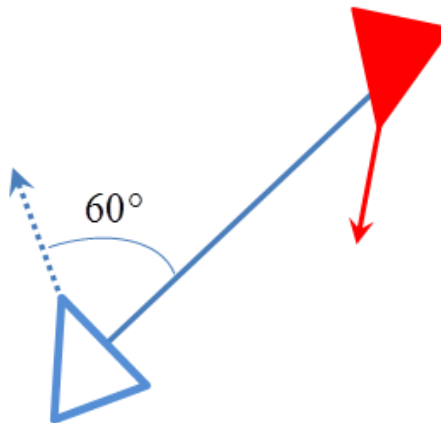


Figura 3. Ilustração da posição das aeronaves imediatamente após a manobra de *crank*.

5. Distância de tiro: $\theta_5 \in (0;100)$.

A distância de tiro é a distância entre a aeronave azul e a vermelha na qual a aeronave azul dispara seu míssil.

6. Distância de evasão: $\theta_6 \in (50;300)$.

A distância de evasão é a distância entre as duas aeronaves quando a aeronave azul inicia sua evasão.

7. Distância de *notch*: $\theta_7 \in (0;100)$.

A distância de *notch* é a distância entre as duas aeronaves quando a aeronave azul inicia uma curva para colocar o inimigo na sua posição relativa de 90° .

8. Peso do inimigo na rota evasiva: $\theta_8 \in (0,5;1,0)$.

A proa H_e da aeronave azul durante sua evasão é determinada por:

$$H_e = \theta_8(180 + R_e) + (1 - \theta_8)(180 + R_w)$$

Onde R_w é a proa para a outra aeronave azul (ala) e R_e é a proa para o inimigo. A Figura 4 mostra um exemplo no qual os triângulos azuis representam as aeronaves amigas, o triângulo vermelho representa a aeronave inimiga, a seta azul representa a proa evasiva, $R_w = 45^\circ$, $R_e = 0^\circ$, $\theta_8 = 0,5$ e $H_e = 202,5^\circ$.

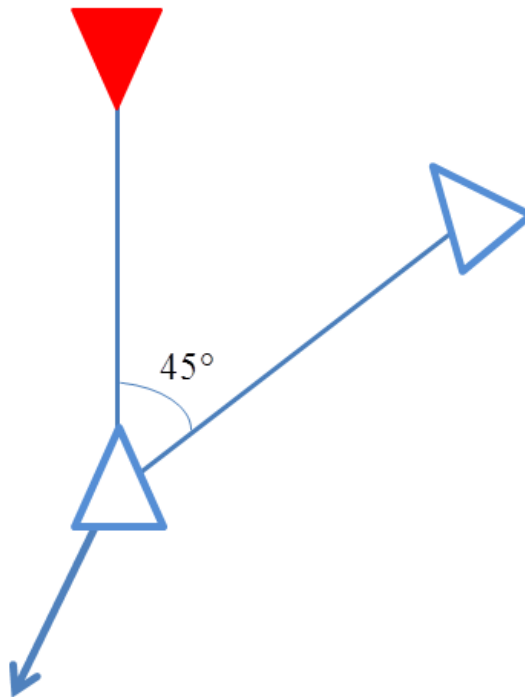


Figura 4. Ilustração do peso do inimigo na rota evasiva.

3.2.1.2. Discretas

9. Altitude: $\theta_9 \in \{10; 20; 30\}$.

A altitude foi modelada como discreta porque o máximo alcance do míssil é catalogado apenas para as altitudes de 10, 20, 30 e 40 (mil pés). Como foi decidido dar vantagem tecnológica para a aeronave vermelha, a altitude de 40 foi reservada para esta aeronave. As demais altitudes foram destinadas para as aeronaves azuis.

3.2.1.3. Categóricas

10. Lado do *crank*: $\theta_{10} \in \{\text{para cima; para fora}\}$.

Na distância de *crank*, a aeronave azul pode curvar tanto para cima quanto para fora da sua referência.

11. Referência do *crank*: $\theta_{11} \in \{\text{ala; inimigo}\}$.

Na distância de *crank*, a aeronave azul pode usar como referência tanto o ala

(segunda aeronave da formação amiga) quanto o inimigo.

3.2.2. Variáveis Incontroláveis (Variáveis Aleatórias)

3.2.2.1. Contínuas

1. Distância de tiro: $\omega_1 \sim U(D_{\max} \times 0,8; D_{\max} \times 1,1)$.

Onde D_{\max} é o máximo alcance do míssil vermelho, \sim denota “é distribuído”, e $U(a,b)$ denota “uniformemente entre a e b”.

2. Distância de evasão: $\omega_2 \sim U(D_{\max}^{azul} \times 0,8; D_{\max}^{azul} \times 1,2)$.

Onde D_{\max}^{azul} é o máximo alcance do míssil azul.

3. Distância de *crank*: $\omega_3 \sim U(\omega_2 + 30; \omega_2 + 130)$.

3.2.2.2. Categóricas

4. Lado do *crank*:

$$\Pr\{\omega_4 = \text{para cima}\} = 0,5$$

$$\Pr\{\omega_4 = \text{para fora}\} = 0,5$$

As definições de ω_1 a ω_4 são as mesmas de suas equivalentes para as aeronaves azuis ($\theta_5, \theta_6, \theta_4$ e θ_{10} , respectivamente).

5. Alvo inicial:

$$\Pr\{\omega_5 = \text{azul}_1\} = 0,5$$

$$\Pr\{\omega_5 = \text{azul}_2\} = 0,5$$

O alvo escolhido pela aeronave vermelha no início do engajamento pode ser tanto a aeronave azul₁ quanto a azul₂.

6. Referência do *crank*:

$$\Pr\{\omega_6 = \text{alvo inicial}\} = 0,5$$

$$\Pr\{\omega_6 = \text{outro alvo}\} = 0,5$$

A aeronave que será utilizada como referência pela aeronave vermelha para realizar a manobra de *crank* pode ser tanto seu alvo inicial quanto a outra aeronave azul.

7. Mudança de alvo:

$$\Pr\{\omega_7 = \text{sim}\} = 0,25$$

$$\Pr\{\omega_7 = \text{não}\} = 0,75$$

Se $\omega_7 = \text{sim}$, então a aeronave vermelha irá mudar seu alvo após ω_8 unidades de tempo no caso de ainda haver outro alvo. No caso da aeronave vermelha já ter destruído uma ou duas aeronaves azuis no instante de tempo ω_8 , a variável ω_7 não ocasionará nenhum efeito na simulação. Caso a aeronave vermelha decida mudar de alvo, isto ocorrerá em $\omega_8 \sim U(20;100)$.

Observação: Como, no mundo real, não se tem controle sobre o que o inimigo irá fazer após o combate iniciar, decidiu-se modelar o seu comportamento usando distribuições Uniformes (contínuas e discretas) e arbitrárias, com valores usados na prática em combates aéreos do mundo real ou escolhidos de acordo com a experiência do autor. Porém, como dito anteriormente, estes valores não representam nenhuma aeronave ou míssil real.

3.2.3. Regras de Engajamento

Simularam-se engajamentos de uma fase inicial da guerra, onde as aeronaves azuis estão impedidas de adentrar o território inimigo, assim como de abater a aeronave vermelha fora dos limites do país azul. Estes fatos proporcionam um “santuário” à aeronave vermelha, a qual pode fugir em segurança para seu território sempre que desejar. A missão das aeronaves azuis é impedir, por meio do tiro de destruição, que a aeronave vermelha invada seu território. A missão da aeronave vermelha é destruir as aeronaves azuis.

3.3. NATUREZA ESTOCÁSTICA DA SIMULAÇÃO

A simulação BVR em consideração foi desenvolvida para ter como entrada as onze variáveis controladas, i.e., o vetor de entrada $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{11})$. Cada vez que a simulação é rodada, as sete (oito se $\omega_7 = sim$) variáveis aleatórias (incontroláveis) são amostradas de suas distribuições e uma resposta será gerada. Como o comportamento da aeronave vermelha depende do vetor de ruído ω amostrado, ainda que com um mesmo vetor θ , cada vez que a simulação roda o resultado pode ser diferente.

3.4. TELAS DA SIMULAÇÃO

As Figuras 5 a 8 mostram algumas telas da simulação implementada, onde o quadrado vermelho representa a aeronave inimiga; o quadrado cinza claro representa a aeronave azul₂; o quadrado cinza escuro representa a aeronave azul₁; o círculo vermelho representa o alcance máximo do radar da aeronave vermelha; os círculos azuis representam o alcance máximo do radar das aeronaves azuis; o quadrado preto representa um míssil, o círculo preto representa o alcance máximo do radar do míssil e a linha horizontal (a qual intercepta o quadrado vermelho na Figura 5) é a fronteira entre os países vermelho (acima da linha) e azul (abaixo da linha).

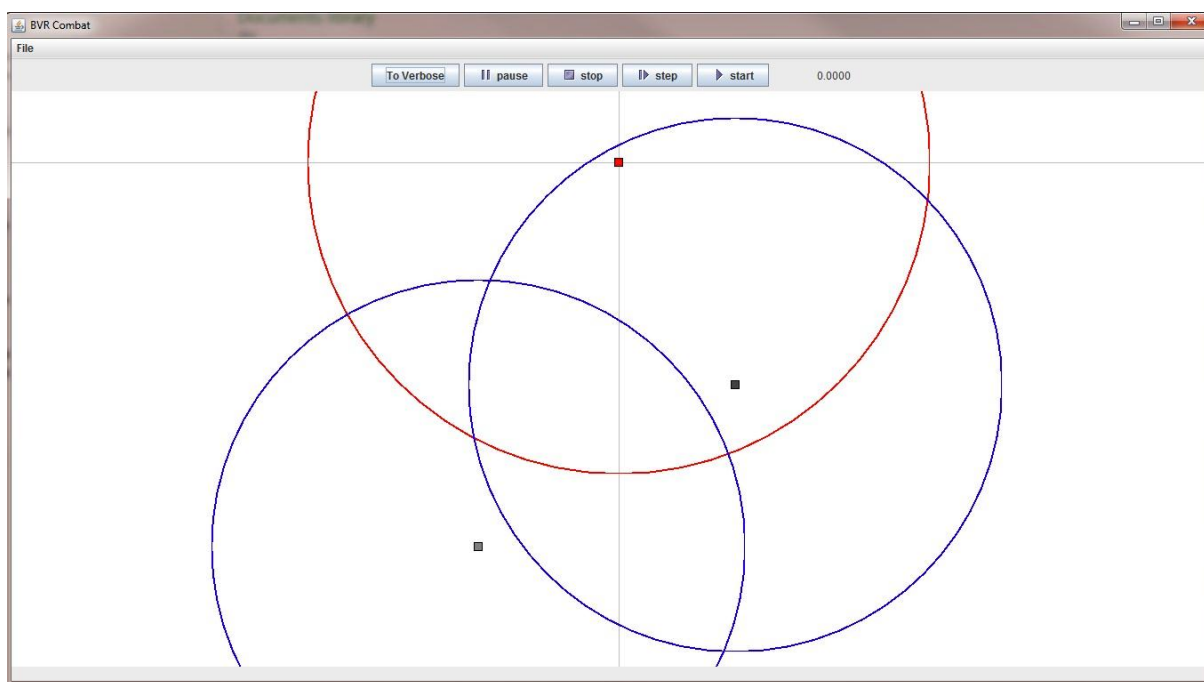


Figura 5. Tela da simulação implementada: posicionamento inicial das aeronaves.

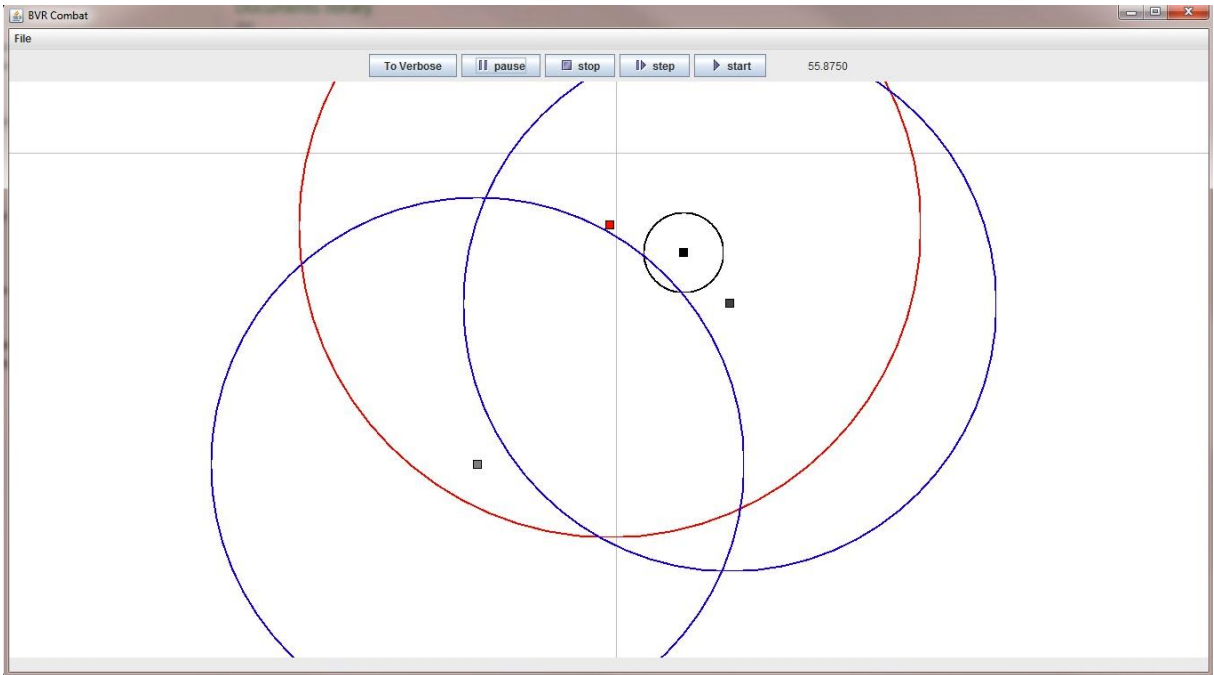


Figura 6. Tela da simulação implementada: aeronave vermelha dispara um míssil na aeronave azul₁.

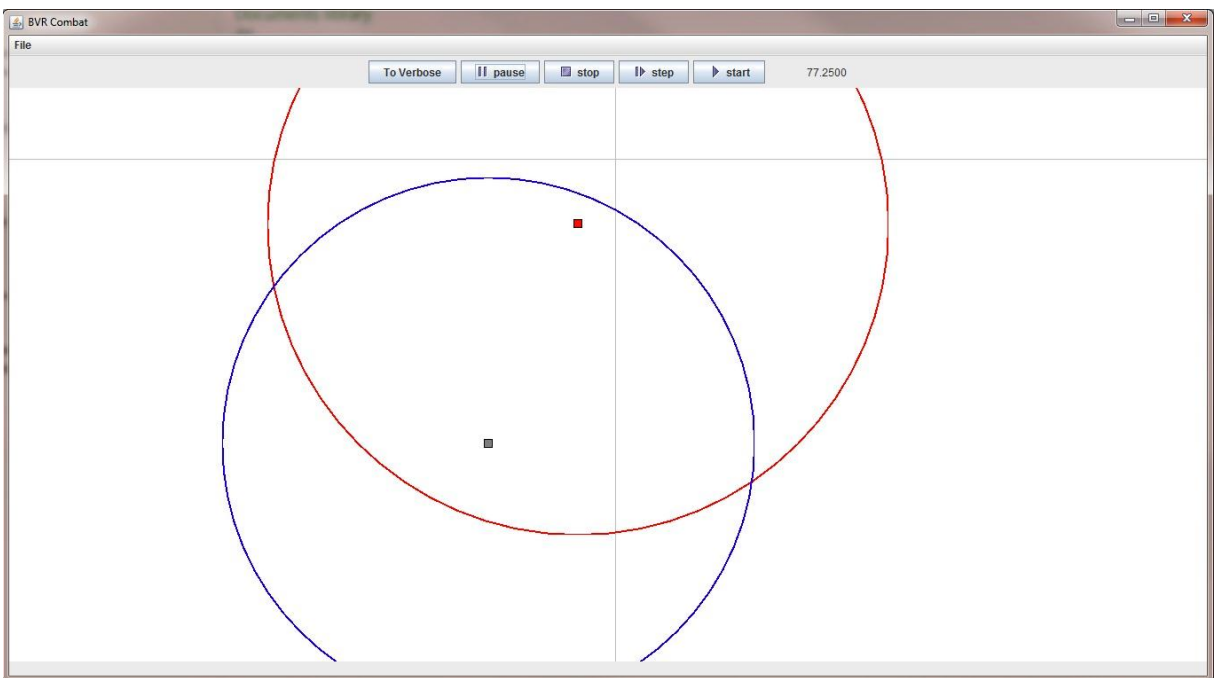


Figura 7. Tela da simulação implementada: a aeronave azul₁ é destruída e a aeronave vermelha aproa a aeronave azul₂.

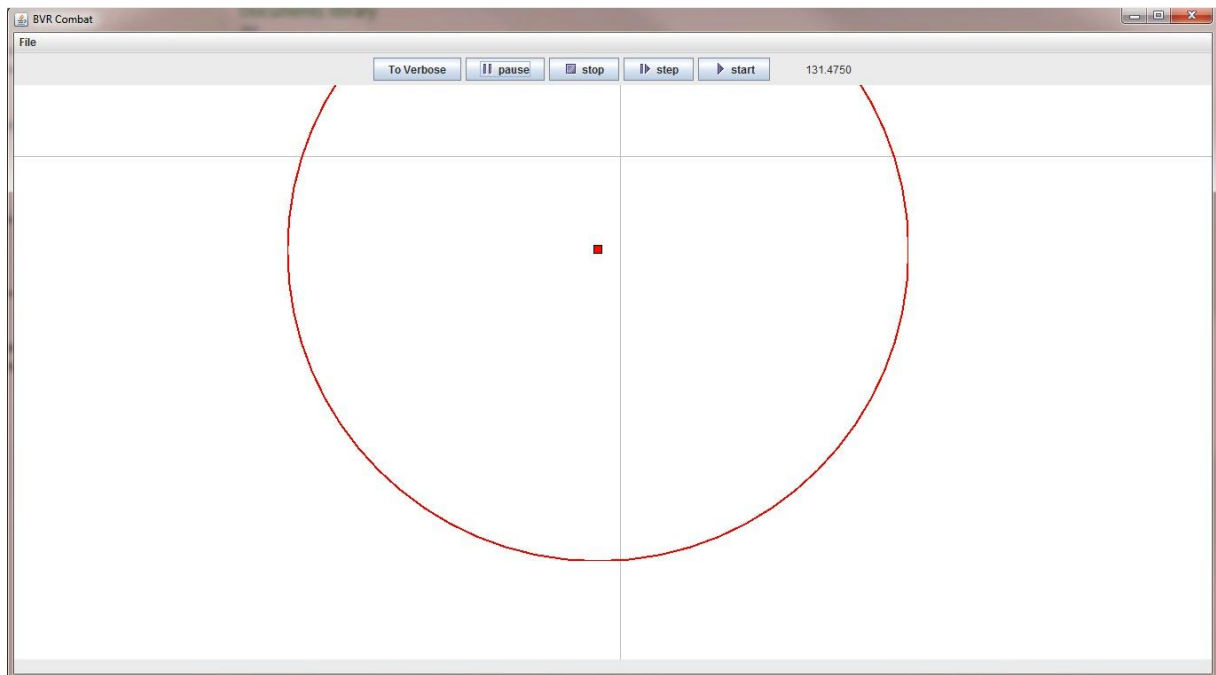


Figura 8. Tela da simulação implementada: a aeronave azul₂ é destruída e a aeronave vermelha ganha o combate.

3.5. NECESSIDADE DA OTIMIZAÇÃO

Com o objetivo de enfatizar a necessidade de um processo de otimização, foram realizadas 100 réplicas aleatórias da simulação BVR, i.e., realizaram-se simulações com 100 diferentes vetores de entrada aleatórios θ^i , $i=1, 2, \dots, 100$. O leitor deve atentar que cada réplica consiste em 100 rodadas com o mesmo vetor θ^i , porém com realizações aleatórias do vetor de ruído ω . No total, 10.000 rodadas do simulador foram feitas.

O valor esperado da probabilidade de destruição da aeronave vermelha, medido pela proporção de resultados positivos observados nas 10.000 simulações, foi de 16,69%.

Isto nos mostra que uma tática aleatória não é um bom plano, resultando em baixos valores da medida de performance.

3.6. OTIMIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO

Utilizando-se uma adaptação do algoritmo de otimização da simulação chamado COMPASS, conjuntamente à implementação da simulação BVR comentada acima, foi possível encontrar uma tática com taxa de sucesso média de 76,85%. Para maiores detalhes do método de otimização utilizado, os leitores são referenciados a Vieira Jr, Kienitz e Belderrain (2011).

4. CONCLUSÃO

Este artigo propôs o uso de simulação computacional como solução para a determinação de melhores táticas para combates aéreos além do alcance visual que maximizem a probabilidade de derrubar as aeronaves inimigas.

Na segunda Seção, uma revisão da literatura sobre engajamentos ar-ar foi feita e a

Seção três descreveu a simulação BVR implementada.

Utilizando-se parâmetros genéricos para modelar tanto as aeronaves quanto os mísseis em baixa resolução, foi possível demonstrar que é factível a geração de táticas aéreas para o combate aéreo além do alcance visual com a utilização de ferramentas da otimização da simulação. Com o uso da tática otimizada, foi possível aumentar a taxa de sucesso média no abate das aeronaves inimigas de 16,69% para 76,85%.

Trabalhos futuros devem focar em aumentar a resolução da simulação, assim como na utilização de parâmetros reais para as aeronaves e mísseis.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AKABARI, S.; MENHAJ, M. B.; NIKRAVESH, S. K. Fuzzy modeling of offensive maneuvers in an air-to-air combat. In: REUSCH, B. (Ed.). **Advances in soft computing: computational intelligence, theory and applications**. Heidelberg: Springer, 2005. p. 171-184.
- [2] BUSS, A. H.; SANCHEZ, P. J. Simple movement and detection in discrete event simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2005, Orlando. **Proceedings...** Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005. p. 992-1000.
- [3] BUSS, A. **Simkit**. Monterey: Naval Postgraduate School, 2010. Available in: <<http://diana.nps.edu/Simkit/>>. Acesso em: 09/09/2011.
- [4] DAVIDOVITZ, A.; SHINAR, J. Two-target game model of an air combat with fire-and-forget all-aspect missiles. **Journal of Optimization Theory and Applications**, v. 63, n. 2, p. 133-165, 1989.
- [5] DEMKIN, M. A.; TISHCHENKO, Y. E.; FEDUNOV, B. E. Basic onboard real-time advisory system for a duel situation of distant air fight. **Journal of Computer and Systems Sciences International**, v. 47, n. 4, p. 552-569, 2008.
- [6] FU, M. C.; CHEN, C.-H.; SHI, L. Some topics for simulation optimization. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2008, Miami. **Proceedings...** Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008. p. 27-38
- [7] HEINZE, C.; SMITH, B.; CROSS, M. Thinking quickly: agents for modeling air warfare. In: ANTONIOU, G.; SLANEY, J. (Ed.). **Advanced topics in artificial intelligence**. Berlin: Springer, 1998. p. 47-58.
- [8] KARELAHTI, J., K. VIRTANEN, T. RAIVIO. Game Optimal Support Time of a Medium Range Air-to-Air Missile. **Journal of Guidance, Control, and Dynamics**, v. 29, n. 5, p. 1061–1069, 2006.
- [9] KARELAHTI, J.; VIRTANEN, K.; RAIVIO, T. Near optimal missile avoidance trajectories via receding horizon control. **Journal of Guidance, Control, and Dynamics**, v. 30, n. 5, p. 1287-1298, 2007.
- [10] LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. 3rd ed. Fairfield: McGraw-Hill, 2000.
- [11] LIN, Z. et al. Sequential maneuvering decisions based on multi-stage influence diagram in air combat. **Journal of Systems Engineering and Electronics**, v. 18, n. 3, p. 551-555, 2007.

- [12] MUKAI, H. et al. Sequential linear-quadratic method for differential games with air combat applications. **Computational Optimization and Applications**, v. 25, p. 193-222, 2003.
- [13] POROPUDAS, J.; VIRTANEN, K. Analyzing air combat simulation results with dynamic Bayesian networks. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2007, Washington. **Proceedings...** Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007. p. 1370-1377.
- [14] TRAN, C.; ABRAHAM, A.; JAIN, L. Adaptation of a Mamdani fuzzy inference system using neuro-genetic approach for tactical air combat decision support system. In: MCKAY, R.; SLANEY, J. (Ed.). **AI 2002: advances in artificial intelligence**. Berlin: Springer, 2002. p. 672-680.
- [15] VIEIRA JUNIOR, H.; KIENITZ, K. H.; BELDERRAIN, M. C. N. Discrete-valued, stochastic-constrained simulation optimization with COMPASS. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2011, Phoenix. **Proceedings...** Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011. p. 4196-4205.
- [16] VIRTANEN, K.; KARELAHTI, J.; RAIVIO, T. Modeling air combat by a moving horizon influence diagram game. **Journal of Guidance, Control, and Dynamics**, v. 29, n. 5, p. 1080-1091, 2006.