

# Avaliação de Procedimentos para Intercepção de Aeronaves em um Cenário de Defesa Aérea

João Carlos da Cunha Davison<sup>1,2</sup>, Alexandre Quirino da Silva<sup>1</sup> e David Fernandes<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Empresa Brasileira de Aeronáutica S/A, EMBRAER, Av. Brigadeiro Faria Lima, 2170 - 12227-901, São José dos Campos, SP

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial, Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 - 12228-900, São José dos Campos, SP

**Resumo** — No cumprimento do seu papel de garantir a soberania do espaço aéreo as Forças Aéreas utilizam doutrinas e procedimentos padronizados para interceptar e identificar aeronaves suspeitas visando proteger um território de incursões potencialmente ilegais ou hostis. Um sistema integrado composto de bases aéreas, aeronaves e centros de controle de defesa aérea, operando harmonicamente, é essencial para o processo de reação imediata às ameaças e para o êxito das missões de interceptação. Este trabalho descreve um processo de auxílio à tomada de decisão do controlador de operação de defesa aérea. Leva-se em considerações as posições, disponibilidades e condições das aeronaves interceptadoras e calcula-se através da simulação da interceptação o tempo total da missão, a distância total a ser percorrida, o tempo para interceptação, a distância para interceptação, o ângulo de cruzamento de proa de interceptação, o consumo de combustível e a viabilidade da interceptação ser realizada em conformidade com certas restrições.

**Palavras-chaves** — Interceptação, defesa aérea, controle do espaço aéreo, combate aéreo.

## I. INTRODUÇÃO

O trabalho realizado faz o estudo, modelagem, implementação, simulação e automação de técnicas de interceptação de aeronaves, dentro de um cenário de vigilância aérea realizado por Radares no solo e aeronaves AEW (*Airborne Early Warning*). O estudo realizado engloba as fases entre o alerta de invasão do espaço aéreo até o combate e retorno à base, levando-se em conta os limites operacionais da aeronave na execução da missão de interceptação [1].

As etapas de modelagem matemática e implementação do algoritmo descrevem a dinâmica tridimensional dos procedimentos de interceptação sem considerar o engajamento em combate, pois nesta situação se perde a capacidade de previsão dos movimentos, que dependerão das ações e reações das aeronaves envolvidas.

Determina-se a eficiência do procedimento de interceptação através da simulação e cálculo dos parâmetros relativos a guagem da aeronave interceptadora. Analisando esses parâmetros o controlador de operações de defesa aérea pode decidir melhor sobre as ações mais eficientes que podem ser tomadas para o êxito da missão de interceptação

J. C. da Cunha Davison, joao.davison@embraer.com.br, Tel +55-12-39277273, A. Q. Silva, asqsilva@embraer.com.br, Tel +55-12-39275855, Fax +55-12-39273395 e D. Fernandes, david@ita.br, Tel. +55-12-39476807, Fax +55-12-39476930.

Nas seções II, III e IV estabelecem-se os conceitos básicos do cenário de operação, das ações táticas e dos procedimentos de interceptação. Na seção V descreve-se o programa de simulação e cálculo desenvolvido e na seção VI mostram-se os resultados de uma simulação de interceptação. Na seção VII são apresentados os comentários finais relativos ao trabalho realizado.

## II. CENÁRIOS DE OPERAÇÃO

Em tempo de paz os Radares terrestres monitoram o espaço aéreo por regiões. Cada aeronave detectada no Radar (pista) deve ser identificada e verificada a sua autorização de navegação. Caso não seja obtida resposta do transponder a estação que detectou a pista no Radar tenta comunicação via rádio com a aeronave ou com outras estações em solo para obter informações sobre a aeronave. A classificação da aeronave permanece pendente. Caso não obtenha sucesso, a aeronave dentro de um período de alguns minutos é classificada como suspeita. O modo como será tratada uma aeronave suspeita depende do estado de alerta. Em tempos de paz (estado de alerta 0 - ESTALI 0) um caça é designado para a interceptação. A escolha de qual aeronave será acionada depende da localização e da situação das aeronaves que estão em bases próximas, analisa-se ainda o alcance, o armamento e o desempenho necessário para a aeronave cumprir a missão.

O controlador de tráfego então conduz (vetora) o interceptador até o alvo, dando a ele o rumo e as correções, de forma a aproximá-lo até um ponto em que ele tenha condições de assumir o controle da situação e realizar um procedimento previamente estabelecido [2].

O procedimento de interceptação em estado de alerta ESTALI 1 é similar, porém como existe uma ameaça maior, são mobilizadas duas aeronaves ao invés de uma. A primeira aeronave é encarregada de identificar o suspeito, enquanto que o objetivo da segunda é dar apoio à primeira, engajando-se em combate caso o suspeito seja identificado como hostil.

A operação em estado de alerta ESTALI 2 obedece a uma organização em zonas, de modo a facilitar o controle do teatro de operações. Segundo a doutrina da OTAN as fronteira defendida é segmentada em zonas denominadas FAOR (*Fighter Area of Responsibility*) e zonas de apoio às operações de combate: zonas W (*Watch*), na qual uma aeronave com Radar de vigilância patrulha uma região que se estende além das fronteiras e zona D (*Drink*), onde uma aeronave de reabastecimento circula para guarnecer as aeronaves de combate.

### III. AÇÕES TÁTICAS E MANOBRAS

O sucesso em um combate aéreo depende da habilidade do piloto em manobrar a aeronave de modo a deixá-la em uma posição apropriada à utilização do armamento contra o inimigo. Se o piloto estiver em uma situação defensiva, o sucesso é definido pela capacidade de resistir ao ataque e abater o inimigo ou escapar do ataque sem danos.

As aeronaves de combate têm condições de detectar alvos além de seu alcance visual. As maneiras mais comuns de se obter informações sobre o inimigo são através do Radar instalado na própria aeronave e através de enlace de dados, onde uma estação em solo ou outra aeronave informa a posição do incursor. Uma vez que a posição do inimigo é definida uma série de ações táticas são tomadas. Estas ações consistem de um conjunto de procedimentos para que a aeronave consiga vantagens sobre o inimigo.

Estes procedimentos estão divididos nas seguintes etapas básicas: detecção, interceptação, engajamento, separação e recolhimento. A falha na execução de qualquer uma deles pode causar o comprometimento do plano tático.

A detecção é a etapa em que o alvo é percebido pelo Radar. A capacidade de detecção depende muito das características do Radar empregado. Interceptação é a etapa em que é feita a aproximação com inimigo, orientada pelo controlador de defesa aérea.

Após a definição do alvo, as manobras devem ser feitas de modo a alcançar o inimigo em condições de empregar o armamento. Este procedimento depende do tipo de armamento que se dispõe e das suas características. Um objetivo complementar desta fase é manter o interceptador em segurança.

Na fase de engajamento o interceptador está em contato visual com o alvo. Como neste momento o inimigo provavelmente já notou sua presença, ele estará manobrando contra o interceptador, exigindo ações de ambas as aeronaves. Estes engajamentos, no caso mais simples, envolvem somente duas aeronaves em combate, uma contra a outra, porém existe a possibilidade de mais aeronaves se envolverem no combate.

Durante o combate, o piloto deve estar sempre visualizando a sua janela de escape. Esta é a condição onde pode ocorrer a separação, ou abandono do engajamento sem o risco de ser abatido. A aeronave então retorna para a sua base na fase de recolhimento.

Manobras Básicas de Combate (BFM) são a aplicação de conhecimentos para alcançar uma posição de onde as armas podem ser empregadas ou anular uma posição vantajosa do adversário, de onde suas armas poderiam ser utilizadas. Não se trata simplesmente de um conjunto de manobras, mas uma série de ações pró-ativas e muitas vezes improvisadas, que variam de acordo com a distância ao alvo, altitude, velocidade, tipo de aeronave, tipo de armamento e inúmeros outros fatores.

O combate aéreo requer reações imediatas e para isto o piloto deve constantemente observar o inimigo, prever sua posição futura, manobrar em resposta a esta previsão e reagir a mudanças desta situação. As manobras básicas consideram apenas o caso de duas aeronaves combatendo, envolvendo as etapas de interceptação, engajamento e separação. As manobras se dividem em três grupos, que correspondem às seguintes situações:

- ofensiva: o piloto está em posição dominante e o seu objetivo é perseguir seu inimigo e abatê-lo;
- defensiva: o piloto está em desvantagem e seu objetivo é evitar as armas do oponente e procurar uma posição neutra ou escapar do combate e

- neutra: nenhuma das aeronaves está em condição de vantagem e o sucesso está condicionado à capacidade de apontar a aeronave para o inimigo com distância suficiente para empregar seu armamento.

Para ser capaz de executar o BFM, o piloto deve entender sua relação com ao alvo sob três perspectivas: geometria espacial, geometria de ataque e envelope de armamento [3, 4 e 5].

A geometria espacial descreve a relação entre a posição das duas aeronaves e pode determinar se existe alguma condição de vantagem entre elas. Ângulo de Cruzamento de Proa (ACP), distância (*range*), ângulo de aspecto e ângulo *off* (AO) são conceitos utilizados para descrever a posição relativa de uma aeronave à outra.

ACP é a diferença entre as proas das aeronaves interceptadora e alvo, ângulo de aspecto é o ângulo em que o alvo enxerga o interceptador, medido a partir da sua calda (seis horas) e AO é o ângulo entre a trajetória do interceptador e a linha de visada do interceptador para o alvo.

A geometria de ataque descreve a trajetória ofensiva que o interceptador irá seguir em relação ao inimigo durante o engajamento, com o objetivo de lançar um míssil ou disparar a metralhadora. No ataque ao alvo, existem três trajetórias de perseguição distintas: perseguição em atraso (*lag pursuit*), perseguição pura (*pure pursuit*) e perseguição em avanço (*lead pursuit*).

Envelope de armamento é a área ao redor do alvo onde o armamento pode ser efetivo. Este envelope é definido em termos de ACP, distância e ângulo de aspecto e depende das características do armamento que está sendo utilizado. Existem armamentos que podem ser lançados a partir de qualquer ângulo de aspecto, conhecidos como armas ALASCA (*all-aspect capability*). Esses mísseis podem conter um Radar e portanto, quanto maior a seção reta-Radar do alvo maior será a energia refletida e maiores são as probabilidades de acerto.

Ao contrário dos mísseis, metralhadoras não têm distância mínima de disparo. O envelope das metralhadoras só é limitado pela distância máxima. O problema de se disparar a curtas distâncias é a possibilidade do interceptador ser atingido por partes que se soltem do inimigo atingido.

### IV. INTERCEPTAÇÃO

Na fase de interceptação, que precede o engajamento, o controlador de defesa aérea vetora o interceptador até o alvo dando a ele o rumo e as correções necessárias para que ele alcance um contato visual com o incursor e assuma o controle da sua navegação.

A condução da interceptação deve considerar:

- altitude relativa entre o interceptador e o alvo, de modo a facilitar a detecção (visual ou por Radar) do alvo pelo interceptador e dificultar que o interceptador seja detectado, além de fornecer condições de manobra e potencial de energia;

- posição do sol, de modo a facilitar a visualização do alvo pelo interceptador e dificultar a visualização do interceptador

pelo alvo, além disso, o possível lançamento de mísseis IR (*InfraRed*) não pode ser prejudicado ;

- desempenho do interceptador em relação ao alvo, para colocá-lo em melhor condição de manobra;
- armamento do interceptador e do alvo, colocando-o na melhor situação para emprego do armamento;
- alcance do interceptador e do alvo, de modo a realizar a interceptação na situação de combustível mais favorável;
- Radar de bordo do interceptador e do alvo, de modo a utilizar uma tática que permita a detecção do alvo o mais rápido possível, sem ser detectado;
- limites geográficos da área de operação, para realizar a interceptação em uma área não controlada por forças hostis;
- Radares terrestres envolvidos, para dificultar a detecção do interceptador por Radares inimigos;
- meteorologia, de modo a evitar o vôo dentro de formações meteorológicas adversas e planejar o final da interceptação numa área de condições favoráveis para o interceptador.

A interceptação é geralmente dividida nas seguintes fases:

- Espera é a fase compreendida entre o acionamento do alerta e a decolagem do interceptador. A duração desta fase depende da condição de alerta dos interceptadores;
- Posicionamento, onde o interceptador deixa sua base e busca um posicionamento que lhe permita o ataque ao alvo nas condições desejadas;
- Ataque ou apresentação, onde o interceptador busca uma geometria favorável para o engajamento, em termos de ACP, distância e altitude.

Normalmente em uma interceptação busca-se alcançar o alvo no menor tempo possível, o que é conseguido eliminando a fase de posicionamento e assumindo uma trajetória de ataque com o ACP determinado por sua posição após a decolagem.

Citam-se três táticas de interceptação: AO, Uma Curva e Encaudamento.

A interceptação pelo AO consiste na orientação do interceptador, baseado no AO, de forma que ele alcance o alvo com um ACP desejado.

Na tática Uma Curva o interceptador executa uma navegação conhecida como navegação de rota de colisão. A trajetória é feita em linha reta, com proa constante, para um ponto final a uma distância de cruzamento com o alvo. O interceptador ataca o alvo em com um determinado ACP, escolhido de acordo com a posição das aeronaves, o armamento do interceptador e capacidade de detecção do Radar. A tática Uma Curva é utilizada também para identificação visual, lançamento de míssil ALASCA ou uma possível conversão para engajamento. O interceptador pode utilizar esta tática se quiser combinar o lançamento de míssil com uma possibilidade de encaudamento para utilização da metralhadora no setor traseiro do inimigo, caso o míssil tenha sido perdido. Esta técnica é conhecida como ataque e reataque.

A tática encaudamento é uma extensão da tática Uma Curva, quando se atinge a distância de cruzamento adequada para manobrar o interceptador para as “seis horas” do alvo. Esta tática tem a vantagem de terminar na posição de combate mais vantajosa, onde é possível empregar a maioria dos armamentos. O encaudamento é muito sensível à manobra do alvo, que com algum movimento pode reduzir a separação lateral, impedindo a conversão, ou se afastar. As reações do alvo são de difícil detecção, pois nesta tática os ângulos e velocidade de aproximação estão variando continuamente.

## V. SIMULAÇÃO E CÁLCULO DA INTERCEPTAÇÃO

Utilizando-se o aplicativo MATLAB foi feita a simulação de uma interceptação, para um cenário específico, com o objetivo de se calcular parâmetros de ataque e de previsão da rota percorrida. O problema de interceptação no espaço tridimensional foi realizado pela combinação da tática (bidimensional) com o perfil (unidimensional). Tática de uma interceptação é a projeção da trajetória do interceptador sobre o plano horizontal. Perfil é a projeção da trajetória do interceptador no plano vertical, desde a fase de espera até a fase de recolhimento.

Foram considerados apenas aspectos de navegação, não sendo incluído os processos de pilotagem (controle da aeronave). Por simplicidade, em uma primeira aproximação do problema, foi considerado um alvo não manobrável, que mantém altitude, rumo e velocidade constantes.

A Fig. 1 ilustra a tática que engloba, no caso mais geral, as fases de espera, aceleração, ataque, conversão e recolhimento. A fase de conversão só ocorre na tática de encaudamento.

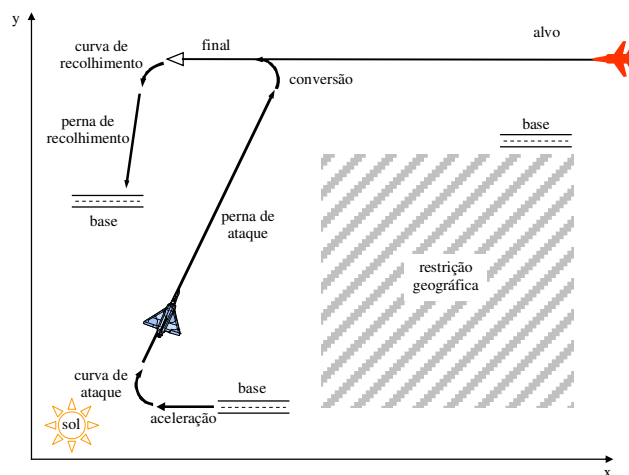


Fig. 1. A tática e suas fases.

A simulação leva em consideração a posição do sol, restrições geográficas e localização das bases dos interceptadores.

No perfil, ilustrado na Fig. 2 são analisadas as fases de espera, aceleração, subida, cruzeiro de ida, conversão vertical, cruzeiro de volta e descida. Admite-se que o interceptador parte de uma situação de menor altitude que o alvo e velocidade inferior à velocidade de interceptação.

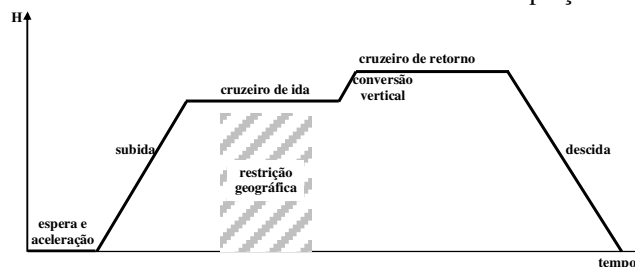


Fig. 2. O perfil e suas fases.

A conversão vertical é a mudança da altitude de interceptação para a altitude do alvo, que ocorre durante a conversão horizontal e assim só existe quando há separação vertical (altitude relativa entre interceptador e alvo) e se deseja realizar um encaudamento.

A Fig. 3 ilustra o relacionamento entre a tática e o perfil.

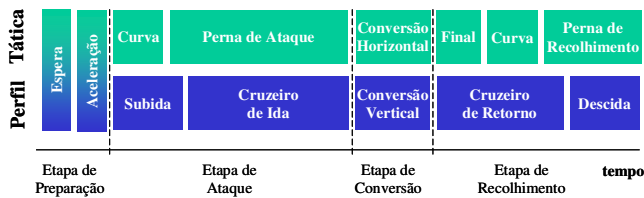


Fig. 3. Relação entre as fases tática e de perfil.

O usuário do programa de cálculo e simulação desenvolvido tem a opção de configurar um cenário com uma vasta gama de possibilidades, tornando a simulação abrangente.

### A. Entradas de dados

As entradas são agrupadas nos seguintes conjuntos:

Tipo de navegação:

- perfil de subida: PPS (plena potência seca) ou PC MAXI (pós-combustão máxima);
- velocidade de interceptação;
- altitude de interceptação (relativa ao alvo);
- tática: Uma Curva ou encaudamento;
- distância de cruzamento (DC), na tática Uma Curva;
- distância de tiro (DT) e comprimento da final (CF), na tática encaudamento e
- raio de curvatura (RC).

Situação inicial:

- aeronave do interceptador;
- estado de alerta do interceptador (ALEBAS, ALEVOO)
- base aérea do interceptador, se ALEBAS;
- desvio em relação à atmosfera padrão ( $\Delta ISA$ );
- posição (x, y) do interceptador (se ALEVOO) e do alvo;
- rumo do interceptador (se ALEVOO) e do alvo;
- velocidade do interceptador (se ALEVOO) e do alvo e
- altitude do interceptador (se ALEVOO) e do alvo.

Restrições:

- quantidade de combustível;
- limite geográfico (no plano horizontal e no vertical);
- posição do sol e
- armamento disponível (ALASCA ou outro).

### B. Saídas de dados

As saídas do programa apresentam ao usuário o desenvolvimento da interceptação. Informa o valor dos parâmetros de desempenho e a viabilidade da interceptação de acordo com as restrições pré-fixadas. As saídas principais são:

- Gráficos da interceptação:
  - tática;
  - perfil e
  - tridimensional com animação das trajetórias.
- Informações:
  - ACP de interceptação;
  - tempo para interceptação (*time-to-go*);
  - tempo total (com o recolhimento);
  - distância percorrida para a interceptação;
  - distância total (com o recolhimento) e
  - combustível gasto.
- Tabela AO/Range e o ACP encontrado
- Viabilidade:
  - segundo o desempenho e geometria e
  - segundo as restrições.

### C. Banco de dados

Há um banco de dados, baseado em arquivo texto, que permite ao usuário a inserção e modificação dos parâmetros que desejar, para adaptá-lo a uma situação específica. O banco de dados se divide em duas partes: banco de dados de aeronaves e banco de dados de bases aéreas. O primeiro específica para as aeronaves os parâmetros que afetam o desempenho:

- modelo do avião;
- peso vazio;
- peso máximo de combustível;
- polar de arrasto ( $C_{D0}$  e K);
- tipo de motorização (jato ou hélice);
- tração (jato) ou potência (hélice) ao nível do mar;
- consumo específico (SFC);
- velocidade máxima;
- velocidade de *stall*;
- velocidade de cruzeiro;
- teto de serviço;
- razão de descida (RD) e
- tempo de espera.

As aeronaves interceptadores inseridas e no banco de dados foram o Super Tucano, AMX, F5-E e A-4.

O banco de dados de bases aéreas especifica as bases aéreas que se localizam na região próxima, que podem ser alternativas de recolhimento para a aeronave. Seus dados são:

- nome da base;
- disponibilidade para pouso;
- posição (x, y);
- altitude;
- direção da pista;
- aeronaves disponíveis e
- estado de alerta.

O estado de alerta da base pode ser tanto ALEBAS como ALEVOO. Este último, apesar de não caracterizar uma base em solo, serve para se definir uma posição no espaço onde aeronaves estão realizando um alerta em vôo.

### D. Estrutura do programa desenvolvido

O programa foi estruturado em níveis de abstração. O nível 1 é o mais alto nível, onde se observam apenas as entradas e saídas. O nível 2 é intermediário e o nível 3 apresenta uma estrutura de mais baixo nível, onde se encontram os módulos com funções mais específicas.

A Fig. 4 mostra a estrutura de alto nível de abstração do programa.

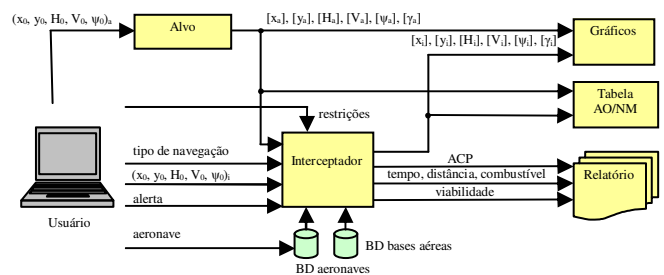


Fig. 4. Diagrama do nível 1.

Na Fig. 4 mostra-se um módulo de cálculo de trajetória do alvo, um módulo do interceptador, um gerador de gráficos e

um de tabela AO/Range, que utiliza os dados de trajetória gerado pelo alvo e pelo interceptador.

A Fig. 5 mostra o módulo do interceptador que é o bloco de maior complexidade existente no nível 2.

Observa-se na arquitetura apresentada que os módulos são sequenciais. Os vetores de trajetória da aeronave são passadas de cada módulo para seu sucessor, que inserem seus novos elementos. O mesmo é feito com o tempo, distância e combustível consumido, que são incrementados a cada módulo.

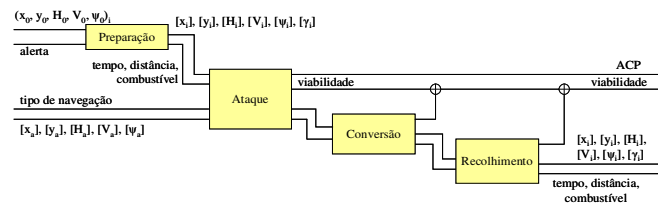


Fig. 5. Diagrama do nível 2.

Os problemas de viabilidade verificados em cada módulo são somados para constituir um relatório geral da viabilidade, indicando se todas as restrições foram atendidas.

No nível 3 de abstração aparecem funções correspondentes a cada fase de tática e de perfil.

## VI. SIMULAÇÃO DA INTERCEPTAÇÃO

Apresenta-se um caso em que se utiliza o Super Tucano, uma aeronave subsônica a hélice, desempenhando uma interceptação com perfil PPS e tática Uma Curva. O interceptador parte de uma base ao nível do mar e acelera a uma velocidade de 150 knots para interceptar um alvo que vem em rumo contrário, a uma velocidade de 100 knots e altitude de 5.000 pés. O Super Tucano carrega armamento *all-aspect* e 1.000 lb de combustível.

A Fig. 6 mostra a tática da interceptação simulada. A linha azul representa o interceptador, a vermelha o alvo e a marca verde representa a base. A linha tracejada indica o recolhimento da aeronave à base após a interceptação. Nota-se que a opção neste caso foi voltar à mesma base de origem.

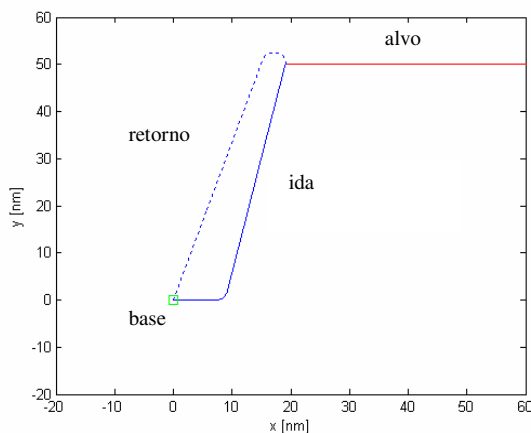


Fig. 6. Tática simulada.

A Fig. 7 combina o perfil e a tática em uma ilustração tridimensional da interceptação, que pode ser visualizada em tempo real pelo operador de defesa aérea à medida que a interceptação se processa.

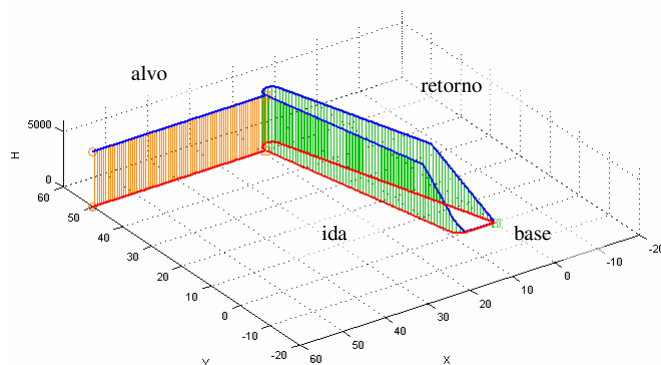


Fig. 7: Ilustração tridimensional da interceptação.

O relatório da simulação forneceu os seguintes resultados:

- tempo total da missão: 771 s;
- distância total percorrida: 119 MN;
- tempo para interceptação: 391 s;
- distância para interceptação: 59 MN;
- ACP de interceptação: 102° e
- consumo de combustível: 83 lb;
- viabilidade: possível em todos os quesitos relativos ao combustível, geometria, armamento, posição do sol, geografia e desempenho.

## VII. COMENTÁRIOS FINAIS

Apresentou-se um programa de cálculo e simulação de um processo de interceptação que leva em consideração as várias componentes do cenário em que irá ocorrer a missão de interceptação.

A utilização do programa desenvolvido pode testar várias condições de interceptação e auxiliar o controlador de defesa aérea decidir quais os melhores meios a serem empregados em um processo de interceptação. Pode-se ainda utilizar o sistema desenvolvido no treinamento de controladores de defesa aérea e no desenvolvimento de sistemas mais avançados para o auxílio na tomada de decisões em operações de defesa aérea.

## AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao Maj. Av. Bublitz do ICEA/DECEA pelo apoio prestado na realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] Lei 9.614 - Tiro de Destruição ([http://www.fab.mil.br/imprensa/Noticias/lei-abate/3007\\_abate.htm](http://www.fab.mil.br/imprensa/Noticias/lei-abate/3007_abate.htm)), acessado em 30/06/2006.
- [2] J. C. da C. Davison. *Estudo da técnica de Interceptação de Aeronaves em um Cenário de Defesa Aérea*. 2007. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [3] USVAF Combat Training ([http://www.x-plane.org/home/Eagle21/USVAF/DCS\\_CTL\\_200503-1.doc](http://www.x-plane.org/home/Eagle21/USVAF/DCS_CTL_200503-1.doc)), – acessado em 20/06/2006.
- [4] Air Combat website (<http://www.sci.fi/~fta/acintro.htm>), acessado em 20/06/2006.
- [5] Advanced Fighter Tactics Introduction website (<http://www.voodoo.cz/falcon/AFT.html>), acessado em 20/06/2005.