

Modelagem comportamental para simulação construtiva de combate além do alcance visual

André Negrão Costa, Diego Geraldo

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

Resumo – Este trabalho propõe um modelo comportamental para a definição do momento de disparo de um míssil e da execução de manobras defensivas num cenário de combate aéreo além do alcance visual. Tal modalidade de combate tem como característica a necessidade de se tomar decisões baseando-se em informações oriundas de sensores, principalmente radares. Além disso, como as informações relativas aos sistemas da aeronave inimiga são, por vezes, desconhecidas, muitas das atitudes tomadas pelos pilotos se baseiam em crenças e estimativas com relação ao oponente. O modelo apresentado neste artigo se propõe a lidar com tais características, gerando comportamentos para entidades representadas num ambiente de simulação construtiva. Os resultados obtidos são exemplificados por meio de uma aplicação que mostra as principais fases do combate BVR, sendo desempenhadas por entidades que se comportam de acordo com o modelo proposto.

Palavras-Chave – Combate BVR, Modelagem, Simulação.

I. INTRODUÇÃO

O combate além do alcance visual, também conhecido como combate BVR (*Beyond Visual Range*), é caracterizado por sua dinamicidade devido às influências que as ações de uma aeronave têm nas outras [1]. Como as aeronaves oponentes estão a uma distância que não permite sua identificação visual, o combate muito se baseia em informações dos sensores disponíveis, tais como radares e sistemas de RWR (*radar warning receiver*).

As informações oriundas de tais sistemas por vezes são incompletas, já que interferências eletromagnéticas podem gerar inconsistências na identificação dos alvos, que, dependendo de sua assinatura radar, podem nem mesmo ser identificáveis.

Isso ocorre frequentemente com armamentos, o que faz com que, na maioria das vezes, os pilotos não possam precisar o momento de disparo de um míssil pela aeronave oponente, já que não o detectam. Dessa forma, as decisões, principalmente no que tange a manobras defensivas, são balizadas por crenças do piloto com relação ao seu oponente, relativas tanto à realização de um disparo, quanto às próprias características dos equipamentos e doutrinas utilizados.

Tais crenças guiam o comportamento do piloto, juntamente com as informações disponibilizadas por seus sensores e as características dos armamentos que sua aeronave possui. Porém, frequentemente se tem poucas informações com relação ao oponente e é em meio a incertezas e a longas distâncias que táticas precisas têm de ser executadas [2].

Devido ao alto custo operacional para se treinar o combate BVR por meio de simulações reais, diversos sistemas para simulação virtual e construtiva têm sido

utilizados nesse contexto para avaliação de aeronaves, mísseis e táticas, além de treinar pilotos, provendo aeronaves inimigas em campos de batalha simulados [3]. Tais aplicações requerem que os comportamentos das aeronaves simuladas sejam indistinguíveis dos seres humanos, podendo inclusive ser mais eficientes, já que podem processar dados em uma quantidade e velocidade superior. Isto é importante tanto para o realismo da simulação, quanto para a aplicabilidade dos resultados nela obtidos.

Assim, a modelagem do comportamento de uma aeronave no contexto de simulação BVR é um desafio, apresentando uma série de decisões sob incerteza, que delineiam as reações das entidades simuladas às ameaças identificadas e estimadas no teatro de operações [4].

Neste trabalho, é proposta a construção de um conjunto de modelos matemáticos que representam as crenças do piloto simulado com relação ao seu oponente. Além disso, por meio de um modelo da zona de engajamento efetivo do armamento – também conhecida como WEZ (*Weapon Engagement Zone*) – utilizado da mesma forma para as previsões das ações do oponente, é determinado o momento de disparo do míssil da aeronave modelada.

Toda a modelagem foi realizada na plataforma AEROGRAF [5], por meio de um *plugin*, sendo nela tanto simulada, quanto visualizada. Os parâmetros que definem os cenários para teste são disponibilizados para modificação pelo usuário, permitindo uma grande variabilidade nas simulações realizadas e diversas análises de interesse operacional.

Apesar de dados relativos ao combate BVR não serem disponibilizados de forma ostensiva, não podendo estes ser apresentados neste trabalho, os modelos propostos se baseiam em conhecimento operacional de pilotos desta modalidade de combate, que participaram ativamente do processo de concepção do *plugin*.

Vale também ressaltar que, apesar de formações com múltiplas aeronaves comporem os cenários mais comuns no contexto BVR [6], este trabalho considera, por simplicidade, apenas o combate entre duas aeronaves. Contudo, no futuro, vislumbra-se efetuar a extensão dos modelos apresentados para que possam atuar satisfatoriamente em cenários de maior complexidade.

O artigo se organiza da seguinte forma: na Seção II são fornecidas informações gerais sobre temas tratados no artigo. Na Seção III, a modelagem comportamental proposta é apresentada, tendo os seus parâmetros detalhados na Seção IV. Na Seção V são mostradas algumas fases do combate BVR simulado no *plugin* e, por fim, na Seção VI discorre-se sobre os trabalhos futuros e as conclusões do trabalho apresentado.

II. BACKGROUND

A. Combate BVR

De acordo com [7] o combate BVR pode ser dividido nas fases contidas na Fig. 1.

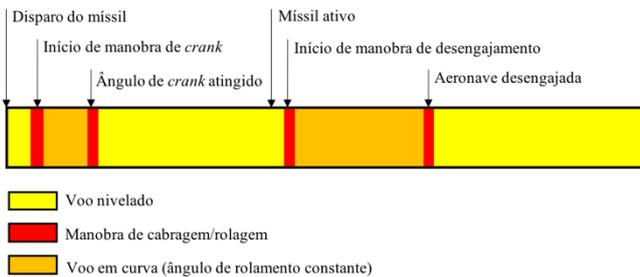


Fig. 1. Fases do combate BVR.

Nota-se que tais fases se iniciam no momento do disparo do armamento, o que claramente indica que esta é uma decisão vital para qualquer modelo que se proponha a representar o comportamento de uma aeronave nesta modalidade de combate.

Antes disso, entretanto, a aeronave deve aproar o alvo de maneira a colocá-lo em seu envelope de tiro. Ao fazê-lo, podem-se realizar algumas manobras defensivas, tais como *crank*, que é uma curva feita com o objetivo de se colocar a um *offset* angular com relação a outra aeronave. Geralmente, tais manobras são realizadas também logo após o disparo, conforme a Fig. 1, sendo o *offset* o ângulo máximo que mantém a aeronave inimiga dentro dos limites do *gimbal* radar.

É importante frisar que muitas das decisões de um piloto BVR se baseiam em informações de sensores, já que a distância impede qualquer identificação visual. Logo, o gerenciamento de tais sistemas é também de suma importância.

Entretanto, mesmo com o uso adequado dos sistemas disponíveis, informações relativas aos sistemas e armamentos do oponente não são necessariamente conhecidas. Sem tais informações, fica comprometido o processo de engajamento, posto que não é possível saber o quanto o oponente está ameaçando a aeronave modelada.

Adicionalmente, as decisões dos pilotos devem estar também pautadas nas diretrizes de combate recebidas por seus respectivos esquadrões. Uma importante diretriz é a filosofia de tiro (*shot philosophy*), que determina as distâncias mínimas em que o disparo deve ser efetuado. Tais distâncias são definidas com base na doutrina adotada, bem como nos recursos disponíveis, já que, caso não haja grande disponibilidade de armamentos, por exemplo, é necessário que estes só sejam utilizados quando se tem maior certeza de sua efetividade.

B. Simulação construtiva

Simulação construtiva é aquela em que todas as entidades são simuladas, tanto seres humanos, quanto os sistemas que

eles operam. Pessoas reais podem apenas dar entradas para a simulação, não determinando seus resultados de maneira direta [8].

As entidades neste tipo de simulação são completamente simuladas por modelos computacionais e podem ser designadas como *Computer Generated Forces* (CGF), em português forças geradas por computador. Tais simulações podem ser *non-real-time*, isto é, serem rodadas em velocidades superiores ao tempo real, já que não há entidades controladas por seres humanos [9].

C. Plataforma AEROGRAF

A plataforma AEROGRAF é um sistema de informação geográficas (SIG) desenvolvido no Instituto de Estudos Avançados da Força Aérea Brasileira (FAB). A arquitetura é modular, permitindo o desenvolvimento e a integração de *plugins*, o que pode trazer novas funcionalidades à plataforma. Neste trabalho, todo o desenvolvimento foi realizado desta forma, por meio de um novo *plugin* no AEROGRAF.

Na plataforma encontram-se modeladas diversas entidades, incluindo tanto plataformas, tais como mísseis e aeronaves, quanto sistemas, tais como radares e RWR. Os modelos se baseiam nas características e parâmetros fornecidos por fabricantes e especialistas nas diversas áreas afins.

D. Weapon Engagement Zone (WEZ)

Para auxiliar no processo de tomada de decisão, tanto de pilotos, quanto de analistas, define-se uma representação visual dos alcances máximos e mínimos de um míssil lançado por uma aeronave BVR, tal região é chamada de zona de engajamento do armamento (WEZ), também conhecida como *Launch Acceptability Region* (LAR), ou ainda *Dynamic Launch Zone* (DLZ) [10].

Existem diversos métodos de cálculo e representação da WEZ [11]. Neste trabalho será adotada uma modelagem implementada no Planejador de Missões Aéreas (PMA) utilizado pela FAB [12].

A montagem do envelope da aeronave inicia-se pela divisão da abertura angular máxima do radar utilizado em 11 radiais. Para cada uma das radiais, são calculadas as duas distâncias de interesse, a saber, *maximum range* (MR) e *no escape zone* (NEZ). O cálculo é realizado por meio da simulação de um disparo na condição em que se está analisando, sendo tais limites encontrados por meio de uma busca binária [13].

Com isso, o *plugin* monta a WEZ e a apresenta graficamente para o analista. Como raramente a aeronave estará alocada exatamente em uma das radiais calculadas, é efetuada uma interpolação dos valores das duas radiais mais próximas ao ponto em que a aeronave inimiga se encontra para saber se esta está ou não dentro do envelope.

Adicionalmente, o *plugin* disponibiliza a visualização de um indicador de WEZ, conforme Fig. 2, semelhante ao que se vê nos ecrãs de alerta (*heads-up displays*) das aeronaves de caça. Tais indicadores mostram o quanto uma aeronave

detectada se encontra dentro do envelope do armamento disponível. As graduações da escala foram criadas para facilitar a visualização dos limites entre três filosofias de tiro (*short, medium e long*), não estando presentes na maioria das aeronaves.

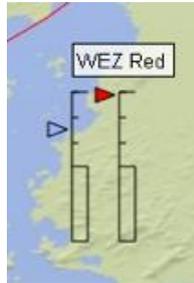


Fig. 2. Indicador de WEZ

III. MODELAGEM COMPORTAMENTAL

A fim de definir quando uma aeronave simulada deve realizar um disparo ou uma manobra defensiva, a solução proposta se baseia nos modelos detalhados a seguir.

A. Disparo aeronave azul

Para efetuar o disparo, a filosofia de tiro pré-estabelecida para a aeronave azul deve ser obedecida. Entretanto, como no indicador de WEZ presente na aeronave não há indicativo claro de se ter atingido a distância prevista na filosofia de tiro, os disparos são efetuados com alguma variabilidade dentro de uma região da WEZ.

A fim de se levar em consideração este fato, propõe-se a utilização de um número aleatório tomado entre os limites de WEZ referentes à filosofia de tiro adotada. Tal número é obtido antes mesmo do início da simulação, determinando a condição exata (*shot point*) que deve ser satisfeita para que a aeronave azul efetue o disparo.

B. Filosofia de tiro aeronave vermelha

Com o objetivo de se obter o nível de ameaça ao qual a aeronave azul está submetida, é necessário conhecer dois parâmetros relativos à aeronave vermelha, sendo o primeiro tratado nesta subseção e o segundo na próxima.

Semelhantemente à aeronave azul, a aeronave vermelha não irá efetuar um disparo caso não esteja satisfazendo as condições relativas à sua filosofia de tiro. Entretanto, para a aeronave vermelha, tais condições são desconhecidas, podendo ser apenas estimadas com base em informações de inteligência.

Dessa forma, é estabelecida uma crença com relação a qual filosofia de tiro deve ter sido adotada pela aeronave vermelha, sendo esta dependente da WEZ de tal aeronave. Para se estabelecer qual é a WEZ, algumas premissas devem ser assumidas a respeito do armamento empregado, já que os outros parâmetros, tais como altitude, velocidade e proa de ambas as aeronaves já são disponibilizados pelo radar da aeronave azul.

Com a WEZ da aeronave vermelha definida, é possível estimar qual seria o momento mais provável de seu disparo. No entanto, como mencionado na subseção anterior, a filosofia de tiro, apesar de definir um ponto exato dentro da WEZ, não é claramente visualizada no indicador da aeronave, resultando em certa variabilidade no momento do disparo.

Dessa forma, como a chance de se efetuar o disparo vai aumentando na medida que o ponteiro atinge o ponto imaginário que define a filosofia de tiro, tal chance é modelada como uma reta que cruza o eixo das abscissas neste ponto, sendo o eixo das ordenadas centrado na NEZ. A partir do ponto que define o fim da região considerada pela filosofia de tiro, o qual representa a última possibilidade de disparo para que se cumpra a filosofia, o gráfico mantém-se constante, assim como antes do início desta região, conforme mostrado na Fig. 3.



Fig. 3. Modelo para filosofia de tiro aeronave inimiga.

C. Efetividade do disparo aeronave vermelha

De forma similar, a WEZ indica quais são as chances de, se efetuado o disparo, o míssil vermelho atingir a aeronave azul. Quanto mais perto da NEZ (No Escape Zone), mais perigo o armamento apresentará, forçando manobras mais agressivas para que seja possível dele se defender.

Assim, tal como feito na subseção anterior, a efetividade do disparo do oponente foi modelada por uma reta que cruza o eixo das abscissas no MR da WEZ, sendo o eixo das ordenadas centrado na NEZ, representando, por meio de sua cota unitária, o ponto de máxima efetividade, o que é representado na Fig. 4.



Fig. 4. Modelo para efetividade do disparo aeronave vermelha

É importante notar que a efetividade do disparo é dependente da crença que se tem com relação ao armamento vermelho, já que isso afeta diretamente a definição da WEZ da aeronave vermelha.

Por fim, os dois modelos relativos à aeronave vermelha, isto é, a efetividade do disparo e a expectativa de filosofia de tiro, são compostos formando um coeficiente de ameaça, o qual é utilizado para balizar as decisões da aeronave, por meio de *thresholds* que indicam o quanto aceitável o risco é.

D. Thresholds

São definidos dois *thresholds* que guiam as decisões da aeronave no que tange a manobras defensivas. Ambos representam a aversão ao risco que o piloto possui, só que em fases diferentes do combate.

O primeiro é utilizado para a fase anterior ao disparo e o segundo para a posterior. Tal divisão foi feita para que se pudesse aumentar o gosto por risco do piloto após ter realizado o tiro, posto que já se comprometeu com o disparo. Isso fica, contudo, a cargo do analista, que pode deixar ambos os *thresholds* com o mesmo valor.

Tais valores devem ser calibrados a fim de representarem comportamentos próximos ao que se espera de um piloto BVR, considerando a doutrina vigente e as condições político-estratégicas em que o combate simulado se insere.

E. Fluxograma representativo

A fim de ilustrar como os modelos descritos compõem o comportamento da aeronave, é apresentado um fluxograma representativo na Fig. 5.

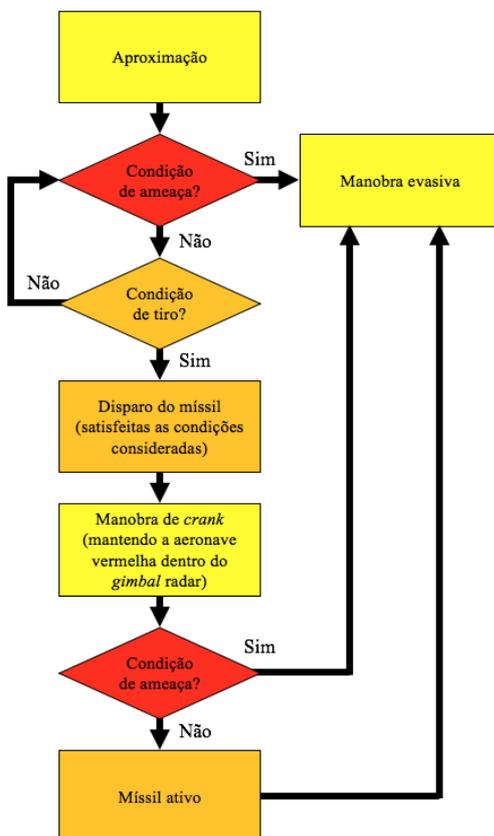


Fig. 5. Fluxograma representativo do modelo comportamental

Conforme já descrito, os nós de decisão são dependentes das filosofias de tiro, das efetividades esperadas dos disparos e dos *thresholds* de ameaça, que, por sua vez, dependem das crenças a respeito da aeronave vermelha.

IV. PARÂMETROS

No *plugin* desenvolvido foram disponibilizados aos usuários diversos parâmetros para serem editados conforme o cenário a ser simulado. Tais parâmetros se dividem em duas categorias: parâmetros de simulação e parâmetros de entidade.

Os nós amarelos são referentes a manobras, os laranjas ao míssil e os vermelhos à ameaça imposta pela aeronave vermelha.

A. Parâmetros de simulação

Esta categoria inclui dados relativos à data e à hora em que a simulação se passa, ao tempo total de simulação e ao tamanho do passo de simulação. Além disso, trata de posições relativas entre as entidades no cenário e dos critérios de *end game*. Tais critérios definem quando que a simulação se encerra, apresentando as seguintes possibilidades: alvo fora da linha de visada do buscador do míssil, razão de rastreamento do buscador incapaz de detectar alvo muito veloz, velocidade do míssil menor do que a do alvo, velocidade absoluta do míssil menor do que um mínimo e velocidade de aproximação do míssil menor do que um mínimo. Os dois últimos parâmetros de simulação são relativos à atmosfera na arena BVR considerada: a pressão e a temperatura.

B. Parâmetros de entidades

Para cada entidade presente na simulação, a saber, as aeronaves e os mísseis, uma série de parâmetros é disponibilizada para alteração. Muitos deles dizem respeito à posição e à manobrabilidade da aeronave (altitude, proa, arfagem, velocidade, fator de carga, inclinação inicial, razão de rolamento, curva nivelada). Tais parâmetros são utilizados ou não de acordo com o modo que a aeronave se encontra, podendo estes ser engajamento ou manobra.

No modo de manobra, a entidade utiliza todos parâmetros fornecidos para limitar seu movimento de acordo com o interesse do usuário. Já no caso em que o modo selecionado é o de engajamento, o *plugin* altera os parâmetros de acordo com a necessidade do combate, realizando manobras mais livres.

Além disso, são disponibilizados alguns parâmetros referentes a radar (máxima abertura do *gimbal* radar, alcance máximo, seção reta radar).

Com relação ao armamento, são definidos parâmetros de tiro (*shot point*, *threshold*, *shot philosophy*), que já foram citados na Seção III, bem como o tipo de míssil que a aeronave possui. É interessante notar que, para os parâmetros *shot philosophy* e tipo de míssil, também são incluídos dados relativos àquilo que o piloto acredita que o oponente adote.

Por fim, nesta categoria são incluídas as opções de visualização do *plugin*, permitindo que o alcance dos radares das aeronaves e dos buscadores dos mísseis, os dados relativos a cada entidade e as rotas desempenhadas pelas aeronaves e mísseis sejam mostrados na tela em tempo de execução.

V. APLICAÇÃO

Para demonstrar a utilização da modelagem proposta, foi criada uma aplicação que utiliza o *plugin* desenvolvido na plataforma AEROGRAF num cenário BVR um contra um.

Inicialmente, as duas aeronaves encontram-se em aproximação, desengajadas e fora do alcance radar de cada uma. Quando elas adentram os limites do *gimbal* radar da oponente, inicia-se a fase de engajamento, conforme mostrado na Fig. 6.

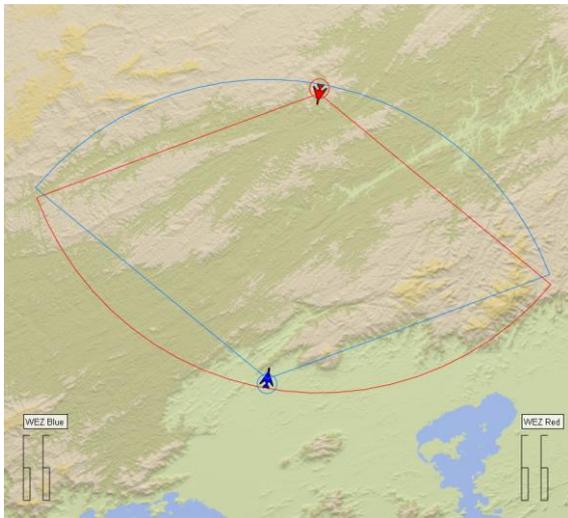


Fig. 6. Aeronaves adentrando os envelopes radar.

Na Fig. 7, após o *plugin* realizar os cálculos matemáticos referentes ao modelo comportamental de cada aeronave, as trajetórias que serão seguidas durante a visualização da simulação são traçadas.

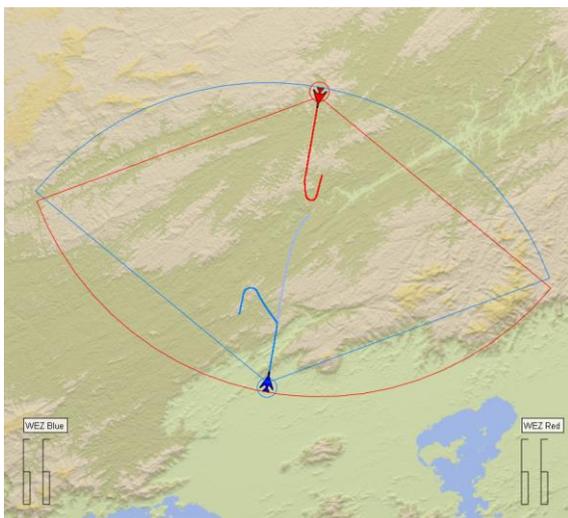


Fig. 7. Representação das trajetórias calculadas.

Decorrido certo tempo de simulação, a aeronave azul realiza o tiro de seu míssil, já que o ponto randomicamente selecionado de disparo (*shot point*), seguindo a filosofia de tiro selecionada, é alcançado. Nota-se que as WEZ de cada aeronave são indicadas pelo *plugin*, bem como as WEZ estimadas com relação à oponente. Isso pode ser observado na Fig. 8, assim como o míssil sendo disparado.

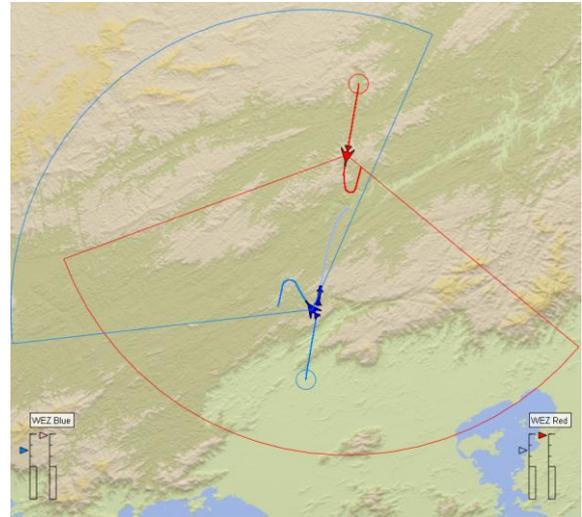


Fig. 8. Disparo do míssil azul.

O míssil segue sua trajetória até chegar na distância em que se torna ativo, ligando seu *seeker*, o que é visto na Fig. 9. Se a aeronave inimiga for detectada, ele continua em perseguição direta. Enquanto isso, a aeronave azul realiza uma manobra de *crank*, deixando a aeronave vermelha dentro dos limites de seu *gimbal*, a fim de continuar a suportar o míssil disparado.

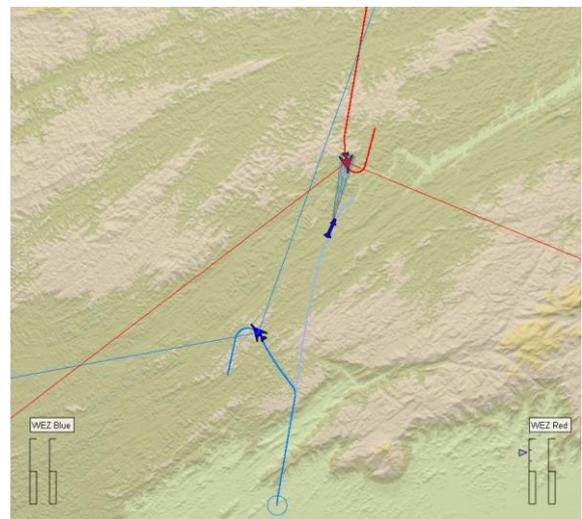


Fig. 9. Ativação do míssil azul (*seeker*).

Entretanto, ao ativar o *seeker*, inicia-se uma emissão eletromagnética que pode ser detectada pelo sistema de RWR da oponente, gerando uma reação que, conforme programado no *plugin*, é uma curva de alta performance. Isso é mostrado na Fig. 10, que também indica que tal manobra foi suficiente para defender a aeronave do míssil disparado.

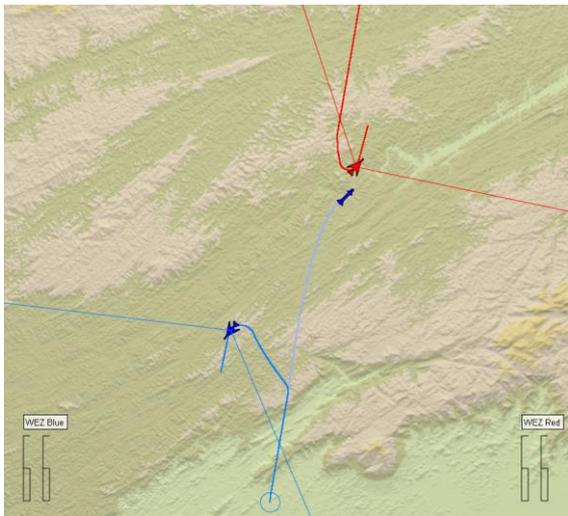


Fig. 10. Curva de alta performance vermelha e míssil azul neutralizado.

VI. CONCLUSÃO

Ao se analisar a aplicação demonstrada, vê-se que o modelo proposto foi capaz de representar a dinâmica básica do combate BVR, permitindo ao analista avaliar como uma série de parâmetros influenciam no decorrer do confronto entre as aeronaves.

A modelagem considerou tanto as características da aeronave e dos armamentos possuídos, quanto as crenças a respeito da aeronave oponente. Também foi considerada a filosofia de tiro estabelecida para a aeronave, bem como o nível de aversão ao risco de seu piloto.

Todos estes fatores contribuíram para o desenvolvimento de uma ferramenta de grande valia para o setor operacional da FAB, bem como para pesquisadores que desejem ver os impactos de novas tecnologias no cenário BVR, já que todos os sistemas utilizados no *plugin* são parametrizados, possibilitando a rápida inserção de melhorias tecnológicas.

Por fim, os modelos matemáticos propostos, apesar de já terem se aproximado da realidade vista em missões BVR, são determinísticos, o que gera menor variabilidade para a simulação. Propõe-se, como extensão deste trabalho, utilizar modelos estocásticos para a definição dos limites apresentados, bem como nos critérios de sucesso do míssil. Isso pode ser também feito por aplicação de lógica *fuzzy*, possibilitando um julgamento mais próximo ao observado nos seres humanos. Adicionalmente, sugere-se a aplicação do modelo a cenários com múltiplas aeronaves, realizando as alterações necessárias, que incluem elementos de coordenação entre os pilotos simulados.

REFERÊNCIAS

- [1] H. C. Marques, D. Geraldo, L. H. Macêdo. "Arcabouço de Combate BVR - Plataforma de Apoio à Decisão e ao Treinamento de Pilotos" In Revista Spectrum, n. 19, Comando-Geral de Operações Aéreas, Set. 2016.
- [2] H. Borck, J. Karneeb, R. Alford, D. W. Aha. "Case-Based Behavior Recognition in Beyond Visual Range Air Combat" In FLAIRS Conference, pp. 379-384. 2015.

- [3] S. Coradeschi, L. Karlsson, A. Törne. "Intelligent agents for aircraft combat simulation" In Proc. of the 6th Conference on Computer Generated Forces and Behavioral Representation. 1996.
- [4] A. N. Costa, F. L. L. Medeiros, D. Geraldo, H. C. Marques. "Modelagem de Comportamentos para Simulação de Combate BVR" In Revista Spectrum, n. 20, Comando de Preparo, Set. 2017.
- [5] J. F. Petersen, M. R. C. Aquino, R. N. Salles. "Plataforma AEROGRAF: um SIG voltado para a Força Aérea" In Revista Spectrum, Comando-Geral de Operações Aéreas, n. 11, Set. 2008
- [6] P. Du, H. Liu. "Study on air combat tactics decision-making based on Bayesian networks" In Information Management and Engineering (ICIME), 2010 The 2nd IEEE International Conference on, pp. 252-256, IEEE, 2010.
- [7] T. R. Persing, T. Dube, G. J. Slutz. "Impact of Aircraft Flight Dynamics Modeling Technique on Weapon System Beyond-Visual-Range Combat Effectiveness" In AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, p. 5689, 2003.
- [8] DoD. "Department of Defense Modeling and Simulation Master Plan, 5000.59-P", Defense Modeling and Simulation Office (DMSO), October 1995.
- [9] D. D. Hodson. "Performance analysis of live-virtual-constructive and distributed virtual simulations: defining requirements in terms of temporal consistency" AFIT/DCE/ENG/09-25, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, School of Engineering And Management, 2009.
- [10] B. M. Birkmire. "Weapon Engagement Zone Maximum Launch Range Approximation using a Multilayer Perceptron", Wright State University, Department of Computer Science and Engineering 2011.
- [11] J. Herrmann. "Air-to-air missile engagement analysis using the USAF Trajectory Analysis Program (TRAP)" In Flight Simulation Technologies Conference, p. 3489. 1996.
- [12] D. Geraldo, "Relatório de avaliação numérica do Plugin Weapon Engagement Zone" São José dos Campos, 2015.
- [13] L. H. Macêdo. "Alocação Coordenada de Múltiplos Alvos Aéreos Utilizando Heurística Especializada" Dissertação de mestrado em Gestão Tecnológica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2017.