

TEORIA DE JOGOS APLICADA AO COMBATE BVR

1º Ten Eng João Paulo de Andrade Dantas
Instituto de Estudos Avançados (IEAv)

RESUMO

Com o uso da teoria dos jogos, propõe-se um modelo em que é possível analisar o momento ideal para o lançamento de um míssil em um combate além do alcance visual (BVR) de duas aeronaves. Com os conceitos matemáticos dessa modelagem e com um determinado risco operacional associado, é possível prever o tempo de suporte de um míssil, isto é, o momento ótimo de realizar o lançamento do projétil e efetuar uma manobra defensiva, determinando dessa forma as melhores táticas que maximizam a probabilidade de derrubar as aeronaves inimigas e não ser atingido por um possível míssil do agente adversário.

Palavras Chaves: Teoria dos Jogos, Simulação, Combate Aéreo Além do Alcance Visual.

GAME THEORY FOR BVR COMBAT

ABSTRACT

Using game theory, it is proposed a model in which it is possible to analyze the ideal moment for launching a missile in a beyond visual range combat of two aircrafts. Mathematical concepts included in this model and with a certain associated operational risk, it is possible to predict the support time of a missile, which relates to the optimal moment of launching the projectile and to perform a defensive maneuver, thus determining the best procedures that maximize the probability of shooting down enemy aircrafts and not being hit by a possible missile from the adversary agent.

Key words: Game Theory, Simulation, BVR Air Combat.

I - INTRODUÇÃO

No combate aéreo moderno, mundialmente as Forças Aéreas têm aprimorado suas aeronaves e armamentos. O desenvolvimento de novas táticas de combate mais efetivas e o treinamento constante dos pilotos são de fato essenciais para garantir a soberania de uma nação. Os confrontos aéreos nos dias de hoje são divididos em combate por referências visuais (WVR) e combate além do alcance visual (BVR). Esse último significa que os combatentes usam equipamentos de detecção aerotransportados para procurar o alvo inimigo e mísseis que fazem uso tanto do radar de bordo da aeronave lançadora quanto da parte interna do armamento.

Inicialmente em um combate, a parte de engajamento é feita por navegação baseada em

dados inerciais e do GPS (*Global Positioning System*) do qual se pode receber ou não atualizações por conexão de dados (*data-link*). Como o radar da aeronave tem um alcance muito maior do que o do míssil, caso não haja *data-link* haverá uma menor probabilidade de sucesso do que em um caso em que se tenha tal dispositivo. Entretanto, mesmo mísseis sem dispositivos de atualizações de dados são capazes de obter sucesso no abate da aeronave inimiga devido 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). Portanto, quanto maior a energia associada a determinado míssil, maior sua capacidade de alterar a sua rota de ataque e atingir o alvo. Uma maneira de se aumentar a probabilidade de sucesso é retardar o lançamento do míssil, pois ele 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 utilizá-la. Isto demonstra que o procedimento de combate empregado tem grande influência no sucesso de um engajamento BVR. [1]

Uma vez que o míssil foi lançado, o piloto deseja diminuir as chances de o oponente também realizar o lançamento de um projétil. Para tal, é necessário a diminuição da proximidade em relação ao alvo, inicialmente reduzindo a potência para perder velocidade e em seguida mudar a direção do voo. Devido a tais implicações de tempo e distância dos combates BVR, em geral, é necessário considerar a ação de muitas variáveis dinâmicas e buscar uma maior probabilidade de sucesso conhecida como probabilidade de abate. A partir do lançamento, o míssil estará se dirigindo à posição futura estimada do alvo. Este, por sua vez, provavelmente não irá para esta posição indesejável, realizando assim o comportamento que é dele esperado no combate aéreo, isto é, adaptará sua rota para fugir das ameaças do adversário.

Manter uma alta probabilidade de abate exigirá que se transmita a posição do alvo para o míssil e isso só é possível com a manutenção do rastreamento do alvo pela aeronave até que o míssil possa tomar essa ação de forma autônoma, isto é, quando se torna ativo. Para a realização desse tipo de procedimento, é necessário manter a aeronave alvo dentro do alcance de atuação do radar da aeronave lançadora.

O *cranking* é a manobra de disparar um míssil e realizar o seu guiamento enquanto se faz um procedimento defensivo para fugir do ataque inimigo e não ser abatido.

Em um combate aéreo BVR, não são apenas a área de detecção do radar e o alcance do míssil que limitam o ataque, mas também as direções adotadas por cada aeronave. O processo de determinação do momento exato de, após o lançamento de um míssil, realizar uma manobra defensiva (*cranking*), é baseado normalmente na avaliação da situação de combate por parte do piloto com base na sua intuição e experiência. Com o uso da teoria dos jogos é possível propor um modelo para análise o tempo ótimo de suporte de lançamento de um míssil em um combate BVR de duas aeronaves. Esse tempo diz respeito ao momento ideal de lançar um míssil e realizar uma manobra defensiva e assim determinar as melhores táticas para combates aéreos além do alcance visual que maximizem a probabilidade de abater as aeronaves inimigas e não sofrer danos.

Nesse artigo, inicialmente, será feito um breve levantamento do que é a teoria dos jogos e seus principais conceitos. Essas definições são importantes para total entendimento das explicações referentes da aplicação da teoria. Em seguida, será explorado em que contexto na FAB está inserido esse estudo e qual sua aplicação operacional. Por fim, será contextualizado um jogo específico de combate BVR no qual será modelado por meio de algumas simplificações para redução de sua complexidade e será aplicado a teoria de jogos diferenciais para esse problema de combate aéreo,

II – TEORIA DOS JOGOS E DEFINIÇÕES

A teoria dos jogos tem como objeto analisar situações onde o resultado da ação de indivíduos depende substancialmente das ações dos outros envolvidos. Em outras palavras, trata de situações onde nenhum indivíduo pode convenientemente agir sem levar em conta as possíveis decisões dos outros. Ela é utilizada para se estudar assuntos tais como eleições, leilões, balanças de poder, evoluções genéticas e estratégias militares de combate. Em geral, pode-se relacionar essa teoria a estudos comportamentais para previsão de ação de outros indivíduos e a modelagem de situações de conflitos, como no combate aéreo. Estas situações são as que as decisões tomadas por uma parte (ou jogador) alteram os resultados de todas as outras partes envolvidas. Desta forma, as decisões tomadas por um indivíduo dependem do conjunto das atitudes escolhidas pelos outros, não se tratando de um problema de otimização.

Um jogo é a situação em que os jogadores tomam decisões que têm em consideração às atitudes e respostas dos outros. Cada jogador tem interesses ou preferências para cada situação no jogo. Em termos matemáticos, cada jogador tem uma função utilidade que atribui um número real (o ganho ou *payoff* do jogador) a cada fase do jogo. Benefícios ou recompensas que o jogador adquiriria a cada

possível resultado são gerados a partir de decisões estratégicas. O principal objetivo da teoria dos jogos é determinar a melhor estratégia para cada jogador, onde se considera como estratégia o plano de ação para o jogo. Uma solução de um jogo é uma prescrição ou previsão sobre o resultado que será avaliado em determinada situação proposta.

Dentre os diversos tipos de jogos analisados nessa teoria, os de soma nula são aqueles para os quais o somatório dos pagamentos (*payoffs*) efetuados a todos os jogadores é nulo, não importando a estratégia adotada por cada um dos deles. Neste caso, o que um jogador ganha corresponde ao que é perdido pelos demais. Já os jogos de soma não nula ou de soma diferente de zero, são aqueles que não respeitam as condições citadas acima, isto é, cujo somatório dos pagamentos efetuados a todos os jogadores não é nulo.

III – PLATAFORMA DE TREINAMENTO DE PILOTOS

Os pesquisadores da Força Aérea Brasileira estão desenvolvendo, a partir de trabalhos de graduação e pós-graduação, bem como projetos de pesquisa em andamento, nos diversos programas do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) e em parceria com os demais institutos presentes no Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), um arcabouço de ferramentas que permitam o desenvolvimento da consciência situacional de equipagens no momento do planejamento da missão, bem como possibilite que as decisões advindas durante o planejamento, possam ser testadas antes que a missão real seja efetuada, através de simulação. A construção será baseada na implementação de algoritmos de apoio à decisão em uma plataforma de planejamento já em uso pela Força Aérea Brasileira, o AEROGRAF, a partir da sua extensão para que possa também realizar simulação a partir de diversos plugins de simulação (conjunto de rotinas de código de programação com a finalidade de produzir uma capacidade), sendo o primeiro o de Cenário BVR. Espera-se que as equipagens de combate da FAB possam usufruir de uma plataforma de apoio à decisão que incremente sua percepção das forças e fraquezas das táticas em uso e a serem desenvolvidas, potencializando o poder de combate dos pilotos de caça. [2]

Nesse contexto, o presente artigo tem o objetivo de introduzir a solução para um dos problemas de pesquisa do projeto proposto relativo as fases do combate BVR. O trabalho exposto aborda a modelagem no combate BVR na fase de engajamento, que prevê uma série de atividades em seus diversos cenários possíveis, tratando-se, especificamente, dos lançamentos de armamento e manobras de evasão, os quais são momentos críticos do combate aéreo. O tipo de análise que será exposta no artigo irá apoiar o desenvolvimento do sistema de apoio à decisão que irá integrar a plataforma de treinamentos de pilotos da FAB.

IV – JOGO DE UM COMBATE BVR

Na modelagem proposta nesse artigo, será considerado um cenário de jogo entre duas aeronaves em combate aéreo além do alcance visual onde cada uma está equipada com um míssil de médio alcance. Sabe-se que o emprego de um míssil consiste tipicamente em três fases. No início, a aeronave lançadora retransmite a informação do alvo ao míssil na fase de apoio. Na segunda fase, a aeronave realiza uma manobra evasiva (*cranking*), e o míssil continua em direção ao ponto de encontro esperado. Finalmente o míssil liga seu próprio radar e tenta atingir a posição futura do alvo. Os pilotos podem selecionar livremente a duração de suas fases de suporte, ou seja, o quanto tempo eles vão guiar o míssil até este encontrar o alvo e quando eles iniciarão uma curva defensiva. Prolongar a fase de suporte encurta a fase de evasão, o que aumenta a probabilidade de acerto. No entanto, a probabilidade de sobrevivência diminui porque fornecer suporte ao míssil lançado requer voar em direção a um míssil potencialmente entregue pelo adversário. As probabilidades acima mencionadas dependem das ações do adversário também. Assim, o problema em análise do jogo é selecionar as manobras e tempos de suporte que maximizam essas probabilidades sob a suposição de que o adversário se comporta racionalmente. [3]

Com o uso da teoria dos jogos torna-se possível a determinação de tempos de suporte ótimos sem o uso de regras heurísticas pré-determinadas. Para a análise dessa situação de combate, os objetivos conflitantes do piloto, isto é, as probabilidades de sucesso e sobrevivência, são nessa análise transformados em funções de recompensa (*payoffs*). Além disso, é considerada uma variável que representará a atitude de risco do piloto. Essa variável indica se o piloto está com uma maior tendência de valorizar o sucesso em abater o alvo ou a sua própria sobrevivência. Essas próprias probabilidades possuem uma tarefa de modelagem complexa e com muitas variáveis associadas, e algumas simplificações são necessárias. Os métodos de otimização e a teoria diferencial de jogos são ferramentas analíticas que podem suportar simulações complexas, desenvolvendo algoritmos para tomada de decisão por meio de condições favoráveis iniciais ou intermediárias para os adversários. Entretanto, para utilizar estas ferramentas, é necessário utilizar modelos e pressupostos matemáticos simplificados, que em geral não são cumpridos nas simulações mais realistas. Um ataque bem-sucedido e a sobrevivência, dependem de duas variáveis: a probabilidade de que o míssil irá fixar a posição do alvo – que depende do erro angular durante a primeira fase de engajamento – e a probabilidade de que o ataque irá ser eficaz – que depende da velocidade final adquirida pelo míssil. Muitos outros aspectos também afetam essas probabilidades, mas estes são considerados como os mais significativos. Como tal, o jogo que está sendo proposto é um jogo

diferencial de soma não nula. As trajetórias e os pagamentos no jogo após a fase de suporte são, contudo, dissociados, já que ambos os jogadores minimizam de forma independente a velocidade final dos mísseis que foram lançados contra ambos os jogadores, minimizando a probabilidade de um dano efetivo.

Portanto, nesse jogo, serão admitidas as premissas de que os jogadores disparam os mísseis simultaneamente, que o radar de busca do míssil é constante, que aeronave detecta o míssil se aproximando somente quando o projétil trava a posição do alvo e, por fim, que durante a fase de evasão a posição do alvo é extrapolada linearmente. Em seguida, apresentamos as fases do combate de duas aeronaves do ponto de vista de um jogador sob as suposições acima.

Na Figura 1 foi exposto a fase inicial do combate entre duas aeronaves:

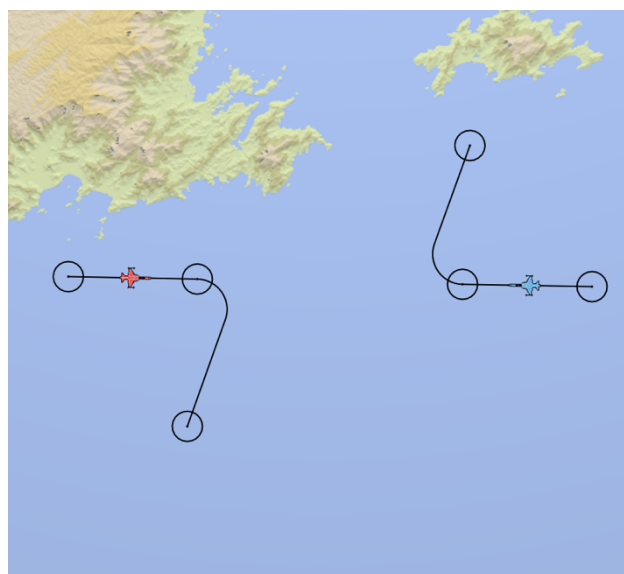


Figura 1 - Momento inicial de um combate BVR entre duas aeronaves.

Nesse momento ocorre o engajamento inicial das duas aeronaves. Nessa fase o piloto precisa decidir o momento de realizar o disparo e realizar manobra defensiva (*cranking*). A seguir, na Figura 2, é exposto o momento exato em que as duas aeronaves realizam o disparo do míssil. Analisando as fases do combate BVR, considera-se o tempo t_{m1} como o momento em que o jogador 1 lança um míssil em direção ao jogador 2 e realiza uma manobra defensiva para não ser atingido por um possível míssil já lançado pelo jogador 2. De forma análoga, o tempo t_{m2} diz respeito ao momento em que o jogador 2 lança um míssil em direção ao jogador 1 e realiza uma manobra defensiva para não ser atingido pelo míssil lançado pelo jogador 1 no tempo t_{m1} . Nessa situação, considera-se que ambos os jogadores possuem um comportamento racionalmente semelhante, realizando o ataque juntamente com um procedimento de defesa (manobra de evasão do míssil).

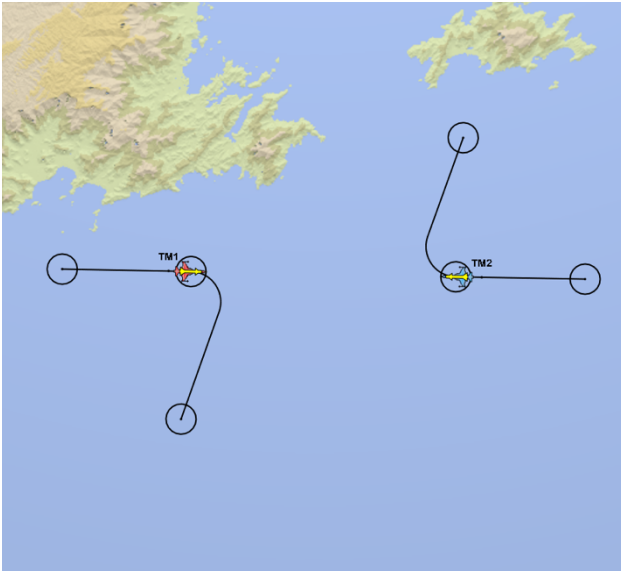


Figura 2 - Tempos de lançamento dos mísseis e realização de manobras de evasão dos jogadores 1 e 2 (t_{m1} e t_{m2}).

As trajetórias dos projéteis foram descritas na Figura 3. Considere r_{12} como a distância do míssil lançado pelo jogador 1 e a posição futura do jogador 2. Semelhantemente, considere r_{21} como a distância do míssil lançado pelo jogador 2 e a posição futura do jogador 1.

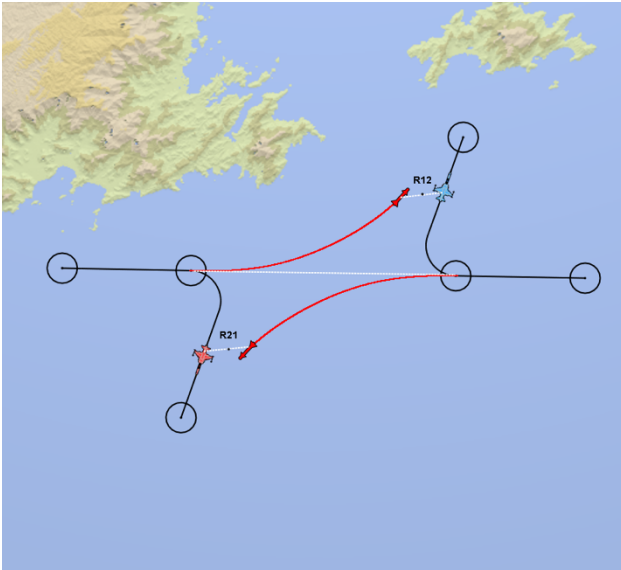


Figura 3 - Trajetórias dos mísseis e fase final do combate.

Cada aeronave quer manobrar antes do lançamento de forma que seu míssil alcance o adversário e, em seguida, quer proceder de modo que o míssil do oponente não possa alcançá-lo. Assim, pode-se dizer que o jogador 1 quer minimizar r_{12} e maximizar r_{21} enquanto o jogador 2 quer minimizar r_{21} e maximizar r_{12} . Caso a aeronave adversária esteja fora do envelope de atuação do míssil, o mesmo não terá energia suficiente para realizar o efeito desejado. Na visão de cada jogador, adotando um risco operacional para cada um (variável que mede o grau de risco que o piloto está disposto a assumir para gerar determinado efeito), a missão é minimizar a distância entre o míssil lançado

e o alvo e, em seguida, realizar a evasão do possível míssil adversário gastando a menor quantidade de energia possível. Caso o jogador realize uma manobra defensiva mais agressiva que o necessário, poderá estar gastando energia que seria útil para um próximo ataque.

Assumindo que cada jogador dá pesos iguais a seus objetivos, o problema pode ser formulado como um jogo de soma zero com *payoff* funcional dado por:

$$J = r_{12} - r_{21} \quad (1)$$

As funções de controle são aquelas que irão determinar os valores das recompensas para cada jogador. As definições de tais funções tem a limitação de que, caso o valor de J venha a diminuir, o jogador 1 pode esforçar-se para tornar r_{21} cada vez maior. No entanto, para um cenário minimamente realístico de modelagem, r_{21} precisa apenas ser maior do que o alcance do míssil do oponente. De forma corresponde, r_{12} só precisa ser menor do que o alcance do míssil do jogador 1. Portanto, realizando essa análise de forma análoga para o jogador 2 e admitindo r_{cap} como o raio de atuação dos mísseis (alcance limite para atingir o alvo) e r_{seg} como o raio de segurança (limite para que a aeronave que está sendo atacada consiga escapar da atuação do míssil inimigo), sugere-se que:

$$J_1 = \max\{r_{12}, r_{cap}\} - \min\{r_{21}, r_{seg}\} \quad (2)$$

$$J_2 = \max\{r_{21}, r_{cap}\} - \min\{r_{12}, r_{seg}\} \quad (3)$$

Na Figura 4 é ilustrado o raio limite para alcançar o alvo (r_{cap}) do míssil AIM-120A AMRAAM lançado em direção à posição futura da aeronave-alvo.

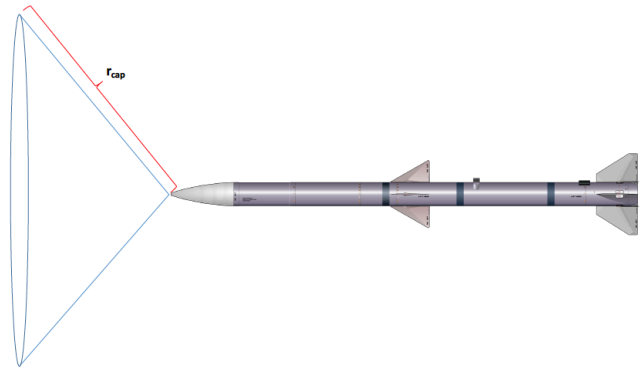


Figura 4 - Raio limite para alcançar o alvo (r_{cap}) do míssil AIM-120A AMRAAM.

Os valores de r_{cap} e r_{seg} são assumidos como sendo as mesmas constantes para ambos os mísseis. Desta forma, o problema se torna um jogo diferencial de soma não nula em que as funções de controle para ambos os jogadores é dada por:

$$\text{Jogador 1} \rightarrow u_1: \min J_1(r_{12}, r_{21}) \quad (4)$$

$$\text{Jogador 2} \rightarrow u_2: \min J_2(r_{12}, r_{21}) \quad (5)$$

Dito isso, fica claro que as funções de controle dependem dos valores mínimos de J_1 e J_2 , já que o objetivo para ambos os jogadores é atingir o alvo inimigo realizando a manobra evasiva de maneira mais suavizada possível. Essa decisão é baseada na tentativa de não fazer uso desnecessário da energia da aeronave e de utilizar o máximo do poder de fogo do míssil. A partir dos *payoffs* e das distâncias obtidas na análise do jogo, é possível encontrar os momentos ideais para realizar o lançamento de um míssil e de quando começar uma manobra defensiva. Esse tipo de informação é de muita utilidade para maximizar as chances de atingir determinando alvo e de evasão de possíveis ataques inimigos. Futuramente, a proposta é tornar esse tipo de informação embarcada em aeronaves, podendo ser utilizada, por exemplo, em um veículo aéreo não tripulado, em um sistema de apoio a decisão na aeronave para pilotos ou ainda em um modelo de orientação de um simulador de combate aéreo.

V - CONCLUSÕES

Aplicando a teoria de jogos diferenciais para os problemas de combate aéreo, é possível obter uma visão substancial da estrutura do problema e melhorias nas manobras de ataque e defesa. Estes métodos apresentam uma ferramenta de validação para verificar a lógica de decisão no disparo de mísseis, por exemplo. Além disso, é possível identificar indícios dos momentos ótimos para realizar o disparo de um projétil. Entretanto, para realizar esse tipo de análise de um combate BVR entre duas aeronaves, devem ser feitas simplificações e restrições em algumas variáveis para que os métodos propostos possam ser aplicados.

O uso da formulação do jogo de soma não nula faz uma predição das recompensas que cada jogador vai obter de acordo com cada decisão tomada. Nesse caso, a soma desses *payoffs* deve ser não nula, determinando um vencedor no jogo proposto. Os tempos de suporte de ambos os jogadores são considerados como variáveis importantes para determinar o sucesso ou o fracasso em determinada rodada do jogo. A principal contribuição deste trabalho foi, portanto, a introdução de um modelo tratável para obter o tempo de suporte ideal de um míssil por meio da teoria dos jogos em um combate BVR de duas aeronaves, podendo ser estendido a outros cenários operacionais em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- [1] VIEIRA JUNIOR, H.; KIENITZ, K. H.; BELDERRAIN, M. C. N. **Simulação Computacional de Combate Aéreo Além do Alcance: Uma Ferramenta de Melhoria**. ITA.
- [2] MARQUES, H.C.; GERALDO, D.; MACÊDO, L.H. **Arcabouço de Combate BVR - Plataforma de Apoio à Decisão e ao Treinamento de**

Pilotos. SPECTRUM: Revista do Comando-Geral de Operações Aéreas, v.1, n. 19, p. 04-10, Set. 2016.

[3] KARELAHTI, J.; VIRTANEN, K.; Raivio, T. **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.

[4] HERBST, W. B. **Dynamics of Air Combat**. Messerschmitt-Bolkow-Blohm W.B. GmbH, Munich, Federal Republic of Germany, 1983.

[5] JÄRMARK, B. **A Missile Duel Between Two Aircraft**. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 8, No. 4, 1985, pp. 508–513.

[6] 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.

[7] MORITZ, K., POLIS, R., AND WELL, K. H. **Pursuit-Evasion in Medium-Range Air-Combat Scenarios**. Computers and Mathematics with Applications, Vol. 13, Nos. 1–3, 1987, pp. 167–180.

AUTORES:



O Primeiro Tenente Engenheiro Dantas possui graduação em Engenharia Mecânica-Aeronáutica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2015) e é mestrando em Engenharia Eletrônica e Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Atualmente é pesquisador no IEAv e membro da equipe de simulação da Divisão de Geointeligência. Contato: e-mail dantas@ieav.cta.br, telefone (12) 3947-5314.