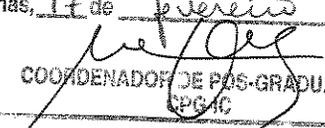


o exemplar corresponde à redação final da
Tese/Dissertação devidamente corrigida e defendida
por: Alexandre Alves dos Santos
e aprovada pela Banca Examinadora.
Campinas, 17 de fevereiro de 2007

COORDENADOR DE PÓS-GRADUAÇÃO
CPG/IC

Inferência Abdutiva na Avaliação de Ameaças
na Defesa Aeroespacial
Alexandre Alves dos Santos
Dissertação de Mestrado

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Inferência Abdutiva na Avaliação de Ameaças na Defesa Aeroespacial

Alexandre Alves dos Santos¹

Dezembro de 2003

Banca Examinadora:

- Prof. Dr. Jacques Wainer
Instituto de Computação/UNICAMP (Orientador)
- Prof. Dr. Emmanuel Piseces Lopes Passos
Departamento de Engenharia Elétrica/PUC-Rio
- Prof. Dr. Siome Klein Goldenstein
Instituto de Computação/UNICAMP
- Prof^ª. Dr^ª. Ariadne M. B. Rizzoni Carvalho
Instituto de Computação/UNICAMP

¹Trabalho com suporte parcial do Ministério da Defesa

UNIDADE CC
Nº CHAMADA UNICAMP
Sa59i
V _____ EX _____
TOMBO BC/ 577-99
PROC 16-127-04
C _____ D d
PREÇO 12,00
DATA 17-10-04 2004
Nº CPD _____

CM00196186-1

BIBID 316151

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IMECC DA UNICAMP**

Santos, Alexandre Alves dos
Sa59i Inferência abduativa na avaliação de ameaças na defesa
aeroespacial /Alexandre Alves dos Santos -- Campinas, [S.P. :s.n.],
2003.

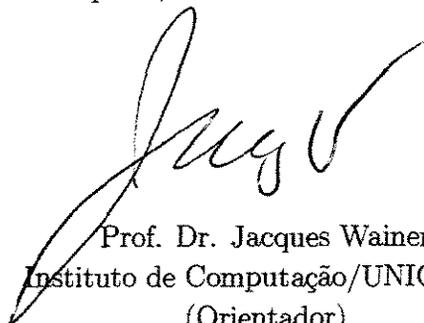
Orientador : Jacques Wainer.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,
Instituto de Computação.

1.Inteligência artificial. 2.Forças armadas. 3.Inferência.
I. Wainer, Jacques. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto
de Computação. III. Título.

Inferência Abdutiva na Avaliação de Ameaças na Defesa Aeroespacial

Este exemplar corresponde à redação final da
Dissertação devidamente corrigida e defendida
por Alexandre Alves dos Santos e aprovada
pela Banca Examinadora.

Campinas, 17 de Dezembro de 2003.

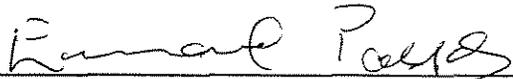


Prof. Dr. Jacques Wainer
Instituto de Computação/UNICAMP
(Orientador)

Dissertação apresentada ao Instituto de Com-
putação, UNICAMP, como requisito parcial para
a obtenção do título de Mestre em Ciência da
Computação.

TERMO DE APROVAÇÃO

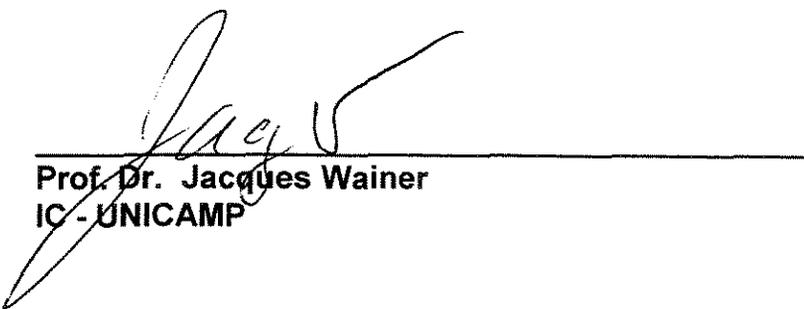
Tese defendida e aprovada em 17 de dezembro de 2003, pela Banca examinadora composta pelos Professores Doutores:



Prof. Dr. Emmanuel Piseques Lopes Passos
IME – PUC-RJ



Prof. Dr. Siome Klein Goldenstein
IC - UNICAMP



Prof. Dr. Jacques Wainer
IC - UNICAMP

Resumo

O processo de fusão de dados de múltiplos sensores é dividido em etapas. Uma delas é a avaliação de ameaças geradas por uma ou mais entidades em determinado ambiente. Esta etapa normalmente requer técnicas de inteligência artificial para obter inferências sobre as informações oriundas dos sensores. Neste contexto, a técnica chamada de inferência abdutiva, que pode ser utilizada na solução de problemas de diagnóstico através do relacionamento causal entre sintomas e desordens, é usada como método de inferência no problema de defesa aeroespacial através do relacionamento causal entre aeronaves, armamentos e alvos.

Este trabalho apresenta um modelo de solução para o problema de avaliação de ameaças na defesa aeroespacial utilizando a técnica da inferência abdutiva em um contexto de fusão de dados de múltiplos sensores. A modelagem emprega informações de fabricantes de armamentos e aeronaves, da inteligência militar, e de instalações de importância para o país em um esforço de guerra. A lógica abdutiva foi utilizada para especificar possíveis alvos de aeronaves detectadas, identificadas e classificadas em um sistema de fusão de dados. A seletividade destes alvos diminui vulnerabilidades como o uso do radar de defesa antiaérea nos pontos não atacados e facilita as tomadas de decisão. Os resultados mostram que a lógica abdutiva constitui um método eficiente para a solução deste tipo de problema.

Abstract

The multisensor data fusion process is divided in stages. One of them is the evaluation of threats created by one or more entities in a certain environment. This stage usually requires artificial intelligence techniques to achieve inferences from the sensors. In this context, the technique called abductive inference, that can be used in the solution of diagnostic problems through the causal relationship between symptoms and disorders, is used as the method of inference in the airspace defense problem through the causal relationship among aircrafts, weapons and targets.

This work presents a solution model for the airspace defense threats evaluation problem using abductive inference in a multisensor data fusion context. This modeling uses information from weapons and aircraft manufacturers, military intelligence and important country locations in a war situation. Abductive logic was used to specify possible targets for detected, identified and classified enemy aircrafts in a data fusion system. Identifying these targets can eliminate vulnerabilities such as using air defense radars in non-target locations and providing assistance to decision-making processes. Results show that abductive inference is an efficient method for the solution proposed.

Agradecimentos

Inicialmente agradeço a Deus, pela minha saúde, pela minha família, pela oportunidade de estudar e pelas pessoas que encontro no trem da minha vida.

Ao meu professor orientador, Dr. Jacques Wainer, pela orientação segura e entusiasmada, e pela compreensão em relação às minhas limitações e capacidades. Obrigado pelos ensinamentos e pelos meus novos horizontes.

A minha mulher Mauren, pelo amor, companheirismo e coragem para decidir largar importantes oportunidades profissionais para me acompanhar para Campinas. Parabéns pelo seu mestrado e obrigado pelo herdeiro para 2004.

Aos meus amados pais Victor e Elcenir, verdadeiros “Porto Seguro” das tempestades da minha vida. São meu apoio, minha orientação e minha maior torcida.

A meu irmão Arthur e toda minha imensa família, das minhas avós Juracy de 97 anos e Idalina, ao Arthur Leonardo de 1 ano, pela força positiva neste período.

Ao meu sogro Augusto César e a família da minha mulher pelo apoio e torcida constantes.

Especial agradecimento aos amigos Evandro, Fernando, Gregório, Cândida, e Silvana que me ensinaram, suportaram e apoiaram em vários momentos deste curso. Maravilhosas pessoas de lugares distantes deste maravilhoso País.

Aos professores do IC, Pedro Rezende, Neucimar, Edmundo, Claudia Bauzer e Cortes, pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Cap Saavedra, da Escola de Artilharia de Costa e Antiaérea, pelo profissionalismo, ética e companheirismo no fornecimento de informações para a realização deste trabalho.

Ao pessoal da secretaria do IC, em especial a Vera, que coordena toda nossa burocracia.

Àquelas pessoas que trabalham no anonimato para que possamos estudar, como o eletricitista Adilson, o porteiro Nelson, a copeira, as faxineiras, seguranças e todos os que silentes trabalham por nós.

A UNICAMP e ao IC pelos recursos disponibilizados para nosso estudo. Recursos estes que somados ao seu quadro de pessoal a tornam uma Universidade de reconhecida excelência.

A todos aqueles que torceram por mim e pela conclusão deste trabalho.

Sumário

Resumo	vii
Abstract	ix
Agradecimentos	xi
1 Introdução	1
1.1 Trabalhos Correlatos	2
1.1.1 Fusão de Dados de Múltiplos Sensores	2
1.1.2 Inferência Abdutiva	4
1.1.3 Defesa Aeroespacial	5
1.2 Descrição do Problema	6
2 Fundamentos Teóricos	9
2.1 Fusão de Dados de Múltiplos Sensores	9
2.1.1 Vantagens do Uso de Múltiplos Sensores	10
2.1.2 Aplicações Militares	10
2.1.3 Aplicações Não-Militares	12
2.1.4 Arquiteturas de Processamento	12
2.1.5 Modelo JDL de Fusão de Dados	14
2.1.6 Exemplo	17
2.2 Inferência Abdutiva	18
2.2.1 Abdução e Lógica	19
2.2.2 Inferência Abdutiva na Solução de Problemas de Diagnóstico	20
2.2.3 Modelo Associativo de Inferência Abdutiva	21
2.3 Defesa Aeroespacial	26
2.3.1 Identificação de Aeronaves	27
2.3.2 Sistemas de Armas	29

3	Modelagem	33
3.1	Modelagem Com Supremacia Aérea	34
3.2	Modelagem Sem Supremacia Aérea	38
3.3	Modelagem Com Incerteza na Identificação da Aeronave	39
4	Aplicações	41
4.1	Construção da Rede Causal	41
4.2	Processamento da Aplicação Principal	44
4.2.1	Filtros	47
4.3	Planejador	48
5	Implementação e Resultados	51
5.1	Implementação	51
5.2	Exemplo de Avaliação de Ameaças	55
5.2.1	Análise dos Resultados	57
5.3	Exemplo de uso do Planejador	58
5.3.1	Análise dos Resultados	60
<hr/>		
6	Conclusões e Extensões	63
6.1	Trabalhos Futuros	64
	Bibliografia	66

Lista de Tabelas

4.1	Dados do manual de planejamento para avaliação da força	44
4.2	Dados do <i>F5E Tiger</i> no arquivo de aeronaves	45
4.3	Dados da <i>BAFG</i> no arquivo de armamentos	46
4.4	Dados de uma pista de pouso no arquivo de aeródromos	46
4.5	Dados dos alvos no arquivo de alvos	47

Lista de Figuras

2.1	Fusão ao nível de dados brutos	13
2.2	Fusão ao nível de vetores característicos	14
2.3	Fusão ao nível de inferências preliminares	15
2.4	Processo JDL de fusão de dados de múltiplos sensores	16
2.5	Ilustração de uma bateria de artilharia em posição	17
2.6	Ciclo de <i>hipotetização</i> e teste	21
2.7	Exemplo de rede associativa causal	22
2.8	Rede causal de um problema de diagnóstico	23
2.9	Um problema de camadas	24
2.10	Identificação de aeronave através do HRR	28
2.11	Técnica de ataque de ângulo de mergulho	30
2.12	Técnica de ataque de vôo rasante	30
3.1	Rede causal com atributos específicos do problema de defesa aeroespacial	34
3.2	Relacionamento entre aeródromos e aeronaves	36
4.1	Dados de manual do Mirage III	42
4.2	Formação do conjunto M, das manifestações	43
4.3	Formação do conjunto S, das entidades intermediárias	43
4.4	Formação do conjunto D, das desordens	43
4.5	Rede causal da defesa aeroespacial	45
4.6	Rede causal utilizada para planeamento	48
5.1	Matriz utilizada para o processamento	52
5.2	Processamento da detecção do Mirage III	53
5.3	Processamento da detecção do F5	54
5.4	Descrição dos alvos	55
5.5	Aeronaves pertencentes à força invasora	56
5.6	Armamentos e alvos associados	57
5.7	Descrição dos aeródromos com as aeronaves aptas a operar	58
5.8	Entrada com o número de aviões a ser simulado	59

5.9	Entrada com o modelo de aeronave a ser simulado	59
5.10	Quadro que permite o OU de aeronaves	60
5.11	Quadro para atualização das coordenadas da aeronave	60
5.12	Filtragem através das condições de luminosidade	61
5.13	Lista com os alvos considerados plausíveis	61
5.14	Entrada para a escolha do alvo	61
5.15	Confirmação do alvo escolhido	62
5.16	Relação de aeródromos e aeronaves para o ataque	62

Capítulo 1

Introdução

A evolução dos recursos tecnológicos tem tornado comum o uso de várias fontes de informação com a finalidade de obter dados mais precisos de uma mesma entidade ou objeto. Entre estes recursos tecnológicos estão sensores como os radares, os sonares, os ecobatímetros, os satélites, e outros, por meio dos quais se localizam acidentes geográficos, alvos inimigos, ou se identificam doenças.

O crescente número de informações oriundas destes sensores associado ao dinamismo computacional levou ao surgimento da área de fusão de dados de múltiplos sensores, visando processar estas informações e apresentar como resultado uma inferência. O trabalho deste processamento foi modelado e passou a ser dividido em fases ou etapas de identificação, de associação, de avaliação das ameaças, e de refinamento do processo, que são mostradas no capítulo 2. A etapa de avaliação das ameaças, tópico do estudo, normalmente usa técnicas de inteligência artificial para a realização da inferência desejada.

O tema de fusão de dados foi, e ainda tem sido, bastante explorado com objetivos militares visto os vultosos investimentos do Departamento de Defesa americano (DoD). Além disso, diversas aplicações não-militares têm sido realizadas com os conceitos e projetos originalmente desenvolvidos para o campo militar.

A proposta de estudo desta dissertação é o conhecimento da aplicação da inteligência artificial na fusão de dados de múltiplos sensores em contextos militares. A busca de temas militares que utilizam sensores conduziu o trabalho para o tema da defesa aeroespacial, área repleta de sistemas que empregam sensores. A defesa aeroespacial é uma área cuja natureza da ameaça envolve um grande espaço geográfico, um curto tempo de resposta, e exige uma ação coordenada de todos os meios de defesa. Ela abrange o emprego de meios heterogêneos subordinados a diferentes órgãos governamentais, o que requer uma organização sistêmica a fim de prover a defesa necessária com o mínimo de dispêndio e o máximo de eficácia [EME, 2001].

Existem diversas técnicas de inteligência artificial que podem ser utilizadas para obter

inferências em um processo de fusão de dados, como redes neurais, lógica fuzzy e redes bayesianas. A escolha da técnica é determinada pela aplicação em que será utilizada [Hall and Llinas, 1997]. Assim, neste trabalho é utilizada a técnica da inferência abdutiva para avaliação de possíveis ameaças em um sistema de defesa aeroespacial. A mesma técnica é utilizada também no estudo do planejamento de um ataque aéreo, considerando as informações disponíveis da inteligência militar.

A estrutura desta dissertação é a seguinte: nas demais seções deste capítulo são apresentados trabalhos relacionados com os temas da dissertação e a descrição do problema estudado. No capítulo 2 são vistos os fundamentos teóricos dos três principais assuntos do trabalho, a saber: fusão de dados de múltiplos sensores, inferência abdutiva e defesa aeroespacial. No capítulo 3 é apresentada a modelagem da inferência abdutiva para o problema de defesa aeroespacial. No capítulo 4 é feita a integração dos assuntos, apresentando como a inferência abdutiva pode ser aplicada no contexto de fusão de dados de múltiplos sensores para a avaliação da ameaça em um cenário de defesa aeroespacial. No capítulo 5 é feita a apresentação da implementação e a análise dos resultados dos trabalhos computacionais realizados. Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas conclusões e propostas para trabalhos futuros.

1.1 Trabalhos Correlatos

Esta seção apresenta uma revisão de trabalhos publicados que envolvem os tópicos da dissertação e que auxiliaram na realização deste estudo.

1.1.1 Fusão de Dados de Múltiplos Sensores

Diversas pesquisas e publicações têm sido feitas nas áreas de detecção, acompanhamento, reconhecimento e classificação de alvos, de vigilância oceânica, de sistemas de defesa terra-ar e ar-ar, e de detecção e destruição de mísseis balísticos, entre outros. A fusão de dados é assunto presente em várias publicações, entre elas as citadas a seguir.

David L. Hall e James Llinas, publicaram o artigo *An Introduction to Multisensor Data Fusion*, [Hall and Llinas, 1997]. Nele os autores apresentam um tutorial do campo de fusão de dados. O assunto é introduzido mostrando áreas de aplicação tanto no campo militar como no não-militar. São exploradas as arquiteturas e o processamento do modelo mais empregado, do *Joint Directors of Laboratories Data Fusion Working Group*, (JDL). Três arquiteturas são apresentadas. Cada uma delas adaptando-se às condições de observação da entidade, aos tipos de sensores, e aos recursos de processamento disponíveis. O artigo trata ainda de técnicas de raciocínio automático que podem ser empregadas nas etapas do modelo JDL, esquemas de representação do conhecimento, processos au-

tomáticos de inferência, e esquemas de controle para a implementação do processo de raciocínio. Finalizando, é feita uma avaliação do estado-da-arte mostrando a evolução alcançada e implementada até a publicação do artigo e as limitações e desafios a serem dominados.

O modelo JDL de fusão de dados foi revisto em 1998 com o objetivo de facilitar o entendimento e a comunicação entre projetistas, engenheiros, pesquisadores e usuários. Alan N. Steinberg, membro do *U.S. JDL Data Fusion Group*, e Christopher L. Bowman publicaram em [Steinberg et al., 1998] a definição de fusão de dados que tem sido considerada a mais precisa e concisa:

Fusão de dados é o processo de combinação de dados ou informações para estimar ou prever estados de uma entidade.

Frequentemente o objetivo é estimar ou prever o estado físico de entidades: sua identidade, atributos, atividades, localização, e condições cinemáticas passadas, presentes e futuras. Adicionalmente foi realizada a revisão das etapas do processo de fusão do modelo JDL. Os objetivos desta revisão foram fornecer uma categorização útil para representação lógica dos diferentes tipos de problemas, e manter o grau de consistência em relação às terminologias empregadas.

O livro *Handbook of Multisensor Data Fusion*, [Hall and Llinas, 2001], publicado em 2001, além de fornecer uma visão global da área de fusão de dados apresenta detalhadamente cada etapa dos procedimentos para a efetivação do processo de fusão. Dividido em 26 capítulos, é um dos mais completos documentos publicados sobre o tema. Além dos tópicos vistos em [Hall and Llinas, 1997] e em [Steinberg et al., 1998] são apresentados métodos de associação e rastreamento de alvos, algoritmos de associação de dados em rastreamento de múltiplos alvos, sistemas de engenharia para implementação de sistemas de fusão de dados e exemplos.

O artigo [Tocantins and Hemerly, 2000] é um exemplo de aplicação dos conceitos de fusão de dados apresentados em [Hall and Llinas, 1997], e em [Steinberg et al., 1998]. Claudia Tocantins e Andrea Hemerly propõem um sistema integrado de vigilância territorial baseado em fusão de dados de múltiplos sensores e no emprego do modelo JDL. A aplicação das autoras consiste de um ambiente operacional único no qual sensoriamento remoto (processamento de imagens), análise geográfica e sistemas de raciocínio são integrados e provêm a um analista, de posse de um conjunto variado e volumoso de dados, suporte no entendimento da situação e apoio à tomada de decisões. Elas exemplificam a aplicação através de um estudo de caso de identificação, localização e classificação de atividades de extração mineral ilegal.

1.1.2 Inferência Abdutiva

A técnica de raciocínio oriunda da inteligência artificial é determinada pela aplicação. Nesta dissertação é utilizada a técnica da inferência abdutiva. Para conhecer seus conceitos e suas aplicações foram destacadas algumas publicações.

James A. Reggia em *A Formal Model of Diagnostic Inference*, [Reggia et al., 1985] formaliza a base teórica para o modelo de problemas de diagnóstico baseado na generalização do problema de cobertura de conjuntos [Cormen et al., 2001]. O modelo proposto por Reggia nesta publicação formaliza os conceitos das seguintes questões:

1. Se um conjunto de uma ou mais desordens são suficientes para explicar um conjunto de manifestações presentes;
2. O que é uma solução para um problema de diagnóstico; e
3. Como gerar todas as explicações possíveis na solução de um problema de diagnóstico.

O modelo de Reggia oferece uma visão similar as características das soluções plausíveis do diagnóstico humano para o caso de múltiplas desordens, assim como tem servido de base teórica para sistemas especialistas para solução de problemas de diagnóstico. É um modelo que considera a existência das camadas de manifestações e de desordens.

Uma extensão do modelo proposto em [Reggia et al., 1985] para redes semânticas de múltiplas camadas foi publicado por Yuan Penn e James A. Reggia, no livro *Abductive Inference Models for Diagnostic Problem-Solving*, [Penn and Reggia, 1990]. Nesta publicação são apresentados modelos computacionais para a solução de problemas de diagnóstico, como o modelo abduativo baseado em associação, utilizado nesta dissertação. A formalização do problema de diagnóstico através da teoria da cobertura parcimoniosa aplicada em cadeias causais é vista de modo similar a teoria que fornece a fundamentação para o problema da avaliação de ameaças na defesa aeroespacial.

Em 2000, Chitta Baral publicou *Abductive Reasoning Through Filtering*, [Baral, 2000], mostrando que o raciocínio abduativo geralmente é usado como método para explicar observações passadas mas que também pode ser usado como raciocínio futuro. Nesta publicação o autor relaciona a aquisição de novas conclusões com as inferências obtidas da base de conhecimento existente através da abdução, e apresenta uma teoria para o uso de filtragens no raciocínio abduativo.

O fator probabilístico é muitas vezes associado ao raciocínio abduativo. De acordo com Josephson, em *On the Logical Form of Abduction*, [Josephson, 1990], esta associação depende dos seguintes fatores:

- O quanto a explicação dada é “melhor” que as explicações alternativas;

- O quanto a explicação é boa sem considerar as explicações alternativas (ela pode não ser suficientemente plausível);
- Qual a avaliação da confiabilidade dos dados existentes; e
- Quanta confiança existe de que todas as explicações foram consideradas.

O artigo cita que o teorema de Bayes pode ser visto como um modo de descrever com simplicidade o peso das hipóteses plausíveis. Entretanto é necessário que exista confiabilidade no conhecimento das probabilidades disponíveis. O autor considera que o uso de probabilidades imprecisas, estimadas ou parciais pode conduzir a obtenção de hipóteses razoáveis, entretanto menos plausíveis do que a hipótese que deveria ser considerada como solução.

Outro artigo publicado que considera o uso de probabilidades no raciocínio abduutivo é o [Kumar and Venkataram, 1996], *Probabilistic Extension to Realistic Abductive Reasoning Model*. Diferentemente do raciocínio bayesiano, Kumar e Ventakaram criaram 3 medidas de probabilidade que são computadas na avaliação da plausibilidade de uma hipótese. O objetivo do modelo criado pelos autores é adicionar características de probabilidade a solução de problemas de diagnóstico e explorar as explicações em ordem de plausibilidade.

1.1.3 Defesa Aeroespacial

A maioria das publicações consultadas para o tema defesa aeroespacial é oriunda das forças armadas, do Departamento de Defesa americano, e da internet.

Em [DOD, 2000], o Departamento de Defesa americano apresenta os objetivos de pesquisa para os 3 anos seguintes ao ano de 2000. Este documento, *Defense Technology Objectives for Joint Warfighting Science and Technology Plan*, especifica os objetivos, as necessidades, custos, e os desafios dos projetos em andamento nos centros militares americanos de pesquisa. As pesquisas em identificação de combate (*Combat Identification*) e identificação precisa de alvos (*Precision target Identification*) são os temas de interesse para esta dissertação.

Outra publicação que estuda a questão de identificação de entidades amigas e inimigas é *Who Goes There: Friend or Foe?*, [Congress, 1993]. O objetivo deste documento é apresentar as pesquisas para a correta e precisa identificação de alvos. Um dos esforços destes estudos é descobrir como evitar o fratricídio de aeronaves amigas. Este assunto também é tópico de *Missile Defense News*, [Times, 2003], que apresenta documentários sobre sucessos e falhas de combates recentes.

Por último, os conceitos de defesa aeroespacial e da organização sistêmica requerida para o funcionamento da defesa aérea e antiaérea estão apresentados em [EME, 2001].

Este documento, juntamente com [EsACosAAe, 2001], mostra os conceitos do planejamento de operações aéreas, permite o raciocínio das técnicas e táticas de operações militares com fins de defesa antiaérea e o conhecimento de materiais como armamentos e aeronaves.

1.2 Descrição do Problema

Segundo [EME, 2001] a finalidade da defesa aeroespacial é assegurar o exercício da soberania no espaço aéreo da nação, impedindo seu uso para a prática de atos hostis ou contrários aos objetivos nacionais, devendo assegurar a proteção no território nacional de pontos vitais selecionados e priorizados como pontos ou áreas sensíveis, em função de sua importância para a sobrevivência nacional e o desenvolvimento de um eventual esforço de guerra.

Estes pontos sensíveis, são deste modo, locais que normalmente são protegidos por algum dispositivo de defesa antiaérea. Devido a sua importância no cenário de guerra são os alvos também desejados pelo inimigo para a destruição.

De um modo geral, na técnica vigente para uso em estado de conflito armado, o dispositivo de reação à uma incursão aérea conduz as unidades de artilharia antiaérea a acionarem seus radares de busca a fim de detectar a incursão em suas zonas de responsabilidade. Ainda que os manuais técnicos apresentem condutas mais hierárquicas, na prática, não é possível fazer a seletividade de quais baterias antiaéreas devam ser acionadas, em virtude da velocidade de uma aeronave moderna frente ao tempo gasto no fluxo das informações que saem de um Centro de Operações Militares (COpM), responsável pela detecção da incursão, até o operador de um dispositivo antiaéreo (canhão, lançador de mísseis, etc), responsável pelo tiro. Em outras palavras, a dificuldade da seletividade está no tempo gasto entre o técnico operador do radar, membro da Aeronáutica, e o responsável pelo gatilho do dispositivo antiaéreo, membro do Exército, normalmente situado a centenas de quilômetros do primeiro.

Quando a artilharia antiaérea se instala no terreno, a fim de proteger estes locais, usa técnicas que variam de acordo com o tipo e a importância do ponto sensível. Independentemente da técnica os sistemas de defesa utilizam-se, entre outras fontes de informações, aquelas oriundas de radares de grande alcance dos Centros de Operações Militares e de radares locais dos próprios sistemas de defesa. Estes radares de defesa aproximada tornam-se vulneráveis quando acionados em virtude da identificação de suas posições através da radiação que emitem. Caso a aeronave incursora seja dotada de sistemas de guerra eletrônica, ela pode disparar um míssil anti-radiação contra o radar local e assim inutilizar aquela posição de tiro antiaéreo.

A proposta do estudo visa avaliar as possíveis ameaças de aeronaves através do uso

da inferência abductiva identificando quais são os alvos de maior plausibilidade de serem atingidos, de acordo com fatores apresentados nos capítulos 2 e 4 como: altura de vôo; quantidade de aeronaves; condições meteorológicas; condições de luminosidade; e tipos de alvo, entre outros. Para isso, foram selecionados dentro de uma região do País aproximadamente 40 alvos, considerados como típicos pontos sensíveis, para serem utilizados como uma amostragem de um cenário de guerra. Tais alvos são descritos por suas coordenadas, pelo tipo de alvo, e pela quantidade de explosivos avaliada como necessária para sua destruição. Neste cenário, aviões de combate são detectados na direção dos pontos sensíveis. As aeronaves, consideradas hostis neste contexto, são modelos que estão em uso em diversas forças aéreas, inclusive na brasileira, facilitando a obtenção de informações sobre as mesmas.

Utilizando-se os conceitos empregados para o estudo da avaliação de ameaças torna-se oportuno um estudo sintético do planejamento para um ataque de uma aeronave a um alvo terrestre. Esta aplicação secundária foi denominada de *Planejador*. No desenvolvimento do *Planejador*, os pontos sensíveis utilizados anteriormente na análise de ameaças passam a ser considerados como alvos. Em outras palavras, o território selecionado no problema anterior, a ser defendido, é considerado território inimigo, e as aeronaves anteriormente relacionadas como inimigas são as aeronaves disponíveis para a realização de ataques. De acordo com o alvo escolhido deseja-se saber quais e quantas aeronaves podem ser utilizadas, e quais os aeródromos indicados para originar o ataque.

Capítulo 2

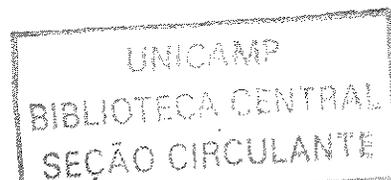
Fundamentos Teóricos

2.1 Fusão de Dados de Múltiplos Sensores

Nos últimos anos recursos tecnológicos, entre eles os sensores, têm disponibilizado um grande número de dados que integrados produzem informações de qualidade e quantidade superiores àquelas produzidas por um único sensor independentemente. A integração de dados não é uma novidade. Humanos e animais usam a habilidade de integrar as informações obtidas pelos sentidos para ajudá-los a sobreviver. Por exemplo, quando um animal não vê outro mas escuta e sente o cheiro característico do seu predador ele sabe da existência do perigo através das informações dadas pelos sentidos. Ou seja, a fusão de dados é naturalmente desenvolvida por humanos e animais para aumentar a precisão sobre os conhecimentos do ambiente e das ameaças.

Enquanto o conceito de fusão de dados não é novo, o surgimento de novos sensores (radares, satélites, sensores embarcados, etc), das avançadas técnicas de processamento, e da evolução do hardware disponível para processamento tornou a fusão de dados em tempo real algo totalmente viável. A mais fundamental caracterização da fusão de dados envolve a transformação hierárquica entre a atividade observada, fornecida por múltiplas fontes como entrada, e uma decisão ou inferência, produzida pelos processos de inferência relativos a localização, caracterização e identificação de uma entidade. O conceito de entidade [Hall and Llinas, 1997] depende da aplicação específica que está sendo considerada, como uma aeronave inimiga em uma aplicação tática de defesa aeroespacial ou a localização e a caracterização de um tumor, em uma aplicação de diagnóstico médico.

O Departamento de Defesa americano (DoD) foi o precursor nos estudos da fusão de dados como é vista na atualidade. Inicialmente com nomenclatura variada e objetivos sobrepostos pelos diferentes pesquisadores e desenvolvedores de sistemas, criou-se em 1986 o *Joint Directors of Laboratories (JDL) Data Fusion Working Group*, atualmente denominado *Data and Information Fusion Group* dentro do *Deputy Director for Research*



and Engineering's Information System Technology Panel do DoD, com o objetivo de unificar terminologias existentes e integrar os grupos de estudo. O resultado desse esforço foi a criação de um modelo de processo e de um dicionário de terminologias (*data fusion lexicon*) inerentes à fusão de dados. Este modelo conhecido como *modelo JDL* propõe-se a ser global, podendo ser utilizado nas mais diferentes áreas de aplicação, o que o transformou no modelo mais largamente empregado para fusão de dados.

2.1.1 Vantagens do Uso de Múltiplos Sensores

Dados resultantes da fusão de dados de múltiplos sensores fornecem várias vantagens [Hall and Llinas, 2001] sobre dados oriundos de um único sensor. Se vários sensores idênticos são utilizados, como por exemplo, radares na identificação de um objeto em movimento, a combinação das observações resultam em uma melhor estimativa da posição e velocidade do alvo. Além disso, ocorre a melhoria da operacionalidade do sistema, devido à possibilidade de um determinado sensor fornecer informações enquanto os demais sensores estão incapacitados, avaliados ou sob interferência inimiga [Benoliel, 1991].

Outra vantagem origina-se na disposição e movimentação dos diversos sensores para melhorar o processo de observação. Por exemplo, dois sensores que medem as direções angulares de um objeto podem detectar a posição de um objeto por triangulação. Além disso, o uso de dois sensores, um movendo em uma direção conhecida em relação ao outro, pode ser empregado para medir a posição e a velocidade instantânea de um objeto em relação a estes sensores.

Uma terceira vantagem é obtida pelo uso de múltiplos sensores para melhorar a observabilidade. Ampliando-se o espectro de informações físicas observáveis pode-se obter resultados mais significativos. Um exemplo clássico [Hall and Llinas, 1997] desta vantagem é o uso combinado do radar pulsante e do sensor de imagem infravermelha, *forward-looking infrared* (FLIR). O primeiro pode determinar com precisão a distância de uma aeronave, mas é limitado para determinar a direção angular, enquanto isso, o FLIR pode determinar com precisão a direção angular, entretanto é incapaz de precisar a distância até o alvo. Estas observações corretamente associadas reduzem a margem de erro na determinação da posição em relação à obtida pelos sensores independentemente.

2.1.2 Aplicações Militares

As aplicações militares [Hall and Llinas, 2001] envolvem a localização, identificação e a caracterização de entidades dinâmicas como emissores, plataformas, armas e unidades militares. Além de objetivar a obtenção destas informações para estratégias de combate um outro resultado bastante desejado é a consecução de inferências de alto nível sobre a situação do inimigo. Dentre estas inferências estão o relacionamento entre as entidades,

o relacionamento entre as entidades e o meio a qual estão inseridas, e as possibilidades de ações do inimigo dentro destes ambientes.

Cada aplicação específica da fusão de dados implica em um conjunto de sensores, de observações desejadas, de inferências e de um conjunto de desafios para a sua efetivação.

Sistemas de vigilância oceânica [Aftergood, 1997] são projetados para detectar, rastrear e identificar alvos no oceano. Exemplos incluem, entre outros, sistemas de guerra anti-submarino e sistemas automatizados para controle de veículos autônomos. Para estes tipos de missão os sensores mais comuns são: radares, sonares, unidades de guerra eletrônica, sistemas de observação dos tráfegos de comunicações, sensores infravermelhos ou radares de abertura sintética (*synthetic aperture radar* SAR). Como visto em [Hall and Llinas, 1997], para cada aplicação existe um conjunto de desafios a serem transpostos para a implementação efetiva. No caso da vigilância oceânica os desafios incluem o grande volume a ser monitorado, a combinação de alvos e sensores, a o complexo ambiente de propagação de sinais, especialmente para os sonares submersos.

Os sistemas de defesa ar-ar ou defesa superfície-ar [Hall and Llinas, 2001] constituem outra aplicação, e são projetados para detectar, rastrear e identificar aeronaves, armas e sensores anti-aeronaves. Tais sistemas são compostos de sensores como radares, geradores de medidas eletrônicas passivas de proteção, sensores de identificação amigo-inimigo (*Identification Friend-Foe* IFF), sensores de imagens optrônicos, e postos de vigilância por observação humana ou eletrônica. Estes sistemas ainda podem ser utilizados para a proteção antiaérea, escolha de aeronaves para ataques, prioridades de alvos, planejamento de rotas de ataque, e outras atividades.

Desafios apresentados a estes sistemas são descritos como contra-medidas do inimigo para burlar os procedimentos do sistema, a rapidez no processo de tomada de decisões, e o processamento de uma grande quantidade de informações sobre aeronaves e alvos em curto espaço de tempo. Um desafio especial para os sistemas de IFF é a confiabilidade na identificação de aeronaves inimigas, também chamada de identificação não-cooperativa. A proliferação da negociação de sistemas de armas pelo mundo resulta em pouca correlação entre a nacionalidade de origem do armamento e a nacionalidade dos combatentes que usam essas armas.

Outro uso da fusão de dados é o auxílio à inteligência militar dentro do campo de batalha, principalmente na vigilância e nos sistemas de aquisição de alvos que visam detectar e identificar potenciais alvos de superfície [Steinberg et al., 1998]. Exemplos desta aplicação incluem a localização de campos minados e o reconhecimento automático de alvos. O conjunto de sensores empregados para estes fins incluem a vigilância aerotransportada através de SAR, medidas eletrônicas passivas de proteção, reconhecimento fotográfico aéreo, sensores acústicos de superfície, veículos não-tripulados, sensores optrônicos, e sensores infravermelhos. As inferências fundamentais desejadas nesta aplicação

são avaliações da situação do campo de batalha e avaliações das ameaças.

2.1.3 Aplicações Não-Militares

Um outro grupo de aplicação da fusão de dados de múltiplos sensores é o que congrega as comunidades acadêmicas, comerciais e industriais [Hall and Llinas, 2001]. São aplicações que visam a solução de problemas encontrados em robótica, no controle de sistemas manufaturados industriais, no desenvolvimento de projetos de edifícios denominados inteligentes e também, nas aplicações médicas. Assim como nas aplicações militares cada uma destas áreas apresenta um conjunto particular de desafios e de sensores específicos em uso, além de singulares ambientes de implementação.

Diversos sistemas têm sido desenvolvidos para identificar e localizar entidades específicas nestas aplicações. São exemplos de aplicações não-militares: sistemas de vigilância territorial, [Tocantins and Hemerly, 2000], que incluem a monitoração de recursos de agricultura, localização de recursos naturais e monitoração do meio-ambiente; e sistemas de fusão de dados para previsão e monitoração do tempo e de desastres naturais [Wald, 2001b]. Estes sistemas confiam primordialmente em imagens, utilizando-se de sensores multiespectrais. Tais sistemas de processamento são normalmente dominados pelos processamentos automático de imagens. Uma das técnicas frequentemente usada para a fusão de imagens de múltiplos sensores envolve redes neurais adaptativas. Múltiplas imagens são processadas com base na entrada pixel-a-pixel em uma rede neural para a classificação automática do conteúdo da imagem.

Outra área de aplicação, utilizada tanto para aplicações militares e não-militares, é o monitoramento de equipamentos mecânicos complexos [Hall and Llinas, 1997], como turbinas, trens de pouso de helicópteros, ou equipamento de manufatura industrial. Por exemplo, um sistema de monitoramento dinâmico pode ser usado para combinar observações a fim de identificar sintomas de possíveis falhas futuras, como desgastes de engrenagens, desalinhamentos, ou outros comportamentos anômalos. O monitoramento destas condições reduz custos de manutenção, melhora a segurança e a confiabilidade no dispositivo sob análise.

2.1.4 Arquiteturas de Processamento

Existem várias maneiras de realizar o processamento da fusão de dados de múltiplos sensores, denominadas arquiteturas de processamento [Hall and Llinas, 2001]. As mais utilizadas são:

- as que realizam a fusão utilizando os dados diretamente extraídos dos sensores;

- as que representam os dados dos sensores através de vetores característicos e realizam posteriormente a fusão dos vetores;
- a arquitetura na qual o processamento de cada sensor gera uma inferência de alto nível, as quais são combinadas em seguida visando uma única conclusão.

Geralmente a *arquitetura da fusão de dados brutos ou diretamente extraídos* é empregada quando os sensores estão monitorando o mesmo atributo de uma entidade, permitindo a direta combinação de dados, conforme o modelo mostrado na figura 2.1. As técnicas para a fusão nesta arquitetura geralmente envolvem métodos de estimativa clássicos, como filtros de Kalman.

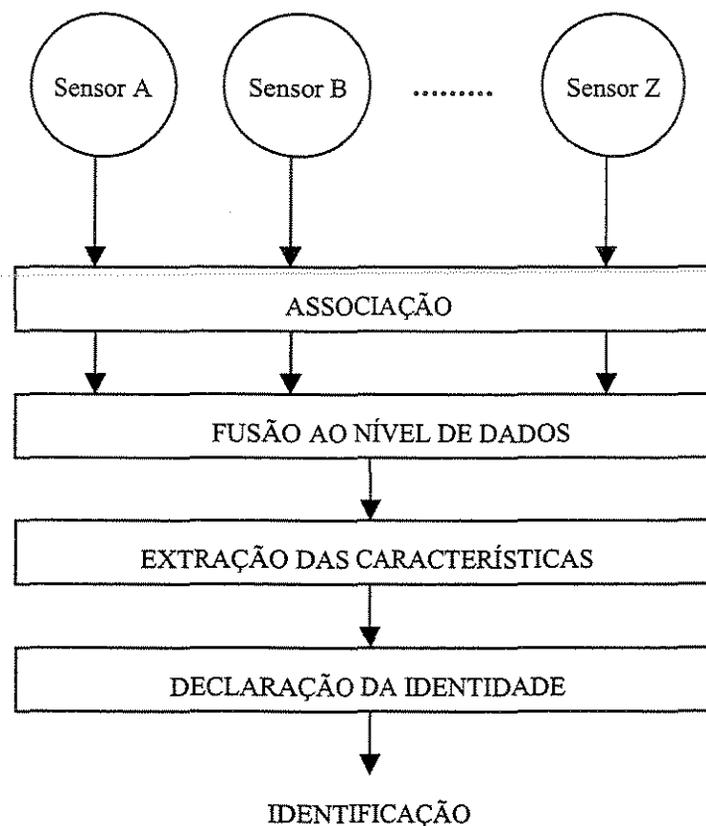


Figura 2.1: Fusão ao nível de dados brutos

No caso de sensores que monitoram diferentes atributos de entidades ou eventos, deve ser utilizada a *arquitetura de fusão ao nível de vetor característico* ou de *arquitetura de fusão ao nível de inferências*, conforme apresentadas nas figuras 2.2 e 2.3, respectivamente.

A fusão ao nível de vetor característico envolve a extração de características que representam a observação dos sensores. Neste caso, elas são combinadas em um vetor

característico único que é a entrada de um sistema de reconhecimento de padrões, como redes neurais ou *clustering*.

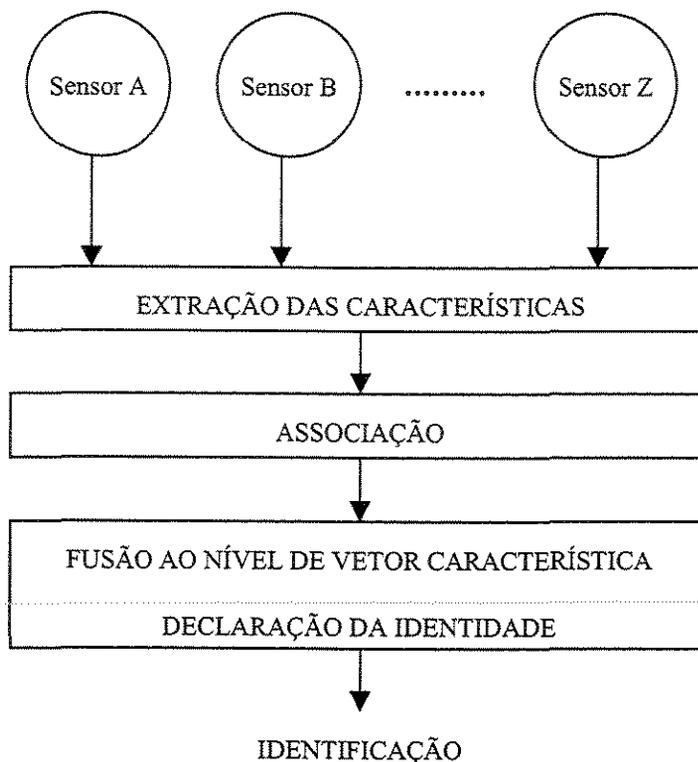


Figura 2.2: Fusão ao nível de vetores característicos

A última é a *arquitetura de fusão a nível de decisão*, que combina as informações dos sensores após terem sido realizadas determinações preliminares individuais de velocidade, localização, e identidade. Exemplos de fusão utilizando este método frequentemente envolvem o uso de métodos de inferência por pesos, inferência Bayesiana ou inferência de Dempster-Shafer.

2.1.5 Modelo JDL de Fusão de Dados

O modelo básico de fusão de dados de múltiplos sensores proposto pelo JDL, funcionalmente orientado, tem sido empregado para o desenvolvimento de aplicações específicas. É um modelo conceitual que divide o processamento dos dados recebidos de múltiplas fontes em quatro fases principais [Steinberg et al., 1998] [Wald, 2001a], ilustradas na figura 2.4 e comentadas a seguir.

- 1ª fase - É atualmente a fase mais desenvolvida e robusta. Basicamente a 1ª fase combina as informações recebidas dos sensores com o objetivo de uma representação

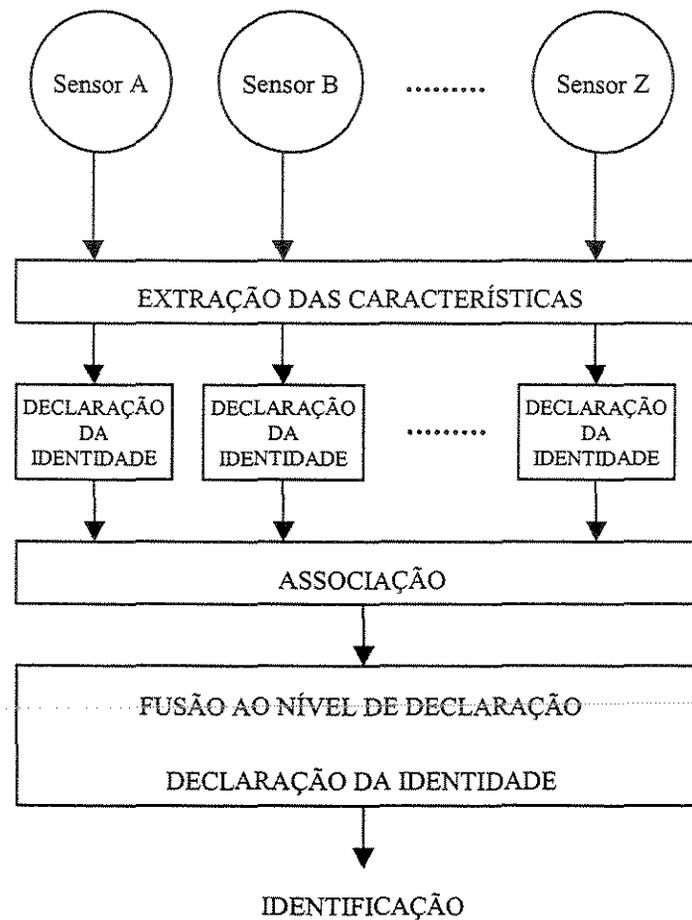


Figura 2.3: Fusão ao nível de inferências preliminares

refinada da entidade. Ela transforma dados dos sensores em um consistente conjunto de unidades e coordenadas, refinando e estendendo no tempo a estimativa cinemática e de posição do objeto.

- 2ª fase - Nesta fase o processo busca desenvolver um relacionamento entre a entidade detectada e outras possíveis entidades ou eventos no contexto do meio em que se encontram. A distribuição de objetos identificados na 1ª fase é examinada com intuito de agregá-los no significado da situação, discutindo a interpretação dos dados de acordo com a analogia da cognição da interpretação humana. Este relacionamento pode ser de proximidade física, de detecção de comunicação entre as entidades, ou de um relacionamento causal que será analisado na fase seguinte.
- 3ª fase - A 3ª fase projeta a situação atual no futuro visando criar inferências relativas às possíveis ameaças que possam ser causadas pela entidade identificada.

Adicionalmente, esta fase objetiva inferências que conduzam a oportunidades de ações ou a identificação de vulnerabilidades no sistema ameaçado. Cabe ressaltar que no campo militar a dificuldade da avaliação de ameaças é aumentada devido à necessidade de considerar o conhecimento sobre a técnica de combate inimiga, o nível de adestramento de pessoal e o material bélico disponível. Assim, deve-se verificar todas as linhas de ações possíveis a fim de determinar o resultado das ameaças produzidas e conseqüentemente a melhor forma de evitá-las ou de se antecipar a elas.

- 4ª fase - Esta fase monitora o processo de fusão de dados como um todo, considerado como um meta-processo. Ela pode fornecer informações em tempo real, identificar informações necessárias para melhorar os produtos das outras fases ou direcionar recursos para melhorar o desempenho dos processamentos.

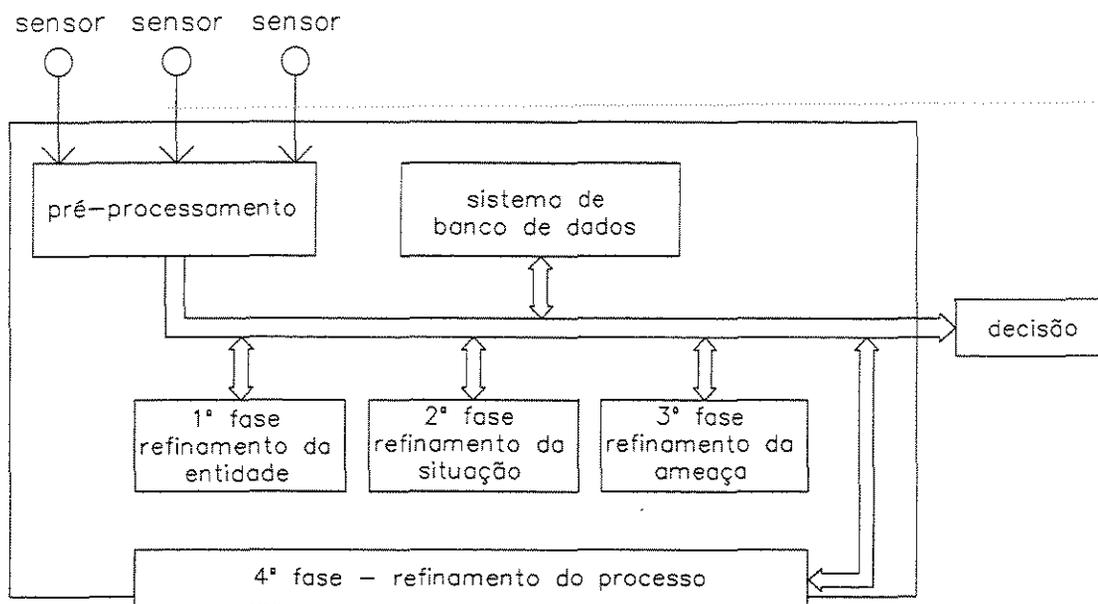


Figura 2.4: Processo JDL de fusão de dados de múltiplos sensores

Duas importantes etapas devem ser ressaltadas pelo suporte que fornecem às quatro fases do processamento da fusão de dados: o pré-processamento, que transforma os dados recebidos nos tipos de dados requeridos na entrada do processo; e o gerenciamento do complexo banco de dados destes sistemas, que fornece suporte ao acesso, arquivamento, compressão, e as demais operações com os variados tipos de dados que podem ser utilizados, como imagens, sinais ou vetores.

Cabe ressaltar que este estudo não objetiva abordar as fases de identificação e classificação da entidade no modelo de fusão de dados, e sim utilizar resultados considerados oriundos destas fases na fase de avaliação de ameaças. A seção 2.3.1 trata sumariamente tópicos relativos a estas etapas.

2.1.6 Exemplo

Um contexto de vigilância territorial similar ao proposto em [Tocantins and Hemerly, 2000] é considerado a seguir. Neste exemplo é descrito um caso representativo de um cenário de aquisição de alvos utilizando o modelo JDL.

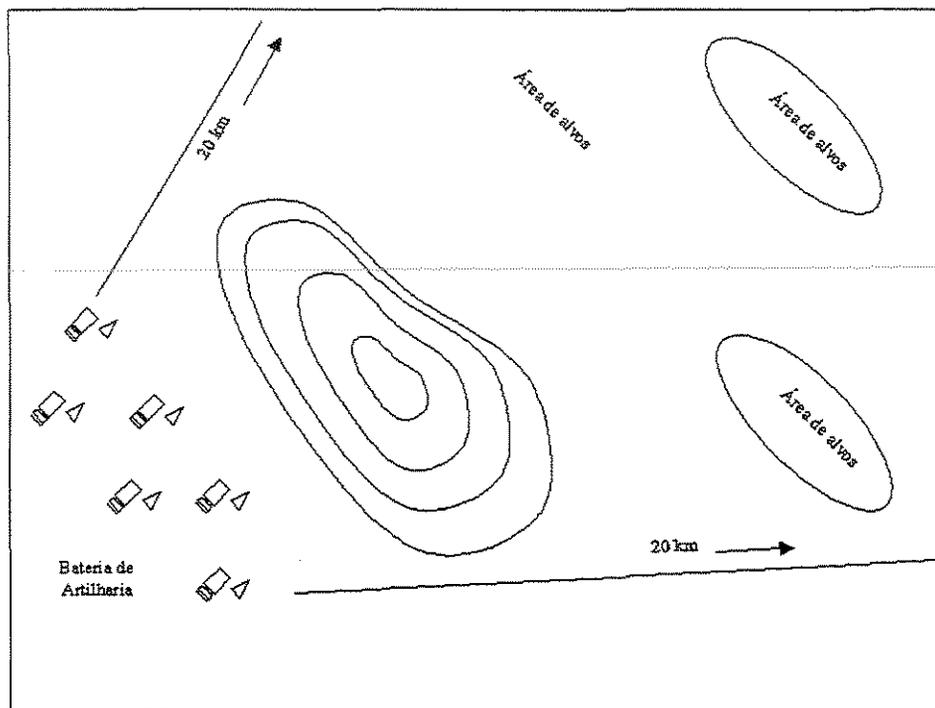


Figura 2.5: Ilustração de uma bateria de artilharia em posição

Efetiva-se na 1ª fase, por exemplo através de processamento de imagens, a identificação de uma entidade como sendo uma viatura militar ao lado de uma peça (canhão) de artilharia. Após esta identificação oriunda da 1ª fase, na fase seguinte, de refinamento do relacionamento entre entidades e entre entidade e o meio ao qual se inserem, pode-se verificar que esta entidade, peça de artilharia mais viatura, está ao lado de outras 5 entidades idênticas, sendo detectado um relacionamento espacial entre elas de afastamento lateral de 50 metros e afastamento frontal de 25 metros (com possíveis margens de erro consideradas). Dentro das técnicas militares, sabe-se que esta configuração de canhões

no terreno é conhecida por ser empregada por baterias de artilharia em posição de tiro. Assim, conhecido que a entidade inicialmente detectada faz parte de uma bateria de artilharia, o processamento pode então, verificar que o espaçamento entre as entidades encontrado no terreno é característico de uma bateria de canhões 155 mm, o que de acordo com os dados prévios da inteligência militar está dentro dos armamentos que o inimigo possui. Então, após a estimativa de situação proveniente da segunda fase, o sistema passa a fase seguinte. Na 3ª fase, o processo projeta no futuro a situação proposta pela fase antecedente, visando criar inferências relativas às possíveis ameaças ou oportunidades de ações. Como é conhecida a forma de emprego deste tipo de arma pode-se chegar a inferência, avaliando a ameaça proporcionada, de que esta bateria pode destruir qualquer alvo em um raio de 20 km, conforme ilustrado na figura 2.5.

Apesar deste exemplo ser meramente ilustrativo do processo JDL de fusão de dados, o contexto militar apresenta as características técnicas e o cenário comum dos campos de batalha.

A 3ª fase do modelo JDL, utiliza uma base de conhecimento para obter uma inferência ou um processo de avaliação deste conhecimento. Existem diversas técnicas de inteligência artificial nas quais tem-se baseado o desenvolvimento de esquemas de raciocínio automático, tais como lógica formal, lógica fuzzy, ou raciocínio baseado em casos. Cada um destes métodos tem um formalismo interno consistente que descreve como é utilizado o conhecimento para a obtenção da conclusão desejada. A combinação dos esquemas de representação do conhecimento e do processo de avaliação ou inferência são fundamentais para a automação do raciocínio.

Como citado anteriormente, a escolha da técnica de inteligência artificial a ser utilizada depende da aplicação em questão. Para o caso proposto neste trabalho, de avaliação de ameaças na defesa aeroespacial, é utilizada a inferência abdutiva. A seção 2.2 apresenta os fundamentos teóricos desta técnica de raciocínio.

2.2 Inferência Abdutiva

O nome abdução é oriundo do termo grego *apagoge*, empregado por Aristóteles como um processo de manipulação de silogismos. O prefixo “*apo*” significa “movimento que leva embora”, sendo a palavra inglesa “abduction” a tradução considerada mais apropriada. Aristóteles tinha como objetivo desta manipulação de silogismos encontrar um processo que procurasse premissas que tornassem uma desejada conclusão verdadeira [Penn and Reggia, 1990]. Segundo Pople, em [Pope and Llinas, 1973], a principal idéia do raciocínio abduutivo é:

O raciocínio da melhor explicação ou da explicação mais plausível para um determinado sintoma ou manifestação.

Outra definição que expõe com clareza o raciocínio abduutivo foi dada por Yun Penn em [Penn and Reggia, 1990], que diz:

Abdução é um tipo de lógica ou raciocínio que gera explicações plausíveis para determinados fatos.

Estas definições demonstram como o raciocínio abduutivo é utilizado diariamente no senso analítico dos seres humanos. Quando um mecânico de automóveis depara-se com um problema em um automóvel, ou seja, uma manifestação ou sintoma, ele realiza um processamento mental de busca das explicações que mostrem o que está ocorrendo no veículo a fim de encontrar a peça defeituosa ou corrigir o problema. É importante notar que o sintoma ou a manifestação do problema mecânico do automóvel é um resultado que está definido previamente e que o objetivo é encontrar a premissa que torne este resultado verdadeiro, tal como Aristóteles queria no seu processo de manipulação de silogismos.

A partir destes conceitos foi desenvolvida a *teoria da cobertura parcimoniosa* em [Reggia et al., 1985], cujo objetivo foi fornecer a fundamentação teórica para o modelo de solução de problemas de diagnóstico. Esta fundamentação teórica formaliza a natureza abduativa do processo de raciocínio diagnóstico, apresentado na subseção 2.2.3.

Inferência abduativa (*abductive inference*), inferência dedutiva e inferência indutiva são os três fundamentos lógicos da pesquisa e do raciocínio científico. Para um melhor entendimento do raciocínio abduutivo a subseção 2.2.1 apresenta exemplos didáticos destas lógicas.

2.2.1 Abdução e Lógica

A comparação entre as lógicas abduativa, indutiva e dedutiva permite visualizar o silogismo inerente a cada uma delas.

O raciocínio dedutivo consiste de uma regra geral, também chamada de premissa maior, e de um caso específico, chamado de premissa menor. Um resultado ou uma conclusão, é então, deduzido a partir destas premissas:

regra geral: Todos as azeitonas do pote são verdes;

caso: Estas azeitonas vieram do pote;

conclusão: Estas azeitonas são verdes!

O raciocínio indutivo, diferentemente do raciocínio dedutivo, possui um resultado e um caso específico, sendo *hipotetizada* a regra geral, ou premissa maior:

caso específico: Estas azeitonas vieram do pote;

resultado: Estas azeitonas são verdes;

regra hipotetizada: Todos as azeitonas do pote são verdes!

O raciocínio abduutivo, ao invés do raciocínio dedutivo e indutivo, busca hipotetizar o caso específico, sendo conhecida a regra geral e o resultado:

regra geral: Todas as azeitonas do pote são verdes;

resultado: Estas azeitonas são verdes;

caso hipotetizado: *Estas azeitonas vieram do pote! (podem até não ter vindo, mas esta é a explicação mais plausível).*

É possível notar nestes exemplos a diferença básica entre a indução e a abdução. Enquanto a primeira hipotetiza a regra geral a segunda hipotetiza o caso específico.

Muitas vezes, mais de uma explanação plausível pode ser encontrada para explicar um determinado resultado do raciocínio abduutivo. Neste caso torna-se necessário um processo que selecione entre as hipóteses existentes aquela mais plausível, visto na subseção 2.2.2.

2.2.2 Inferência Abduativa na Solução de Problemas de Diagnóstico

Um problema diagnóstico é um problema no qual surge um dado conjunto de manifestações ou sintomas e deseja-se então, explicar o porque eles estão presentes, utilizando os conhecimentos do mundo [Penn and Reggia, 1990]. Este tipo de problema pode ser encontrado em dezenas de atividades do dia-a-dia, como nas investigações policiais de um crime, no diagnóstico médico ou no reparo de um problema mecânico ou elétrico de um automóvel.

Diversos estudos [Josephson, 1990] [Pope and Llinas, 1973] [Penn and Reggia, 1990] [Reggia et al., 1985] [Kumar and Venkataram, 1996] mostraram que o raciocínio humano para diagnósticos frequentemente envolve o processo sequencial de: geração de hipóteses, com a formação de explicações candidatas para explicar uma determinada manifestação ou sintoma; atualização destas hipóteses, através da atualização de dados das hipóteses existentes ou criando novas hipóteses baseadas em novas informações; e teste das hipóteses, a fim de eliminar ambiguidades.

Este *ciclo de hipotetização e teste*, mostrado na figura 2.6, é mantido enquanto as hipóteses passam por critérios que funcionam como filtros, até que finalmente restem as hipóteses consideradas explicações plausíveis de um dado sintoma ou manifestação.

É importante notar o funcionamento do raciocínio diagnóstico. Como o diagnosticador gradualmente adquire novas informações sobre o problema, suas hipóteses podem mudar para refletir as novas informações. Por exemplo [Reggia et al., 1985], se um paciente reclamar de uma repentina dor no peito o médico pode inicialmente considerar algo como:

Hipótese H1: "ataque cardíaco, OU embolia pulmonar, OU ..."

Assim que informações adicionais se tornem disponíveis algumas das hipóteses iniciais podem ser descartadas ou outras adicionadas. Se neste exemplo é posteriormente revelado

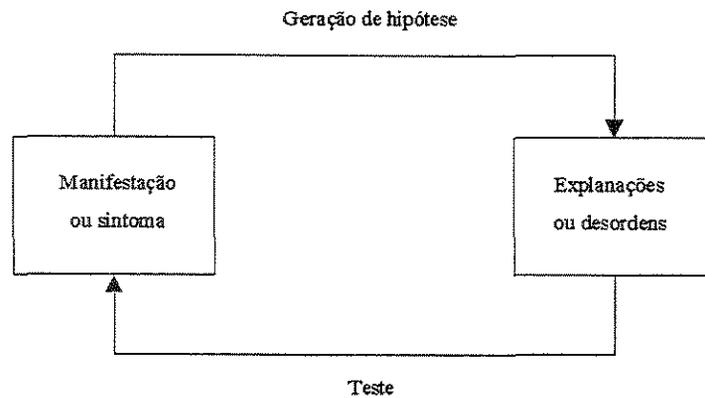


Figura 2.6: Ciclo de *hipotetização* e teste

que o paciente tem tosse crônica e foi um fumante assíduo as hipóteses podem mudar para:

Hipótese H2: "ataque cardíaco, OU embolia pulmonar, OU ..."

E "broquite, OU asma, OU ..."

Isso refletiria a raciocínio do médico de que pelo menos duas doenças devem estar presentes na consideração dos sintomas do paciente. Neste caso, as hipóteses contém incertezas, indicadas pelos *OU(s)*, e a presunção da presença de múltiplas desordens, indicadas pelo conectivo *E*. O médico continua o processo de diagnóstico até avaliar que foi alcançado um resultado satisfatório no ciclo de geração de hipóteses e testes para a obtenção de uma explicação plausível para os sintomas apresentados pelo paciente.

A representação do conhecimento dos problemas de diagnóstico pode ser feita de várias maneiras. Entre elas estão: a classificação estatística, a dedução baseada em regras e a abdução baseada em associação. O mecanismo de inferência é um dos fatores determinantes na escolha. Neste trabalho utiliza-se o modelo associativo de inferência abdutiva, que é apresentado a seguir.

2.2.3 Modelo Associativo de Inferência Abdutiva

Redes causais ou *semânticas* têm sido estudadas como forma de representação do conhecimento em inteligência artificial, [Russell and Norvig, 2003]. Redes associativas consistem de nós, representando entidades como objetos, eventos, e entidades, e links entre os nós, representando o relacionamento ou associação entre os nós. Esta representação torna conveniente a sua utilização para associações causais entre desordens e manifestações em problemas de diagnóstico, diferentemente dos modelos estatístico ou baseado em regras, onde o relacionamento entre entidades são colocadas implícitas em probabilidades ou regras condicionais.

As características básicas do modelo abdutivo baseado em associação, para a solução de problemas de diagnóstico, são o uso de associações simbólicas de causa-efeito entre as entidades individuais, e um repetitivo processo de geração e testes de hipóteses como mecanismo básico de inferência [Penn and Reggia, 1990]. Dada uma ou mais manifestações ou sintomas o mecanismo de inferência gera um conjunto de “causas” ou de “hipóteses plausíveis” que possam explicar a ocorrência das manifestações. Este é, por exemplo, o modo de raciocínio do médico. Ele tenta encontrar as causas que melhor expliquem os sintomas apresentados pelo paciente. Caso ocorram ambigüidades das possíveis causas dos sintomas o médico tenta adquirir novas informações, como os resultados de exames laboratoriais, para buscar então, o conjunto com menor número de hipóteses que explique a maioria ou a totalidade dos sintomas. Este raciocínio é, em outras palavras, a definição da *cobertura parcimoniosa*. O objetivo da *cobertura* é explicar todas as manifestações que estão presentes, enquanto que o objetivo da *parcimônia* é minimizar a complexidade das explicações [Reggia et al., 1985].

Na teoria da cobertura parcimoniosa o conhecimento para solução de problemas de diagnóstico é representado como uma rede de relacionamentos causais, mostrado na figura 2.7. Desordens, indicadas pelos nós estão no conjunto D , e são causalmente relacionadas com estados intermediários (conjunto S), se houver, e por último, com o conjunto M , que representa as manifestações ou sintomas.

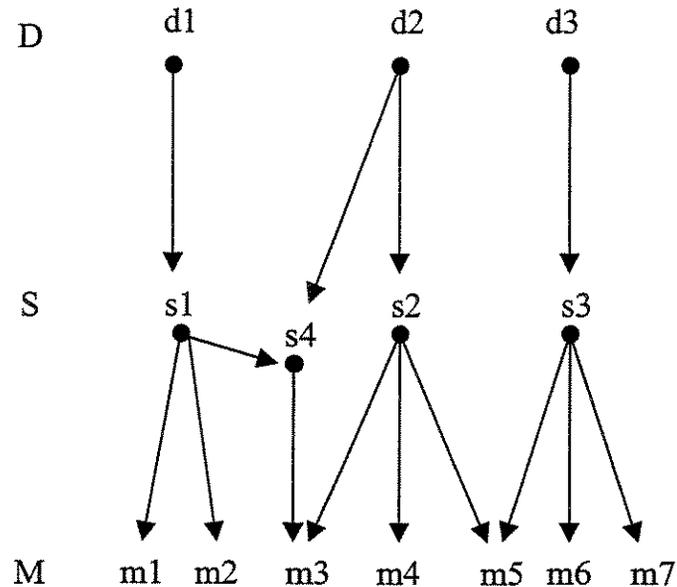


Figura 2.7: Exemplo de rede associativa causal

O conhecimento associativo usado nas aplicações de solução de problemas de di-

agnóstico, onde estados intermediários e cadeias de conexões causais estão envolvidas, é normalmente grande e complexo. Cadeias causais devem refletir a natureza transitiva das relações entre entidades. As cadeias causais são compostas, além das manifestações e das causas principais, de estados intermediários, também conhecidos como estados patológicos. A representação de um problema de diagnóstico pode ser definida da seguinte forma [Penn and Reggia, 1990]:

Definição 1 Um problema de diagnóstico P é uma 5-tupla $\langle H, D, M, C, H^+ \rangle$, onde: $H = \{h_1, \dots, h_n\}$ é um conjunto finito e não-vazio de "elementos hipóteses" ou entidades; $D \subseteq H$ é um conjunto não-vazio de elementos distintos, chamado de conjunto de desordens;

$M \subseteq H$ é um conjunto não-vazio de elementos distintos, chamado de conjunto de manifestações;

$C \subseteq H \times H$ é uma relação chamada *causal*, tal que:

1. $\forall h_i \in H, \langle h_i, h_i \rangle \notin C^+$, onde C^+ é o fechamento transitivo de C ;
2. $\text{Dom}(C) = H - M, \text{Im}(C) = H - D$; e

$H^+ \subseteq H$, onde H^+ é o conjunto distinto de entidades ditas presentes.

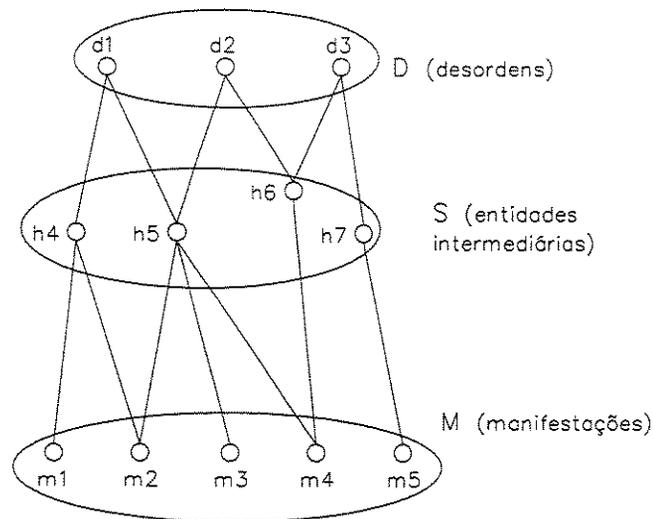


Figura 2.8: Rede causal de um problema de diagnóstico

Os conjuntos de manifestações, sintomas e de elementos intermediários compõem o conjunto H . O conjunto D , subconjunto de H , representa as desordens que podem aparecer no diagnóstico final. O conjunto M , subconjunto de H , representa todas as

manifestações, ou seja, anormalidades mensuráveis cuja ausência ou presença pode ser determinada por uma medida física. O conjunto C representa todas as associações causais entre as entidades de H . Finalmente, o fechamento transitivo C^+ de C representa as associações causais, diretas ou indiretas, entre todos os elementos de H , que podem ser obtidas através da transitividade da relação causal. Neste contexto, cria-se uma rede causal que é explorada a partir do surgimento das manifestações, conforme ilustrado na figura 2.8, a fim de utilizar a teoria da cobertura parcimoniosa para apresentar a hipótese mais plausível para o aparecimento dos sintomas.

As redes causais definidas deste modo são chamadas *redes hiper-bipartidas*, e em especial, no caso da existência de camadas intermediárias, o problema é conhecido como um *problema de camadas*, como o ilustrado na figura 2.9.

$P = \langle H, D, M, C, H^+ \rangle$ é considerado um problema de camadas se:

Definição 2 H pode ser particionado em conjuntos não-vazios disjuntos:

$M = H^0, H^1, \dots, H^L = D$, e $C = C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_L$, onde $C_l \subseteq H^l \times H^{l-1}$ para $l = 1$ até $l = L$.

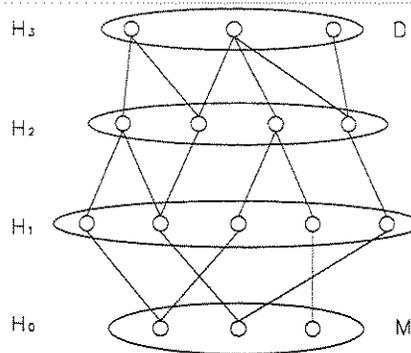


Figura 2.9: Um problema de camadas

Define-se para o problema P os seguintes conjuntos ou funções baseadas na relação C , no fechamento transitivo C^+ e no fechamento reflexivo-transitivo C^* :

Definição 3 para um $h_i \in H$ em um problema de diagnóstico $P = \langle H, D, M, C, H^+ \rangle$:
 $efeitos(h_i) = \{h_j \mid \langle h_i, h_j \rangle \in C\}$ é o conjunto de entidades diretamente causadas por h_i ;

$causas(h_i) = \{h_j \mid \langle h_j, h_i \rangle \in C\}$, é o conjunto das entidades que podem diretamente causar h_i ;

$efeitos^+(h_i) = \{h_j \mid \langle h_i, h_j \rangle \in C^+\}$ é o conjunto de todas as entidades que podem ser, diretamente ou indiretamente, causadas por h_i ;

$causas^+(h_i) = \{h_j | < h_j, h_i > \in C^+\}$ é o conjunto de entidades que podem, diretamente ou indiretamente, causar h_i ;

$efeitos^*(h_i) = \{h_i\} \cup efeitos^+(h_i) = \{h_j | < h_i, h_j > \in C^*\}$;

$causas^*(h_i) = \{h_i\} \cup causas^+(h_i) = \{h_j | < h_j, h_i > \in C^*\}$;

Definição 4 para um $H_I \subseteq H$ em um problema de diagnóstico $P = \langle H, D, M, C, H^+ \rangle$, tem-se:

$$efeitos(H_I) = \bigcup_{h_i \in H_I} efeitos(h_i);$$

$$efeitos^+(H_I) = \bigcup_{h_i \in H_I} efeitos^+(h_i);$$

$$efeitos^*(H_I) = \bigcup_{h_i \in H_I} efeitos^*(h_i);$$

$$causas(H_I) = \bigcup_{h_i \in H_I} causas(h_i);$$

$$causas^+(H_I) = \bigcup_{h_i \in H_I} causas^+(h_i);$$

$$causas^*(H_I) = \bigcup_{h_i \in H_I} causas^*(h_i).$$

Estabelecidos estes conceitos, a solução de problemas de diagnóstico é obtida a partir de três importantes definições:

Definição 5 $H_I \subseteq H$ é dito ser uma **cobertura** de $H_J \subseteq H$ se $H_J \subseteq efeitos^*(H_I)$. Uma cobertura de H_J é dita ser **irredundante** se nenhum dos seus próprios subconjuntos é também uma cobertura de H_J .

Definição 6 E é uma **explicação** de H^+ para um problema de diagnóstico P , tal que $P = \langle H, D, M, C, H^+ \rangle$ se:

1. E é uma cobertura irredundante de H^+ ; e
2. $E \subseteq D$.

Definição 7 A **solução** de um problema de diagnóstico $P = \langle H, D, M, C, H^+ \rangle$, designado por $Sol(P)$, é o conjunto de todas as explicações de H^+ .

Esta fundamentação teórica permite analisar o processo de formação da rede causal de um problema de diagnóstico de camadas, e assim, obter a cobertura irredundante da solução.

Os problemas de inferências em uma aplicação de defesa aeroespacial não são problemas de diagnóstico propriamente ditos. Entretanto, os conceitos vistos na solução de problemas de diagnóstico podem ser diretamente utilizados no raciocínio desejado para a aplicação de defesa aeroespacial. Para tanto, as aeronaves que surgem no espaço aéreo são consideradas como as manifestações, assim como os armamentos que elas carregam como elementos intermediários dos estados patológicos, e finalmente, as causas ou hipóteses plausíveis consideradas como alvos. Na seção 2.3, é apresentada uma visão geral do funcionamento de um sistema de defesa aeroespacial e a relação entre a avaliação das ameaças e as informações de combate.

2.3 Defesa Aeroespacial

A defesa aeroespacial [EME, 2001] é o conjunto de ações destinadas a assegurar o exercício da soberania de uma nação em seu espaço aéreo, impedindo seu uso para a prática de atos hostis. A defesa aeroespacial compreende a defesa ativa, englobando aeronaves de interceptação e artilharia antiaérea, e a defesa passiva, que complementa a vigilância do espaço aéreo e provê proteção para a população civil para minimizar os efeitos causados pelos ataques aéreos.

A defesa aeroespacial [EsACosAAe, 1999], formada pela defesa aérea e pela defesa antiaérea, envolve uma quantidade enorme e variada de meios heterogêneos. O sistema de defesa aérea e antiaérea é composto, entre outros, dos meios de: *detecção*, através de uma rede de radares de vigilância de grande alcance; *telecomunicações*, cuja finalidade é ligar os diversos componentes do sistema; *controle*, para a coordenação e controle das ações de defesa antiaérea; *aeronaves de interceptação*; e *unidades de artilharia antiaérea*.

De um maneira geral, a operação de defesa aérea visa detectar incursões no espaço aéreo [EME, 2001]. Uma vez ocorrida uma incursão, busca-se de imediato, identificá-la e classificá-la; tratando-se de uma incursão inimiga, o sistema de defesa verifica qual a arma mais apropriada para executar a missão de resposta àquela ameaça: se aeronave de interceptação ou meios de defesa antiaérea. Normalmente, são selecionados e alocados caças de interceptação, no ar ou em bases de alerta no solo, para interceptar o mais cedo possível a incursão. Caso os caças de interceptação encontrem dificuldades na eliminação da incursão, concretizando-se a possibilidade de ataque a áreas ou pontos sensíveis (alvos de grande valor estratégico), as defesas antiaéreas desses locais passam à situação de alerta máximo, com as armas antiaéreas prontas para fazer frente à incursão, transferindo para a artilharia antiaérea a responsabilidade da destruição das aeronaves inimigas.

A análise da ameaça criada por um vetor aéreo é de grande importância para a defesa aeroespacial. Ela consiste do detalhado estudo das forças inimigas, considerando o dispositivo, a composição, a organização, o valor, as táticas de emprego, os armamentos, os

equipamentos e a capacidade de suprimento. Além destes aspectos, são ainda fundamentais a análise do terreno e das condições meteorológicas. Tais informações levam a criação das possibilidades do inimigo. A rapidez na obtenção de inferências procedentes destas informações é fundamental nas tomadas de decisões e nas ações dos sistemas de armas.

No estudo das forças inimigas um dos principais objetivos é o levantamento dos equipamentos utilizados pelo lado oposto. As aeronaves, em particular, são poderosos vetores de destruição e por isso requerem especial atenção. Para lidar com as ameaças das aeronaves de modo mais eficaz estudos têm sido feitos para uma identificação mais precisa dos aviões durante o combate, como apresentado na seção 2.3.1.

2.3.1 Identificação de Aeronaves

Sistemas têm sido desenvolvidos para tornar as aeronaves armas mais eficazes e precisas. Se por um lado os ataques estão sendo cada vez mais cirúrgicos, por outro lado os sistemas de defesa estão cada vez mais rápidos e seguros. Mísseis de defesa como os do tipo *Patriot*, fabricado pelos Estados Unidos, são capazes de detectar, rastrear, perseguir e destruir ameaças aéreas com altos índices de eficácia. Para tanto, as bases lançadoras do *Patriot* são dotadas de sistemas de processamento automático para o disparo do míssil. Tal procedimento automático, entretanto, tem sido responsável por fratricídios [Congress, 1993] (termo que designa o fogo amigo atingindo as próprias tropas) durante as ações de combate das tropas amigas. Recentemente, na segunda guerra do Iraque, o sistema *Patriot* foi responsável por 2 incidentes deste tipo. Em um dos casos, um avião modelo Tornado, da Real Força Aérea, foi abatido por um míssil porque seu sistema eletrônico de identificação, também conhecido como IFF (*identification friend foe*), não estava funcionando corretamente. Este dispositivo envia periodicamente sinais codificados informando tratar-se de uma aeronave da tropa amiga. Na ocasião, o sistema de reconhecimento automático de alvos do *Patriot* não foi capaz de realizar a diferenciação das aeronaves, o que levou a realização do disparo que derrubou o avião.

Este tipo de acidente teria sido evitado se o sistema identificasse que a aeronave era um modelo Tornado, que era um avião de uso exclusivo da Grã-Bretanha no conflito. É nesse sentido que os esforços de pesquisa do Departamento de Defesa americano têm sido direcionados. Critérios comuns de identificação de aeronaves [EsACosAAe, 1999], como o IFF, a identificação visual, e o comportamento em vôo estão sendo associados à modernas tecnologias, como vistas em [Congress, 1993] e em [DOD, 2000], que mostram que projetos têm sido desenvolvidos para identificar atributos específicos de entidades de combate. O objetivo é identificar e diferenciar inclusive aquelas entidades consideradas não-cooperativas, ou seja, que não apresentam sua identificação quando solicitada, como por exemplo, através de dispositivos de autenticação do tipo IFF. Na referência citada é

apresentado um estudo sobre o uso radares de alta resolução (*High Resolution Radar - HRR*) para utilização na identificação dos motores das aeronaves através da modulação causada na onda refletida pelo ar que atravessa a turbina do avião, conforme ilustrado na figura 2.10, comparando a onda refletida com as armazenadas em um banco de dados.

Outra tecnologia emergente para a identificação de aeronaves é o LADAR (nome originado de *laser + radar*), [Henderson and Gatt, 2003], na qual a identificação é realizada comparando-se uma assinatura resultante da detecção da vibração da aeronave com outra padrão, disponível em um banco de dados. Este sistema, integrado a um pacote de comando, controle, comunicações, computação, inteligência militar e fusão de dados, tem protótipo previsto para o ano de 2003, de acordo com [DOD, 2000].

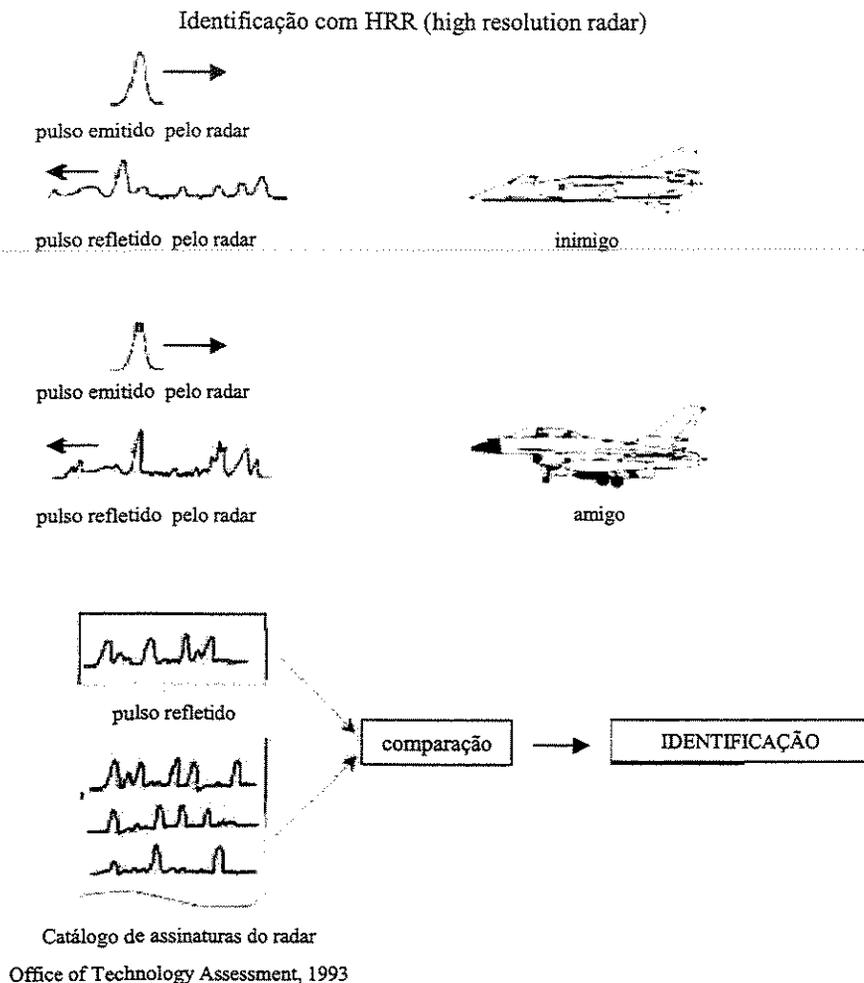


Figura 2.10: Identificação de aeronave através do HRR

2.3.2 Sistemas de Armas

O sistema de armas é o amplo arsenal que permite as aeronaves atingirem alvos de qualquer natureza, assim como, a artilharia antiaérea de abater aeronaves. Atualmente os armamentos mais empregados são os canhões, os mísseis, os foguetes e as bombas.

Os mísseis e os foguetes são armamentos normalmente utilizados contra alvos de tamanho reduzido, principalmente em ataques que requerem uma maior precisão, como radares, viaturas, ou depósitos. A diferença entre os mísseis e foguetes está na capacidade do míssil em modificar sua trajetória durante o voo em direção ao alvo. Apesar desta capacidade adicional do míssil o uso deste armamento é racionalizado em virtude do alto custo do míssil em relação ao foguete. São armas geralmente lançadas sob a técnica de ataque conhecida como ângulo de mergulho, mostrada na figura 2.11 [EME, 2001]. Alguns mísseis podem ser disparados de distâncias superiores a 20 km, como o míssil anti-radiação *SHRIKE* e o anti-navios *EXOCET*. Outros requerem distâncias inferiores a 5 km, como os anti-carros *Hellfire* e o míssil *MAVERICK*, de múltiplas finalidades.

Diferentemente dos mísseis, os foguetes tem um baixo custo de aquisição, o que o torna um dos sistemas de armas mais utilizados. São normalmente disparados em grupamentos para obter um maior poder de destruição. Os mais modernos podem ser disparados a 5 km do alvo. Seguem a mesma forma de lançamento dos mísseis. O mais comum é o foguete de 70 mm (FGT 70), para alvos de pequeno porte.

As bombas são o sistema de armas mais empregado no mundo. De vários tipos, tamanhos e poder destrutivo, influenciam diretamente a técnica de voo durante o ataque. As bombas de *queda livre*, também conhecidas como *bombas de aviação para fins gerais* (BAFG), são empregadas contra edificações, fortificações, viadutos, estradas de ferro, etc. São liberadas em ataques de média e baixa alturas, utilizando como técnica de ataque o ângulo de mergulho, como mostra a figura 2.11. Outro tipo de bomba, as *bombas de feixe* são artefatos que possuem no seu interior uma grande quantidade de submunições e tem o intuito de saturar uma área de grandes dimensões. São conhecidas como *bombas lançadores de granada* (BLG) e tem entre seus alvos preferenciais, tropas em reunião, viaturas não-blindadas e fortificações leves. Também utilizam como técnica de ataque o ângulo de mergulho. As *bombas freadas* nada mais são que bombas de queda livre equipadas com placas de arrasto ou pára-quadras. Isso permite que as aeronaves façam bombardeiros de baixa altura como mostra a figura 2.12, com ótima precisão e fora do alcance de fragmentação da bomba. São chamadas bomba anti-pistas (BAPI). São ideais para viadutos, estradas de ferro e pista concretadas de aeródromos. Outro tipo, as *bombas incendiárias*, (BINC), são compridas e cilíndricas, sendo constituídas de tanques de alumínio de revestimento fino, cheio de gelatina incendiária. São eficazes contra alvos que possam ser avariados pelo calor intenso, como depósitos de combustíveis, tropas ou viaturas. Para seu lançamento a aeronave emprega a técnica de ataque de

bombardeios rasantes, mostrado na figura 2.12 [EME, 2001]. Por último, as modernas *bombas inteligentes*, que são bombas de queda livre equipadas com dispositivos que a direcionam para o alvo, como optrônicos ou laser. Não executam necessariamente uma técnica de ataque fixa.

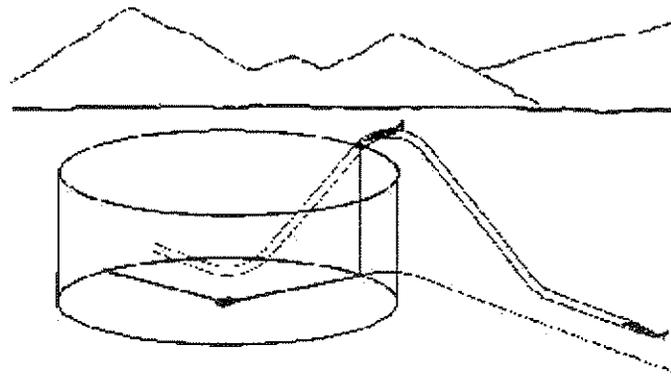


Figura 2.11: Técnica de ataque de ângulo de mergulho

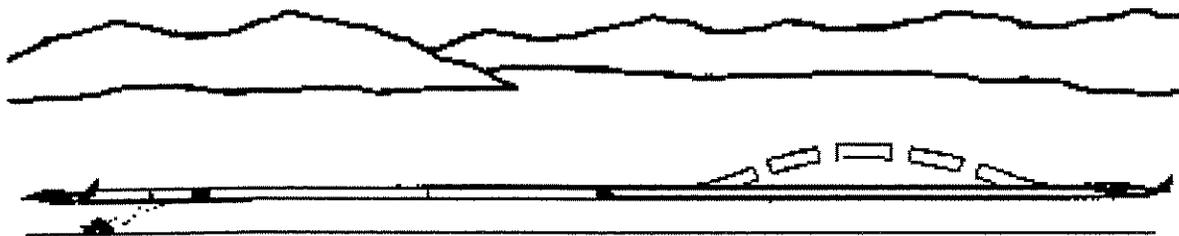


Figura 2.12: Técnica de ataque de vôo rasante

O conhecimento das características dos armamentos dos aviões inimigos são dados importantes e normalmente de fácil obtenção, visto que as aeronaves têm suas informações disponíveis no mercado como forma de propaganda dos fabricantes. Com isso, torna-se possível analisar dados como raio de ação, teto de emprego, velocidades de ataque ao solo, armamentos compatíveis e capacidade de realização de guerra eletrônica destes aparelhos, informações importante na análise das possibilidades do inimigo.

O armamento a ser usado afeta diretamente a técnica de ataque e sua escolha é feita de acordo com o objetivo a ser atingido [EsACosAAe, 2001]. Para a destruição ou inutilização do alvo de um ataque cálculos são feitos levando em consideração, entre outros fatores, o tipo e a resistência do material construtivo de uma instalação. O resultado final é a quantidade de aviões necessária para transportar a carga de armamentos requerida para o ataque. Adicionalmente são inseridas as aeronaves específicas para a defesa aérea das demais aeronaves que realizam o ataque principal, compondo assim todo o grupo de ataque. Cabe ressaltar que uma aeronave em ataque tem seu destino previamente estabelecido, não se utilizando do *princípio da oportunidade*, em que poderia atingir alvos oportunos na rota estabelecida.

O aspecto fundamental na determinação do tipo de armamento é o alvo. O alvo é também o destino das armas das aeronaves. Assim, existe uma importante relação causal entre a aeronave e o armamento que é carregado [Santos and Wainer, 2003], determinada por razões construtivas da aeronave, assim como outra importante relação causal entre o alvo e o tipo de armamento que é empregado para a sua destruição ou inutilização. Estas relações causais são exploradas no capítulo 3.

Capítulo 3

Modelagem

O capítulo 2 apresenta a teoria do modelo associativo de inferência abdutiva para problemas de diagnóstico. As cadeias causais são compostas de manifestações ou sintomas, de entidades de estados intermediários e de desordens. O raciocínio abductivo para a aplicação de defesa aeroespacial é similar ao conceito da representação de um problema de diagnóstico. A analogia feita para o novo problema transforma manifestações de um diagnóstico em aeronaves de um ataque, e desordens em alvos [Santos and Wainer, 2003]. Entretanto algumas peculiaridades requerem uma formulação teórica diferente da mostrada na seção 2.2.3.

No modelo apresentado por [Penn and Reggia, 1990] as entidades não se manifestam com multiplicidade, como no caso do problema de defesa aeroespacial, em que pode haver várias aeronaves idênticas realizando um mesmo ataque. Outra diferença está na utilização de classes de alvos no conjunto D , das desordens. Na verdade, os alvos são diferenciados uns dos outros através da localização, dada em coordenadas geográficas ou retangulares, não sendo suficiente identificar na rede causal qual a classe de alvo que pode ser destruída pela aeronave detectada. É necessário identificar qual o alvo. Outra condição é de que o alvo somente será considerado plausível se somada as quantidades de explosivos que as aeronaves transportam resulte em um valor maior que a quantidade requerida para a sua destruição.

A figura 3.1 é apresentada com o objetivo de auxiliar na visualização das diferenças entre o problema de diagnóstico e o problema de defesa aeroespacial. Na parte superior da figura é possível identificar os valores de P , E e N , (peso necessário para destruição e coordenadas geográficas E e N para localização, respectivamente), que especificam um alvo pertencente à classe a que está conectado. Nas arestas que ligam as classes de aeronaves (m_l) aos armamentos (s_w) estão os pesos de explosivos de cada armamento que podem ser transportados pela aeronave. Na classe de aeronaves m_1 a representação indica a presença de mais de uma aeronave da mesma classe. Na parte inferior da figura está o valor do

raio de ação $m_{k_{alc}}$ do modelo de aeronave que a classe representa. As definições a seguir apresentam a modelagem para o situação de supremacia aérea.

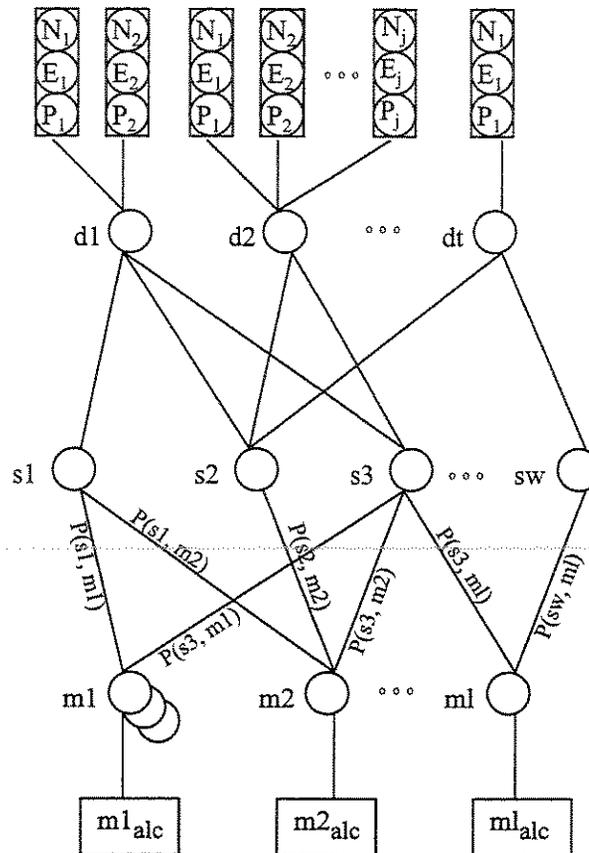


Figura 3.1: Rede causal com atributos específicos do problema de defesa aeroespacial

3.1 Modelagem Com Supremacia Aérea

A definição 8 especifica os conjuntos e as relações envolvidas na modelagem de um problema de avaliação das ameaças na defesa aeroespacial, designado por *problema de defesa aeroespacial*.

Definição 8 Um problema de defesa aeroespacial A é uma óctupla $\langle H, D, M, S, F, C, P, M^+ \rangle$ onde:

$$H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\};$$

H é finito, não-vazio, chamado de conjunto dos elementos hipóteses ou das entidades;
 $D \subseteq H$ é um conjunto não-vazio, chamado de conjunto das classes de alvos;
 $M \subseteq H$ é um conjunto não-vazio, chamado de conjunto das classes de aeronaves;
 $S \subseteq H$ é um conjunto não-vazio, chamado de conjunto dos armamentos ou conjunto das entidades intermediárias;
 $F \subseteq H$ é um conjunto não-vazio, chamado de conjunto dos aeródromos;
 C é a denotação utilizada para um relacionamento chamado causal;
 P é denotação utilizada para o relacionamento entre as classes de aeronaves e os tipos de armamentos;
 M^+ é o conjunto das aeronaves ditas presentes;

(Obs: A definição do relacionamento causal C é apresentada na definição 3, no cap. 2.)

Classes de alvos devem permitir que instalações com características semelhantes fiquem agrupadas na mesma classe. O número de classes depende dos tipos de pontos sensíveis existentes na área a ser defendida. As instâncias das classes são os alvos com sua localização. Por exemplo, pode-se ter a classe *hidrelétrica* e as instâncias *Itaipu*, *Furnas* e *Salto*. Estas instâncias são definidas pelas coordenadas geográficas de sua localização e pela quantidade de explosivos calculados para um ataque aquele alvo em particular. A definição 9 formaliza o conjunto dos alvos.

Definição 9 $D \subseteq H$ é um conjunto não-vazio, chamado de conjunto das classes de alvos;
 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_t\}$;
 d_i , para $1 \leq i \leq t$, é uma classe de alvos onde a instância j é a especificação de um alvo pertencente a classe i , para $0 \leq j \leq q$, sendo q o número máximo de alvos da classe;
 $d_{i_j} = \langle d_{i_{jP}}, d_{i_{jE}}, d_{i_{jN}} \rangle$, onde:
 $d_{i_{jP}}$ é o peso de explosivos em quilos (kg) necessário para a destruição do alvo;
 $d_{i_{jE}}$ e $d_{i_{jN}}$ são as coordenadas retangulares (ou geográficas) de localização do alvo;

A montagem da classe das aeronaves é feita especificando os modelos de aviões utilizados pela força aérea inimiga. O conjunto das classes forma o conjunto M . Utilizando as informações dos armamentos destas aeronaves é formado o conjunto S . As formalizações destes conjuntos são feitas nas definições 10 e 11, respectivamente.

Definição 10 $M \subseteq H$ é um conjunto não-vazio, chamado de conjunto das classes de aeronaves;
 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_l\}$;
 m_k , para $1 \leq k \leq l$, é uma classe de aeronaves em que $m_{k_{alc}}$ é o raio de ação da aeronave da classe k ;

Definição 11 $S \subseteq H$ é um conjunto não-vazio, chamado de conjunto dos armamentos ou conjunto das entidades intermediárias;

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_w\};$$

s_r , para $1 \leq r \leq w$, é um armamento do conjunto S ;

S é formado pelos tipos de armamentos que podem dotar as aeronaves que formam o conjunto M ;

O relacionamento entre aeronaves e aeródromos é fundamental para a estimativa de alcance da aeronave. Normalmente as aeronaves de um ataque partem de um único aeródromo e tem seu destino estabelecido previamente após a realização do estudo de situação. Define-se assim o conjunto dos aeródromos, que tem associado a cada aeródromo as aeronaves que podem operar em suas pistas, como mostrado na figura 3.2.

Definição 12 $F \subseteq H$ é um conjunto não-vazio, chamado de conjunto dos aeródromos;

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_z\};$$

f_v , para $1 \leq v \leq z$, é um aeródromo em que opera uma aeronave m_k , $\forall m_k \in \text{efeitos}(f_v)$

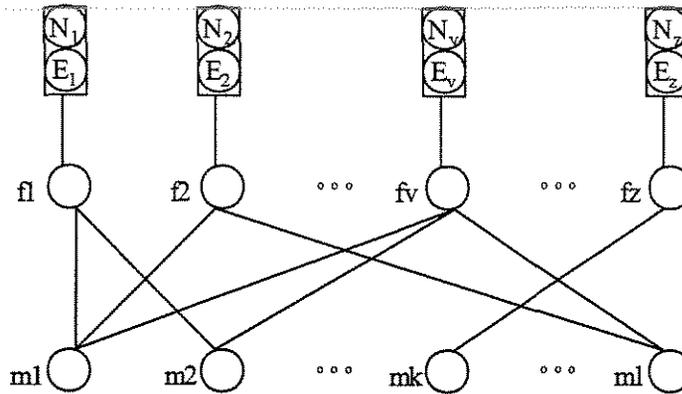


Figura 3.2: Relacionamento entre aeródromos e aeronaves

Definição 13 M^+ é o conjunto das aeronaves ditas presentes;

$$M^+ = \{a_1.m_1, a_2.m_2, \dots, a_l.m_l\}$$

$M^+_{cond} = \langle M^+_E, M^+_N, M^+_{alc} \rangle$, onde:

M^+_{cond} é a condição de localização e raio de ação do conjunto de aeronaves detectadas, M^+ ;

M^+_E e M^+_N são as coordenadas geográficas médias das aeronaves presentes em M^+ ;

$$M^+_{alc} = \min(m_{k_{alc}} \in M^+).$$

Definição 14 Seja $classes(M^+)$ o conjunto das classes de aeronaves ditas presentes em M^+ definido por:

$$M^+ = \{a_1.m_1, a_2.m_2, \dots, a_l.m_l\};$$

$$classes(M^+) = \{m_1, m_2, \dots, m_l\}.$$

Definição 15 Seja $fonte(M^+)$ o aeródromo de origem do conjunto de aeronaves M^+ definido por:

$$fonte(M^+) = \langle fonte(M^+)_E, fonte(M^+)_N \rangle;$$

$$fonte(M^+) = f_v, \text{ para}$$

- 1) $classes(M^+) \subseteq efeitos(f_v)$;
- 2) f_v é tal que $(\sqrt{(f_{vE} - M_E^+)^2 + (f_{vN} - M_N^+)^2})$ é mínimo.

Para um alvo ser dito *alcançável* considera-se que a aeronave de menor raio de ação, que faz parte das aeronaves pertencentes a M^+ , é capaz de atingir o objetivo. A distância do aeródromo que origina o ataque até o alvo de interesse precisa ser menor que a capacidade de vôo do conjunto de aeronaves. Sendo desconhecida a origem de M^+ , para que seja feita a análise do pior caso, adota-se que o aeródromo mais próximo da primeira localização das aeronaves é a origem do ataque, desde que permita a operação dos modelos detectados.

A definição 16 determina que um alvo é *alcançável* se ele está a uma distância na qual a distância aeronave-aeródromo somada a distância aeronave-alvo seja menor que o alcance do conjunto de aeronaves presentes em M^+ .

Definição 16 d_{i_j} é um alvo dito *alcançável* se:

$$classes(M^+) \subseteq efeitos^+\{d_i\};$$

$$\overline{d_{i_j}M^+} + \overline{fonte(M^+)M^+} < M_{alc}^+, \text{ onde:}$$

$\overline{d_{i_j}M^+}$ é a distância entre o conjunto de aeronaves detectadas, M^+ , e um alvo d_{i_j} , dada por:

$$\overline{d_{i_j}M^+} = \sqrt{(d_{i_jE} - M_E^+)^2 + (d_{i_jN} - M_N^+)^2};$$

$\overline{fonte(M^+)M^+}$ é a distância entre o conjunto de aeronaves detectadas, M^+ , e o aeródromo de origem de M^+ , $fonte(M^+)$, dada por:

$$\overline{fonte(M^+)M^+} = \sqrt{(fonte(M^+)_E - M_E^+)^2 + (fonte(M^+)_N - M_N^+)^2}.$$

O relacionamento entre o conjunto S e o conjunto M definido a seguir visa especificar a capacidade de transporte de armamentos por uma aeronave. Isto é necessário para que somada as quantidades de explosivos transportadas pelas aeronaves do conjunto M^+ possa ser feita uma comparação com a quantidade requerida para cada alvo d_{i_j} .

Definição 17 Seja $s_r \in S$ um tipo de armamento;
 Seja $m_k \in M$ uma classe de aeronave;
 $P(s_r, m_k)$ é o peso máximo de explosivos do armamento tipo s_r que pode ser transportado pela aeronave da classe m_k ;

Para um alvo ser dito *destrutível* é necessário que o conjunto das aeronaves presentes em M^+ possam alcançar o alvo, e ainda, que tenham armamentos suficientes para o tipo de dano desejado. A definição 18 explicita o que é um alvo *destrutível*.

Definição 18 d_{i_j} é um alvo dito **destrutível** se:
 d_{i_j} é alcançável;
 $d_{i_j p} < (a_1.P_1 + a_2.P_2 + \dots + a_l.P_l)$, onde:
 $P_k = \max(P(s_r, m_k))$, $\forall s_r$ tal que $(s_r \in \text{efeitos}(d_i)) \wedge (s_r \in \text{causas}(m_k))$

Definição 19 A solução de um problema A de defesa aeroespacial, designada por $Sol(A)$ é conjunto formado por todos os elementos d_{i_j} tal que d_{i_j} é destrutível.

Para a formação do conjunto M^+ , das aeronaves presentes em um ataque, três considerações são feitas: existe supremacia aérea; não existe supremacia aérea; e existe incerteza na identificação de uma classe de aeronaves. Como anteriormente citado as definições apresentadas são para o caso em que há supremacia aérea. Basicamente estas definições podem ser usadas para os dois outros casos, com as modificações apresentadas nas seções seguintes.

3.2 Modelagem Sem Supremacia Aérea

Para uma situação em que não há supremacia aérea é necessário que a inteligência militar especifique qual o modelo de aeronave utilizado pelo inimigo para o combate ar-ar. Este modelo escolta as aeronaves responsáveis pelo combate ar-superfície, executantes do ataque. Suponhando que a classe de aeronaves m_k é utilizada com a finalidade de combate ar-ar, modifica-se a definição 13 para que M^+ seja:

$$M^+ = \{a_1.m_1, a_2.m_2, \dots, a_l.m_l\} - \{a_k.m_k\}$$

Essa modificação permite que somente as aeronaves que realizam o combate ar-superfície sejam consideradas na verificação dos alvos ditos *destrutíveis*.

3.3 Modelagem Com Incerteza na Identificação da Aeronave

No caso de haver incerteza na identificação de uma classe de aeronaves a solução é considerar um *OU* de aeronaves presentes para que seja feita a cobertura das possibilidades geradas por ambos os modelos de aeronave. Supondo-se que as classes de aeronaves m_k e m'_k são as que geram dúvida, a solução do problema A de defesa aeroespacial, mostrada na definição 19, é modificada para:

$Sol(A) = Sol(A_1) \cup Sol(A_2)$, tal que:

A $Sol(A_1)$ é dada considerando $M^+ = \{a_1.m_1, \dots, a_k.m_k, \dots, a_l.m_l\}$;

A $Sol(A_2)$ é dada considerando $M^+ = \{a_1.m_1, \dots, a_k.m'_k, \dots, a_l.m_l\}$;

Capítulo 4

Aplicações

A principal aplicação proposta neste trabalho é o emprego do conceito de inferência abductiva na avaliação de ameaças na 3ª fase do processo de fusão dados. Uma segunda aplicação é obtida da rede associativa utilizada para atender a aplicação principal. É um *Planejador* de assessoramento de escolha de aeronaves para realizar um ataque a um determinado alvo.

Como apresentado no capítulo 3 as entidades no caso destas aplicações são aeronaves de combate. Na aplicação principal, após o recebimento da identificação do tipo de aeronave que realiza a incursão no espaço aéreo, sua localização, informações cinemáticas, e altura de vôo, entre outros dados, o processamento utiliza a inferência abductiva para identificar quais alvos são mais plausíveis para a realização de um ataque por parte dessas aeronaves com as características detectadas.

No caso da aplicação secundária, do *Planejador*, a rede causal é utilizada para identificar a melhor opção de aeronaves para realizar um ataque a um alvo que se deseja atingir.

4.1 Construção da Rede Causal

A montagem da rede causal para o raciocínio abductivo é feita utilizando os dados de manual de cada aeronave pertencente a força invasora. As informações com as características das aeronaves são previamente inseridas em um arquivo que é lido durante o processamento. Na figura 4.1 são mostradas, como exemplo, as características da aeronave Mirage III.

Como a entidade a ser detectada neste estudo é uma aeronave, que desempenha o papel de manifestação ou sintoma nos problemas de diagnóstico, ela é um dos elementos do conjunto M , das manifestações. Os demais elementos do conjunto são, analogamente, as demais aeronaves pertencentes a força aérea inimiga, como é visto na figura 4.2.

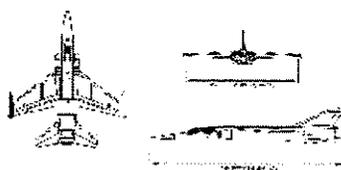
AERONAVE		F-103						
		POSTA REQUERIDA						
Fista Cn Af	ALT	300	400	500	600	700	800	900
	ZC	1600	1650	1700	1760	1810	1860	1920
	ZA	1920	2000	2050	2120	2170	2250	2300
		DESEMPENHO						
ECP	2	AAAe	1	REVO	N	AR-AR	S	
CONFIGURAÇÃO							ALCANCE	
Tipo	Carga						AA	BE
A	250xMun.30; 2 AIM9; 1 MATRA; 2x130 Gal						780	560
B	250xMun.30; 4 BAFG 460; 1x242 Gal						600	300
C	250xMun.30; 4 BAFG 230; 1x242 Gal						800	480
D	250xMun.30; 4 BAFI; 1x242 Gal						780	450
E	250xMun.30; 4 BINC 300; 1x242 Gal						750	400
MIRAGE III								
								

Figura 4.1: Dados de manual do Mirage III

A figura 4.1 fornece ainda as informações que compõem os elementos do conjunto S , das entidades intermediárias. São os dados do sistema de armas que pode ser transportado pela aeronave. Cada avião somente pode transportar os armamentos de um tipo de configuração (figura 4.1, lado esquerdo) por vez. Então, a união destes tipos de armamentos de todas as aeronaves forma o conjunto S , mostrado na figura 4.3.

O último conjunto que forma a rede causal é o conjunto D , que estabelece os alvos. Na analogia com a solução de problemas de diagnóstico os alvos desempenham o papel das doenças, como no caso de um exemplo de diagnóstico médico. Os alvos são pontos sensíveis de valor estratégico existentes em determinadas regiões. Tais locais são normalmente protegidos por sistemas de defesa antiaérea, localizados nas proximidades, de

acordo com a técnica empregada para cada tipo de ponto sensível. Podem ser instalações de comunicações, hidrelétricas, usinas nucleares, aeródromos, tropas reunidas, ou indústrias importantes para a guerra, como as indústrias siderúrgicas.

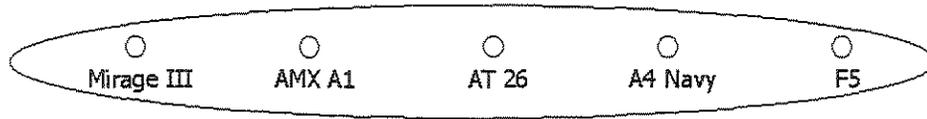


Figura 4.2: Formação do conjunto M, das manifestações

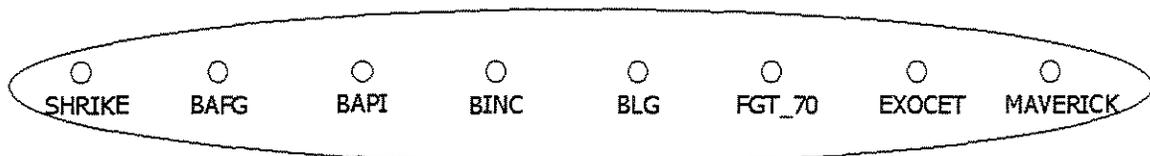


Figura 4.3: Formação do conjunto S, das entidades intermediárias

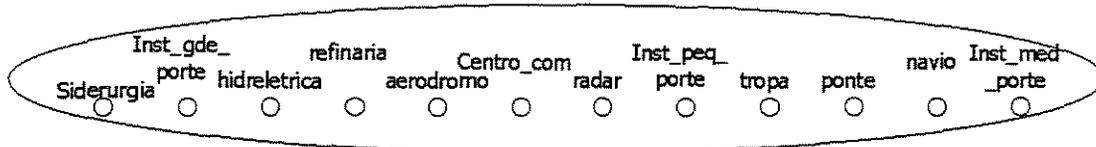


Figura 4.4: Formação do conjunto D, das desordens

Há uma relação direta entre os alvos e as armas utilizadas para sua destruição ou inutilização. Foguetes não são utilizados para destruir hidrelétricas de grande porte, assim como mísseis anti-radiação não são empregados para destruir pistas de pouso. Esta relação causal, [EsACosAAe, 2001], vista na tabela 4.1, mostra quais tipos de armas são utilizadas para quais tipo de alvos, e ainda, especifica a quantidade necessária de explosivos, em quilogramas ou libras, para inutilização ou destruição do alvo de acordo com a avaliação da resistência do seu material constitutivo, o que é utilizado como filtro mais a frente no processamento.

n°	Alvo	Tipo de Dano	Armamento	Quantidade	Unidade
1	Fábrica de aviões	Afetar produção	BAFG	40.000	lb
2	Termoelétrica/ Refinaria /Trm petróleo	Afetar	BAFG	12.000	lb
3	Hidrelétrica	Destruir	BAFG	8.000	lb
4	Centro de distribuição de energia elétrica	Interditar 72 hs	BAFG	12.000	lb
			NAPALM	15.000	lb
			Míssil Maverick	4	un
5	Usina siderúrgica	Afetar	BAFG	44.000	lb
6	Fábrica de veículos	Afetar produção	BAFG	40.000	lb
7	Indústria Eqp eletrônicos	Afetar Produção	BAFG	30.000	lb
8	Ferrovias, rodovias oleodutos	Interditar por 10 hs	BAFG	12.000	lb
			BAPI	4.000	lb
9	Pátio Ferroviário	Interditar por 24 hs	BAFG	24.000	lb
			BAPI	12.000	lb
10	Instalações portuárias base naval	Destruir	BAFG	8.000	lb
			BAPI	6.000	lb

Tabela 4.1: Dados do manual de planejamento para avaliação da força

Para a formação do conjunto D , apresentado na figura 4.4, os alvos foram classificados em 12 diferentes tipos, podendo ser enquadrados nestas classes novos alvos que apareçam ou então, criadas novas classes de acordo com a necessidade.

Como mostrado na teoria de redes associativas os nós representam as entidades e as ligações entre eles os relacionamentos ou associações entre as entidades. Com estes conceitos pode ser montada a rede associativa entre os conjuntos M , S e D , apresentada na figura 4.5.

4.2 Processamento da Aplicação Principal

No processamento para a avaliação de ameaças o algoritmo utiliza 4 arquivos para a consulta de informações. São arquivos com os dados do inimigo sobre as aeronaves, os armamentos e os aeródromos, e sobre os alvos da aérea a ser defendida. Cabe ressaltar que considera-se que o processamento estaria recebendo informações de posicionamento

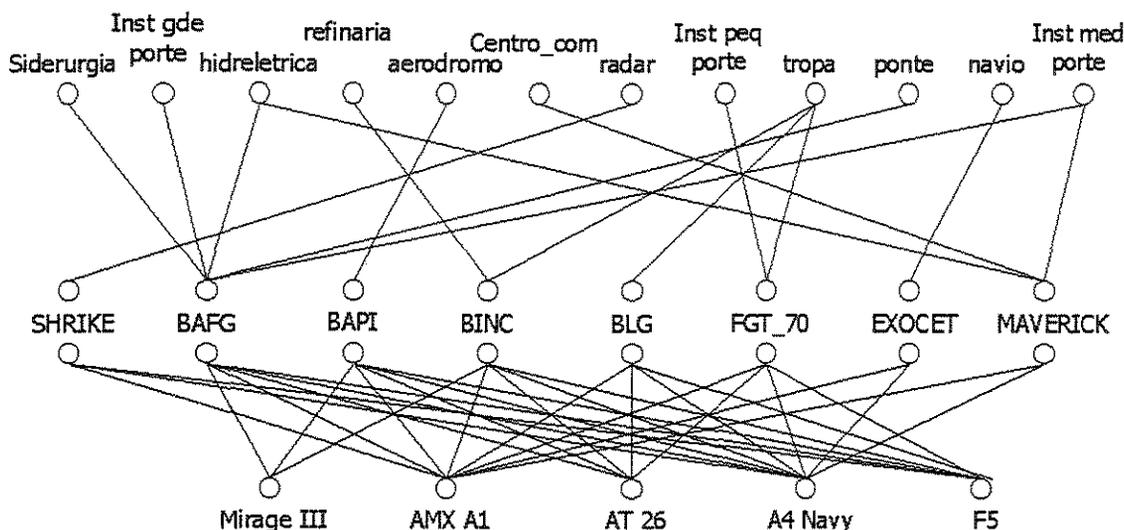


Figura 4.5: Rede causal da defesa aeroespacial

das aeronaves detectadas de um sistema preliminar composto, entre outros sensores, de radares.

Para o processamento o alcance é o máximo valor dado pelo manual da aeronave. Na prática, o valor de raio de ação da aeronave varia de acordo com o seu comportamento de vôo, se vôo a alta altura (AA) ou a baixa altura (BB). No caso do Mirage o maior valor é de *800 km*, mostrado no lado direito da figura 4.1. Este valor máximo é o adotado pelo algoritmo, visto que fornece a maior cobertura espacial da região de alvos, independente da observação de outros fatores relativos à determinação do alcance. O arquivo das aeronaves contém, para cada avião, além do raio de ação, um nome, uma abreviação, o sistema de armas especificando a quantidade em peso de explosivos de cada tipo de armamento, e variáveis para o posicionamento através de coordenadas retangulares. A tabela 4.2 apresenta um exemplo dos dados do *F5E Tiger*.

Nome	Alcance	CoordE	CoordN	Arma1	Arma2	Arma3	Arma4	Arma5	Arma6	Arma7	Arma8
F5E	800km	-	-	BAFG	BAPI	BINC	BLG	FGT70	Shrike	-	-
F5	Quantidade (kg):			1840	2300	2400	2000	2240	3000	-	-

Tabela 4.2: Dados do *F5E Tiger* no arquivo de aeronaves

No arquivo dos armamentos constam todas as armas que dotam todas as aeronaves do inimigo, e para cada armamento são listadas as classes de alvos que podem ser objetivos de destruição ou inutilização. A tabela 4.3 apresenta, como exemplo, os dados da bomba de aviação para fins gerais (BAFG).

É importante ressaltar que algumas classes de alvo possuem mais de um tipo de

armamento que pode responder pela sua destruição. Para viabilizar a comparação entre armas de diferentes tipos, como bombas e mísseis, foi realizada uma normalização entre os armamentos. Por exemplo, de acordo com a figura 4.1, para interditar um centro de energia elétrica por 72 horas pode ser usado tanto 12000 lb de BAFG como 4 mísseis *Maverick*. Ou seja, cada míssil equivale a 3000 kg de BAFG. Para efeito de cálculos neste trabalho a BAFG foi tomada como armamento padrão e os demais tipos foram normalizados em relação a ela. Além disso, o peso do armamento está sendo considerado como peso de explosivo, não sendo levado em consideração a formação do explosivo nem o peso do invólucro do míssil, foguete ou bomba.

Nome	Classes de alvos				
BAFG	Inst_med_porte	Inst_gde_porte	hidrelétrica	ponte	siderurgia

Tabela 4.3: Dados da *BAFG* no arquivo de armamentos

O arquivo dos aeródromos fornece um nome, as coordenadas retangulares de cada pista de pouso, e uma lista das aeronaves que podem operar em cada local. Para exemplificar a tabela 4.4 mostra as entradas de uma base aérea denominada *X*. Na verdade, nem todas aeronaves podem decolar de todos os aeródromos. Algumas requerem condições de aproximação e decolagem diferenciadas, ou comprimentos de pista maiores. São discriminados para cada aeródromo o tipo de aeronave que pode decolar ou pousar na pista existente. Através do arquivo de aeródromos o processamento pode identificar a pista mais próxima das coordenadas das aeronaves identificadas e que permita a decolagem, e projetar continuamente o raio de ação máximo de acordo com o percurso executado, retirando os alvos que fiquem fora do alcance projetado.

Nome	CoordE	CoordN	Aeronaves aptas a operar				
Base Aérea X	415500	7450000	F5	A1	A4	-	-

Tabela 4.4: Dados de uma pista de pouso no arquivo de aeródromos

O último arquivo para consulta é o que relaciona os alvos. Nele estão listados os locais a serem defendidos. São os chamados pontos sensíveis ou de valor estratégico. Para cada alvo estão reunidas as seguintes informações: classe do alvo de acordo com a classificação proposta, coordenadas retangulares, quantidade de armas em peso para destruição ou danos, e uma especificação ou apelido para identificar entre elementos da mesma classe. A tabela 4.5 apresenta, como exemplo, a discriminação de 4 alvos.

Após identificar os tipos de informações presentes nesses arquivos o próximo passo é o funcionamento do processamento. Três diferentes abordagens podem ser consideradas. Elas dependem da existência ou não da supremacia aérea na situação analisada e da precisa identificação da aeronave. Supremacia aérea é o completo domínio do espaço aéreo em que

Classe de alvo	coordE	coordN	Quant. em peso (kg) para destruir	Especificação
siderurgia	595500	7511600	12000	CSN - V.Redonda - RJ
refinaria	660000	7470000	9000	Duque de Caxias - RJ
refinaria	280000	7486000	15000	Paulínia - SP
pista_pouso	634800	7466080	6000	base aérea Sta Cruz - RJ

Tabela 4.5: Dados dos alvos no arquivo de alvos

se opera, sem a necessidade de proteção contra a defesa aérea inimiga, ou então, somente contra a defesa antiaérea, se existir. Um exemplo recente de supremacia aérea foi visto na guerra do Iraque de 2003, onde as forças invasoras não tiveram dificuldades em operar no espaço aéreo iraquiano.

Quando há supremacia aérea todas as aeronaves detectadas estão sendo utilizadas para efetivação do ataque ar-superfície, enquanto que, sem a supremacia, parte das aeronaves são utilizadas para a defesa aérea, ou seja, combate ar-ar. A missão destas aeronaves é proteger as aeronaves dedicadas ao ataque ar-superfície. Elas são responsáveis somente pela defesa aérea, e não entram na área em que é realizado o ataque ar-superfície, o que conduz a desconsideração dos seus armamentos na análise dos alvos de destino.

Para determinar quais aeronaves poderão ser usadas como defesa aérea deve-se verificar as aeronaves de dotação da força aérea inimiga. Os caças utilizados para combate ar-ar são os caças de interceptação, mais velozes e mais ágeis do que os caças de ataque.

4.2.1 Filtros

Os filtros são condicionantes que visam aumentar a plausibilidade dos alvos selecionados. Diversos fatores podem ser utilizados como filtros. O fator mais importante é a distância. O alvo precisa estar dentro do alcance da aeronave para ser atingido. Os arquivos de alvos, aeródromos e aeronaves possuem coordenadas cartesianas para que este fator seja sempre considerado, e por isto o fator distância está incluído na definição do problema.

Outros filtros são dependentes da sofisticação tecnológica da aeronave, do grau de adiestramento do inimigo e dos conhecimentos oriundos da inteligência militar [EME, 2001]. Para um ataque sob condições meteorológicas adversas a aeronave tem que ser capaz de realizar a navegação por instrumentos. Aparelhos como GPS, radar-altímetro, radar-topográfico e mapas digitalizados são necessários para a introdução das informações de ataques pré-planejados nos computadores de bordo. Adicionalmente deve ser verificada a capacidade de identificação e pontaria para o alvo nestas condições, o que requer o uso de sensores infravermelho e laser.

O ataque noturno [EsACosAAe, 2001] é outra condição que requer equipamentos especiais que nem sempre as aeronaves possuem. Além dos instrumentos requeridos para condições meteorológicas adversas são precisos sensores infravermelho que gerem imagens

térmicas da rota e do alvo, como o *Forward Looking Infra-red* (FLIR), visto na seção 2.1.1.

Alguns tipos de armamentos precisam ser disparados a pouca altura em relação ao solo, como as bombas incendiárias. Como aeronaves evitam sobrevoar regiões de grandes elevações ou densamente povoadas, pois aumentam suas vulnerabilidades, o terreno é outro fator filtrante para estes alvos.

Os filtros podem ser criados de acordo com os conhecimentos específicos de cada alvo, região, técnica de ataque, ou equipamentos das aeronaves. Assim como é necessário que as aeronaves que realizam um ataque tenham explosivos suficientes para a destruição de um alvo desejado, os filtros também podem ser criados para eliminar da lista de alvos aqueles que poderiam ser destruídos com um percentual menor de explosivos comparado com o transportado pela soma dos explosivos das aeronaves.

4.3 Planejador

A segunda aplicação, derivada do processamento para a avaliação de ameaças, mostrada na figura 4.2, tem por objetivo apresentar as possibilidades de aeronaves e aeródromos para o planejamento de um ataque.

O diagrama da relação causal mostrada em 4.5 é invertido para ser usado como Planejador. A figura 4.6 apresenta a rede invertida.

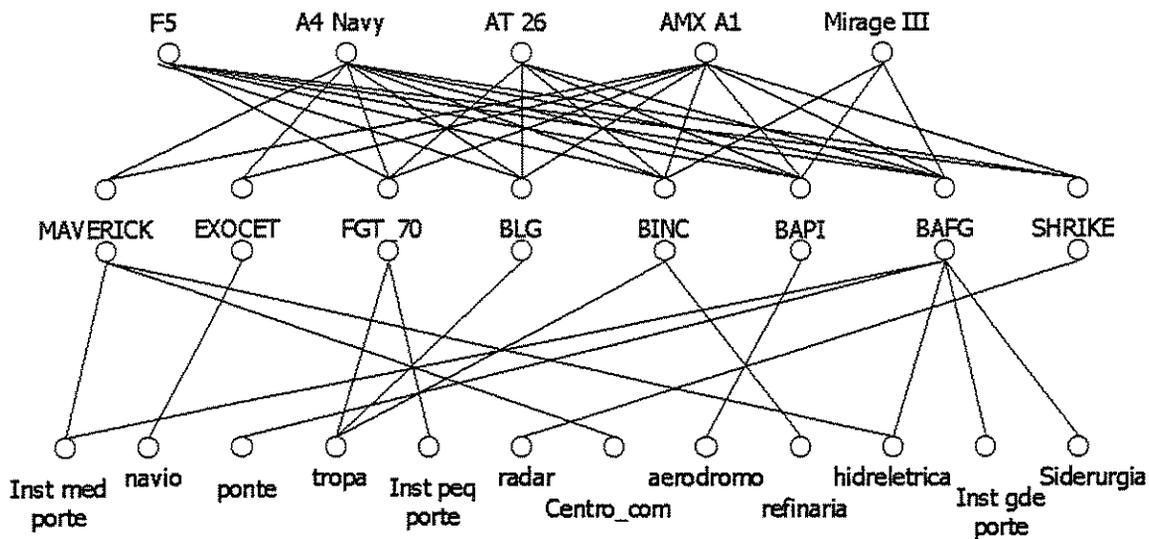


Figura 4.6: Rede causal utilizada para planejamento

Para encontrar os aeródromos e as aeronaves aptas a serem utilizados o processamento inicialmente verifica, de acordo com o arquivo de armamentos ou de acordo com a rede causal, quais armas podem ser utilizadas para destruir o alvo. Em seguida, verifica quais aeronaves podem transportar estes armamentos, e calcula quantas aeronaves são necessárias para transportar a quantidade de explosivos requerida.

A distância entre o alvo e os aeródromos é calculada a fim de verificar quais aeronaves tem o raio de ação maior que a distância a ser percorrida.

De posse destas informações uma lista de aeródromos e aeronaves é produzida, o que permite ao tomador de decisões escolher a solução mais oportuna.

Capítulo 5

Implementação e Resultados

Este capítulo tem o objetivo de apresentar a estrutura da implementação e os resultados de computações realizadas através da visualização de entradas e saídas do programa. É importante ressaltar que este capítulo não tem finalidades estatísticas ou de precisão dos resultados visto que algumas informações dos alvos e aeródromos têm valores estimados ou inseridos com finalidade didática.

5.1 Implementação

A implementação deste trabalho está feita na linguagem Java. Existem 4 arquivos *.txt* com as informações que são utilizadas pelo programa. O arquivo *alvo.txt* possui os dados dos locais considerados pontos sensíveis ou passíveis de serem alvos na área a ser defendida. O arquivo *aeronave.txt* contém os dados das aeronaves do inimigo. O arquivo *aerodromo.txt* relaciona os aeródromos inimigos e quais aeronaves podem operar em cada pista. Estes dois arquivos (*aeronave.txt* e *aerodromo.txt*) possuem informações oriundas da inteligência militar. Por último, o arquivo *armamento.txt* descreve quais os tipos de alvo que podem ser atacados com os armamentos que existem.

No processamento, inicialmente é construída uma matriz *conjunto S x conjunto D*, ou *armamentos x alvos* para a inserção do peso do armamento transportado pela aeronave. As linhas referem-se aos armamentos e as colunas aos alvos. É construído também um vetor com o tamanho do número de alvos para ser utilizado como contador. A figura 5.1 apresenta esta matriz.

A cada aeronave detectada, de acordo com o seu tipo e os dados de manual, verifica-se quais os armamentos podem estar sendo carregados. Para o 1º alvo listado, localizado na 1ª coluna, é verificado se um dos armamentos transportados pela aeronave pode ser utilizado para destruição deste alvo. Se a resposta for negativa a 1ª coluna é deixada em branco e passa-se ao alvo seguinte, na 2ª coluna. Se a resposta for positiva, então algum

armamento daquela aeronave pode destruir o alvo em questão.

Após este passo é verificado se mais de um armamento transportado pela mesma aeronave pode destruir aquele alvo. Se a resposta for negativa, então somente um armamento pode ser utilizado e o valor referente ao peso em explosivos do armamento transportado é colocado na célula referente a interseção entre a coluna do alvo e a linha do armamento.

Se mais de um armamento transportado pela aeronave pode ser responsável pela destruição do alvo então é necessário fazer uma comparação entre eles para verificar aquele que pode causar maior destruição, ou seja, que tem maior quantidade de explosivos. Neste caso é utilizada a normalização citada em 4.2. Após essa comparação a célula da interseção da coluna do alvo com o armamento escolhido recebe o valor em peso da quantidade de explosivos do armamento mais destrutivo.

		LISTA DE ALVOS							
		1	2	3	4	5	6	...	N
LISTA DE ARMAMENTOS	BAG								
	BAP								
	BLG								
	BAP								
	FGT70								
	SHRKE								
	MAVERCK								
	EXOCET								
	Soma:								
	Para destruir o alvo é necessário:								
	Contador:								

Figura 5.1: Matriz utilizada para o processamento

Deve-se observar que para cada aeronave uma célula de cada coluna é preenchida, ou então, a coluna permanece com as células vazias. Em seguida, para cada coluna que teve alguma célula preenchida é adicionado uma unidade no contador referente à coluna (inicialmente zerado).

Todos os alvos são percorridos e o processo é repetido para as demais aeronaves detectadas utilizando a mesma matriz. Quando uma determinada célula conter um valor inserido por uma aeronave analisada anteriormente deve-se adicionar a quantidade de explosivos àquela existente na célula. Repete-se para cada nova aeronave avaliada o incremento do contador nas colunas que tiveram algum valor inserido.

Ao final, identifica-se no vetor contador aquelas células que tem valor final incrementado igual ao número de aeronaves detectadas. Para os alvos que obedecem esta condição verifica-se se a quantidade de explosivos somada em cada coluna da matriz é maior que a quantidade necessária para destruição. Caso positivo o alvo descrito pela coluna é um alvo plausível.

EXEMPLO

As figuras 5.2 e 5.3 ilustram um exemplo didático que utiliza a rede causal da figura 4.5.

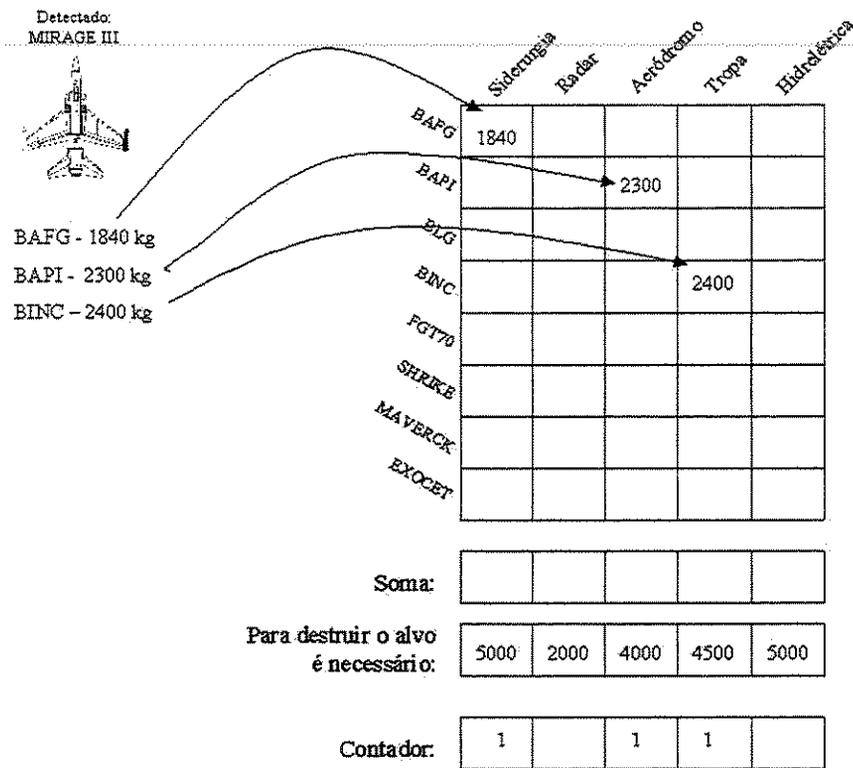


Figura 5.2: Processamento da detecção do Mirage III

Inicialmente uma aeronave Mirage III é detectada e existem 5 alvos na região a que se destina. O peso de explosivos é inserido nas células de interseção entre o armamento que o mirage pode carregar e o alvo, conforme visto na figura 5.2. Nesta figura, a fim de facilitar a visualização, foi inserido o vetor “Soma” para computar a soma dos armamentos em um mesmo alvo, e o vetor “Para destruir o alvo é necessário:”, que mostra os valores contidos no arquivo de alvos.

A seguir, uma segunda aeronave é detectada e identificada como sendo um F5E Tiger. O peso de seus armamentos são inseridos na matriz, conforme mostra a figura 5.3, sendo somados aos pesos dos armamentos do Mirage III quando for o caso. Além disso, deve-se observar que o alvo *Tropa* pode ser destruído tanto pela BINC, BLG ou pelo FGT70. Na comparação entre os armamentos verifica-se que a BINC tem maior peso de explosivos, ou seja, o pior caso para ser analisado. Ao final, considerados todos os alvos, são identificadas as colunas que tem o valor do contador igual a 2 (número de aeronaves detectadas). Nestas colunas, comparando a soma do peso dos armamentos das aeronaves com o necessário para destruir os alvos nota-se que apenas o *aeródromo* cumpre esta condição.

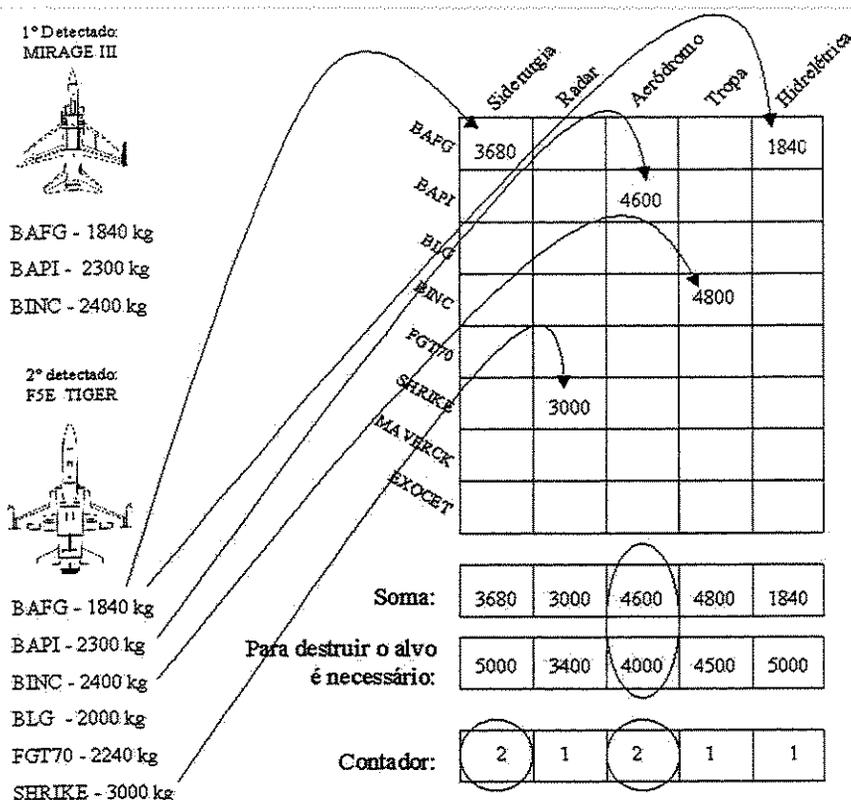
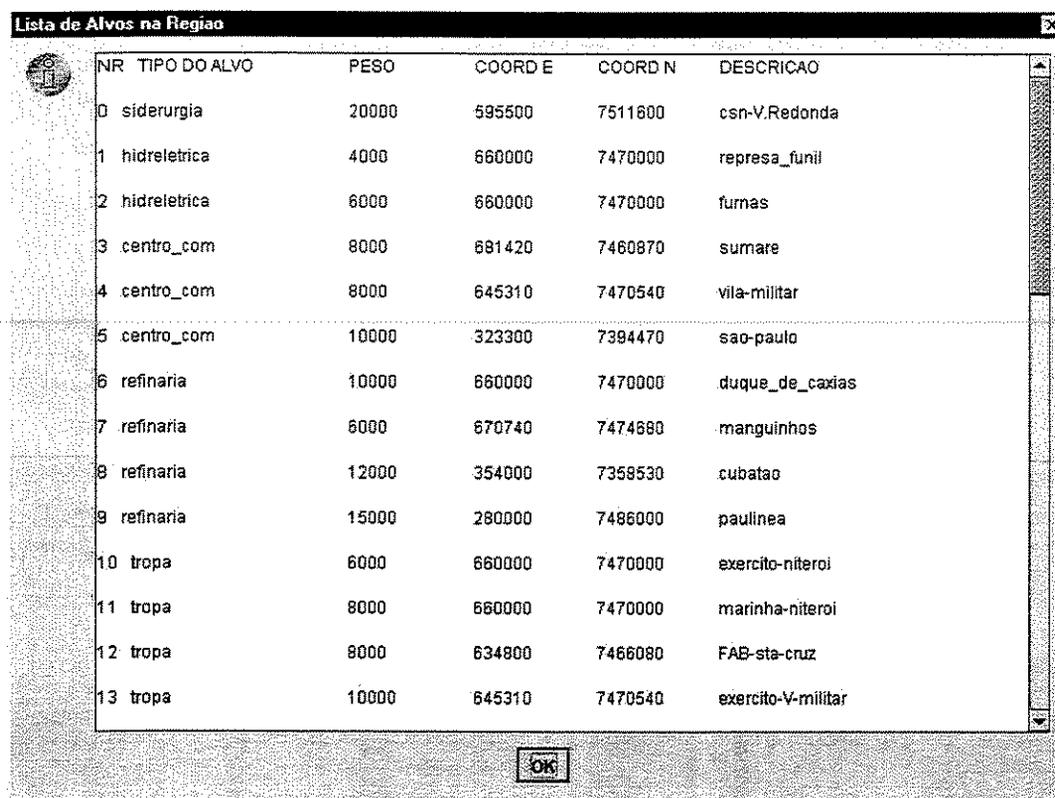


Figura 5.3: Processamento da detecção do F5

5.2 Exemplo de Avaliação de Ameaças

Com a finalidade de apresentar as opções de entrada e de proceder uma verificação nas informações disponíveis são mostrados quadros que apresentam as informações que estão descritas nos arquivos de alvos, aeronaves, armamentos e aeródromos. As figuras 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7 mostram os quadros que permitem esta verificação.



The screenshot shows a window titled "Lista de Alvos na Região" with a table of target information. The table has six columns: NR, TIPO DO ALVO, PESO, COORD E, COORD N, and DESCRICAO. There are 14 rows of data, numbered 0 to 13. The data includes various target types such as siderurgia, hidreletrica, centro_com, refinaria, and tropa, with their respective weights and coordinates. An "OK" button is visible at the bottom of the window.

NR	TIPO DO ALVO	PESO	COORD E	COORD N	DESCRICAO
0	siderurgia	20000	595500	7511600	csn-V.Redonda
1	hidreletrica	4000	660000	7470000	represa_funil
2	hidreletrica	6000	660000	7470000	furnas
3	centro_com	8000	681420	7460870	sumare
4	centro_com	8000	645310	7470540	vila-militar
5	centro_com	10000	323300	7394470	sao-paulo
6	refinaria	10000	660000	7470000	duque_de_caxias
7	refinaria	6000	670740	7474660	manguinhos
8	refinaria	12000	354000	7358530	cubatao
9	refinaria	15000	280000	7486000	paulinea
10	tropa	6000	660000	7470000	exercito-niteroi
11	tropa	8000	660000	7470000	marinha-niteroi
12	tropa	8000	634800	7466080	FAB-sta-cruz
13	tropa	10000	645310	7470540	exercito-V-militar

Figura 5.4: Descrição dos alvos

A situação considerada é de supremacia aérea, onde todas as aeronaves estão envolvidas no ataque. Uma lista de 42 pontos sensíveis considerados como alvos de importância estratégica ou de valor militar foi discriminada para a aplicação deste algoritmo. No arquivo de alvos cabe ressaltar que alguns deles estão com os mesmos valores de coordenadas. Isto foi feito intencionalmente com o objetivo de não excluir alvos pelo fator distância, evitando uma impressão errônea sobre a não importância de outros fatores através da retirada óbvia de alvos pelo raio de ação das aeronaves.

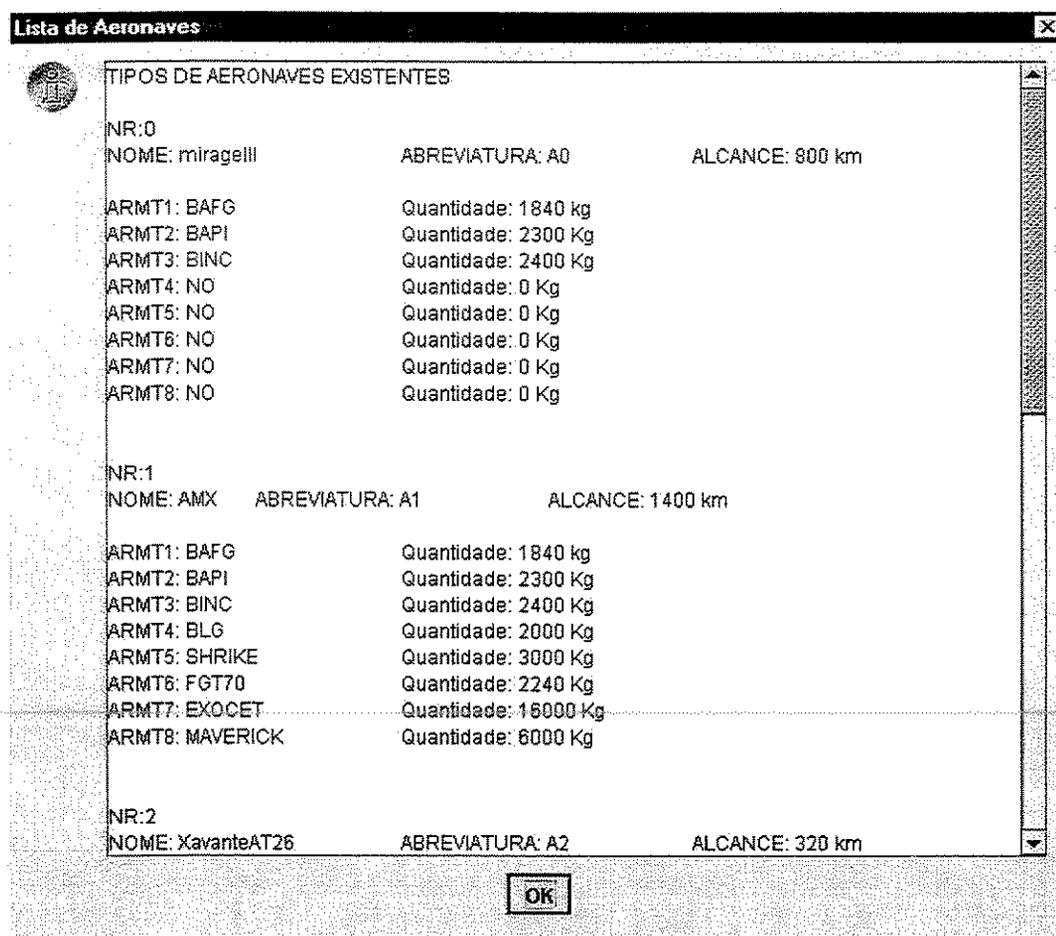


Figura 5.5: Aeronaves pertencentes à força invasora

Inicialmente a implementação requer que seja inserido o número de aeronaves que está sendo simulado. Isto é feito pela interface mostrada na figura 5.8.

Dada a entrada do número de aeronaves em simulação a próxima etapa é escolher quais os modelos destes aparelhos. Esta escolha deve ser coerente com o que ocorre na prática nas configurações de ataque. Neste exemplo a entrada é de 3 aeronaves, sendo especificadas como 2 aviões do tipo F5 e 1 avião do tipo Mirage III. A figura 5.9 mostra o quadro com as opções para a escolha do modelo.

Sequencialmente ao quadro da escolha da aeronave é apresentado um novo quadro que fornece a opção da entrada de outro modelo de aeronave para o caso da identificação ter sido imprecisa. Caso a resposta seja positiva um novo quadro de escolha de aeronaves é mostrado para que o processamento continue mas considerando um *OU* de aeronaves, com os valores de ambos modelos. Na execução deste exemplo não estão sendo consideradas incertezas na identificação, opção dada pelo quadro mostrado na figura 5.10.

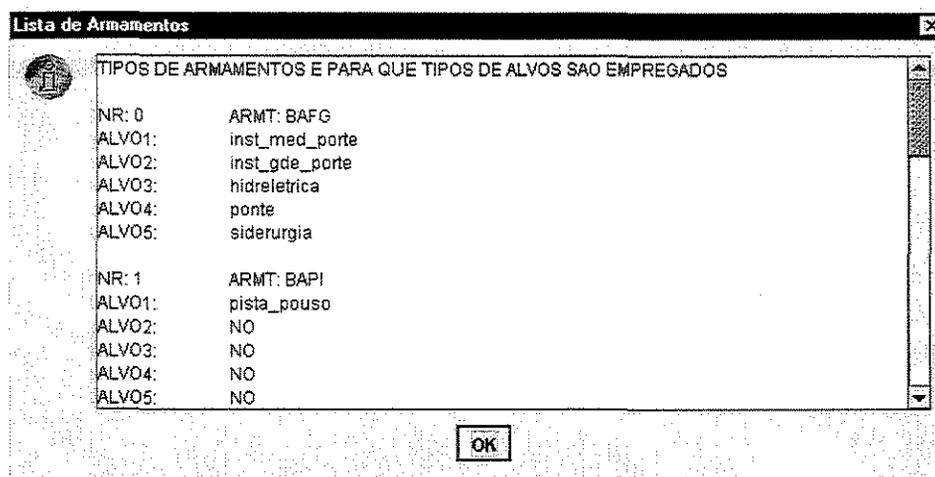


Figura 5.6: Armamentos e alvos associados

Após a escolha da aeronave é importante que suas coordenadas sejam atualizadas para o cálculo da distância da posição do conjunto de aeronaves até os pontos sensíveis e também até os aeródromos. Esses valores são computados para determinar os alvos dentro do raio de ação das aeronaves. A figura 5.11 mostra a inserção destes valores. Na prática são coordenadas obtidas diretamente do radar de detecção.

As etapas de inserção do modelo de aeronave, verificação de incertezas, e coordenadas é repetido até que tenha sido inserido as informações do número de aeronaves informados para a simulação. Em seguida um quadro de filtragem é apresentado para que seja considerada as condições de luminosidade diurna ou noturna. Neste exemplo é considerado o ataque diurno. É interessante notar que nesta fase do processamento são inseridos os filtros. Conforme visto na seção 4.2.1 eles são dependentes da sofisticação tecnológica da aeronave, do grau de adestramento do inimigo e dos conhecimentos oriundos da inteligência militar. Portanto quanto maior a quantidade de informações específicas maior a possibilidade de exclusão de alvos através da filtragem.

Por último, para este exemplo, está a saída com o quadro que apresenta os alvos considerados plausíveis. Da entrada com 42 alvos o resultado final foi a obtenção de 15 alvos. A figura 5.13 apresenta a relação dos alvos.

5.2.1 Análise dos Resultados

O exemplo visto na seção anterior ilustra os objetivos do trabalho. Apenas 35,7% dos alvos inicialmente considerados podem ser atingidos com esta configuração de aeronaves para um ataque. Essa redução acentuada tem uma explicação. O modelo Mirage III não tem armamentos para todos os tipos de alvos, como por exemplo mísseis anti-radiação

NOME	COORD E	COORD N
BAires1	790000	7550000
A0		
A1		
A2		
A3		
A4		
Porta-aviac1	400000	7450000
NO		
A4		
NO		
NO		
NO		
Base-X	530000	7595000
A1		
A2		
A3		
A4		
NO		
BAires2	610000	7550000
A1		
A2		
A3		
A4		
NO		

Figura 5.7: Descrição dos aeródromos com as aeronaves aptas a operar

e foguetes. Portanto sua presença limita a capacidade operacional do F5, aeronave de performance superior. Outro fator que contribui para o reduzido número de alvos no resultado é a quantidade de aeronaves. Com 3 aeronaves não é possível reunir quantidade de explosivos suficiente para destruir grandes alvos. Entretanto, caso fosse grande o número de aeronaves, este também poderia ser um fator utilizado como filtro para retirar aqueles alvos de menor porte, que requerem na sua destruição pouca quantidade de explosivos.

Uma conclusão parcial que foi obtida de processamentos como o deste exemplo é de que, quanto maior a versatilidade da aeronave maior é a necessidade de filtragens para se obter uma diminuição da quantidade de alvos. Na verdade, cada modelo de aeronave tem atributos que podem ser utilizados para este fim, mesmo aquelas dotadas de tecnologias modernas nos seus equipamentos.

5.3 Exemplo de uso do Planejador

O *Planejador* é uma aplicação obtida da rede associativa inicialmente construída para a avaliação de ameaças.

Um alvo deve ser escolhido para ser o objetivo do ataque. A figura 5.4 é utilizada

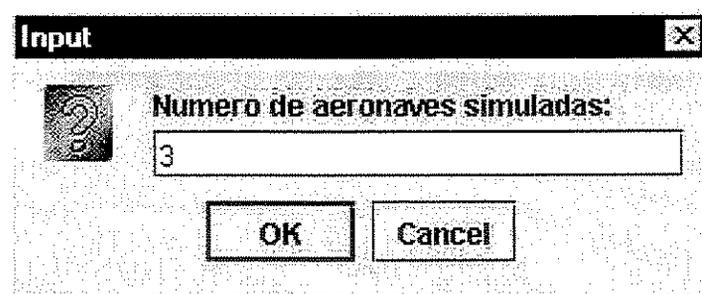


Figura 5.8: Entrada com o número de aviões a ser simulado

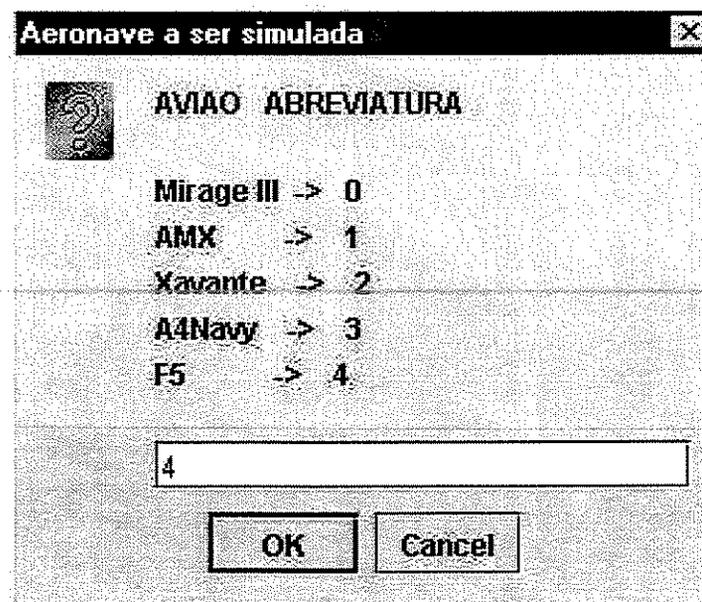


Figura 5.9: Entrada com o modelo de aeronave a ser simulado

para a identificação do alvo através do número de ordem na listagem, cuja entrada está mostrada na figura 5.14.

Após a escolha do alvo um quadro confirma a escolha realizada e mostra as suas características e coordenadas, como verificado na figura 5.15

Com estas informações e utilizando os dados dos arquivos, mostrados nas figuras 5.5, 5.6, e 5.7 o processamento apresenta as possibilidades de origem do ataque, com o respectivo número necessário de aeronaves de cada tipo, e a distância entre o aeródromo e o alvo para auxiliar no planejamento do tomador de decisões. Este resultado está mostrado na figura 5.16.

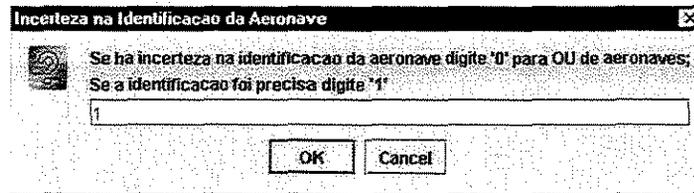


Figura 5.10: Quadro que permite o OU de aeronaves

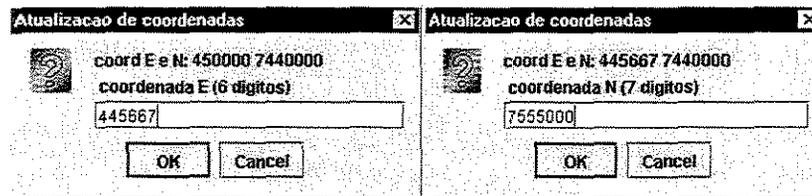


Figura 5.11: Quadro para atualização das coordenadas da aeronave

5.3.1 Análise dos Resultados

O resultado obtido pelo *Planejador* é muito semelhante ao que ocorre na prática. Ele verifica qual o aeródromo que fornece as melhores condições de origem do ataque, permitindo comparar com os demais aeródromos para que seja levado em consideração informações subjetivas, como por exemplo, a existência de defesa antiaérea na rota de um aeródromo para o alvo.

Outras avaliações são feitas para se chegar ao valor final do número de aeronaves, principalmente nos casos em que não há supremacia aérea. São fatores como a capacidade de guerra eletrônica das aeronaves inimigas, o nível de defesa antiaérea existente na área do alvo, e a capacidade de defesa aérea do inimigo. Estes fatores não foram explorados neste trabalho e são considerados como extensões a este estudo.

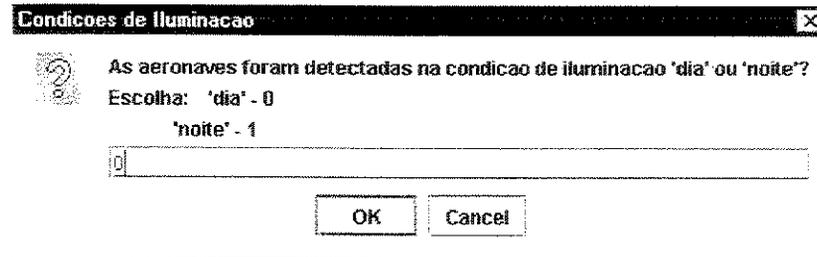


Figura 5.12: Filtragem através das condições de luminosidade

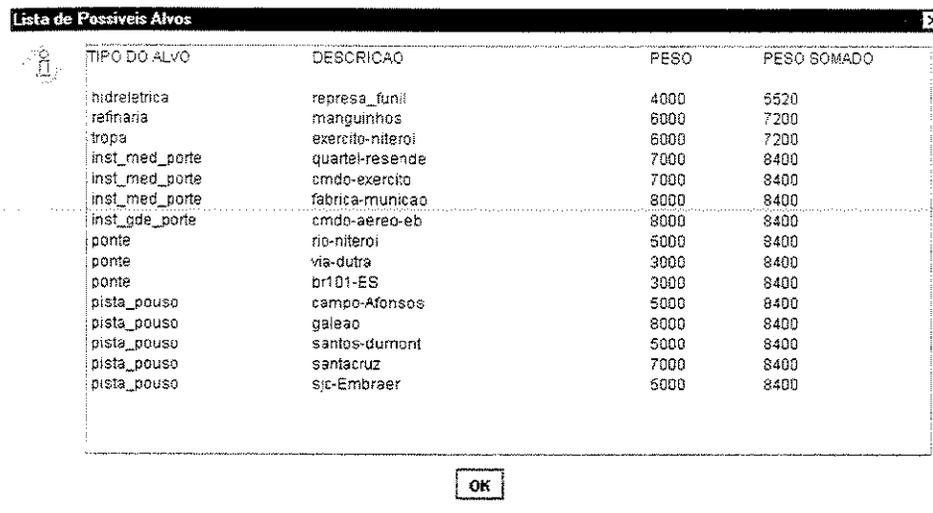


Figura 5.13: Lista com os alvos considerados plausíveis

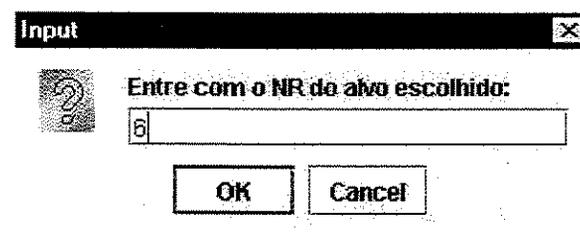


Figura 5.14: Entrada para a escolha do alvo

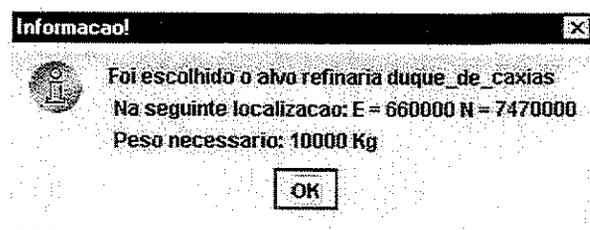


Figura 5.15: Confirmação do alvo escolhido

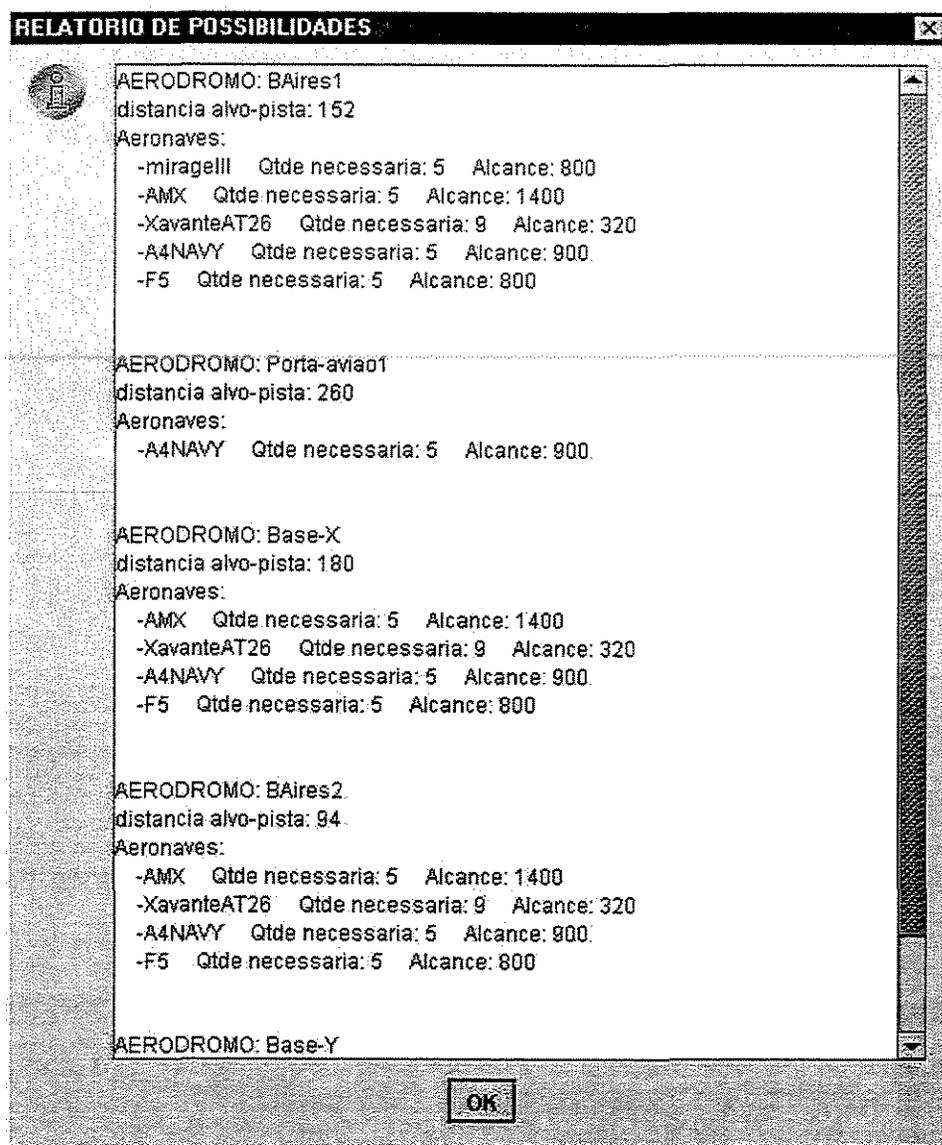


Figura 5.16: Relação de aeródromos e aeronaves para o ataque

Capítulo 6

Conclusões e Extensões

A dissertação apresenta uma forma de avaliar as ameaças provocadas pela presença de aeronaves inimigas no espaço aéreo em estado de guerra, e também, utiliza-se dos mesmos conceitos para apresentar um processamento que visa auxiliar no planejamento de missões de ataque.

Acredita-se que o proposto neste trabalho, dentro de um conhecimento tecnológico em desenvolvimento, pode auxiliar diretamente o sistema de defesa aeroespacial, visando principalmente :

- aumentar a integração dos sistemas de defesa aérea e antiaérea;
- auxiliar o processo de tomada de decisão; e
- reduzir as vulnerabilidades do uso do radar na defesa antiaérea.

A redução das vulnerabilidades do uso do radar é importante nos combates modernos. A partir do momento em que a defesa antiaérea utiliza seus radares de busca e de tiro ela passa também a ser detectada pelas aeronaves que possuem sistemas de guerra eletrônica. Um exemplo real e recente de detecção de uma bateria antiaérea, descrito em [Times, 2003], ocorreu na guerra do Iraque de 2003. No dia 23 de março de 2003 um caça tornado havia sido abatido por uma bateria antiaérea de mísseis *Patriot*, como relatado na seção 2.3.1. No dia seguinte, 24 de março, um caça F-16, em missão de combate, detectou através do sistema de guerra eletrônica de bordo que uma bateria *Patriot* tinha fixado o radar de tiro na própria aeronave F16. Sendo o processamento do *Patriot* automático aquela era a última etapa antes da realização do tiro. Antes, porém, em uma decisão considerada acertada pelo comando da força aérea americana, o piloto disparou um míssil anti-radiação, destruindo a bateria *Patriot* antes da realização do tiro.

Apesar deste exemplo por pouco não tratar-se de um fratricídio ele demonstra como torna-se vulnerável a utilização do radar com finalidade antiaérea mesmo em armamentos

modernos. Assim, um dos objetivos deste trabalho é possibilitar a operação somente dos radares envolvidos na defesa do ataque em andamento.

Outra conclusão desta dissertação é que a utilização do conhecimento declarativo na representação das redes associativas causais mostra as vantagens deste tipo de representação do conhecimento. O acesso as informações relevantes são codificadas explicitamente, permitindo com simplicidade o *raciocínio* sobre as relações existentes. Existe uma facilidade em acrescentar novos fatos, relações, ou entidades ao processo construído sem a necessidade de mudanças globais. O *Planejador* mostrado na seção 4.3 é um exemplo da versatilidade proporcionada pelo uso da abordagem declarativa do conhecimento, pois utiliza o mesmo princípio representativo e a mesma rede causal da aplicação principal porém com outra finalidade.

Os conhecimentos militares aplicados neste trabalho foram obtidos da Escola de Artilharia de Costa e Antiaérea do Exército e da Escola de Comando e Estado Maior da Aeronáutica. Entretanto, os assuntos explorados ao longo da dissertação possuem desdobramentos que não foram tratados nos tópicos apresentados, seja por tratarem de casos particulares ou por segurança das informações.

As informações técnicas utilizadas sobre aeronaves são reais e disponíveis nos manuais destes aparelhos que estão em uso no Brasil e no exterior e são de amplo conhecimento internacional. Informações de táticas de combate, de armamentos, da localização e discriminação de pontos sensíveis, e de aeródromos, foram parcialmente alteradas ou omitidas, visando preservar os valores intrínsecos destes dados.

Diversos cursos têm tratado os assuntos de métodos de inferência e de fusão de dados com finalidades militares, como o *Military Data Fusion* ocorrido em Londres em 2002, cujos dados estão no site <http://www.smi-online.co.uk/events/overview.asp?is=1&ref=682>, e o *Introduction to Multi-Target, Multi-sensor Data Fusion Techniques for Detection, Identification, and Tracking*, que tem sido realizado anualmente em Washington, DC, cujo objetivos estão em <http://www.oei-edu.com/r407.htm>. Nestes documentos é possível verificar que soluções têm sido propostas nas diferentes aplicações, mas que a 3ª fase da fusão de dados ainda está em evolução.

6.1 Trabalhos Futuros

Estudos adicionais podem ser propostos em relação a esta dissertação tanto no aspecto de implementação como no aspecto teórico. Esta seção tem o objetivo de expor alguns tópicos que podem ser como contribuição deste trabalho, como mostrados a seguir.

Múltiplos aeródromos de origem das aeronaves - As definições sobre a origem das aeronaves feitas no capítulo 3 consideram que todos os aviões partem do mesmo aeródromo, o que é de fato a técnica mais empregada. Extensões podem considerar operações com

coordenação e planejamentos mais complexos, em que aeronaves partem de diferentes aeródromos. A diminuição da distância entre elas associada às rotas de vôo podem ser empregadas para auxiliar nas inferências.

A particular situação do *reabastecimento em vôo*, REVO, foi considerado nos estudos mas não no processamento. Para as aeronaves que permitem REVO deve-se ter como coordenadas de aeródromo não aquelas referente a pista de decolagem do avião, mas sim a região ou linha limite para a realização desta operação de reabastecimento. Cabe ressaltar que o reabastecimento em vôo é uma operação de alto risco para as aeronaves, e por isso ocorrem dentro do território inimigo ou sobre o mar, longe das possibilidades da defesa aérea e antiaérea.

Aeronaves de múltiplas funções - No desenvolvimento da modelagem três casos foram analisados: com supremacia aérea, sem supremacia aérea, e com incertezas na identificação da aeronave. As técnicas de combate aéreo estão mudando rapidamente com a evolução tecnológica em vigor, havendo uma tendência de existência de aeronaves cada vez mais multi-funções e também cada vez mais específicas, como o caso dos modelos *A-10 Thunderbolt* destinados à destruição, entre outros alvos, de carros de combate blindados. Extensões deste trabalho podem ser feitas na análise das técnicas empregadas pelas aeronaves multi-funções, que ainda são poucas de poucas forças aéreas. O emprego nesta análise de procedimentos similares ao caso com supremacia aérea parece ser uma abordagem possível, dado que é considerado o pior caso, em que todas aeronaves se destinam a um alvo.

Uso de prioridades para os alvos - Além dos aspectos de filtragem mostrado em 4.2.1, acredita-se ser viável o uso de prioridades considerando a importância do alvo em um cenário de combate. Para a implementação deste aspecto é necessário um maior conhecimento sobre o planejamento de ataques aéreos e sobre a importância de cada instalação na infraestrutura de uma área em esforço de guerra.

Precisão na normalização - A comparação de armamentos feita durante a inserção das quantidades de explosivos na matriz de *armamentos x alvos* foi realizada através de uma normalização média dos valores vistos para o trabalho. Para atingir maior precisão nesta normalização pode ser utilizada uma tabela de normalização para cada classe de alvo, de acordo com a realização de um estudo complementar sobre os armamentos empregados.

Planejador - Um dos objetivos da construção do Planejador foi mostrar a versatilidade proporcionada pelo uso do conhecimento declarativo como forma de representação do conhecimento. Entretanto os resultados obtidos podem ser melhorados a fim de atingir a confiabilidade requerida. Para isso é necessário que sejam levados em consideração outros fatores além dos mostrados na seção 4.3, como capacidade de guerra eletrônica e capacidade de defesa aérea e antiaérea do inimigo, o que é normalmente feito através de condicionantes probabilísticas obtidas em manuais.

Referências Bibliográficas

- [Aftergood, 1997] Aftergood, S. (1997). Ocean surveillance information system. In <http://www.fas.org/irp/program/core/osis.htm>.
- [Baral, 2000] Baral, C. (2000). Abductive reasoning through filtering. In *Artificial Intelligence Journal*, volume 120(1), pages 1–28.
- [Benoliel, 1991] Benoliel, J. A. C. (1991). *Uma Aplicação em C3I por Fusão de Dados*. Tese de Mestrado - Instituto Militar de Engenharia.
-
- [Congress, 1993] Congress, U. S. (1993). *Who Goes There: Friend or Foe?* Office of Technology Assessment - US Government Printing Office.
- [Cormen et al., 2001] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., and Stein, C. (2001). *Introduction to Algorithms*. MIT Press, 2nd edition.
- [DOD, 2000] DOD, U. S. (2000). *Precision Targeting Identification - Defense Technology Objectives for Joint Warfighting Science and Technology Plan*. U.S. Department of Defense.
- [EME, 2001] EME (2001). *C44-1 Emprego da Artilharia Antiaérea*. Estado Maior do Exército - EME, 4th edition.
- [EsACosAAe, 1999] EsACosAAe (1999). *C44-8 Comando e Controle na Artilharia Antiaérea*. Escola de Artilharia de Costa e Antiaérea - EsACosAAe, 3rd edition.
- [EsACosAAe, 2001] EsACosAAe (2001). *DAMEPLAN - Dados Médios de Planejamento*. Escola de Artilharia de Costa e Antiaérea - EsACosAAe, 4th edition.
- [Hall and Llinas, 2001] Hall, D. and Llinas, J. (2001). *Handbook of Multisensor Data Fusion*. CRC Press, 1st edition.
- [Hall and Llinas, 1997] Hall, D. L. and Llinas, J. (1997). An introduction to multisensor data fusion. In *Proceedings of the IEEE*, volume 85, pages 6–22.

- [Henderson and Gatt, 2003] Henderson, S. and Gatt, P. (2003). Coherent laser radar tutorial. In *MSS Conference - Coherent Technologies*.
- [Josephson, 1990] Josephson, J. R. (1990). On the logical form of abduction. In *AAAI Spring Symposium Series: Automated Abduction*.
- [Kumar and Venkataram, 1996] Kumar, G. P. and Venkataram, P. (1996). Probabilistic extension to realistic abductive reasoning model. Department of Electrical Communication Engineering - Indian Institute of Science.
- [Penn and Reggia, 1990] Penn, Y. and Reggia, J. A. (1990). *Abductive Inference Models for Diagnostic Problem-Solving*. Springer-Verlag, 1st edition.
- [Pope and Llinas, 1973] Pope, H. E. and Llinas, J. (1973). On the mechanization of abductive logic. In *Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, pages 147–152. Morgan Kaufmann.
- [Reggia et al., 1985] Reggia, J. A., Nau, D., Wang, P., and Peng, Y. (1985). A formal model of diagnostic inference. In *Information Sciences*, volume 37, pages 227–285.
-
- [Russell and Norvig, 2003] Russell, S. and Norvig, P. (2003). *Artificial Intelligence - A Modern Approach*. MIT Press, 2nd edition.
- [Santos and Wainer, 2003] Santos, A. A. and Wainer, J. (2003). Inferência abdutiva na avaliação de ameaças na defesa aeroespacial. In *Anais do IV ENIA/SBC*, volume 1.
- [Steinberg et al., 1998] Steinberg, A. N., Bowman, C. L., and Jr, W. (1998). Revisions to the jdl data fusion model. In *Proceedings of 3rd NATO/IRIS Conf.*
- [Times, 2003] Times, L. A. (2003). Vaunted patriot missile has a friendly fire failing. In <http://www.cdw.org/nmd/nmdupdates/030424.html>.
- [Tocantins and Hemerly, 2000] Tocantins, C. A. and Hemerly, A. (2000). Uma proposta de sistema de vigilância territorial. In *Anais do GIS Brasil (GIS)*.
- [Wald, 2001a] Wald, A. L. (2001a). The jdl definition of information fusion. In <http://www.data-fusion.org/article.php?sid=70>.
- [Wald, 2001b] Wald, A. L. (2001b). Some examples of systems exploiting information fusion. In <http://www.data-fusion.org/article.php?sid=75>.