Mário Aparecido Corrêa

Modelo de Veículos Aéreos não Tripulados Baseado em Sistemas Multi-Agentes

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

São Paulo
2008

Mário Aparecido Corrêa

Modelo de Veículos Aéreos não Tripulados Baseado em Sistemas Multi-Agentes

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração:
Sistemas Digitais

Orientador:
Prof. Dr. João Batista Camargo Júnior

São Paulo
2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 22 de novembro de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Ficha Catalográfica

Corrêa, Mário Aparecido
Modelo de Veículos Aéreos não Tripulados Baseado em Sistemas Multi-Agentes/M.A. Corrêa. – ed.rev. – São Paulo, 2008. 90 p.

Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1.Aeronaves não tripuladas 2. Sistemas multi-agentes 3.Robôs I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais. II.t.

Dedico este trabalho à minha esposa Rosana e à minha filha Amanda, as quais me ensinaram que sábio é o homem que reconhece na família o seu verdadeiro baluarte.

Agradecimentos

Ao Professor Dr. João Batista Camargo Júnior, pela inestimável orientação, amizade, apoio e pelos inúmeros ensinamentos transmitidos ao longo dos últimos anos, os quais guardarei e aplicarei por toda a vida.

Aos Professores e Colegas do Grupo de Análise de Segurança da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, com os quais muito aprendi e que conhecem, muito bem, o significado de trabalho em equipe e companheirismo.

Ao Major Eno Siewerdt, a quem devo o fascínio por este universo da aviação.

Aos amigos que ao longo dos últimos anos me apoiaram e me incentivaram.

Ao Professor Dr. Hugo Enrique Hernández Figueroa, da Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP, que além de ter me orientado em meu Mestrado, foi o primeiro a abrir-me as portas da Academia.

Aos grandes nomes da ciência, que desde a infância muito me fascinaram e inspiraram.

À minha esposa e filha, sem as quais, nada disso seria possível.

Resumo

Nos últimos anos, os países desenvolvidos vêm dedicando crescentes esforços para integrar o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) no espaço aéreo controlado, visando sua utilização para fins civis. Embora este tema ainda não tenha consenso quanto aos critérios a serem adotados, é de comum acordo na comunidade que, no mínimo, devam ser mantidos os atuais níveis de segurança (*"Safety"*) praticados pela aviação civil mundial. Neste cenário, a convivência entre aeronaves comerciais, com cada vez mais passageiros e aeronaves não tripuladas, traz sérias preocupações com relação à capacidade que o sistema atual de navegação, controle, vigilância e de Gerenciamento de Tráfego Aéreo tem para lidar com situações de perigo decorrentes da aproximação entre estas duas categorias de aeronaves. Neste contexto, esta tese propõe uma modelagem de um VANT, tendo-se como ponto de partida os conceitos de robô móvel, cujo modelo de inteligência é fundamentado em Inteligência Artificial Distribuída (IAD), implementável segundo o paradigma de Sistemas Multi-Agentes (SMA) e que leve em consideração os principais requisitos de *"Safety"* exigidos pelo "*Communication Navigation System/Air Traffic Management*" (CNS/ATM), de modo a permitir a futura inserção destas aeronaves no espaço aéreo controlado.

Abstract

During the last years, developed countries are conducting efforts to integrate Unmanned Aircraft Vehicles (UAVs) to the controlled airspace, aiming at their civilian use. So far, there has been no common consensus on the criteria to be adopted by the community that should, at least, keep the minimum safety levels international aviation has already attained. In this scenario, commercial aircrafts - with more and more passengers - and UAVs will share the same space. There will be a lot of concern related to the actual navigation, control and surveillance system capacity as well as to the air traffic control management ability to handle potentially dangerous situations due to the approximation between aircrafts of these two categories. Based on this scenario, this thesis proposes an UAV modeling having as starting point the mobile robot concept, of which the intelligence model based on Distributed Artificial Intelligence, can be implemented by using the Multi Agent Systems paradigm. This paradigm should take the main safety requirements as an obligation, as defined by the Communication Navigation System/Air Traffic Management (CNS/ATM), as a way of handling the future insertion of UAVs into the controlled airspace.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas

1 Introdução **1**

1.1 Motivação 4

1.2 Objetivos 6

1.3 Organização 8

2 Veículo Aéreo não Tripulado **9**

2.1 Introdução 9

2.2 Histórico 13

2.3 VANT no Brasil 14

3 Definições e Considerações Teóricas **17**

3.1 Sistemas Multiagentes 17

3.2 Agentes Inteligentes 17

3.2.1 Inteligência Artificial Distribuída - IAD 17

3.2.2 Sistemas Multi-agentes 18

3.2.3 Agentes 19

3.2.4 Arquiteturas de Agentes 24

3.2.5 Arquiteturas Reativas ou Não-Deliberativas 27

3.3 Natureza Robótica do VANT 28

4 Modelo Proposto: VANT Baseado em Sistema Multi-Agentes 31

4.1 VANTS sob a Ótica de Agentes 32

4.1.1 Definição do Ambiente 37

4.2 Agente Avaliador de Riscos 40

4.3 Agente Decisor 46

4.4 Agente Executor 58

4.5 Considerações Finais 59

5 Experimentação e Prova de Conceito 61

5.1 Definição do Ambiente Computacional 61

5.2 Considerações sobre os Experimentos 62

5.2.1 Estratégias de Execução dos Experimentos 64

5.3 Resultados 68

5.3.1 Cenário 1: Amostra de Controle 68

5.3.2 Cenário 2: Colaborativo 69

5.3.3 Cenário 3: Falha dos Atuadores 70

5.3.4 Cenário 4: Falha dos Sensores 71

5.3.5 Cenário 5: Competitivo 72

5.3.6 Cenário 6: Realístico 73

5.4 Considerações Finais 74

6 Conclusões e Recomendações 75

Referências 81

Apêndice A – JADE: *"Java Agent DEvelopment Framework"* 87

A.0.1 Principais Características do JADE 87

A.0.2 FIPA e JADE 88

A.0.3 Considerações 89

Lista de Figuras

3.1 Modelo Conceitual de um Agente. 19

3.2 Categorização de Agentes (JENNINGS, 1996). 23

3.3 Arquitetura para Agentes Funcionais. 25

3.4 Arquitetura Baseada em Estados Mentais. 26

3.5 Arquitetura de um agente reativo (RUSSELL; NORVIG, 2000). . . . 28

3.6 Modelo de Agente Híbrido (RUSSELL; NORVIG, 2000) 29

4.1 Interação Agente-Ambiente. 32

4.2 Modelo Lógico do SMA proposto para o VANT 36

4.3 Modelo de Proteção de uma Aeronave 38

4.4 Quadro de Métricas usuais para descrição de Riscos em Aviação Civil. 41

4.5 Visão da Rede Bayesiana do Agente Avaliador de Riscos. 45

4.6 Arquitetura Básica de um SE. 49

4.7 Arquitetura do Agente Executor. 59

5.1 Plano de vôo original do VANT. 63

5.2 Modelo de atuadores da VANT 66

A.1 Modelo padrão de plataforma de agentes definido pela FIPA. . . . 89

Lista de Tabelas

4.1 Possíveis Combinações de Negociação entre Aeronaves. 52

5.1 Tabela de Estados e Ações para as Aeronaves e o VANT. 63

5.2 Probabilidade máxima admissível de ocorrência de um acidente por hora de vôo, de acordo com (FAA/EUROCONTROL, 1998). . . . 64

5.3 Resultados obtidos após 5.000 horas de vôo, sem atuação dos Agentes. 68

5.4 Resultados obtidos após 5.000 horas de vôo, com a atuação dos Agentes. 70

5.5 Resultados obtidos após 5.000 horas de vôo, com Taxa de Falha dos Atuadores em 10%. 71

5.6 Resultados obtidos após 5.000 horas de vôo, com Taxa de Falha dos Sensores em 10%. 72

5.7 Resultados obtidos após 5.000 horas de vôo, com Taxa de Colaboração das Aeronaves em 5%. 73

5.8 Resultados obtidos após 5.000 horas de vôo, cenário ideal. 74

Lista de Abreviaturas

ACL "*Agent Communication Language*"

ANAC Agência Nacional de Aviação Civil

BDI "*Belief, Desire and Intention*"

CENIPA Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos

CFP "*Call For Proposals*"

CNS/ATM "*Communication Navigation System/Air Traffic Management*"

DAC Departamento de Aviação Civil

FAA "*Federal Aviation Administration*"

FIPA "*Foundation of Intelligent Physical Agents*"

GAS Grupo de Análise de Segurança

GPS "*Global Positioning System*"

IA Inteligência Artificial

IAD Inteligência Artificial Distribuída

ICAO "*International Civil Aviation Organization*"

JADE "*Java Agent DEvelopment Framework*"

JESS "*Java Expert System Shell*"

KIF "*Knowledge Interchange Format*"

KQML "*Knowledge Query and Manipulation Language*"

MAFV "*Multi-purpose Autonomous Flight*"

MTBF "*Mean Time Between Failures*"

PID Proporcional Integral Diferencial)

POLI Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RDP Resolução Distribuída de Problemas

RMIT "*Royal Melbourne Institute of Tecnology*"

SE Sistema Especialista

SMA Sistemas Multi-agentes

TAEMS Task Analysis, Environment Modeling, and Simulation

TCAS *Traffic allert and Collision Avoidance System*

VANT Veículo Aéreo Não Tripulado

1 Introdução

"I propose to consider the question: 'Can machines think ?'
This should begin with definitios of the meaning of the terms 'machine' and 'think'."
A.M. Turing

Deixando de discorrer sobre a pré-história da aviação, sonho dos antigos egípcios e gregos, que representavam alguns de seus deuses por figuras aladas e passando por sobre o vulto de estudiosos do problema, como Leonardo da Vinci, que no século XV construiu um modelo de avião em forma de pássaro, pode-se localizar o início da aviação nas experiências de alguns pioneiros que, desde os últimos anos do século XIX, tentaram o vôo de aparelhos então denominados mais pesados do que o ar, para diferenciá-los dos balões cheios de gases, e por conseqüência mais leves do que o ar.

Ao contrário dos balões, que se sustentavam na atmosfera por causa da menor densidade do gás em seu interior, os aviões precisavam de um meio mecânico de sustentação para que se elevassem por seus próprios recursos. O brasileiro Santos Dumont foi o primeiro aeronauta que demonstrou a viabilidade do vôo do mais pesado do que o ar. O seu vôo no "14-Bis" em Paris, em 23 de Outubro de 1906, na presença de inúmeras testemunhas, constituiu um marco na história da aviação, embora a primazia do vôo em avião seja disputada por vários países. No período de 1907 a 1910, Santos Dumont realizou, ainda, inúmeros vôos com o monoplano "*Demoiselle*".

A partir das experiências bem sucedidas dos Wright e de Santos Dumont, o desenvolvimento do avião deslanchou de modo surpreendente.

Porém, tal como acontece com muitas outras invenções, esse desenvolvimento ocorreu muito mais pelo esforço de guerra[1] do que pelo seu uso comercial. Não cabe aqui discutir as "vantagens" da guerra, se é que existem. O fato é que, durante todo o Século **XX**, os períodos de maior desenvolvimento da aviação, à exceção dos anos 20 e 30, coincidiram com períodos belicosos.

[1]Desenvolvimento de aviões militares.

Desde a sua efetiva criação, o avião passou por vários períodos de "amadurecimento", em que suas características mais importantes foram sendo definidas. Pode-se identificar esses principais períodos como sendo:

- **De 1903-6 a 1914:** Nascimento do avião e consolidação dos princípios construtivos e operacionais. Até esta época, a maioria dos aviões eram biplanos (duas asas sobrepostas) e construídos de madeira e lona. Até o início da Primeira Guerra, os aviões ainda eram muito imprevisíveis e inseguros, restringindo-se suas manobras as habilidades dos pilotos;

- **De 1914 a 1918:** Primeira Guerra Mundial. Os aviões se desenvolveram rapidamente e foram criadas aplicações especializadas como caças, bombardeiros, aviões de observação e de transporte. A maioria dos aviões ainda continuava sendo de madeira e lona, embora alguns modelos já empregassem o metal (alumínio) na fabricação de algumas peças;

- **Década de 20 e 30:** Com a paz, houve um grande ímpeto na aviação comercial, liderada pelos alemães que, restritos em sua aviação militar pelo Tratado de Versalhes, concentraram-se na produção de aviões civis e dirigíveis[2];

- **De 1935 a 1945:** Período iniciado com a ascensão da Alemanha Nazista, seguido da Segunda Guerra Mundial. Guardadas as proporções[3], foi o período de maior desenvolvimento do avião como o conhecemos hoje, evoluindo dos biplanos movidos à hélice para o avião a turbo-hélice, com asa de geometria variável. Boa parte da tecnologia desenvolvida nessa época é utilizada até os dias de hoje;

- **Pós-Guerra:** Após a Segunda Guerra Mundial, como seria de se esperar, houve novo "*boom*" da aviação comercial, favorecida agora por inovações como o "*Comet*", primeiro avião a jato para transporte de passageiros, que começou a operar em 1952 e o Boeing 707, em 1954, primeiro dos grandes jatos, tais como os de hoje.

Assim, nos últimos 50 anos, o desenvolvimento da aviação comercial tem se limitado ao desenvolvimento de novas tecnologias de construção, tais como materiais mais leves e seguros, motores mais econômicos e menos poluentes e na incorporação dos avanços da eletrônica digital, principalmente nos sistemas de vôo e navegação, com níveis de segurança estabelecidos internacionalmente, como

[2]Embora grande parte desses projetos tivesse o seu uso previsto em operações militares.
[3]Apenas 10 anos.

será apresentado mais adiante nesta tese. No mesmo período, na área militar, houve vários conflitos localizados, tais como a Guerra da Coréia e a do Vietnã nas décadas de 50 e 60/70[4], a Guerra do Golfo e da Bósnia em período mais recente, que novamente forçaram o aperfeiçoamento da guerra aérea. Neste contexto de gerra surgiram os aviões com tecnologia "*stealth*", conhecidos popularmente como "aviões invisíveis" pelo fato de serem capazes de espalhar os feixes dos radares de vigilância e cujo emprego na Guerra do Golfo inaugurou uma nova era na aviação militar. Foi neste mesmo cenário que surgiram os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT)[5]. Em abril de 2001 um "**Global Hawk**", um avião não tripulado de uso exclusivamente militar, voou de "*Edwards AFB*" nos Estados Unidos até a Austrália, sem escalas e sem reabastecimento. O vôo tomou 23 horas e 23 minutos e é o vôo ponto-a-ponto mais longo já realizada por um avião não tripulado. Em outubro de 2003, o primeiro vôo totalmente autônomo sobre o Oceano Atlântico por uma aeronave controlada por computadores foi realizado. A Operação "Tempestade no Deserto" sublinhou o papel central que os satélites possuem nos conflitos modernos, contudo, os VANTs levaram uma vantagem importante sobre os satélites, pois além de serem mais baratos é mais fácil alterar sua trajetória e assim sua cobertura. Além disso, fornecem um método de coleta de informações táticas altamente descartável pois possuem a vantagem adicional de serem capazes de voar mais perto do alvo sem colocar em risco a vida de um piloto. Surge assim a era dos VANTs, ou seja, um veículo aéreo motorizado que não transporta um operador humano.

A partir desta perspectiva, têm-se que o estado atual e futuro do VANT apresenta alguns desafios para a Aviação Mundial. Por exemplo, como pode esta lidar com as mudanças culturais necessárias para otimizar o uso de um veículo aéreo que traga consigo um aumento significativo da capacidade tática e a um custo mais baixo, sem um piloto a bordo? Além disso, que procedimento de segurança (*"Safety"*[6]) e de seleção de pessoal produzirá o melhor uso dos avançados sistemas VANT ?

Sabe-se que a presença de um piloto humano em uma aeronave acarreta

[4]Período conhecido como a "Era dos Jatos", sendo deste período a quebra da barreira do som.

[5]Um Veículo Aéreo Não Tripulado, também chamado UAV, do inglês "*Unmanned Aerial Vehicle*", e às vezes abreviado VANT, é o termo usado para descrever todo e qualquer tipo de aeronave que não necessita de pilotos embarcados para ser guiada. Este tipo de aeronave é controlada à distância por meios eletrônicos e computacionais, sob a supervisão e governo humanos, ou de forma autônoma por meio de sistemas computacionais embarcados.

[6]Em português o conceito de segurança é muito abrangente, indo desde a segurança da informação até segurança humana e de bens físicos, sendo que em inglês o termo *"SAFETY"* é mais específico à segurança humana e de bens materiais e ambientais.

numerosas desvantagens em termos de custo e peso, assim como as limitações dos consoles e sistemas de apoio à sobrevivência de uma tripulação. O piloto também restringe a manobrabilidade da aeronave por causa dos limites fisiológicos no que diz respeito à tolerância a força **G**[7].

Contudo, remover o piloto, dá origem a uma liberdade de desenho que pode produzir uma aeronave menor, mais eficiente, mais leve e de preço mais acessível sendo especialmente projetada para as aplicações fim. Dessa forma, as promissoras capacidades do VANT tornaram-no um fenômeno na Aviação cujos investimentos brasileiros em pesquisa tornam-se extremamente necessários, pois nos últimos anos os países desenvolvidos vem dedicando crescente esforços para integrar estes Veículos Aéreos não Tripulados ao espaço aéreo controlado, visando sua utilização para fins civis[8]. Dado o estado atual de tais pesquisas no âmbito mundial, pode-se deduzir que os fatores tecnológicos já não restringirão, no futuro próximo, o desenvolvimento de aeronaves não-tripuladas realmente inteligentes. Contudo, muito do desenvolvimento nesta área está focado no próprio desenho da aeronave, sua manobrabilidade e sua dinâmica de operação, deixando uma ampla lacuna tecnológica no que diz respeito ao emprego de técnicas que permitam aos VANTs agirem de forma verdadeiramente autônoma em relação ao seu contexto, e é precisamente neste nicho que se fundamenta esta pesquisa. Neste ponto é extremamente oportuno citar o pioneirismo do projeto ARARA conduzido na USP de São Carlos e que vem sendo empregado na agricultura, realizando vôos autônomos através de um sistema de navegação pré-programado em solo (TRINDADE et al., 2004).

Neste ponto faz-se importante ressaltar que defende-se nesta tese a seguinte visão: Sendo estas máquinas aeronáuticas capazes de realizarem vôos totalmente autônomos, tratam-se de robôs móveis cujo modal é o ar.

1.1 Motivação

De acordo com o Departamento de Aviação Civil (DAC), a operação de um VANT só é autorizada no Brasil se tal operação puder atender aos mesmos princípios de segurança aplicáveis às operações de aeronaves tripuladas, ou seja: Estas aeronaves [9] não podem ser ou criar riscos para pessoas ou propriedades no ar

[7]Unidade utilizada para se medir o efeito da aceleração onde 1 G é igual à aceleração da gravidade na terra ($9,8\,\mathrm{m/s^2}$).

[8]Além dos já consagrados empregos militares.

[9]A partir deste ponto, no texto, o uso do termo aeronave se referenciará a veículos aéreos tripulados ou não indiferentemente.

ou na superfície, maiores do que os riscos que podem ser atribuídos às operações de aeronaves tripuladas de classe ou categoria equivalente. A exemplo do que ocorre com as aeronaves normais, um princípio básico de segurança a ser considerado é que a probabilidade de uma falha simples do sistema aéreo não tripulado ser catastrófica deve ser da ordem de 10^{-5} falhas por ano, o que equivale a 10^{-9} falhas por hora (FAA/EUROCONTROL, 1998), onde tal probabilidade é calculada através de um processo estatístico, com base em análise e ensaios de cada componente do VANT.

Como, em geral, tais operações hoje são conduzidas por um operador (piloto) humano, este deve possuir seguro de responsabilidade civil e deve entregar à autoridade de aeronáutica civil, com jurisdição sobre a área onde ocorrerá a missão, um termo de responsabilidade assinado, responsabilizando-se por qualquer dano a terceiros que venha a ocorrer.

É essencial citar que a prevenção de acidentes aeronáuticos é estimulante da atividade aérea como um todo e não uma ação restritiva ao vôo, pois a sua finalidade é fazer com que a operação se desenvolva dentro de normas e parâmetros preestabelecidos, permitindo que a atividade aérea seja realizada sem interrupções, tendo por base uma análise efetiva dos riscos inerentes e com o máximo de segurança, preservando-se assim, os recursos humanos e materiais a ela diretamente relacionados[10].

Embora ainda não regulamentado, é certo que os VANTs trazem a promessa de serem eficazes em um amplo espectro de características operacionais e de difícil realização com os atuais sistemas tripulados. Além disso, os baixos custos operacionais e de aquisição destas aeronaves podem impulsionar um desenvolvimento acelerado das tecnologias que permitam um uso cada vez mais regular do VANT em aplicações civis, como pode ser observado em (UVS, 2005). Assim sendo, entende-se que o estado atual, e futuro, dos veículos aéreos não-tripulados apresenta fortes desafios para a academia, especialmente no que tange otimizar o uso de um veículo aéreo que traga consigo um aumento significativo da capacidade e segurança, de operação a um custo efetivamente mais baixo.

Como será exposto no capítulo 2, ver-se-á que alguns países, dentre os quais inclui-se o Brasil, reconhecem que os VANTs são algo de novo e importante e estão, em ritmos bem diferentes, investindo em seus próprios programas de pesquisa.

[10]Código Brasileiro de Aeronáutica - Lei no 7.565 de 19 de dezembro de 1986.

Visando este cenário é que, nos últimos quatro anos, o Grupo de Análise de Segurança (GAS), da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI), vem dedicando especial atenção em suas pesquisas no que diz respeito ao transporte aéreo. Entre os projetos do GAS, a Análise de Segurança de Sistemas Aeronáuticos consiste em utilizar metodologias de análise de risco para avaliar a probabilidade de acidentes/incidentes em sistemas aeronáuticos, bem como propor soluções para o aumento do nível de segurança destes sistemas. Diversas pesquisas de mestrado e doutorado vêm sendo conduzidas dentro deste enfoque. No âmbito desta Linha de Pesquisa está o programa do "Estudo da Segurança do Sistema CNS/ATM[11]", cujo objetivo principal deste projeto é o desenvolvimento acadêmico de pesquisas na área de confiabilidade e segurança aplicada aos sistemas que compõem o CNS/ATM e sua implementação no Brasil[12].

Dentro deste contexto, e do exposto no início, surge um grupo de estudos dedicado a pesquisas que levem à inclusão dos VANT no espaço aéreo controlado, de modo a atender às exigências de *"SAFETY"* do CNS/ATM, orientados pelo fato de que o emprego de VANT em aplicações civis deverá crescer, em uma perspectiva global, à uma taxa de 20% nos próximos 5 anos (UVS, 2005), (JAPAN UAV ASSOCIATION, 2005) e (DOD, 2005). É no cerne deste grupo que se insere esta pesquisa.

1.2 Objetivos

O objetivo desta pesquisa consiste em apresentar uma modelagem de um VANT, tendo-se como ponto de partida os conceitos de robô móvel, cujo modelo de inteligência é fundamentado em Inteligência Artificial Distribuída (Inteligência Artificial Distribuída (IAD)), implementável segundo o paradigma de Sistemas Multi-Agentes (Sistemas Multi-agentes (SMA)) e que leve em consideração os principais requisitos de *"SAFETY"* exigidos pelo CNS/ATM, de modo a permitir a futura inserção destas aeronaves no espaço aéreo controlado.

[11]No começo dos anos 80, a Organização de Aviação Civil Internacional (OACI) reconheceu que as limitações dos sistemas atuais de navegação aérea estavam crescendo de maneira significativa e que seria necessário introduzir melhorias para sustentar a aviação civil do século 21. Em 1983, foi instituído o comitê especial, denominado sistemas futuros de navegação aérea (FANS), ao qual foi confiada a tarefa de estudar, identificar, analisar e avaliar novos conceitos e novas técnicas sobre o assunto e apresentar recomendações para o desenvolvimento progressivo e coordenado da navegação aérea. O primeiro Comitê FANS executou sua tarefa em 1988, elaborando a concepção de sistemas de comunicações, navegação e vigilância (CNS), baseada, principalmente em satélites destinados a suportar e a propiciar a implementação de novos conceitos, abrangendo a gerência do tráfego aéreo (ATM).

[12]Adaptado do site oficial do GAS: http://www.pcs.usp.br/~gas/projetos.php

Para tal modelagem, deve-se partir da definição de robô móvel visando reforçar as características autônomas (ou de inteligência) de um VANT genérico, permitindo-se dessa forma modelá-lo como uma entidade inteligente inspirada no conceito de agente e que seja, de acordo com (RUSSELL; NORVIG, 2000): "... capaz de perceber seu ambiente por meio de sensores, e agir sobre esse mesmo ambiente por intermédio de atuadores". Assim sendo e utilizando-se da visão de robô móvel, deve-se ter em mente as "três leis da robótica" criadas por Isaac Asimov, em seu livro: "Eu Robô".

Dentro desta filosofia deve se considerar que uma aeronave sem tripulação necessita de autonomia para cumprir suas missões. Assim, uma vez entendida a natureza robótica do VANT este, em geral, deve estar preparado para lidar com ambientes parcialmente observáveis, estocásticos, dinâmicos e contínuos, tendo, portanto a capacidade de "Raciocinar" sobre as ações a serem executadas. Para tanto e para completar o modelo robótico, pretende-se adotar uma abordagem do ponto de vista de sistemas multi-agentes, considerando-se que um agente genérico seja definido como sendo uma entidade real ou virtual capaz de agir num ambiente qualquer, de se comunicar com outros agentes e que possui competências específicas. Assim, dentro deste ponto de vista, deve ser investigada a possibilidade de se obter um modelo lógico de um VANT seguindo a filosofia de sistema multi-agentes, composto por agentes especializados. A interação e a colaboração entre estes agentes, para a execução das tarefas (objetivos) do VANT, deverá permitir que este se comporte como um único agente físico.

Por fim, em tal sistema multi-agente, deverá ser pesquisada a utilização do Raciocínio Probabilístico baseado na Regra de Bayes, como forma de avaliação de riscos e investigada a adoção de um sistema especialista baseado em regras *"Fuzzy"* como apoio a tomada de decisões.

No aspecto de prova dos conceitos, pretende-se executar um conjunto de experimentos computacionais com o enfoque na medição do Perigo de Colisões em Vôo entre o VANT e outra aeronave em processo de cruzamento de sua rota. Tais experimentos serão compostos por seis cenários distintos:

1. Amostra de Controle: Ou seja, sem a atuação dos agentes modelados;
2. Colaborativo;
3. Falha dos Atuadores;
4. Falha dos Sensores;

5. Competitivo;

6. Realístico.

Em cada cenário poder-se-á ajustar os seguintes parâmetros:

1. Taxa de Cooperação das Aeronaves;

2. Taxa de Falha dos Sensores;

3. Taxa de Falha dos Atuadores;

1.3 Organização

Visando tais objetivos, este trabalho está dividido em seis capítulos, onde nos Capítulos 1 e 2 apresentam-se os conceitos aeronáuticos e os Veículos Aéreos Não Tripulados, sob a ótica histórica e operacional.

No Capítulo 3 apresentam-se os conceitos fundamentais de Sistemas Multi-Agentes e um ponto introdutório sobre robôs móveis.

No Capítulo 4 apresenta-se o modelo proposto nesta pesquisa, tendo por base os conceitos de Agentes Inteligentes e Robôs Móveis.

Já no Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos nos processos de simulações e validações do modelo proposto. Finalmente, no Capítulo 6 realizam-se as conclusões e recomendações oriundas dos resultados da pesquisa.

2 Veículo Aéreo não Tripulado

"As invenções são, sobretudo, o resultado de um trabalho teimoso."
Santos Dumont

2.1 Introdução

O Departamento de Defesa Americano (DOD) define VANT[1] como sendo "*um veículo aéreo motorizado que não transporta um operador humano, usa forças aerodinâmicas para a sustentação aérea, pode voar de maneira autônoma ou ser pilotado por controle remoto, pode ser descartável ou recuperável e pode transportar uma carga útil letal ou não-letal. Veículos balísticos ou semibalísticos, mísseis de cruzeiro e projeteis de artilharia não são considerados veículos aéreos não-tripulados*"(JP, 2005).

Embora a idéia de remover o piloto da nacele[2] possa ser conceitualmente simples, o VANT apresenta um desafio operacional, já que é um sistema planejado para voar em ambiente hostil. De uma maneira mais ampla, o VANT de emprego militar também pode englobar armamentos "*stand-off*"[3]. Em futuro próximo, entrarão em operação veículos não tripulados de combate, que executarão tanto missões operacionais ar-solo como ar-ar e VANT de tamanho reduzido, para utilização por um pequeno grupo de soldados.

A razão de se explorar o uso de VANT no domínio militar é bastante clara, seguindo o conceito de *Dull, Dirty and Dangerous Missions* (JONES, March 1997). Estes conceitos são plenamente justificáveis quando há exposição da tripulação a situações de perigo.

No Brasil, existem demandas nas três forças para aplicação de VANT em aplicações militares, onde pode-se citar que, no Comando da Aeronáutica (Comaer), a necessidade imediata é de Alvos Aéreos Manobráveis (AAM) de

[1]Também chamado de **UAV**- *"Uninhabited Air Vehicle"* ou **DRONE**.
[2]Estrutura que pode acomodar tripulação, carga ou os motores de uma aeronave.
[3]Mísseis de cruzeiro, mísseis anti-navio e bombas guiadas propulsadas ou planadas.

alto desempenho, com propulsão a jato, para aplicação nos programas de desenvolvimento de mísseis ar-ar e no treinamento operacional com mísseis. Também foi identificada, no Comaer, a necessidade de VANT para enlace de comunicações, principalmente para apoio ao projeto SIVAM[4].

Já o Exército Brasileiro (EB) tem uma necessidade operacional de uma aeronave de reconhecimento e busca de alvos para artilharia. Já a Escola de Artilharia de Costa e Antiaérea (EsACosAAe) tem necessidade, a curto prazo, de alvos de baixo custo, em complemento aos aeromodelos utilizados atualmente e, futuramente, de alvos aéreos de alto desempenho.

A Marinha do Brasil (MB) identificou as seguintes necessidades:

- Alvo aéreo de baixo custo;
- VANT de reconhecimento e;
- Alvo aéreo de alto desempenho.

Tanto a Marinha quanto o Exército têm necessidade de alvos para testes e treinamento com mísseis do tipo superfície-ar de curto alcance, com armamento antiaéreo. Já o VANT de reconhecimento da Marinha teria emprego na correção de tiro e no apoio aos fuzileiros navais, com capacidade de operação a partir do convés de vôo de fragatas e corvetas.

Por fim, em 14 de junho de 2004 foi publicado no Diário Oficial da União[5] que o Ministério da Defesa estabelece as diretrizes para desenvolvimento de VANT pelas Forças Singulares e Indústria de Defesa e as necessidades listadas estão alinhadas com estas diretrizes.

No domínio civil, as aplicações de VANT estão começando a se difundir, onde as possíveis utilizações são:

- Vigilância policial de áreas urbanas;
- Vigilância de áreas de fronteira;
- Inspeção de oleodutos e gasodutos;
- Controle de safras agrícolas;
- Levantamento de recursos florestais;

[4]Sistema de Vigilância da Amazônia.
[5]Seção 1, na Portaria nº 606, de 11 de junho de 2004.

- Controle de queimadas;
- Enlace de comunicações e cobertura de eventos para as redes de TV;
- Detecção precoce e monitorização e apoio ao combate de incêndios em florestas;
- Vigilância da costa marítima, tendo em vista detectar e dissuadir contrabando e narcotráfico marítimo;
- Vigilância da orla costeira tendo em vista fiscalizar o tráfego de navegação comercial e promover a segurança marítima, fiscalizar a exploração e a extração de recursos naturais (com ênfase para as pescas e a aqüicultura oceânica);
- Vigilância aérea das vias rodoviárias para dissuadir, detectar e identificar eventuais pontos críticos, bem como para apoiar a gestão e o planejamento de infra-estruturas;
- Vigilância aérea e terrestres de fronteiras e sistemas de transportes para endereçar imigração ilegal;
- Definição e execução de planos de ordenamento do território e, em particular, das reservas naturais, patrimônio florestal (espécies e higiene) e ordenamento urbano;
- Meteorologia: estudos de uma grande gama de fenômenos naturais;
- Monitorização ambiental aérea (qualidade do ar);
- Serviços de vigilância e segurança pública e de instalações;
- Busca e salvamento.

A principal motivação, nestas áreas, tem sido a busca por constante redução de custos operacionais e minimização de riscos, o que resulta em uma forte pressão pelo uso de novas tecnologias que devam, por princípio da aeronáutica, serem seguras e confiáveis (JAPAN UAV ASSOCIATION, 2005). Esta tem sido uma motivação para que estudos, como o desta tese, sejam desenvolvidos, mesmo que venham a provar em suas deliberações, as possíveis limitações quanto ao uso de VANT em aplicações civis.

Quanto aos aspectos estratégicos, tem-se que uma questão de suma importância para a implantação de um novo sistema de alta tecnologia no Brasil

é quanto à decisão de aquisição no exterior ou de desenvolvimento no próprio país (UVS, 2005). Uma aquisição no exterior tem a vantagem de se conseguir o início de operação do novo sistema em um prazo muito menor. Nos casos em que as quantidades adquiridas forem pequenas, os custos envolvidos com a compra no exterior são, normalmente, menores que os de desenvolvimento, homologação, e produção no país. Nestes contratos de aquisição, podem ser adotadas cláusulas de contrapartida que considerem a transferência de tecnologia. Esta transferência, porém, geralmente está relacionada com técnicas que rapidamente estarão obsoletas. Por outro lado, a aquisição de componentes críticos no exterior expõe a indústria nacional a uma situação de dependência, sujeita a eventuais restrições por razões comerciais ou estratégicas.

O acesso a componentes comerciais integrantes de sistema de navegação e controle (com nível de tecnologia/precisão necessários aos VANT) é normalmente restrito no mercado internacional. No mínimo, esse acesso é sujeito a uma licença de uso e exportação, submetido aos interesses comerciais e políticos dos países de origem.

Finalmente, o desenvolvimento de VANT no Brasil traria um aumento de competitividade e de produtividade para as empresas brasileiras nas áreas de aeronáutica, de eletrônica, de software e de materiais especiais. Essas companhias estariam envolvidas com o desenvolvimento da aeronave e de vários sistemas como os equipamentos eletrônicos embarcados, a estação de solo e os equipamentos de apoio de solo. O apoio do governo, por meio dos Fundos Setoriais, possibilitará que estas empresas e os institutos de pesquisa e desenvolvimento participem do desenvolvimento de VANT, sem comprometer as suas situações econômicas.

2.2 Histórico

Inicialmente, os VANT foram idealizados para fins militares. Inspirados nas bombas voadoras alemãs do tipo **V-1** e **V-2** empregadas na Segunda Gerra Mundial[6], e nos inofensivos aeromodelos rádio-controlados, estas máquinas voadoras de última geração foram concebidas, projetadas e construídas para serem usadas em missões muito perigosas para serem executadas por seres humanos, nas áreas de inteligência militar, apoio e controle de tiro de artilharia, apoio aéreo às tropas de infantaria e cavalaria no campo de batalha, controle de mísseis de cruzeiro, atividades de patrulhamento urbano, costeiro, ambiental e de fronteiras, atividades de busca e resgate, entre outras.

Atualmente, o desenvolvimento de pesquisas e fabricação de VANT são realizadas e estimuladas, principalmente, por militares estadunidenses, pelas Forças de Defesa de Israel e pelas principais forças armadas do mundo. Embora o interesse pelos VANT seja tão antigo quanto a história da aviação tripulada, eles começaram a ser notícia devido a sua eficácia militar nos conflitos recentes, como o do Afeganistão (2001) e do Iraque (2003). A campanha do Afeganistão chamou a atenção para o papel crescente dos VANT, porque foi ali que eles realmente começaram a atacar alvos, além de realizarem sua missão primordial de coleta de informações e de guiarem armas(SOMERVILLE, 2002).

Israel foi a primeira nação a empregar aeronaves de reconhecimento não-tripulados, ainda em 1982, nos céus do Líbano. As Forças Armadas dos EUA iniciaram suas atividades com VANT na década de 90 onde a DARPA, agência de pesquisas do Departamento de Defesa, começou a investir no desenvolvimento de um VANT bélico. O primeiro exemplar foi o *"Predator"*, da *"General Atomics"*, que entrou em operação em 1997 e no qual o Pentágono investiu ao longo do projeto, mais de **US$ 1, 2 bilhão**. Trata-se de um jato com envergadura de asas de 15 m que opera numa altitude máxima se 15 km, bem acima dos aviões de carreira.

O segundo representante desta nova categoria de aeronaves robôs que entrou em ação foi o *"Global Hawk"*, da *"Northrop Grumman"*. É uma aeronave de grande porte, pesando 11 ton, com envergadura de 40 m e velocidade de 650 km/h e que pode voar a 20 km de altitude. É um robô espião projetado para fornecer, em

[6] A **Vergeltungswaffe 1 Fi 103 / FZG-76** (V-1) e a **Vergeltungswaffe Zwei** , conhecidas como as Bombas Voadoras, *"Buzz bomb"* ou *"Doodlebug"*, foram os primeiros mísseis modernos guiados usado em tempo de guerra. **Vergeltungswaffe** significa "arma de represália", e **FZG** é a abreviação de *"Flak Ziel Gerät"* ("dispositivo de mira antiaéreo"), um nome escolhido para desinformação.

tempo real, imagens em alta resolução do teatro de operações inimigo. Em abril de 2001 se tornou a primeira aeronave não tripulada a cruzar o Pacífico num vôo sem escalas. Até janeiro de 2006, o Pentágono havia empregado em seu projeto, mais de **US$ 6,6 bilhões** para desenvolvê-lo. Atualmente esta aeronave está sendo adquirida pela Austrália e, na versão *"EuroHawk"*, pelo exército alemão, o *"Bundeswehr"*.

Mas o início do uso maciço de VANT pelo Pentágono foi deflagrado na campanha do Afeganistão no final de 2001 e desde março de 2003 na Guerra do Iraque. Os números são secretos, mas sabe-se que existem hoje mais de 5.000 aviões-robôs em operação nos céus de Bagdá.

Eles são empregados pelo Exército, pela Força Aérea, pela Marinha e pelos Marines em versões diferenciadas, e tamanhos que oscilam de um pequeno aeromodelo lançado manualmente passando por modelos maiores que são catapultados ao espaço, até chegar ao *"Global Hawk"*, do qual a Força Aérea possui mais de 50.

2.3 VANT no Brasil

Com exceção dos teatros de operações militares, muitos dos atuais vôos de VANT ao redor do mundo são realizados mediante a técnica de segregação do espaço aéreo, pois é consenso entre as autoridades no assunto de que a falta de um piloto a bordo é considerado um "risco potencial" para outros usuários do espaço aéreo.

O Brasil segue a Convenção de Aviação Civil Internacional, que só cita aeronaves não tripuladas no Artigo 8, onde é dito que "nenhuma aeronave capaz de ser voada sem um piloto não pode ser voada sem piloto sobre um Estado signatário da Convenção sem uma autorização especial do referido Estado". Os Anexos à Convenção sequer tocam no termo "aeronaves não tripuladas". Como não existe base nos padrões internacionais para utilizar a expressão "aeronave não tripulada", a exemplo do que ocorre nos países com maior experiência no assunto, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) resolveu adotar a expressão "veículo aéreo não tripulado" ou VANT significando um veículo capaz de voar na atmosfera, fora do efeito de solo, que foi projetado ou modificado para não transportar um piloto humano e que é operado por controle remoto ou autônomo. A ANAC designa ainda Sistema Aéreo Não Tripulado, SANT significando o conjunto veículo aéreo não tripulado, seus controles de vôo e seu sistema de

operação. Inclui qualquer estação de solo e enlace de dados utilizado, assim como qualquer processo dedicado de comunicações com órgãos de Controle de Tráfego Aéreo.

A ANAC classifica o VANT de acordo com a seguinte lista:

- **Tipo 1**: Peso máximo de decolagem igual ou inferior a 20 Kg;
- **Tipo 2**: Peso máximo de decolagem entre a 20 Kg e 50 Kg;
- **Tipo 3**: Qualquer peso máximo de decolagem superior a 50 kg, operado unicamente por controle autônomo.

Devido aos aspectos de segurança, a legislação vigente restringe que a operação de uma VANT deva ser realizada em local suficientemente distante de áreas densamente povoadas, de zonas de tráfego de aeródromos e de áreas sensíveis a ruído como escolas, parques, hospitais, igrejas, etc. Deve ainda a operação ser conduzida em local onde não existam fontes de ondas eletromagnéticas capazes de interferir ou prejudicar de alguma forma o SANT[7].

Outro ponto importante é que, a menos que especificamente autorizada por uma autoridade aeronáutica com jurisdição sobre a área, a operação deve ser realizada a uma altura máxima de 400 ft acima da superfície e, na eventualidade de conflito de tráfego com aeronaves tripuladas, o operador do VANT deve ceder o direito imediato de passagem, mesmo que para tanto o seu veículo precise ser **danificado ou mesmo destruído**.

Para operações de um VANT **tipo 3** e que envolva veículos cujo peso e tamanho possam se igualar aos de uma aeronave tripulada, a ANAC adotou a política de só autorizar tal operação no Brasil se esta puder atender aos mesmos princípios de segurança aplicáveis às operações de aeronaves tripuladas, ou seja: Esta operação não pode ser, ou criar, riscos para pessoas ou propriedades no ar ou na superfície maiores do que os riscos que podem ser atribuídos às operações de aeronave tripulada de classe ou categoria equivalente. Como citado no capítulo 1, a exemplo do que ocorre com as aeronaves normais, um princípio básico de segurança a ser considerado é que a probabilidade de uma falha simples do sistema aéreo não tripulado ser catastrófica deve ser da ordem de 10^{-5} falhas por ano, o que equivale a 10^{-9} falhas por hora de vôo. Tal probabilidade deve ser calculada através de um processo estatístico (árvore de falhas), com base em análise e ensaios de cada componente do SANT.

[7]Antenas transmissoras e/ou receptoras de alta potência, linhas de transmissão de alta tensão, subestações elétricas ou instalações de geração de energia elétrica.

Para o atendimento destes requisitos é que se apresenta o modelo de VANT objeto desta tese e que será detalhado no capítulo seguinte.

3 Definições e Considerações Teóricas

"A interligação entre a Ciência e a ficção científica, por vezes, produz resultados curiosos. Nem sempre fica claro se é a vida que imita a arte ou vice-versa."

Carl Sagan

3.1 Sistemas Multiagentes

Tanto a Ciência da Computação quanto a Inteligência Artificial (IA) têm buscado formas de conceber sistemas que se aproximem de uma dada realidade considerando, em geral, as visões que outras áreas do conhecimento têm desta mesma realidade. Assim surgiram a orientação a objetos (da Matemática), a representação de conhecimento e raciocínio (da Psicologia e da Lógica), as redes neurais (da Biologia), etc. De forma análoga, a área de Sistema Multi-Agente (SMA) é o nome dado à sub-área da Inteligência Artificial Distribuída (IAD) que estuda o comportamento de um conjunto de agentes autônomos objetivando a solução de um problema que está além de suas capacidades individuais (JENNINGS, 1996). Em (WOOLDRIDGE, 2002), um agente é um sistema computacional que está situado em algum ambiente, e que é capaz de ações autônomas neste ambiente.

3.2 Agentes Inteligentes

3.2.1 Inteligência Artificial Distribuída - IAD

(BOND; GASSER, 1988) define IAD como a sub-área da Inteligência Artificial que estuda a concorrência em computações de Inteligência Artificial. (OLIVEIRA, 1996) observa que esta definição pode levar à uma errônea compreensão do conceito de IAD como uma simples união entre IA e Sistemas Distribuídos, porém IAD é um conceito mais amplo.

Uma conceitualização de IAD mais compatível com a idéia de agente é apresentada em (JENNINGS, 1996) que diz que o objeto de investigação da IAD são os modelos de conhecimento e as técnicas de comunicação e raciocínio necessárias para que agentes computacionais convivam em sociedades compostas de computadores e pessoas. Ainda em (JENNINGS, 1996) divide-se a IAD em duas principais áreas de pesquisa :

- Resolução Distribuída de Problemas (RDP): Geralmente este tipo de sistemas inclui a existência de regras já definidas relativamente ao comportamento dos múltiplos agentes da comunidade (a coordenação da atividade dos agentes é centralizada). O planejamento das ações de cada um dos agentes é efetuado inicialmente por decomposição do problema em sub-problemas, e dá-se a atribuição deste aos vários agentes envolvidos. Assim, a resolução de um problema é realizada por um conjunto de agentes, que cooperam apenas na divisão do esforço e na partilha de conhecimento e resultados;

- Sistema Multi-agente (SMA): Nestes sistemas, a coordenação do comportamento inteligente numa comunidade de agentes é descentralizada. Esta é o resultado da integração do conhecimento, capacidade, objetivos, e planos dos diferentes agentes envolvidos. Os agentes participam mais autonomamente na decisão de realização das suas próprias ações. Não existe um planejamento inicial. O planejamento é a execução do problema.

Tem-se em (OLIVEIRA, 1996) que em um SMA a atenção do projetista não está necessariamente voltada para um problema específico. Esta abordagem consiste na coordenação do comportamento inteligente de um conjunto de agentes autônomos, que podem ter sido criados antes do surgimento de um problema em particular.

3.2.2 Sistemas Multi-agentes

Um sistema Multi-Agente é formado por um conjunto de agentes que colaboram entre si para cumprir com a responsabilidade no sistema (AMANDI, 1997).

Em (BOND; GASSER, 1988), um sistema multi-agente pressupõe coordenação entre um conjunto existente de agentes autônomos e inteligentes. Fundamentalmente, está envolvida a busca por uma funcionalidade neste sistema

que permita que estes agentes possam coordenar seus conhecimentos, objetivos, habilidades e planos individuais de uma forma conjunta, em favor da execução de uma ação ou da resolução de algum problema.

Tanto para a ação, quanto para a resolução do problema, em sistemas multi-agentes faz-se necessária a cooperação entre os agentes.

(JENNINGS, 1996) mostra que as características dos Sistemas Multi-Agentes têm vantagens significativas sobre um solucionador de problemas monolítico, dentre elas:

- Maior rapidez na resolução de problemas através do aproveitamento do paralelismo;
- Diminuição da comunicação por transmitir somente soluções parciais em alto nível para outros agentes ao invés de dados brutos para um lugar central;
- Mais flexibilidade por ter agentes de diferentes habilidades dinamicamente agrupados para resolver problemas;

3.2.3 Agentes

O conceito de agente (vide figura 3.1) é de vital importância para a compreensão do que seja um Sistema Multi-agente. Apresenta-se algumas das definições encontradas na literatura para este termo.

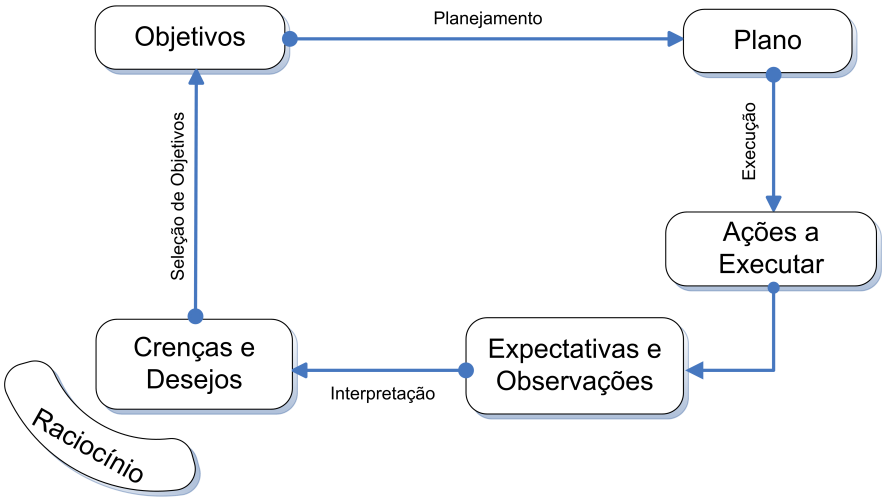

Figura 3.1: Modelo Conceitual de um Agente.

Em (FILHO, 1994) considera-se que um agente pode ser definido como uma entidade que funciona contínua e autonomamente em um ambiente no qual

existam outros processos e agentes.

Já em (AMANDI, 1997), um agente é uma entidade computacional com um comportamento autônomo que lhe permite tomar suas decisões para agir, levando em consideração as mudanças acontecidas no ambiente em que atua e o seu desejo de alcançar seus objetivos.

(LOGIC et al., 1993) afirma que um agente é uma entidade à qual se atribuem estados, denominados de estados mentais. Os estados mentais usuais são: crenças, decisões, capacidades, objetivos, intenções, compromissos e expectativas, que são conceitos análogos ou similares aos humanos. Com base nesta perspectiva, o que faz qualquer componente de *"hardware"* ou *"software"* ser considerado um agente é precisamente o fato dele poder ser analisado e controlado em termos destes estados mentais.

Em (ZLOTKIN; ROSENSCHEIN, 1989) considera-se que, do ponto de vista prático, são agentes: (a) robôs que atuam em um ambiente, interagindo com outros robôs ou com humanos em língua natural e utilizando sensores para captar informações do meio, tais como controle de motor e restrições de tempo; (b) um sistema que interage com outros sistemas ou com o ser humano.

Em (JENNINGS; WOOLDRIDGE, 1996) apresenta-se um agente como "uma entidade de software persistente dedicada a um propósito específico". Ainda em (JENNINGS; WOOLDRIDGE, 1996) toma-se um agente como "um programa de computador que simula um relacionamento humano fazendo algo que outra pessoa poderia fazer para você", ou ainda define-se que um agente é "uma entidade de software para qual tarefas podem ser delegadas".

Em (WEISS, 1999), não há definição universalmente aceita do termo agente, mas há um consenso geral de que autonomia é a idéia central da noção de agência. Em (RUSSELL; NORVIG, 2000), autônomo vem a ser algo como "não submetido a controle imediato de um humano", como no termo *veículo autônomo*. Já em(MOFFAT; FRIJDA, 1995), o significado de autonomia para um agente é a capacidade para atingir seus próprios objetivos.

Entende-se que parte da dificuldade em se definir o termo agente surge do fato de que para diferentes domínios de aplicação os atributos associados ao conceito de agência assumem diferentes níveis de importância. Assim, da mesma forma que para alguns domínios de aplicação a capacidade de aprendizado a partir das experiências é de suma importância, para outras, aprender pode constituir uma capacidade não só pouco importante, mas indesejável.Todavia, apesar de todas as

divergências sobre a definição do que seja um agente, alguma forma de definição é necessária, caso contrário há risco de que o termo perca o significado dentro do escopo no qual está sendo abordado. A definição apresentada aqui, e que será utilizada neste trabalho, é uma adaptação feita em (WEISS, 1999) da apresentada em (WOOLDRIDGE, 2002):

"um agente é um sistema computacional que está situado em algum ambiente, e que é capaz de ações autônomas neste ambiente visando atingir seus objetivos propostos".

Apresenta-se o conceito de agente como sendo uma entidade com capacidade de resolução de problemas. Inserido nesta visão, define-se o agente como tendo as seguintes propriedades:

- **autonomia** - executam a maior parte de suas ações sem interferência direta de agentes humanos ou de outros agentes computacionais, possuindo controle total sobre suas ações e estado interno;
- **habilidade social** - por impossibilidade de resolução de certos problemas ou por outro tipo de conveniência, interagem com outros agentes (humanos ou computacionais), para completarem a resolução de seus problemas, ou ainda para auxiliarem outros agentes. Disto surge a necessidade de que os agentes tenham capacidade para comunicar seus requisitos aos outros e um mecanismo decisório interno que defina quando e quais interações são apropriadas;
- **reatividade** - percebem e reagem à alterações nos ambientes em que estiverem inseridos.
- **pró-atividade** - agentes, do tipo deliberativo, além de atuar em resposta às alterações ocorridas em seu ambiente, apresentam um comportamento orientado a objetivos, tomando iniciativas quando julgarem ser apropriado.

Entende-se aqui que autonomia seja a capacidade do agente executar as suas atividades sem a necessidade de intervenção humana. Para ter autonomia, o agente deve ter um certo grau de inteligência, capacitando-o a sobreviver em um ambiente dinâmico e por vezes não benigno (WEISS, 2000).

Para se definir um agente racional ideal, é necessário considerar seu "conhecimento embutido", ou em outras palavras, o conhecimento que lhe é dado no ato de sua construção e não o obtido por aprendizado. No caso das

ações do agente basearem-se completamente no conhecimento embutido, ao ponto que este não considere suas percepções, podemos dizer que o agente tem falta de autonomia, ou seja, segue apenas regras pré-estabelecidas em sua base de conhecimento. O comportamento de um agente pode ser baseado tanto em sua própria experiência, quanto em seu conhecimento embutido.

Assim, pode-se concluir que o grau de autonomia de um agente está diretamente relacionado ao nível de independência que este tem em relação àquilo que lhe é nato ("instintivo") (RUSSELL; NORVIG, 2000).

3.2.3.1 Categorias de agente

Em (JENNINGS, 1996), para que possa agir de maneira autônoma, agentes podem ter várias habilidades, tais como: percepção e interpretação de mensagens, raciocínio baseado em crenças, tomada de decisão, planejamento e, habilidade para executar planos incluindo passagem de mensagens. Ainda em (JENNINGS, 1996), categoriza-se os agentes quanto ao nível de capacidade de resolução de problemas (figura 3.2):

- **Reativos**: reagem a alterações no ambiente ou a mensagens de outros agentes.Não têm capacidade de raciocínio sobre suas intenções, reagindo tão somente sobre regras e planos estereotipados. Suas ações podem ser: atualizar uma base de fatos, e enviar mensagens para outros agentes ou para o ambiente;

- **Intencionais**[1]: Tem a habilidade de raciocínio sobre suas intenções e crenças, e pode criar e executar planos de ações. São considerados como sistemas de planejamento selecionando objetivos, de acordo com suas motivações, e raciocinar sobre estes e, se necessário, executar e revisar planos. Em um SMA, agentes intencionais coordenam-se entre si através de intercâmbio de informação sobre as suas crenças, metas ou ações. Esta informação é eventualmente incorporada aos seus planos;

- **Sociais**: Os agentes intencionais são considerados sociais quando possui modelos de outros agentes, sobre os quais raciocina para tomar decisões e criar planos. Por isso, tem de ser capazes de manter atualizados esses modelos (atualizando crenças, metas e eventualmente planos) de forma a tomar decisões e criar os seus planos levando-se em consideração tais modelos de outros agentes envolvidos.

[1]Também pode ser apresentado com outros termos, tais como: Racional, Cognitivo e Deliberativo.

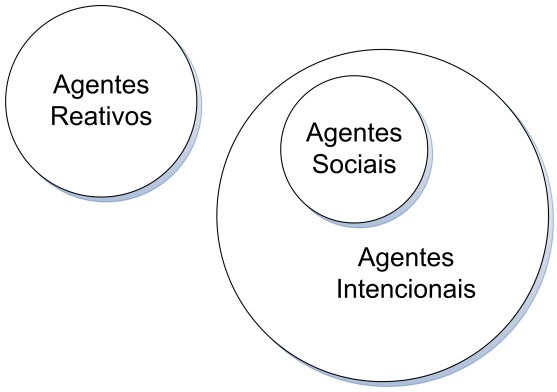

Figura 3.2: Categorização de Agentes (JENNINGS, 1996).

3.2.3.2 Estruturas e Manutenção do Conhecimento

As estruturas de conhecimento utilizadas na construção de agentes podem ser de diferentes tipos:

- Crenças (ou fatos);
- Objetivos (ou intenções);
- Preferências;
- Motivações;
- Desejos;
- Etc.

É usual que a aquisição de novas crenças por parte de um agente seja resultado de mensagens enviadas por outros agentes ou pelo ambiente no qual está inserido.

Inserido em um SMA, um agente possui somente uma visão parcial da situação e do problema a ser resolvido. A informação processada pelo agente é muitas vezes parcial, incerta ou até mesmo errônea. Assim sendo, o agente necessita de mecanismos de manutenção da consistência de sua base de conhecimento.

Visando minimizar este problema, (JENNINGS, 1996) define níveis de consistência das crenças entre um grupo de agentes computacionais e propõe um algoritmo, amplamente utilizado, de manutenção da verdade que garante consistência local para cada agente e consistência global para dados compartilhados entre agentes.

3.2.3.3 Habilidades de Adaptação e Aprendizado

Em um ambiente dinâmico podem ocorrer imprevistos. Quando uma alteração no ambiente ocorre, o agente que nele está inserido pode necessitar adaptar-se à esta nova realidade, ou até mesmo à mudanças de comportamento de outros agentes aos quais ele se relaciona direta ou indiretamente.

Em (BORDINI et al., 2001) aborda-se a questão onde agentes aprendem coletivamente para coordenar suas ações na direção de uma solução para um problema em comum. No entanto duas importantes restrições têm sido consideradas na literatura (REZENDE, 2003): restrição de incompatibilidade, na qual ações podem ser mutuamente excludentes; e restrição de informação local, na qual cada agente conhece uma parte de seu ambiente.

Em (WEISS, 2000) apresenta-se um SMA composto de sistemas especialistas com conhecimento diversificado, no qual um módulo de raciocínio indutivo permite a cada agente adquirir novos conhecimentos através da interação com outros sistemas especialistas.

3.2.4 Arquiteturas de Agentes

Agentes são construídos e operam em ambientes. Esses ambientes impõem restrições sobre o comportamento dos agentes e providenciam serviços e facilidades que podem ser usados pelos agentes. Um número significativo de arquiteturas diferentes de agentes tem sido proposto. Cada uma destas implica em uma estratégia de negociação também completamente diferente, porque os agentes podem ter objetivos diferentes e portanto, participarão em negociações sobre coisas completamente diferentes.

Para referência, selecionou-se as principais arquiteturas listadas a seguir:

- Arquiteturas Cognitivas ou Deliberativas;
- Arquiteturas Funcionais;
- Arquiteturas Baseadas em Estados Mentais;
- Arquiteturas Reativas ou Não-Deliberativas;
- Arquiteturas Híbridas.

3.2.4.1 Arquiteturas Cognitivas ou Deliberativas

Em (BASTOS, 1998) define-se que os agentes cognitivos (ou deliberativos) possuem uma representação simbólica do mundo, sendo que suas deliberações (também chamadas decisões) são feitas por meio de um processo baseado em raciocínio lógico. Este raciocínio trabalha sobre um conjunto de símbolos que, sendo fisicamente concebíveis, podem ser combinadas formando-se estruturas sobre o qual se pode operar.

Em (FILHO, 1994), o agente passa por um processo de deliberação explícita para a escolha da ação, que é feito através de:

1. uma representação simbólica do mundo[2];
2. um plano; ou
3. uma função de utilidade para a ação.

3.2.4.2 Arquiteturas Funcionais

No caso da arquitetura funcional (vide figura 3.3), o agente é composto por módulos que representam cada uma das funcionalidades necessárias para sua operação. Em (DEMAZEAU, 2000) e em (DEMAZEAU; BAEIJS, 1998) define-se que um agente cognitivo deve possuir conhecimento, um conjunto de objetivos, e capacidades de percepção, comunicação, decisão e raciocínio.

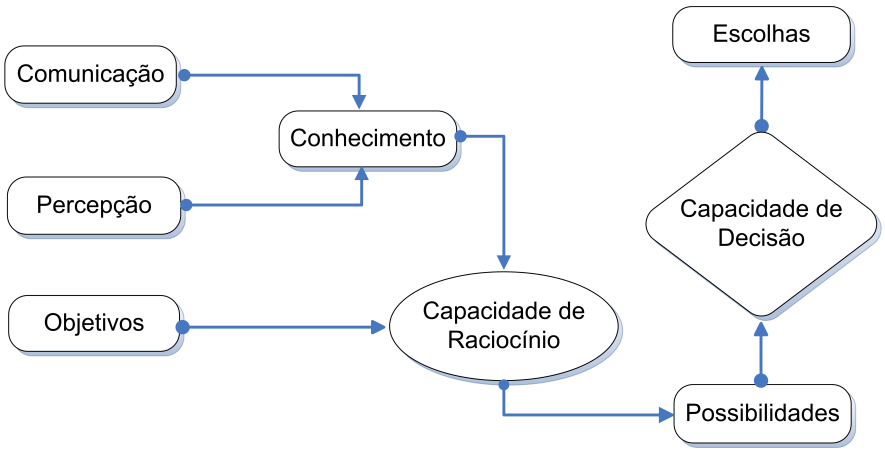

Figura 3.3: Arquitetura para Agentes Funcionais.

Outra arquitetura é apresentada em (STEINER, 1996), sendo composta por três partes principais:

[2]Entende-se pelo termo "mundo" o ambiente em que o agente está inserido.

- cabeça - controle das ações, portanto englobando as capacidades reativas, racionais e cooperativas;
- comunicador - implementa as capacidade de comunicação do agente;
- corpo - encarregado da execução das ações e observação do ambiente.

3.2.4.3 Arquiteturas Baseadas em Estados Mentais

Numa abordagem de visão psicológica, as arquiteturas baseadas em estados mentais definem o estado de um agente como um conjunto de componentes mentais, tais como: crenças, capacidades, escolhas e compromissos.

Em (DEMAZEAU, 2000) e em (WEISS, 2000) afirma-se que, para gerenciar sua autonomia, os agentes possuem inteligência que baseia-se, geralmente, nos próprios estados mentais (figura 3.4). Em função destes estados mentais, um agente define seu comportamento autônomo, que consiste em decidir a ação seguinte que deve executar para satisfazer algum de seus objetivos, quando e para quem solicitar colaboração, que mudanças no ambiente determinam mudanças nas suas crenças ou objetivos, e assim por diante (AMANDI, 1997).

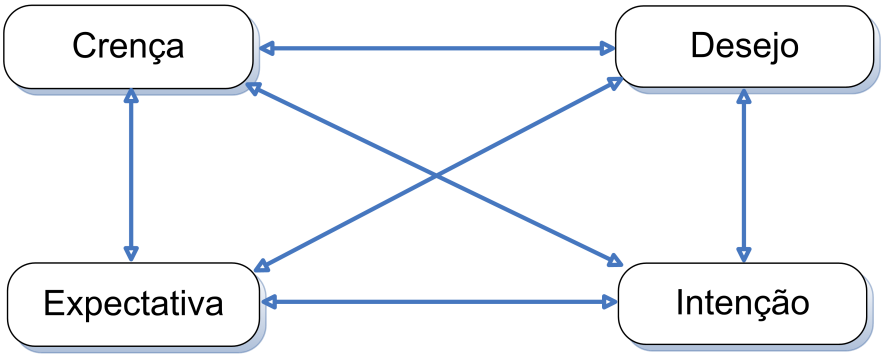

Figura 3.4: Arquitetura Baseada em Estados Mentais.

Dentre as arquiteturas baseadas em estados mentais, situam-se as clássicas arquiteturas "*Belief, Desire and Intention*" (BDI).

Este tipo de arquitetura considera três estados mentais: Crença, Desejo e Intenção[3]. Em (WEISS, 1999), estas arquiteturas surgem do processo de decidir, momento a momento, qual ação desempenhar na direção de seus objetivos. Este processo envolve dois processos importantes: decidir quais objetivos queremos atingir, e como iremos atingir estes objetivos.

Basicamente, crenças são a representação do mundo mantida pelo agente. As intenções são desejos eleitos para execução (RAO; GEORGEFF, 1995).

[3] "*Belief, Desire and Intention*".

Alterações percebidas pelo agente podem significar alterações em suas crenças e, possivelmente, mudanças em suas intenções, pois seus desejos podem não ser mais os mesmos para este novo conjunto de crenças (KFIR-DAHAV; TENNENHOLTZ, 1996).

Por considerar apenas três estados mentais, podemos dizer que a abordagem BDI é reducionista sob o ponto de vista de modelagem do comportamento humano, pois desconsidera estados mentais que representam aspectos emocionais.

3.2.5 Arquiteturas Reativas ou Não-Deliberativas

(RUSSELL; NORVIG, 2000) define-se que, em uma arquitetura reativa, o processo de tomada de decisão de um agente ocorre em tempo real, em resposta a estímulos do ambiente, captados por seus sensores, ou a mensagens enviadas por outro agente. Neste tipo de agente, o mecanismo de controle é, geralmente, implementado por um conjunto de regras evento-ação, chamado por (BASTOS, 1998) pelo termo estímulo-resposta, ou por máquinas de estados finitos (autômatos finitos).

(FILHO, 1994) define que, em uma arquitetura reativa, o processo de tomada de decisão de um agente ocorre em tempo real, em resposta a estímulos do ambiente, captados por seus sensores, ou à mensagens enviadas por outro agente. Neste tipo de agente, o mecanismo de controle é, geralmente, implementado por um conjunto de regras evento-ação ou ainda conhecido pelo termo estímulo-resposta (BASTOS, 1998), ou ainda por máquinas de estados finitos (autômatos finitos). Esta arquitetura pode ser vista na figura 3.5.

Em (MOFFAT; FRIJDA, 1995) um agente é dito "reativo" se não necessariamente planeja tudo, mas pode algumas vezes somente reagir apropriadamente a certos estímulos. Deve-se distinguir esta reatividade forte da reatividade fraca, onde o agente planeja sua resposta, porém interrompendo qualquer outro processo em andamento que seja menos importante. Uma arquitetura desse tipo não guarda qualquer representação simbólica do mundo e também não utiliza raciocínio simbólico complexo.

3.2.5.1 Arquiteturas Híbridas

Arquiteturas híbridas são provenientes das deficiências encontradas nas arquiteturas deliberativas e reativas, reunindo propriedades de ambas (RUSSELL;

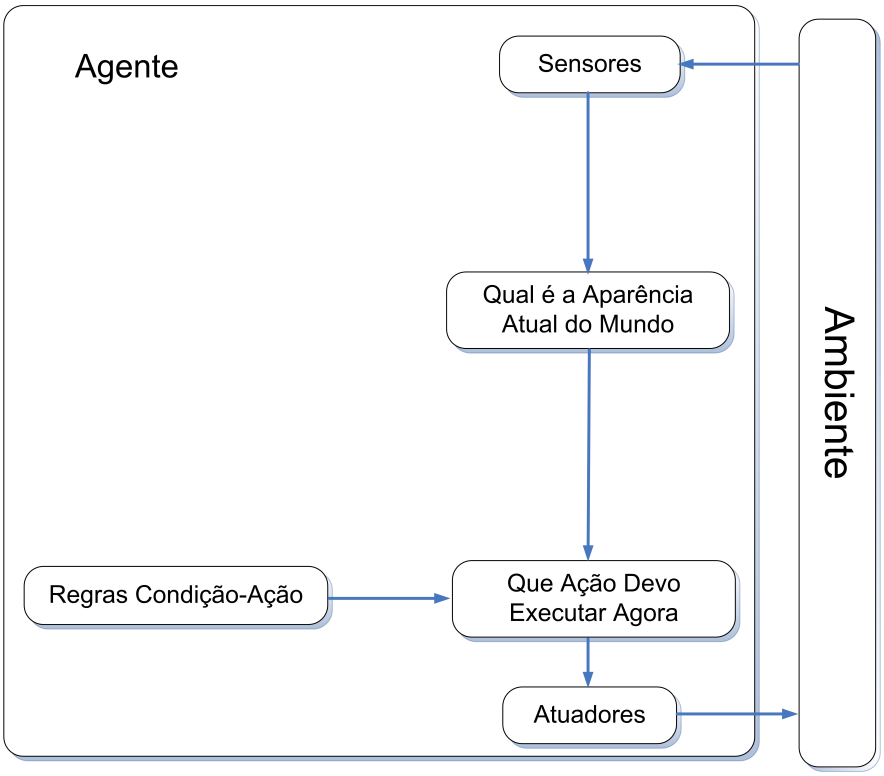

Figura 3.5: Arquitetura de um agente reativo (RUSSELL; NORVIG, 2000).

NORVIG, 2000). As arquiteturas reativas têm dificuldades para modificar seus planos de ação a partir do momento em que a situação passa a divergir de seus objetivos iniciais. No caso de arquiteturas deliberativas, estas possuem dificuldades em lidar com situações imprevistas que exijam decisões rápidas. Estas arquiteturas (híbridas) devem definir agentes dotados de capacidades reativas, de raciocínio e planejamento, resolvendo as limitações provenientes das abordagens mais "puras".

Em um mundo incerto, um agente racional precisa ser também reativo: certas mudanças no ambiente (situações) podem ativar objetivos os quais precisam ser atingidos imediatamente (vide figura 3.6).

3.3 Natureza Robótica do VANT

De acordo com (JÁCOBO, 2001) um Robô Móvel atual deve ser equipado com sensores (visão, infravermelho, sonar, sistemas de navegação inercial, etc.) que permitam a percepção do ambiente em que esteja inserido, podendo este ser total ou parcialmente desconhecido. Deve ser dotado de capacidade de decisão que lhe permita cumprir uma dada tarefa (objetivo) sem intervenção humana. Dessa forma, o robô torna-se capaz de construir um modelo do já mencionado ambiente, para depois decidir quais ações podem ser executadas, visando a realização de sua

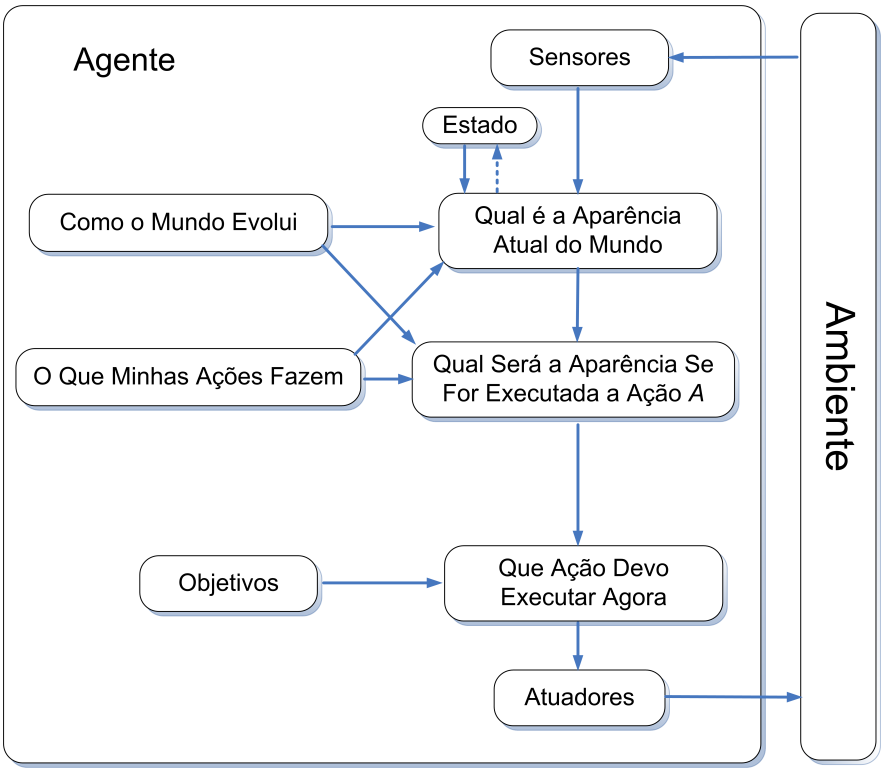

Figura 3.6: Modelo de Agente Híbrido (RUSSELL; NORVIG, 2000)

tarefa.

Ainda de acordo com a *"Japan Industrial Robot Association"* (JIRA), um robô é definido como um sistema mecânico que possui movimentos flexíveis análogos aos movimentos orgânicos, e que combina esses movimentos com funções inteligentes e ações semelhantes às do ser humano.

Uma aeronave sem tripulação necessita de autonomia para cumprir suas missões. Assim sendo, um VANT deve ser considerado, também, um robô autônomo.

Em (JONES et al., 1998), definem-se robôs autônomos como sendo robôs que podem realizar os objetivos desejados em ambientes desestruturados, sem a ajuda humana contínua. Um auto nível de autonomia é particularmente desejado em campos como a exploração espacial, onde a comunicação possui atrasos e as interrupções são inevitáveis.

Assim um robô totalmente autônomo, no mundo real, deve ter a habilidade de:

- Receber informações do seu ambiente, e interpretá-la adequadamente;
- Trabalhar sem nenhuma interferência humana;
- Se deslocar de um ponto **A** à um ponto **B**, sem assistência de navegação

humana;

- Reparar-se sem ajuda externa;

No contexto em que se propõe a modelagem de um VANT, tendo por ponto de partida os conceitos de robô móvel e autônomo, entende-se que "função inteligente" significa **decisão**, **reconhecimento**, **adaptação** ou **aprendizagem** e que, "ações semelhantes às do ser humano" significa **agir no ar tal e qual um piloto real**, considerando-se as regras de um vôo seguro e objetivando cumprir suas tarefas, com o maior nível de autonomia possível.[4]

Uma vez entendida a natureza robótica do VANT este, em geral, deve lidar com ambientes parcialmente observáveis, estocásticos, dinâmicos e contínuos.

É importante mencionar que em um ambiente simulado computacionalmente, é possível utilizar algoritmos simples (TENNENHOLTZ, 2002) e (KFIR-DAHAV; TENNENHOLTZ, 1996) para promover o aprendizado de um robô em algumas horas de CPU a partir de milhões de tentativas. Já em um ambiente real, estes poderiam levar anos para executar tais tentativas. Dessa forma, um VANT real precisa incorporar o máximo possível do conhecimento sobre si, sobre missões anteriores, seu ambiente e sobre as tarefas que irá executar. Esse conhecimento deve ser tal que permita ao VANT aprender rapidamente, e assim executar sua missão atual de forma segura.

Por fim, um VANT real deverá comunicar-se e colaborar com outros VANTs, aeronaves civis e controladores, tudo dentro das normas do CNS/ATM. Assim sendo, para completar o modelo robótico, uma modelagem do ponto de vista de sistemas multi-agentes se faz pertinente, sendo este o propósito da próxima seção.

[4]Vide definição de VANT apresentada no Capítulo 2.

4 Modelo Proposto: VANT Baseado em Sistema Multi-Agentes

"É fazendo que se aprende a fazer aquilo que se deve aprender a fazer."
Aristóteles

Como exposto no capítulo 2, vê-se que alguns países, dentre os quais inclui-se o Brasil, reconhecem que os VANTs são algo de novo e importante e estão, em ritmos bem diferentes, investindo em seus próprios programas de pesquisa (DOD, 2005).

É certo que os VANTs trazem a promessa de serem eficazes em um amplo espectro de características operacionais, de difícil realização com os atuais sistemas tripulados. Além disso, os baixos custos operacionais e de aquisição destas aeronaves podem impulsionar um desenvolvimento acelerado das tecnologias que permitam um uso cada vez mais regular do VANT em aplicações civis, como pode ser observado em (UVS, 2005). Assim sendo, entende-se que o estado atual e futuro dos veículos aéreos não-tripulados apresenta fortes desafios para a academia, especialmente no que tange otimizar o uso de um veículo aéreo que traga consigo um aumento significativo da capacidade e segurança de operação a um custo efetivamente mais baixo (CORRÊA et al., 2006a).

É neste contexto que, neste capítulo, se propõe um modelo de VANT baseado em SMA que seja capaz de perceber o contexto de sua missão, que possa avaliar riscos e tomar decisões e que possa interagir com outros VANTs e demais aeronaves em um cenário onde a segurança (*"SAFETY"*) seja o fator preponderante (CORRÊA et al., 2007) e (CORRÊA et al., 2006b).

4.1 VANTS sob a Ótica de Agentes

Parte-se da definição de robô móvel visando reforçar as características autônomas (ou de inteligência) de um VANT genérico, permitindo dessa forma modelá-lo como uma entidade inteligente inspirada no conceito de agente e que seja, de acordo com (RUSSELL; NORVIG, 2000): "... capaz de perceber seu ambiente por meio de sensores, e agir sobre esse mesmo ambiente por intermédio de atuadores", como pode ser observado na figura 4.1.

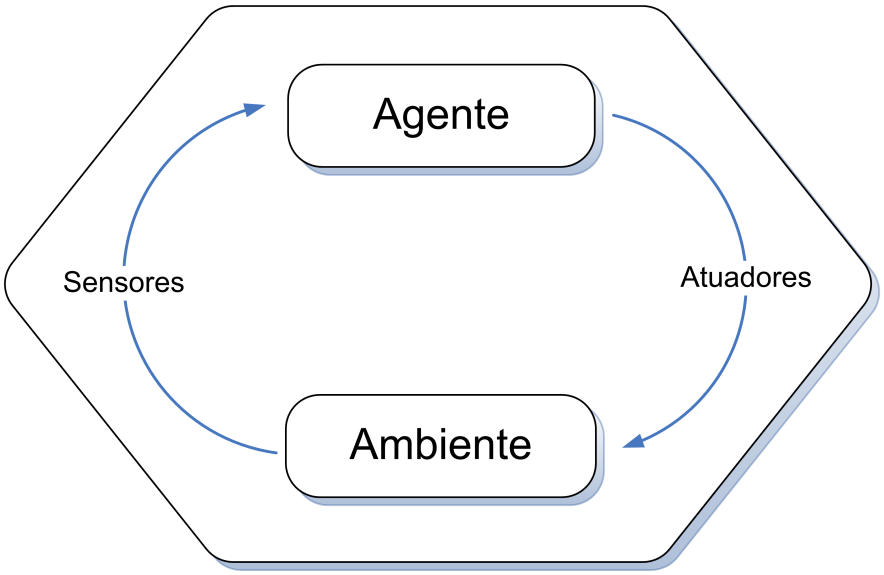

Figura 4.1: Interação Agente-Ambiente.

Ainda em (RUSSELL; NORVIG, 2000), tem-se que robôs são, por definição, agentes físicos que executam tarefas interagindo com o mundo real. Observa-se aqui uma grande semelhança com o que se sabe ser necessário para que se possa excluir o piloto de uma aeronave, pois o humano em questão deverá ser substituído por um conjunto perfeitamente integrado de:

- Sensores;
- Atuadores;
- Algoritmos de IA.

Neste ponto é importante citar que dados estatísticos levantados pela Boeing mostram que 62% dos acidentes aéreos são causados por erro humano. Aí estão incluídos todos os fatores contribuintes: falha de treinamento, estresse, fadiga, desatenção, imprudência, imperícia, negligência, erro de julgamento, falha de planejamento, supervisão deficiente, falhas de comunicação, operação indevida do equipamento entre outros.

De acordo com o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA), os elementos que constituem a base e o objeto de toda a atividade de Prevenção de Acidentes Aeronáuticos são definidos no trinômio "homem-meio-máquina". Caso uma análise efetiva desses três elementos não seja levada a efeito, para que as medidas corretivas eficazes sejam implementadas, os acidentes continuarão a ocorrer. A este trinômio devem-se adicionar os elementos "missão" e "organização", que complementam as áreas a serem avaliadas em prol da Prevenção de Acidentes Aeronáuticos.

Neste contexto, vê-se que as autoridades aeronáuticas tratam as questões relativas à *"SAFETY"* com muito rigor, e um VANT em operação deve levar em consideração este mesmo rigor uma vez que se está buscando eliminar o fator "Erro Humano" através de uma análise criteriosa dos riscos e seu efetivo controle. Assim sendo, para iniciar-se a modelagem partindo-se da visão de robô móvel, faz-se cabível refletir sobre as famosas "três leis da robótica" criadas por Isaac Asimov em seu livro "Eu Robô", que dizem:

1. Um robô não pode ferir um ser humano, ou por inação permitir que um ser humano seja ferido;
2. Um robô deve obedecer às ordens dadas por um ser humano, exceto quando isto conflitar com a primeira lei;
3. Um robô deve proteger sua própria existência, a menos que isso conflite com a primeira ou a segunda lei.

É claro que, em caso de uso militar, as três leis acima citadas não fazem muito sentido. Porém são extremamente compatíveis com o que preconiza a aviação civil no tocante a segurança. Assim sendo, torna-se um caminho natural modelar um VANT partindo-se da definição de robô móvel, sendo este o objetivo da sessão subseqüente.

Em (WEISS, 2000), um agente genérico é definido como sendo uma entidade real ou virtual capaz de agir num ambiente qualquer, de se comunicar com outros agentes e que possui competências e disponibiliza serviços. Já em (WOOLDRIDGE; JENNINGS, 1994), um sistema composto por um ou mais agentes é um sistema multi-agentes (visão microscópica) e este, por outro lado, pode ser modelado inteiramente como sendo um único agente (visão macroscópica).

Partindo-se deste ponto de vista, propõem-se um modelo lógico de um VANT como sendo um sistema multi-agentes, composto por agentes especializados.

A interação e a colaboração entre estes agentes, para a execução das tarefas (objetivos) do VANT, faz com que este se comporte como um agente físico (robótico) (HILL et al., 2005).

Após os estudos iniciais acerca das tecnologias de base disponíveis para o desenvolvimento de sistemas multi-agentes, procedeu-se a seleção destas tendo-se como principal preocupação a necessidade de construção de um sistema fiável, com um grau de eficácia elevado e cujo foco principal fosse a engenharia da aplicação e não os aspectos cognitivos de um modelo multi-agente típico (DEMAZEAU, 2000). Assim, neste contexto, propõem-se um modelo com as seguintes características fundamentais:

1. **Autonomia de decisão**: Capacidade de analisar uma situação, gerar alternativas de atuação e escolher a situação que melhor atenda a seus objetivos. Em certos casos, o agente não conhece o cenário de atuação, mas tem capacidade de escolher uma experiência prévia semelhante e assim adaptar a solução ao novo cenário;

2. **Autonomia de execução**: Capacidade de operar no ambiente sem intervenção de outro agente (em geral o ser humano);

3. **Competência para decidir**: Capacidade de configurar sua atuação sem intervenção externa;

4. **Reatividade**: Capacidade de reagir às mudanças do ambiente a partir do reconhecimento de um contexto conhecido;

5. **Adaptabilidade**: Capacidade de adaptar seu processo de decisão, frente a situações desconhecidas;

6. **Comunicabilidade**: Capacidade de interagir com outros agentes, objetivando atingir suas metas. (colaboração);

7. **Tempestividade**: Capacidade de tomar decisões e agir em tempo real rígido[1].

Pelo exposto acima, e dada a complexidade que se apresenta em um sistema capaz de executar seus objetivos de forma autônoma atendendo-se aos requisitos de desempenho e controle em tempo real, concluí-se que a modelagem mais adequada deva contemplar uma arquitetura multidisciplinar que seja capaz de

[1]Restrição temporal que, quando não cumprida, pode originar uma falha catastrófica.

integrar diversas técnicas de inteligência artificial que caracterizem um agente racional, aliadas às técnicas destinadas ao desenvolvimento de sistemas complexos e *"Hard Real-Time"*[2] (MACHADO et al., 2001).

Embora hajam muitas abordagens candidatas para este tipo de modelagem (DOYLE, 1992) (BRATMAN et al., 1991) (HILL et al., 2005), pode-se observar da literatura que todas as propostas partem da uma mesma definição de "estados mentais" para um agente racional.

Em (WEISS, 2000) tem-se que tais estados mentais caracterizam a arquitetura denominada BDI. Ainda em (WEISS, 2000) e em (WOLLKIND et al., 2004), cada uma dessas atitudes representam, respectivamente: informação, motivação e deliberação. Juntas, estas atitudes mentais determinam o comportamento do agente (KFIR-DAHAV; TENNENHOLTZ, 1996) (HILL et al., 2005).

Esta abordagem traz uma grande vantagem em particular, pois pode valer-se de termos e conceitos que são familiares no cotidiano das pessoas (BORDINI et al., 2001). Por exemplo, nos estudos orientados ao uso de aeronaves desprovida de uma tripulação pode-se ter o comportamento tático da mesma revisto e validado diretamente por um piloto real, como discutido em (SOMERVILLE, 2002) e em (DASGUPTA, 2006).

Assim, o principal desafio deste trabalho é gerar um modelo implementável de um sistema multi-agente caracterizado por agentes do tipo BDI e que seja capaz de operar de forma segura em tempo real, visando o cumprimento das missões que lhe forem designadas. Na figura 4.2, apresenta-se um modelo lógico para compor SMA inserido no contexto do VANT como proposta desta tese.

Como se pode observar na figura 4.2, temos o VANT composto por:

- **Sensores**: No contexto de um VANT genérico, entende-se por sensores os componentes que permitam a aeronave medir sua velocidade, nível de vôo, orientação da proa e demais informações de navegação[3] que permitam incorporar conhecimento sobre si e sobre seu ambiente[4];
- **Atuadores**: Ainda no contexto de um VANT genérico, entende-se por atuadores os mecanismos que compõem o sistema de suporte ao vôo, tais

[2]O sistema apresenta pelo menos uma restrição temporal do tipo Rígida. São sistemas críticos.

[3]Embora em um contexto mais amplo, poder-se-ia considerar sensores de "visão" que auxiliem no processo de tomada de decisões.

[4]Considera-se aqui, também, o sistema de comunicação com outras aeronaves na categoria de sensor.

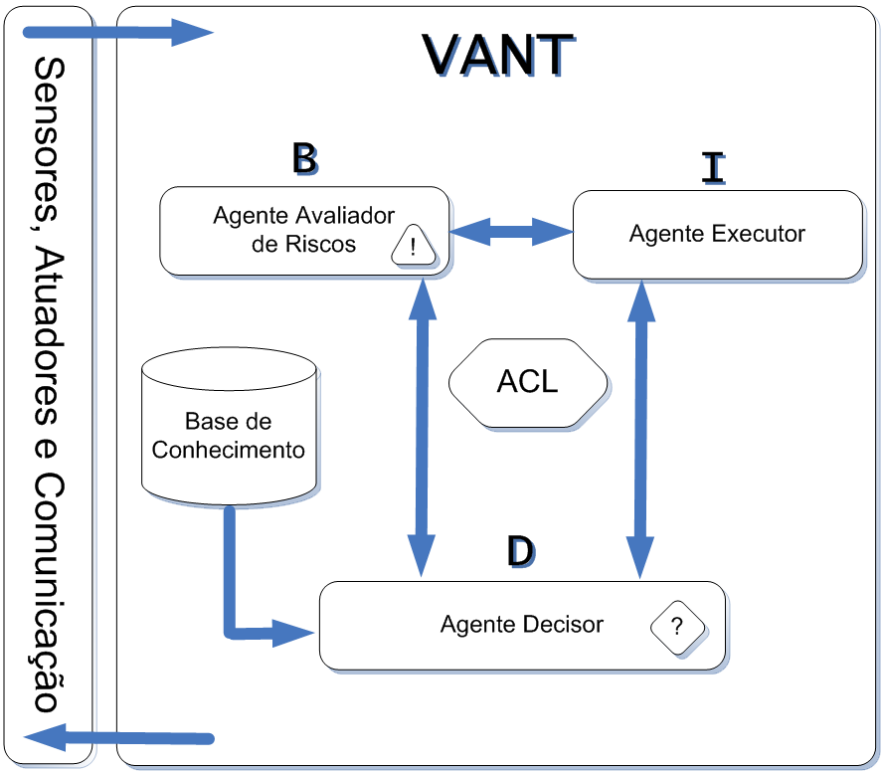

Figura 4.2: Modelo Lógico do SMA proposto para o VANT

como leme, profundor, sistema motor entre outros;

- **Agente Avaliador de Riscos**: Uma vez que os sensores colham evidências sobre o ambiente ao seu redor, ao tomarem medidas das grandezas as quais são especificados, deve o VANT analisar o cenário em que está inserido e avaliar e mensurar, em probabilidade de ocorrência, os eventos que conflitam com os meios de se atingir os objetivos de sua missão e com os princípios de *"SAFETY"*. Este é o principal papel deste agente, cuja base de conhecimento constitui a primeira abstração de "crença" de que a aeronave possa alcançar seus objetivos de forma segura;

- **Agente Decisor**: As evidências filtradas e alteradas pelas crenças desencadeiam a seleção de alternativas que servirão de base para a tomada de decisão e conseqüente "desejo" de ação. Portanto, cabe ao Agente Decisor resolver sobre qual ação deverá ser executada. Outro papel Agente Decisor é ser o responsável pela negociação com outras aeronaves visando validar suas decisões;

- **Agente Executor**: Uma vez que a decisão foi tomada, cabe ao Agente Executor coordenar os atuadores para que estes executem a ação desejada. Tal coordenação e controle são contextualizados como sendo a "intenção" de se obter sucesso na operação em questão;

- **"*Agent Communication Language*" (ACL)**: A comunicação entre os agentes utiliza uma estrutura formalizada pela "*Foundation of Intelligent Physical Agents*" (FIPA), conhecida por Linguagem de Comunicação de Agentes (PITT; MAMDANI, 1999), (FIPA, 1997). Uma mensagem ACL é uma expressão na qual os argumentos são termos ou sentenças formadas por palavras do vocabulário ACL do contexto da operação[5];

- **Base de Conhecimento**: Como mencionado anteriormente, um VANT real precisa incorporar todo conhecimento sobre si, sobre missões anteriores, sobre seu ambiente e sobre as tarefas que irá executar. Além disso, deverá aprender com os sucessos ou fracassos das ações executadas e conhecer todas as regras para um vôo seguro. Este é o objetivo da base de conhecimento proposta neste modelo.

É importante frisar que existe uma realimentação entre os agentes visando a atualização dos "Estados Mentais". Assim, quando uma decisão é tomada, o Agente Avaliador de Riscos verifica se os riscos decorrentes desta ainda continuam aceitáveis, ou se um atuador não puder agir, o Agente Executor informa ao Agente Decisor para que este avalie outras alternativas.

4.1.1 Definição do Ambiente

Como previamente demonstrado, um VANT genérico pode ser modelado a partir do conceito de robô móvel autônomo, que por sua vez, é um agente físico que interage com o ambiente através de sensores e de atuadores, o que torna importante definir o conceito de ambiente de operação do VANT adotado nesta tese. Dessa forma, abstrair-se-á que o ambiente seja definido a partir do conceito de espaço aéreo, que na definição aeronáutica é visto como sendo a porção da atmosfera controlada por um país através de um órgão controlador. Neste contexto, as aeronaves circulam assessoradas por controladores (em terra) e por sistemas embarcados de detecção e resolução de conflitos (KUCHAR; YANG, 2000). Neste ambiente, e do ponto de vista da aeronave, esta é cercada virtualmente por dois cilindros elípticos chamados "zonas de segurança", estando a mesma em um dos focos tal como ilustrado na figura 4.3.

Como se pode observar na figura 4.3, o volume decorrente do cilindro mais externo é denominado "zona de alerta" e o mais interno é denominado "zona

[5]No caso em questão, o vocabulário é composto pelas grandezas correspondentes aos sensores, pelas ordens a serem dadas aos atuadores e pelas mensagens as serem trocadas com outras aeronaves.

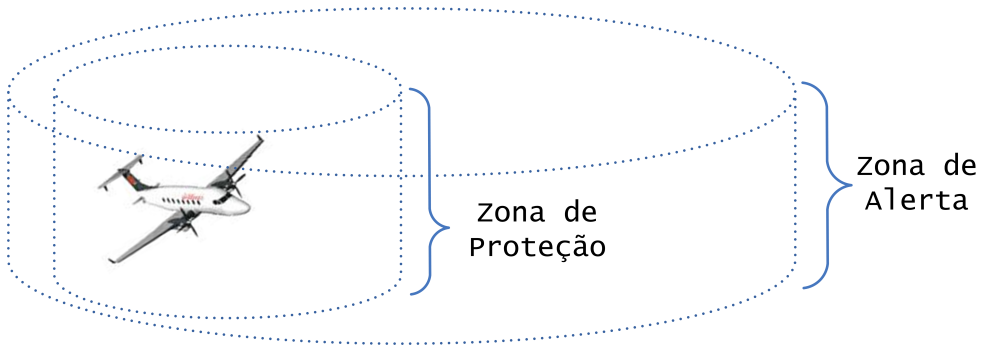

Figura 4.3: Modelo de Proteção de uma Aeronave

de proteção" (CORRÊA; CAMARGO, 2007)[6]. Se as "zonas de segurança" de uma segunda aeronave cruzar com as "zonas de segurança" do VANT, estará caracterizado um conflito.

Uma vez estabelecidas as "zonas de segurança", resta definir-se quais os fenômenos e quais as variáveis serão consideradas[7]. Neste ponto, faz-se importante lembrar que toda aeronave em vôo tem que lidar com informações relativas ao comportamento da atmosfera em sua rota, com informações provenientes de outras aeronaves e informações provenientes dos controladores em terra. Além destas informações externas, tem-se ainda as informações provenientes dos sensores da própria aeronave, tais como altitude, velocidade, combustível entre outras. Assim, dado o escopo deste trabalho, no modelo de ambiente proposto serão consideradas as seguintes variáveis divididas em dois grupos:

1. Pertinentes ao Vant
   - Velocidade (kt) [8]
   - Altitude (nível de vôo em pés)
   - Autonomia de Vôo (combustível para cumprir o Plano de Vôo)
   - Proa [9]
2. Pertinentes a outras aeronaves
   - Velocidade
   - Altitude
   - Autonomia de Vôo

[6]Os sensores do modelo proposto neste trabalho terão alcance limitado à estes dois volumes.
[7]Por motivos de simplificação não será considerado, nesta tese, a dinâmica de vôo do VANT.
[8]Considera-se o sistema métrico adotado em aeronáutica.
[9]Direção segundo a qual deve ser, ou está, orientado o eixo longitudinal da Aeronave.

- Proa

Para efeito de tomada de decisão, serão consideradas as normas de separação mínima que compreende a distância vertical mínima e distância lateral mínima, sendo estas as componentes principais da "zona de alerta". Esta separação é controlada em unidade de tempo (WILLEMAIN, 2003).

No ambiente proposto, toda aeronave terá uma identificação única, e terá habilidade de variar sua proa, nível de vôo e velocidade, respeitando o conjunto de regras constantes na base de conhecimento, prevista no modelo.

Toda troca de mensagem entre agentes será realizada utilizando-se a ACL especificada pela FIPA(FIPA, 1997) (PITT; MAMDANI, 1999) e deverá constar:

- Identificação da aeronave (VANT ou não)
- Posição
- Nível de vôo
- Velocidade
- Hora
- Estimativa de próxima posição (em relação a uma trajetória corrente).

Toda mudança de nível e/ou velocidade será notificada através do mesmo procedimento, ou seja, por troca de mensagem ACL, contendo:

- Nível atual
- Velocidade atual
- Novo nível pretendido
- Nova velocidade pretendida.

Uma vez fechados estes conceitos, segue-se a modelagem dos agentes apresentados na figura 4.2.

4.2 Agente Avaliador de Riscos

Para que o VANT possa atingir os objetivos de sua missão, é preciso que o mesmo venha a analisar o cenário em que está inserido, atualizando sua "crença" de que possa alcançar estes objetivos de forma segura avaliando e mensurando, em probabilidade de ocorrência, os eventos que conflitam com os princípios de *"SAFETY"*. É com esta finalidade que se apresenta o Agente Avaliador de Riscos, que representa a **Crença**[10] do sistema BDI proposto.

Para que se possa entender melhor o funcionamento deste Agente, faz-se necessário que se apresente a noção de Risco. A expressão **Risco** é freqüentemente utilizada no âmbito popular, como também pela mídia, nos mais variados sentidos, tais como:

- risco de negócio;
- risco social;
- risco econômico;
- risco de investimentos;
- risco militar;
- risco país;
- etc.

De um modo mais formal, risco pode ser medido em termos da probabilidade de um evento adverso ocorrer, dado alguma unidade de atividade. Em aviação[11], existe um dado número de métricas usualmente utilizada para descrever Risco, das quais as mais relevantes são apresentadas na figura 4.4 (FAA/EUROCONTROL, 1998):

Como se poder observar da figura 4.4, o conceito inerente da expressão Risco envolve sempre incertezas e algum tipo de perda ou dano. Nessas condições, pode-se deduzir a relação $\boldsymbol{risco = incertezas + danos}$. Outro conceito fundamental é o de **Perigo**[12] que é subtendido como uma fonte em potencial que pode induzir a ocorrência de algum acidente. Portanto, risco indica a severidade de perda ou lesão e o grau de probabilidade dessas perdas. Ou seja, a

[10] O que se conhece sobre o estado do ambiente e dos agentes que compões o sistema.
[11] Especialmente a Aviação Civil.
[12] Do inglês *"Hazard"*.

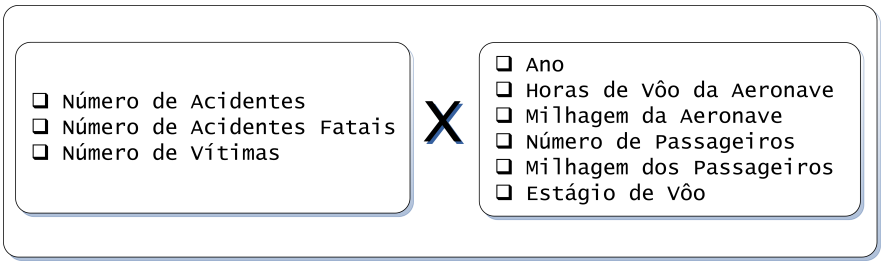

Figura 4.4: Quadro de Métricas usuais para descrição de Riscos em Aviação Civil.

probabilidade da conversão de sua fonte em potencial, representada pelo perigo, em um acidente (ALSTON, 2003). Simbolicamente este conceito pode ser expresso por (CAMARGO, 2002):

$$risco = \frac{perigo}{salvaguarda} \tag{4.1}$$

onde o termo *salvaguarda* deve ser entendido como o resguardo ou proteção a uma fonte potencial que possa causar um dano. Dessa expressão, pode-se concluir que o risco pode ser tão pequeno quanto se deseja, mas nunca zero (WILLEMAIN, 2003).

Ainda em (CAMARGO, 2002), o risco é definido como sendo o nível de perigo combinado com:

- A probabilidade de o perigo levar a um acidente e;
- A exposição ou duração do perigo (latência).

Em (ALSTON, 2003) o perigo tem duas importantes características: a gravidade[13] e a probabilidade de sua ocorrência. A combinação de ambas é denominada nível do perigo. Portanto, quanto maior o nível do perigo, maior a chance de ocorrência de um acidente (WILLEMAIN, 2003).

Dado este contexto, o ato de mensurar o nível de perigo e o conseqüente Risco é o que se apresenta como o principal objetivo do agente aqui modelado (*i.e* Avaliador de Risco). Em outras palavras: Deve o Agente Avaliador de Riscos calcular o nível de perigo para que o Agente Decisor possa mantê-lo próximo de zero ou em um nível aceitável (WILLEMAIN, 2003).

Ainda em (WILLEMAIN, 2003), são inaceitáveis riscos que sejam caracterizados por conseqüências indesejáveis e com **alta probabilidade de ocorrência**. Contudo porém, pode-se tolerar e assumir riscos nos seguintes casos:

- Aqueles com conseqüências graves, desde que a probabilidade de ocorrência do risco seja muito baixa, ou seja, inferior a 10^{-9} ocorrências por hora;
- Aquelas onde as conseqüências possam ser negligenciadas, desde que haja minimização dos perigos.

Para atingir os objetivos de manter o nível de perigo próximo de zero, o Agente Avaliador de Riscos deve possuir duas funções principais (FAA/EUROCONTROL, 1998):

1. **Vigilância**: cuja função é analisar o cenário em que está inserido, a partir das evidências colhidas pelos sensores. Outra função da vigilância é calcular a razão de aproximação, a proa e a altitude das aeronaves próximas[14] visando estimar a invasão de sua "Zona de Segurança", que por sua vez é delimitada pelas "Zonas de Proteção" e "Zonas de Alerta", conforme apresentado na figura 4.3

[13] Algumas vezes denominada de severidade.
[14] Este dados são, nesta tese, obtidos através da comunicação utilizando-se a ACL.

2. **Algoritmos de avaliação de Riscos**: cuja função é calcular as probabilidades de ocorrência do risco e sua severidade, baseado nos eventos que estejam ocorrendo (ou na eminência de ocorrer) dentro da "Zona de Segurança".

O modelo de predição de colisão de duas aeronaves em vôo apresentado em (FAA/EUROCONTROL, 1998) assume que a probabilidade P de uma aeronave colidir com outra, dado que ambas se cruzarão é dado por:

$$P = \frac{2nR\sqrt{v_1^2 - 2v_1v_2cos\theta + v_2^2}}{v_1v_2sen\theta} \leq 10^{-9} \tag{4.2}$$

onde:

n = número de aeronaves em rota de cruzamento;

$v_{1,2}$ = velocidade das aeronaves;

R = raio da "Zona de Alerta";

θ = ângulo interno, em graus, de cruzamento das aeronaves ($0 < \theta < 180$);

Dada a natureza estocástica do processo de avaliação de risco apresentado na equação 4.2, propõem-se nessa tese o uso de Redes Bayesianas como solução para esta avaliação. Técnicas probabilísticas tem sido utilizadas com crescente sucesso em inteligência artificial para lidar com todas as situações em que medidas de sensores são imprecisas ou onde as informações são vagas ou incompletas, tendo o maior destaque dado ao Raciocínio Probabilístico (THRUN, 2000). Neste contexto, as Redes Bayesianas são uma indicação natural, pois são representações compactas e eficientes para um conjunto de distribuições de probabilidade, conforme exposto em (PEARL, 1988).

Uma abordagem geral para tratar a incerteza, é o cálculo de probabilidades. Nessa abordagem o raciocínio é baseado na realização de inferências probabilísticas, isto é no cálculo da probabilidade condicional de um evento, dadas todas as evidências disponíveis, aplicando-se o teorema de *Bayes*. A probabilidade condicional é vista como medida de crença no evento, dadas as evidências disponíveis. Assim, a probabilidade do evento A representa a crença do agente na veracidade de A, baseado na informação disponível. Essa estimativa, representada pela probabilidade condicional $P(A|C)$, necessita ser consistente com os axiomas de probabilidade, e C atua como um ponteiro para um contexto do conhecimento e representa toda a informação relevante atual disponível. A

dupla $A|C$ representa o evento A no contexto dado por C. O conhecimento empírico invariante (de um especialista) é codificado através da probabilidade condicional. Se uma nova evidência E torna-se disponível, então a nova estimativa da probabilidade de A é escrita $P(A|E, C)$, onde a vírgula denota a conjunção da evidência E com o contexto C do conhecimento anterior.

Matematicamente, uma Rede Bayesiana é uma representação compacta de uma tabela de conjunção de probabilidades do universo do problema (PEARL, 1988). Por outro lado, do ponto de vista de um especialista, Redes Bayesianas constituem um modelo gráfico que representa de forma simples[15] as relações de causalidade das variáveis de um sistema.

Uma Rede Bayesiana consiste do seguinte:

- Um conjunto de variáveis e um conjunto de arcos ligando as variáveis;
- Cada variável possui um conjunto limitado de estados mutuamente exclusivos;
- As variáveis e arcos formam um grafo dirigido sem ciclos;
- Para cada variável A que possui como pais $B1, ..., Bn$, existe uma tabela $P(A|B1, ..., Bn)$.

Um detalhe muito importante que se deve ter em conta é que a topologia de uma Rede Bayesiana surge da interação com um especialista no domínio em que esta se aplica, de modelos causais disponíveis na literatura do domínio em questão ou, ainda, pode ser aprendida diretamente a partir de dados históricos. As probabilidades podem ser fornecidas pelo especialista do domínio, obtidas em estudos estatísticos publicados, obtidas analiticamente através da aplicação da análise combinatória para domínios específicos ou, ainda, aprendidas diretamente a partir de dados históricos. Em nosso caso, como não há dados históricos sobre VANTs incursionando o espaço aéreo, nem tão pouco especialistas no assunto que pudesse fornecer subsídios para a topologia, decidiu-se partir do processo de interação entre aeronaves conforme prescreve a Portaria número 18 do Estado Maior da Aeronáutica, publicada em Novembro de 2005.

Dado que uma rede Bayesiana representa um modelo estatístico complexo num pequeno número de valores probabilísticos, tem-se que a principal vantagem de raciocínio probabilístico sobre raciocínio lógico é o fato de que os agentes podem tomar decisões racionais mesmo quando não existir informação suficiente

[15] O que não significa dizer que as relações sejam simples.

para se provar que uma ação funcionará. Assim, o propósito de se organizar o modelo proposto baseado em Redes Bayesianas para suporte a decisão em ambiente aeronáutico é obter estimativas de incertezas para riscos ocasionados por eventos aleatórios, como por exemplo a aproximação inesperada de uma outra aeronave.

A figura 4.5 apresenta a Rede Bayesiana empregada no Agente Avaliador de Riscos, conforme a seguinte premissa: **O fator de maior risco de acidente quando duas aeronaves se cruzam é a proximidade de suas "Zonas de Proteção"**, ou em outras palavras, quando não há separação mínima (FAA/EUROCONTROL, 1998). É importante destacar que as probabilidades a priori foram levantadas levando-se em consideração a equação 4.2 e o estudo de algumas colisões em pleno vôo (BLOM et al., 2005), especialmente a descrita em (BFU, 2004), e que o método de inferência é o de Propagação de Crenças descrito em (PEARL, 1988).

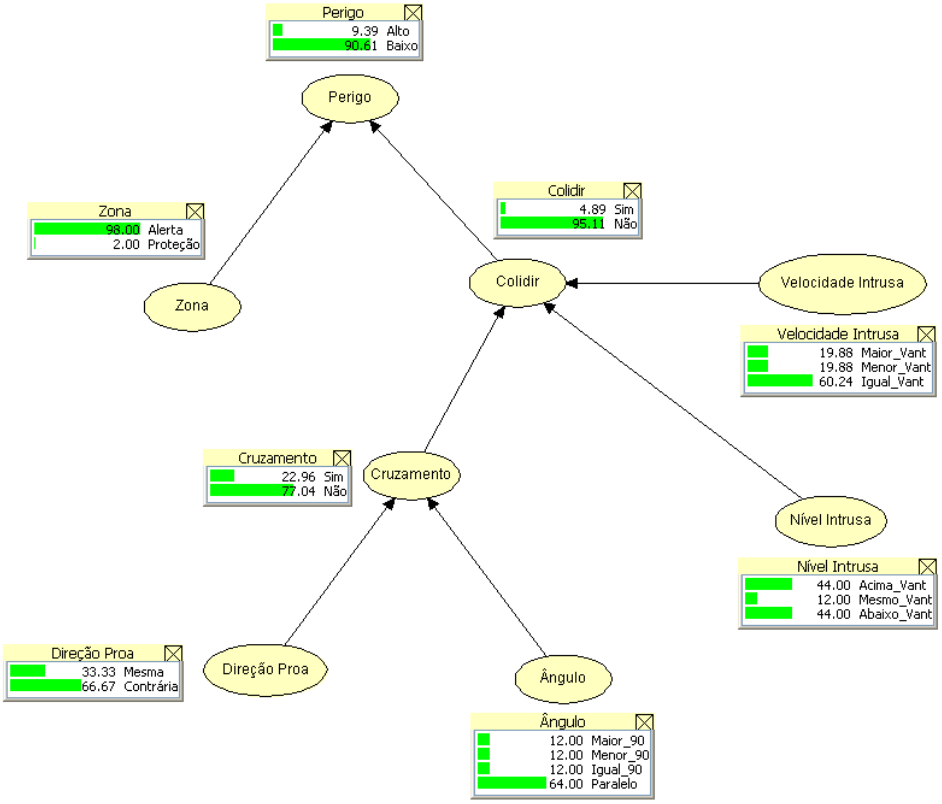

Figura 4.5: Visão da Rede Bayesiana do Agente Avaliador de Riscos.

Conforme pode ser observado na figura 4.5, o diagrama de influência (ou rede bayesiana) proposto representa a equação 4.2, porém com as informações adicionais de **Nível de Vôo** e **Proa** da aeronave intrusa. Dessa forma, sempre que for detectada uma aeronave próxima as "Zonas de Segurança", torna-se possível ao Agente Avaliador de Risco cumprir seu papel e estimar o perigo.

4.3 Agente Decisor

No modelo que se apresenta, é extremamente importante que o VANT conheça suas posições presente e futura no ambiente e seja capaz de avaliar os riscos inerentes, permitindo que decisões relativas a mudanças de trajetórias, altitudes e velocidades sejam tomadas e compartilhadas, representando o conceito de **Desejo**[16] do modelo BDI proposto. No entanto, o processo de tomada de decisões não é trivial. De fato, a própria Teoria da Decisão surgiu da pesquisa em métodos sistemáticos para resolução de problemas. Atualmente constitui o arcabouço racional para escolher entre cursos de ação alternativos (decisões) quando as conseqüências dessa escolha não são perfeitamente conhecidas, ou seja, os resultados são incertos. Todas as informações disponíveis são utilizadas para deduzir qual das decisões alternativas é a "melhor decisão lógica possível" de acordo com as preferências do decisor.

Obviamente não se pode garantir a decisão tomada produza resultados ótimos, apenas se espera que ela minimize a conseqüência de se obter um resultado desfavorável (HORVITZ et al., 1988). Esse formalismo pode ser embasado na teoria dos conjuntos *"fuzzy"* para atribuir graus de pertinência às informações incompletas, e na teoria de utilidade para manter consistência entre as preferências do decisor e as decisões tomadas. Neste contexto, tomar decisões significa escolher as decisões que maximizam a utilidade esperada dos resultados em um conjunto de decisões com resultados incertos (GARDNER, 2000). Aliados a isso tem-se que uma das atividades mais complexas realizadas para tomada de decisão é a manipulação de incertezas.

Por definição (MURRAY; D., 2006), o processo de tomada de decisão consiste, em geral, da execução da seguinte seqüência:

- **Análise e Identificação:** Consiste no levantamento de informações de onde o problema está inserido, para uma tomada de decisão precisa;
- **Desenvolvimento de Alternativas:** Criação de possíveis alternativas de resolução para o problema levantado;
- **Classificação das Incertezas:** Levantar o grau de incerteza de cada alternativa, classificando-as conforme algum critério;
- **Escolha da melhor Alternativa:** Realizadas etapas anteriores, analisam-se as melhores alternativas com base em alguma função de

[16]Estados do mundo que o agente quer atingir.

avaliação, e opta-se por aquela que maximize a utilidade esperada dos resultados ;

- **Execução:** Com a alternativa escolhida, ela deverá ser executada por algum atuador.

Em (TURBAN; ARONSON, 1997), apresenta-se um Sistema Especialista (SE) como componente de um Sistema de Apoio à Decisão, ressaltando sua grande capacidade de avaliação de alternativas e seus respectivos graus de incerteza. Em (WATERMAN, 1985), as categorias mais comuns de aplicação são interpretação de situações observadas, predição de conseqüências de uma dada situação, diagnósticos, monitoramento de sistemas dos quais se esperam determinados resultados, controle do comportamento de determinados sistemas entre outros.

Um Sistema Especialista é aquele que é projetado e desenvolvido para atender a uma aplicação determinada e limitada do conhecimento humano. É capaz de emitir uma decisão, apoiado em conhecimento justificado, a partir de uma base de informações tal qual um especialista de determinada área do conhecimento humano.

Para tomar uma decisão sobre um determinado assunto, um especialista o faz a partir de fatos que encontra e de hipóteses que formula, buscando em sua memória um conhecimento prévio armazenado durante anos, ou no período de sua formação ou no decorrer de sua vida profissional sobre esses fatos e hipóteses. E o faz de acordo com a sua experiência, isto é, com o seu conhecimento acumulado sobre o assunto e com esses fato e hipóteses, emite a decisão.

Durante o processo de raciocínio, vai-se verificando qual a importância dos fatos que encontra comparando-os com as informações já contidas no seu conhecimento acumulado sobre esses fatos e hipóteses. Neste processo, vai-se formulando novas hipóteses e verificando novos fatos; e esses novos fatos vão influenciar no processo de raciocínio. Este raciocínio é sempre baseado no conhecimento prévio acumulado. Um especialista com esse processo de raciocínio pode não chegar a uma decisão se os fatos de que dispõe para aplicar o seu conhecimento prévio não forem suficientes. Pode inclusive, por este motivo, chegar a uma conclusão errada, mas este erro é justificado em função dos fatos que encontrou e do seu conhecimento acumulado previamente.

Um Sistema Especialista deve, além de inferir conclusões, ter capacidade de aprender novos conhecimentos e, desse modo, melhorar o seu desempenho de raciocínio e a qualidade de suas decisões.

A arquitetura de um SE envolve quatro elementos básicos (figura 4.6):

1. Uma base de conhecimento que contém fatos, regras e padrões de situações;
2. Um dispositivo de inferência[17] capaz de tomar decisões em um certo domínio;
3. Uma memória de trabalho onde os fatos e as regras são avaliados;
4. Um gerador de explicações (opcional) que justifica como o sistema chegou a uma dada conclusão.

No entanto, um SE puramente lógico não é capaz de lidar com as incertezas do domínio de aplicação pelo fato deste atuar com regras "canônicas" acerca do universo de decisões a serem tomadas, sendo que tais regras são do tipo: ***SE x ENTÃO y***. Visando eliminar esta deficiência, em (ZIMMERMANN et al., 1984) apresenta-se um sistema especialista cuja base de conhecimento é constituída por regras *"fuzzy"*.

A Teoria de Conjuntos *"Fuzzy"* foi concebida e apresentada em (ZADEH, 1965), com o objetivo de fornecer um ferramental matemático para o tratamento de informações de caráter impreciso ou vago. A Lógica *"Fuzzy"*, baseada nessa teoria, foi inicialmente construída a partir dos conceitos já estabelecidos de lógica clássica. Operadores foram definidos à semelhança dos tradicionalmente utilizados e outros foram introduzidos ao longo do tempo, muitas vezes por necessidades de caráter eminentemente prático. Existem inúmeras situações em que a relação de pertinência não é bem definida e, nestes casos, não sabemos dizer se um dado elemento pertence ou não a um dado conjunto. A intensão de Zadeh foi flexibilizar a pertinência de elementos aos conjuntos criando a idéia de grau de pertinência. Dessa forma, um elemento poderia pertencer parcialmente a um dado conjunto (ZADEH, 1965).

Pelo exposto, temos que as regras básicas de um Sistema Especialista podem ser melhoradas capturando-se as incertezas associadas ao domínio da aplicação. Assim, o modelo de raciocínio proposto é baseado nos métodos de raciocínio *"fuzzy"*, nos quais estas regras básicas tomam a forma de regras *"fuzzy"*. Em outras palavras, a teoria *"fuzzy"* que é também chamada de teoria nebulosa, tem se destacado cada vez mais do âmbito da tomada de decisão, pois proporciona uma ferramenta satisfatória na representação de incertezas, sendo possível através dela, modelar a atividade de percepção dos seres humanos. Através da teoria

[17]Motor de Inferência.

nebulosa as incertezas podem ser propagadas ao próximo nível lógico mais alto de um determinado sistema que retém a informação, conforme demonstrado em (ANTYUFEEV; S., 2006).

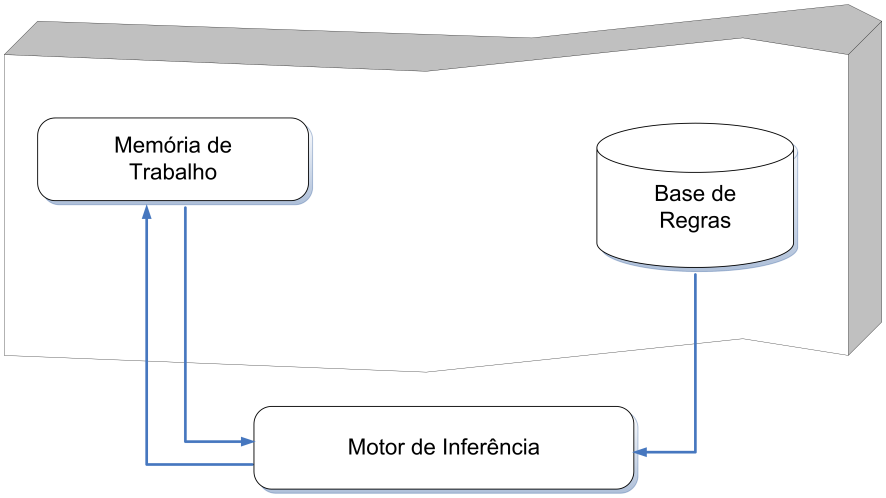

Figura 4.6: Arquitetura Básica de um SE.

Assim sendo, o mecanismo de raciocínio para o Agente Decisor proposto nesta tese é um SE onde a Base de Conhecimento é constituída por regras *"fuzzy"*. Uma visão parcial desta base está listada no Código 4.3.1.

```
1   Se Ângulo=Maior_90 AND Nível_Inrusa = Acima_Vant AND Perigo = Baixo
2   Então ação = Manter_Nível
3
4   Se Direção_Proa=Mesma AND Zona = Alerta AND Nível=Mesmo_Vant AND Perigo = Alto
5   Então ação = Mudar_Nível
6
7   Se Direção_Proa=Mesma AND Zona = Proteção AND Nível=Mesmo_Vant AND Perigo = Alto
8   Então ação = Mudar_Nível AND ação=Baixar_Velocidade
9
10
11  Se Direção_Proa=Contrária AND Zona = Alerta AND Nível=Acima_Vant AND Perigo = Baixo
12  Então ação = Manter_Nível AND Baixar_Velocidade
13
```

Código 4.3.1: Visão Parcial das Regras de Produção do Agente Decisor.

As regras apresentadas no Quadro 4.3.1 estão em linguagem natural apenas por questão de compreensão. O método utilizado para se chegar a base de regras final foi o seguinte:

1. Utilizando-se o Software *Hugin*[18] para edição de Redes Bayesianas, simulou-se um conjunto de situações com 100.000 registros, estocasticamente gerados à partir do Método de Monte Carlo (GAMERMAN; LOPES, 2006).

2. Na seqüência, utilizando-se o Software para Aprendizado de Máquinas *KnowledgeMiner*[19], aplicou-se a técnica de Indução de Regras *"Fuzzy"*, apresentada em (ALIGHANBARI et al., 2004).

3. Realizou-se o ajuste das regras geradas, e sua adequação para a linguagem *fuzzyJess*, apresentada em (ORCHARD, 2001).

Essa abordagem permitiu que se chegasse à uma Base de Regras bastante completa, dado o escopo da atuação do Agente Decisor e as variáveis do ambiente. É importante mencionar que esta Base de Regras tem por matriz as três leis da robótica citadas no início deste capítulo.

4.3.0.1 Negociação

Seguindo-se adiante no modelo tem-se que, para que o VANT possa cumprir com seus objetivos, este deve negociar com os demais ocupantes do ambiente as ações que poderá tomar sem afetar o grau de segurança estabelecido. Para tal efeito, o conceito de Negociação entre Agentes deve ser posto em prática.

Gerhard Weiss (WEISS, 2000) afirma que *"negociação é uma característica fundamental de um sistema de agentes que executam alguma atividade em um ambiente compartilhado"*. A negociação está muito relacionada com o compartilhamento de recursos entre os agentes, sendo seu principal objetivo tornar as ações individuais de cada agente coordenadas para se atingir o objetivo final do sistema multi-agente. Além disso, há uma preocupação com a coerência, de modo a se avaliar como o sistema multi-agente se comporta enquanto está resolvendo um dado problema. O principal motivo para uma preocupação maior com a negociação entre agentes é o fato de que um só agente, dentro de um sistema multi-agente, não terá informação ou capacidade suficiente para resolver

[18] www.hugin.com
[19] www.knowledgeminer.net

muitos dos problemas - muitos dos objetivos não podem ser atingidos por agentes agindo isoladamente.

Dessa forma, negociação seria a capacidade de esses agentes trabalharem em conjunto e combinar seus objetivos de forma a concluírem o objetivo final do sistema. Geralmente para uma negociação ser bem sucedida, cada agente deve manter um "modelo" dos outros agentes e também desenvolver um modelo de interações futuras ou possíveis (JENNINGS, 1996). A negociação pode, ainda, ser dividida em cooperativa ou competitiva. (GOLDMAN; ROSENSCHEIN, 1993).

Por definição, segundo (WEISS, 2000): *"Negociação Competitiva é a coordenação entre agentes antagônicos ou simplesmente egoístas ("self-interested")."*. Ou seja, a Negociação Competitiva está relacionada à negociação entre agentes competitivos, ou que disputam os mesmos recursos. No caso do modelo proposto, duas aeronaves podem querer disputar o mesmo ponto no espaço simultaneamente (WOLLKIND, 2004). Geralmente são usados protocolos de negociação para determinar as regras de negociação e são definidos os conjuntos de atributos sobre os quais se pretende chegar a um acordo (ENDRISS, 2006).

Negociação Cooperativa, como apresentado em (WEISS, 2000), é a *"...coordenação entre agentes não antagônicos..."*, ou seja, uma negociação entre agentes que não possuem objetivos conflitantes. Neste caso, agentes cooperativos auxiliam-se mutuamente. Neste tipo de negociação, os agentes agem de forma que o conjunto de agentes realize suas tarefas como um "trabalho de equipe", visando sempre o objetivo final do sistema.

4.3.0.2 O Processo de Negociação

A negociação, em geral, é definida como um processo em que duas ou mais partes multilateralmente barganham recursos para um ganho mútuo, usando ferramentas e técnicas específicas de cada aplicação.

O processo de negociação pode ser visto através de duas dimensões : o tipo de problema de negociação e as abordagens de negociação. Nessa dimensão, destaca-se o problema de negociação cooperativa e o problema de negociação não cooperativa ou competitiva (O'HARE; JENNINGS, 1996) e (NWANA et al., 1996).

A negociação cooperativa defende que todas as partes ou agentes estão trabalhando para um mesmo objetivo. Geralmente pode-se encontrar essa situação quando diferentes departamentos de uma organização estão negociando recursos internos. Nesse caso, uma parte pode ceder recursos para outra se houver

ganho da corporação como um todo. No caso do problema aqui proposto, uma aeronave (VANT ou não) pode solicitar a ocupação de um mesmo nível de vôo que a ocupada por uma outra, sendo que esta pode ceder em função da segurança como um todo.

Na negociação não cooperativa ou competitiva, as partes assumem algum conflito de interesses. O grau de incompatibilidade nos objetivos e os métodos para lidar com os conflitos determinam as estratégias a serem adotadas pelos agentes em diferentes circunstâncias. Esse tipo de negociação se identifica como um jogo de soma zero, ou seja, o ganho de um jogador é a perda do outro. Um exemplo poderia ser a negociação do preço de um produto entre um comprador e um vendedor, onde as duas partes possuem objetivos antagônicos: o comprador quer o menor preço e o vendedor persegue o maior.

Para o caso do SMA aqui proposto para modelar o VANT ocorre sempre a negociação cooperativa, pois os objetivos de cada agente estão em concordância com o objetivo de mantê-lo em um vôo seguro e o cumprimento de uma dada missão. No entanto, quando este VANT é visto como um único agente inserido no espaço aéreo, o processo de negociação com outras aeronaves (tripuladas ou não) poderá ser do tipo cooperativo ou competitivo, especialmente se a segurança de ambas estiver ameaçada(vide tabela 4.1).

Combinação	**Aeronave 1**	**Aeronave 2**
1	Coopera	Coopera
2	Coopera	Compete
3	Compete	Compete

Tabela 4.1: Possíveis Combinações de Negociação entre Aeronaves.

Para que os agentes possam "chegar a um acordo", eles devem trocar mensagens entre si e ter métricas de decisão, ou seja, devem saber se os dados obtidos são os necessários e satisfatórios para selar o acordo. Para viabilizar a negociação, os agentes necessitam comunicar entre si. Os protocolos de negociação servem de estrutura para implementação e são utilizados na difusão das mensagens.

Assim, um agente não pode forçar outro agente a realizar um serviço ou a modificar seu estado interno. Um agente deve tentar convencer o outro a cooperar com ele. Para tanto, precisam negociar. Neste contexto, negociar pode ser visto como o processo que permite que grupos de agentes se comuniquem para tentar estabelecer um acordo, mutuamente aceitável, para a solução de um determinado problema. Em outras palavras, é um processo executado na

intenção de possibilitar que os agentes colaboradores atinjam um consenso na distribuição de recursos (JENNINGS, 1999). Os agentes primeiro comunicam suas intenções (que podem ser conflitantes) e, então, tentam atingir um acordo fazendo concessões ou buscando alternativas (KAIHARA; FUJII, 2002). A capacidade de alcançar acordos, sem intermediários, é uma habilidade fundamental de agentes inteligentes autônomos (WOOLDRIDGE, 2002).

O processo de negociação possui três componentes principais (SPRINKLE et al., 2000):

1. **O protocolo**: define as "regras de encontro" entre agentes, ou seja, explicita quais propostas os agentes podem fazer. Também define os estados da negociação, além dos eventos que causam mudanças nestes estados ;
2. **O objeto a ser acordado**: é o assunto discutido na negociação, que pode ser o nível de vôo, direção da proa,etc;
3. **A estratégia do agente**: define o modelo, adequado ao protocolo, que um agente aplicará para conseguir atingir o seu objetivo na negociação. O agente, sendo uma entidade racional, deve ter como objetivo maximizar o resultado esperado de sua função de utilidade[20] (RUSSELL; NORVIG, 2000).

A complexidade do processo de negociação aumenta com o número de agentes envolvidos e a forma como estes interagem. Existem três possibilidades, descritas abaixo.

- Negociação de um-para-um: neste tipo de negociação cada agente negocia apenas com um outro agente;
- Negociação de um-para-muitos: nesta abordagem, um único agente negocia com vários outros;
- Negociação muitos-para-muitos: nesta classificação, vários agentes negociam com vários outros simultaneamente.

Um mecanismo de negociação entre agentes deve possuir os seguintes atributos (KAIHARA; FUJII, 2002):

1. **Eficiência**: os agentes não devem desperdiçar recursos enquanto não atingem um acordo;

[20]Que descreve o grau de contentamento do agente com um estado do mundo.

2. **Estabilidade**: nenhum agente deve ser incentivado a desistir da estratégia acordada;

3. **Simplicidade**: o mecanismo de negociação deve impor baixa demanda computacional e de banda (no envio das mensagens)

4. **Distribuição**: o mecanismo não deve requerer um centralizador de tomadas de decisão;

5. **Simetria**: o mecanismo não deve desprezar nenhum agente por razões arbitrárias ou impróprias.

No modelo aqui apresentado, o mecanismo de negociação está integrado à base de regras *fuzzy* do Agente Decisor, de forma que este possa considerar o resultado da negociação em seu processo de tomada de decisão.

No entanto, para negociar, os agentes precisam se comunicar para melhor atingir seus objetivos e/ou objetivos da sociedade[21] da qual fazem parte (JENNINGS, 1996). Sem comunicação, o agente é um indivíduo isolado fechado em seu *"loop"* **perceber-pensar-agir**. A comunicação expande a capacidade de percepção dos agentes, pois permite que eles se beneficiem com as informações e especializações que outros agentes possuem.

4.3.0.3 Comunicação entre Agentes

Na comunicação entre humanos a intenção da mensagem não é sempre de fácil entendimento. Uma pessoa pode dizer "estou com fome", quando deseja que o ato perlocucionário da outra pessoa seja oferecer algum alimento. No entanto, a pessoa que ouviu a fala pode não entender como um pedido para servir algo, e crer que a mensagem tenha sido apenas informativa. Na comunicação entre agentes não pode haver esse tipo de ambigüidade.

A teoria dos atos de fala (PEDERSEN, 2002), que pode ser utilizada como uma forma de organizar a conversação, trata a comunicação como uma ação. Em outras palavras, ela assume que os atos de fala são realizados pelos agentes da mesma forma que outras ações, auxiliando a realização de suas intenções. Atos de fala designam todas as ações intencionais executadas durante a comunicação.

[21]Um Sistema Multi-Agente é, por vezes, tratado pelo termo "Sociedade"em alusão às suas características de "convivência" e colaboração.

Existem vários tipos de atos de fala, que podem ser classificados como:

1. **Afirmativos**: Dão informações sobre o mundo. Por exemplo: "Estou à 3.500 pés";
2. **Diretivos**: São usados para dar diretrizes ao endereçado, expressam pedido ou comando. Por exemplo: "Mude seu nível vôo para 3500 pés".
3. **Promissivos**: Expressam promessas. Por exemplo: "Eu vou mudar minha velocidade em breve";
4. **Expressivos**: Servem para dar indicações do estado mental do locutor. Por exemplo: "Estou certo da decisão tomada";
5. **Declarativos**: Mudam o estado do mundo. Por exemplo: "Estou diminuindo minha velocidade para 150KN";
6. **Veredictos**: Expressam julgamentos. Por exemplo: "O Perigo tem 98 % de probabilidade de ser Alto";

Atos de fala possuem três aspectos: **locução ou expressão**, **elocução** e **perlocução**. Locução é o que é falado pelo agente, enquanto elocução é o que o receptor entende. Perlocução é o real efeito do ato comunicativo no receptor. O ideal é que a locução e a elocução sejam iguais, para que a perlocução possa ser previsível. A teoria dos atos de fala usa o termo **performativa** para identificar a intenção **elocucionária** da fala. Em Sistemas Multi-Agentes, a comunicação por atos de fala é tema de muitas pesquisas (GINSBERG, 1991), (FININ et al., 1994), (PEDERSEN, 2002), (FILHO, 1994), entre outras.

Em um SMA, os agentes comunicam-se trocando mensagens. As mensagens são representadas usando duas linguagens: externa e interna.

A **linguagem interna**, ou linguagem para representação de conhecimento, é usada para representar o conteúdo da mensagem. A semântica do conteúdo da mensagem é dependente de domínio, ou seja, apenas os agentes que conhecem, ambos, o domínio e a linguagem interna é que são capazes de entender a mensagem. Como exemplo de linguagem interna pode-se citar o KIF (GINSBERG, 1991).

A **linguagem externa** funciona como um envelope para o conteúdo da mensagem. Na linguagem externa estão representados emissor e receptor da mensagem, bem como o domínio (ontologia) ao qual se refere o conteúdo da

mensagem. A linguagem externa possui semântica bem definida e deve ser compreendida por todos os agentes.

A teoria dos atos de fala influenciou as linguagens externas desenvolvidas para comunicação entre agentes nos anos 1990. As duas mais importantes são "*Knowledge Query and Manipulation Language*" (KQML) (FININ et al., 1994) e "*FIPA-ACL*" (FIPA, 1997) e (PITT; MAMDANI, 1999). Em ambas as linguagens, a intenção elocucionária (performativa) é indicada explicitamente na mensagem. Desse modo, garante-se que a intenção do emissor ao enviar a mensagem (locução) é preservada ao chegar no receptor (elocução).

Para facilitar o seu uso em SMAs, a "*FIPA-ACL*" disponibiliza um conjunto de performativas limitado e bem definido, porém poderoso o suficiente para representar, virtualmente, diversas situações que possam surgir na comunicação entre agentes. A seguir, descrevem-se informalmente algumas das principais performativas:

1. "*accept-proposal*": Permite que um agente declare que aceita uma proposta feita por outro agente;

2. "*agree*": Indica que o agente emissor da mensagem aceitou atender uma requisição anterior feita com a performativa "*request*";

3. "cancel": Usada por um agente para indicar que não deseja mais que uma ação pedida seja realizada;

4. "*Call For Proposals*" (CFP) : O agente que enviou uma mensagem indica seu interesse em um certo serviço e espera propostas de agentes que possam realizá-lo;

5. "*inform*": Assim como "*request*", esta é uma das duas performativas mais importantes de "*FIPA-ACL*". É o mecanismo básico para a comunicação de informações. O agente emissor deseja que o receptor acredite em seu conteúdo;

6. "*not-understood*": Permite que o agente informe que não entendeu a razão de uma ação executada por outro agente;

7. "*propose*": Permite que um agente faça uma proposta para outro agente, por exemplo, em resposta a uma mensagem "*cfp*" anteriormente enviada;

8. "*refuse*": Usada por um agente para informar a outro que não executará determinada ação;

9. "*reject-proposal*": Usada por um agente para indicar a outro que não aceita uma proposta feita durante uma negociação;

10. "*request*": Uma das duas performativas mais importantes de "*FIPA-ACL*", permite que um agente peça a outro que execute uma ação;

Um outro conceito importante na comunicação multi-agente é o de **ontologia**. Uma ontologia representa a terminologia ou vocabulário usado em um domínio específico, bem como as relações entre os termos dessa terminologia e a semântica de tais termos e relações (WOOLDRIDGE, 2002). Os agentes em ambos os lados da comunicação, aqui representados por duas aeronaves, precisam conhecer de maneira precisa o significado do termo **Proa**, bem como a unidade náutica em que as velocidades são representadas. É isso que define a ontologia "*cns-atm*", referenciada no campo "*onthology*" do exemplo mostrado no Código 4.3.2.

```
1  (inform
2  :sender        Vant
3  :receiver      Aeronave_1
4  :content       Velocidade 150 KN
5  :language      fipa-acl
6  :ontology      cns-atm
7  ...)
```

Código 4.3.2: Exemplo de Atos de Fala utilizando "*FIPA-ACL*".

Apenas quando ambos agentes conhecem a ontologia da mensagem é que a comunicação realmente ocorre. Para isso, eles devem ter acesso à definição da ontologia, que pode vir na própria mensagem ou, ainda, estar em um repositório do sistema que todos os agentes possam acessar.

Assim sendo, estabelece-se que o modelo de comunicação adotado nesta tese é baseado em Atos de Fala, executados com utilização da linguagem "*FIPA-ACL*", onde a ontologia é definida no contexto do CNS/ATM.

Desta forma, o Agente Decisor se apresenta modelado com base em um Sistema Especialista com máquina de inferência "*Fuzzy*", e com um Mecanismo de Negociação e Comunicação baseado em Atos de Fala e na linguagem "*FIPA-ACL*", representando nas decisões, o conceito de "Desejo" do sistema BDI proposto. Um ponto importante a se destacar é que o sistema de comunicação modelado para o Agente Decisor, também é utilizado para troca de mensagens dentro do próprio VANT, ou seja, os Agentes Avaliador de Riscos, Agente Decisor e Agente Executor comunicam-se através deste mecanismo.

4.4 Agente Executor

O último agente que se apresenta no modelo é o Agente Executor. Ele representa o conceito de **Intenções**[22] do sistema BDI proposto, e é modelado de forma que este possa interagir com os atuadores do VANT e deve estar apto a reagir às impossibilidades de atuação, ou seja, se lhe for comandado uma determinada ação cuja qual não possa ser executada por alguma falha no atuador, este deve comunicar ao Agente Decisor e deve ser capaz também de agir com outros recursos de forma independente, caso seja possível. Estas características o tornam um agente do tipo **Reativo**.

Em (WOOLDRIDGE; JENNINGS, 1994), define-se Agentes Reativos, os agentes que reagem a alterações no ambiente ou a mensagens de outros agentes. Não têm estes a capacidade de raciocínio sobre suas intenções, reagindo tão somente sobre regras e planos pré-determinados.

Do ponto de vista da abordagem de robô móvel adotado para se modelar o VANT, o Agente Executor está relacionado com o sistema de navegação da aeronave. Formalmente, navegação é o processo de conduzir um veículo de um lugar para o outro utilizando algum método de orientação e envolve questões sobre posição atual, posição futura, origem, destino, manobras, etc. Assim, o sistema de navegação busca orientar o veículo de forma a mantê-lo em sua rota, e caso seja necessária alguma manobra, poder levá-lo de volta à rota original.

No caso do VANT, estão relacionados ao sistema de navegação os sistemas de Controle de Vôo, cujos objetivos são os seguintes:

- Manter a Estabilidade: Dadas as dinâmicas de um vôo[23], este pode se tornar instável. Cabe aos sistemas de controle de Vôo atuarem de forma autônoma para manterem o vôo o mais estável possível;
- Manter a Atitude: Esta função controla a orientação da aeronave;
- Controlar a Velocidade: Esta função visa manter a velocidade da aeronave compatível com a estabelecida pelo Agente Decisor, através de atuação no controle da potência do sistema propulsor;
- Controlar a Rota: Esta função manobra a aeronave em resposta aos comados provenientes do Agente Decisor, visando mantê-la na rota

[22] Seqüência de ações para alcançar objetivo.

[23] A dinâmica de vôo está fora do contexto desta modelagem por se tratar de assunto específico de aerodinâmica.

estabelecida, ou ajustá-la em função de algum evento.

Na figura 4.7 apresenta-se a arquitetura adotada para o Agente Executor. Pode-se observar da figura que o elemento principal é o Sistema de Gerenciamento de Vôo. À partir deste é que são acionados os subsistemas de propulsão e controle do vôo.

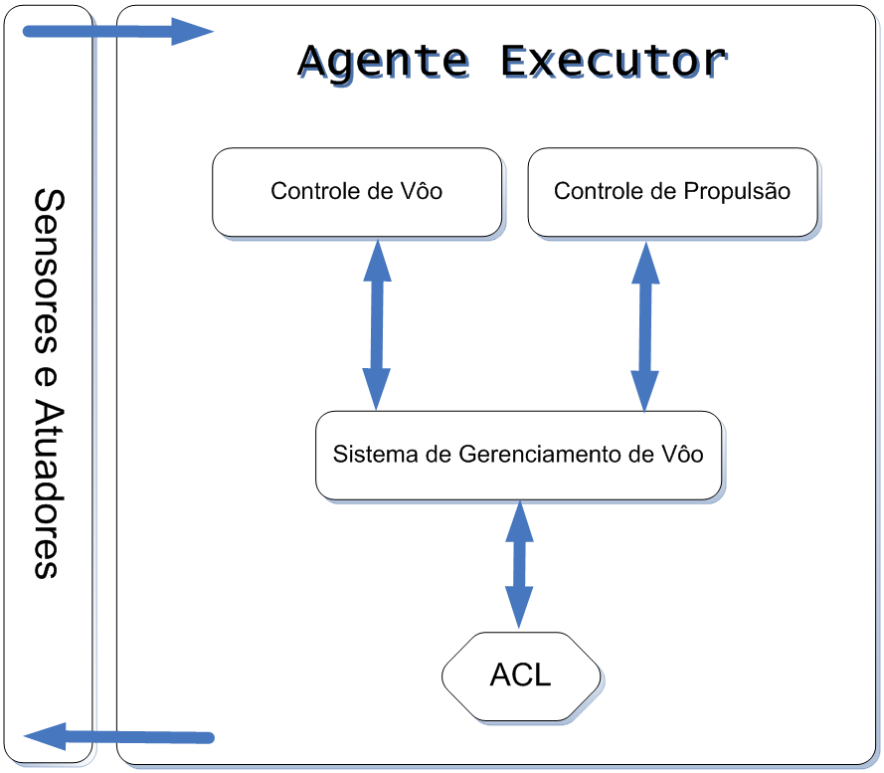

Figura 4.7: Arquitetura do Agente Executor.

Ainda na figura 4.7 apresentam-se a leitura dos sensores. Ressalta-se que esta é uma tarefa do Agente Decisor e está relacionada, na figura 4.7, a arquitetura do Agente Executor apenas para fins de compreensão. Por fim, cabe ao Agente Executor decidir como executar alguma tarefa. Por exemplo, se lhe for comandado que se faça um incremento em sua velocidade, mas a aeronave já se encontre em aceleração, o Agente Executor pode decidir por não atuar imediatamente, ou atuar de forma a complementar a ação em curso.

4.5 Considerações Finais

No desenvolver deste capítulo, apresentou-se o um modelo de VANT inspirado em um sistema multi-agentes. No entanto algumas considerações se fazem necessárias para fechar a completa compreensão do modelo ora proposto.

Primeiramente, deve-se observar o fato de que a definição do VANT como um

robô móvel e por conseqüência um agente físico, permitiu que este fosse modelado como uma agente do tipo BDI. Embora possa parecer natural que um veículo autônomo deva agir em função de estados mentais, dificilmente faz-se trivial torná-lo consciente de seu ambiente e de sua missão, meta esta satisfatoriamente atingida com a fusão das diversas técnica de inteligência artificial aplicadas. Assim, o modelo que se apresentou permite que se consiga visualizar o VANT como uma entidade dotada de inteligência, com capacidade de avaliação e julgamento. No entanto estes benefícios somente encontrarão lugar prático se houver sensores e atuadores realmente eficientes, pois no modelo consideram-se que as informações e respostas destes sejam precisas e tempestivas.

Em segundo lugar, pode-se notar que o Agente BDI utilizado para modelar o VANT é, de fato, um sistema multi-agente quando observado do ponto de vista da aeronave. Isto implica que o VANT é, em sua essência, um sistema colaborativo, composto por agentes especializados e cooperativos cujo objetivo coletivo é o cumprimento de uma dada missão de vôo de forma a atingir os requisitos de "*Safety*" exigidos.

Por fim, faz-se importante frisar o fato de que para o modelo como um todo não levou-se em consideração os aspectos implementacionais do sistema, tais como critérios de tempo real e limitações físicas, pois o principal objetivo desta pesquisa é investigar a possibilidade de se ter um modelo lógico para um VANT, baseado em sistemas multi-agentes. Dessa forma pôde-se ter mais graus de liberdade para se executar as provas de conceito com a utilização de ferramentas tipicamente não apropriadas para sistemas de tempo real.

5 Experimentação e Prova de Conceito

"Se não puder ser expresso em números, poderá não ser verdade."
Pitágoras

Com o objetivo de se realizar a prova dos conceitos apresentados nesta tese, elaborou-se e executou-se o conjunto de experimentos computacionais descritos nesta seção. Inicialmente se apresentará uma visão do ambiente computacional utilizado, e em seguida se apresentará a descrição dos experimentos e os resultados obtidos.

5.1 Definição do Ambiente Computacional

Visando a realização dos experimentos computacionais citados nesta seção, adotou-se como plataforma de *hardware* um computador *Athlon AMD64* de 3.4GHz, com *1Gb* de memória *RAM*. Para esta plataforma, o sistema operacional adotado foi o *Linux Debian 4.0* de 64bits.

As linguagens de programação adotadas para esta prova de conceito foram o **JAVA** e o **C++**, devido principalmente a existência de um grande número de ferramentas e bibliotecas de componentes destinados a construção de SMA, assim como para a realização das máquinas de inferência Bayesianas e SE "*Fuzzy*".

Neste contexto, escolheu-se como plataforma para os agentes o "*Java Agent DEvelopment Framework*" (JADE) (BELLIFEMINE et al., 2007), pelo fato deste fornecer um "*framework*" completo que trata da comunicação através da **FIPA-ACL**, do ciclo de vida do agente e do monitoramento da execução. Para a modelagem e inferência da rede Bayesiana utilizou-se o *SMILE* (MODELING; ENGINE, 2008)[1] que se trata de uma biblioteca C++ independente de Plataforma e, para a máquina de inferência do Agente Decisor, utilizou-se o "*Java Expert*

[1] http://genie.sis.pitt.edu/

System Shell" (JESS) (HILL, 2003), que é um "*script shell*" para construção de sistemas especialistas baseado em regras, inteiramente desenvolvido em **JAVA** e que possui um ambiente integrado ao JADE. A versão utilizada é uma adaptação para operação com regras "*Fuzzy*", chamada "*FuzzyJess*"[2].

5.2 Considerações sobre os Experimentos

Para a elaboração dos experimentos computacionais aqui apresentados, considerou-se o fato de que um VANT, independentemente da missão a ser cumprida, poderá operar em espaço aéreo controlado. Desta forma, uma das características do modelo proposto nesta tese é propiciar um vôo seguro tanto para o VANT quanto para as demais aeronaves ao redor deste.

Assim, visando-se verificar o desempenho do modelo proposto, elaborou-se um conjunto de experimentos concentrando-se esforços para medir-se o **perigo de colisões em vôo** entre o VANT e outra aeronave em processo de cruzamento de sua rota.

Neste ponto é importante frisar que o modelo de um VANT baseado em sistemas multi-agentes não tem a pretensão de ser um Sistema Anti-colisão. Para tal função existe o *Traffic allert and Collision Avoidance System* (TCAS)[3]. O objetivo aqui é dotar o VANT de uma inteligência tal que este possa tomar decisões e negociar recursos do espaço aéreo tal qual um piloto o faria.

Assim, modelou-se um VANT que siga um plano de vôo com três fases, como pode ser observado na figura 5.1, percorrendo um espaço com outras cinco aeronaves que se apresentam aleatoriamente no cenário. Estas aeronaves são dotadas de capacidade de comunicação através da **FIPA-ACL**.

Ambos, VANT e demais aeronaves, são modelados à partir do conjunto de variáveis, estados e condições apresentados na tabela 5.1. Estas variáveis estão descritas na seção 4.1.1 do capítulo 4.

Idealizou-se, no total 6 cenários com o equivalente a 5.000 horas de vôo cada. No primeiro destes, os agentes não foram ativados, visando a geração de uma amostra de controle. Registrou-se em arquivo todos os eventos (incluindo-se as trajetórias). À partir do segundo cenário, repetiu-se toda a simulação

[2]http://www.cs.vu.nl/ ksprac/2002/doc/fuzzyJDocs/FuzzyJess.html

[3]Basicamente o TCAS de uma aeronave é um radar que se comunica com o TCAS de outras aeronaves e analisa se há rota de colisão entre elas.

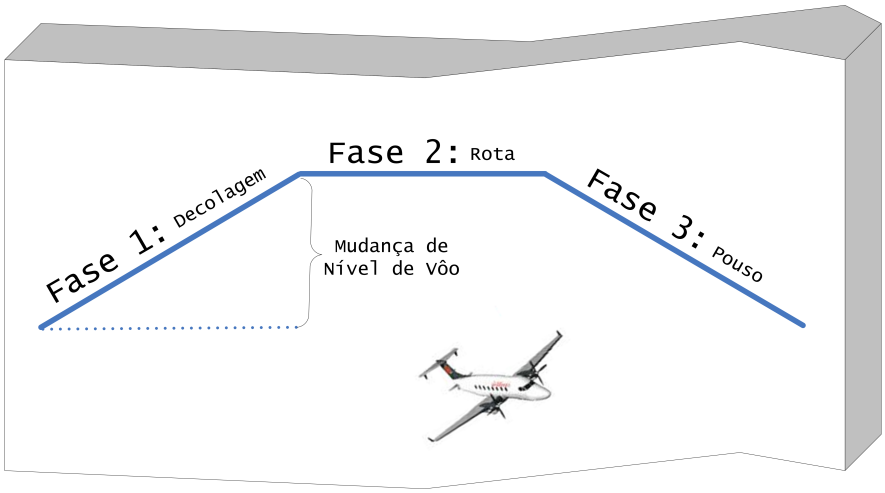

Figura 5.1: Plano de vôo original do VANT.

anteriormente gravada, porém com a atuação dos agentes, permitindo-se assim a comparação dos resultados.

Variável	**Estados**	**Ações**
Nível de Vôo	• Acima • Mesmo • Abaixo	• Subir • Manter • Descer
Velocidade	• Maior • Mesma • Menor	• Aumentar • Manter • Diminuir
Proa	• Mesma • Contrária	• Manter • Mudar
Autonomia de Vôo	• Alta • Baixa	• Se Alta: Pode Colaborar • Se Baixa: Compete

Tabela 5.1: Tabela de Estados e Ações para as Aeronaves e o VANT.

5.2.1 Estratégias de Execução dos Experimentos

Os experimentos apresentados neste capítulo visam simular o atendimento aos **Requisitos de Segurança de Vôo**, que são basicamente definições qualitativas e quantitativas de riscos à segurança, associados a cada acidente que possa acontecer durante as fases do vôo apresentadas na figura 5.1. Tais requisitos, resumidamente, incluem:

- Descrição das conseqüências do acidente (severidade do perigo);
- Probabilidade de ocorrência do acidente, que é dado pelo máximo valor aceitável de probabilidade de ocorrência do acidente (probabilidade de risco, que é de 10^{-9} por hora de vôo);
- Regras de prevenção qualitativas que tornam possível evitar o acidente.

Via de regra, as conseqüências possíveis de acidentes aéreos são ordenadas em classes de severidade, que devem incluir os perigos de acidente catastrófico, acidente grave, acidente significativo e acidente desprezível (WILLEMAIN, 2003), (ALSTON, 2003) e (FAA/EUROCONTROL, 1998). A tabela 5.2 apresenta a probabilidade máxima admissível de ocorrência de um acidente, que pode ser aceita para cada classe de severidade, de acordo com (FAA/EUROCONTROL, 1998).

Conseqüências	**P(ocorrência): qualitativo**	**P(ocorrência): quantitativo**
Catastrófico	Extremamente improvável	$1 \cdot 10^{-9}$
Grave	Improvável	$1 \cdot 10^{-4}$
Significativo	Ocasional	$1 \cdot 10^{-3}$
Desprezível	Provável	$1 \cdot 10^{-1}$

Tabela 5.2: Probabilidade máxima admissível de ocorrência de um acidente por hora de vôo, de acordo com (FAA/EUROCONTROL, 1998).

Neste contexto considerou-se que, havendo-se um acidente entre um VANT e uma outra aeronave, este seria classificado como Catastrófico, e assim os experimentos foram projetados para verificar se a probabilidade de ocorrência do acidente para esta categoria se mantem no nível aceitável.

Quanto as regras de prevenção qualitativas, estas estão na base de conhecimento do Agente Decisor, apresentado no capítulo 4, seção 4.3.

Assim sendo e, visando-se alcançar a homogeneidade dos resultados e um conjunto de dados que representem uma possível realidade operacional, adotou-se a seguinte estratégia de execução dos experimentos[4]:

1. O tempo entre a decolagem e o pouso do VANT é de 20 horas;
2. O número de aeronaves que cruzam a rota do VANT pode variar de 1 à 5, por hora de vôo;
3. Durante o vôo, a velocidade do VANT varia entre 62 kt e 162 kt[5];
4. Em cada cenário puderam-se ajustar os seguintes parâmetros:
   (a) Taxa de Cooperação das Aeronaves;
   (b) Taxa de Falha dos Sensores;
   (c) Taxa de Falha dos Atuadores;

A taxa de cooperação é gerada com base na tabela 4.1 do capítulo 4, implicando uma probabilidade percentual de que a aeronave em negociação com o VANT possa aceitar colaborar ou simplesmente competir.

Quanto às taxas de falha para sensores e atuadores, determinou-se que estas sejam definidas como sendo a **Probabilidade do Sensor ou Atuador falhar (não funcionar) no momento em que estes forem requisitados**, podendo estar funcionando em uma segunda requisição. Assim, se a taxa de falha for definida como $0,5\%$, isto implica em uma disponibilidade assintótica de $99,5\%$.

Neste ponto se faz importante destacar o que se considerou como atuadores e sensores no modelo de VANT. Na figura 5.2, apresenta-se o modelo de atuadores clássicos de uma aeronave, onde o objetivo básico é permitir-se que durante o vôo, o VANT possa mover-se de três maneiras básicas:

- num ângulo vertical para cima e para baixo;
- num ângulo horizontal de um lado para outro;
- rolando ao redor de um eixo longitudinal.

O movimento vertical é controlado pelas superfícies móveis, chamadas Profundores **(C)**. Movendo-se esses Profundores para cima, o avião tem a sua

[4]A a estratégia apresentada é inspirada em valores obtidos em (UVS, 2005), (DOD, 2005), www.airsafetygroup.com.br, www.aopa.org e www.eurocontrol.int.

[5]1 kt = 1.8532 km/h.

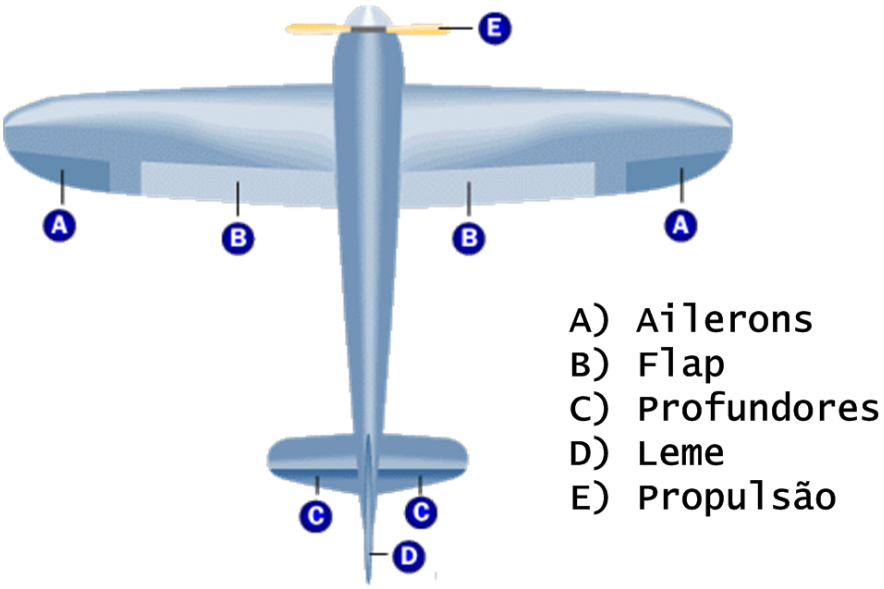

Figura 5.2: Modelo de atuadores da VANT

frente levantada, em posição de subida. Baixando-se os mesmos, o efeito é exatamente o oposto. Controla-se o movimento horizontal por meio de uma superfície móvel no estabilizador vertical, conhecido como leme **(D)**. No caso de apenas o leme ser usado, o VANT "derrapa" lateralmente, pois não há uma força contrária horizontal que o impeça de continuar a virar. Movendo-se os Ailerons **(A)**, superfícies de controle nas extremidades das asas, o VANT pode ser forçado a se inclinar ou rolar para o lado interno da curva, ao mesmo tempo em que o leme o faz girar de tal maneira que ele se incline na direção do centro da curva.

Quanto aos sensores, considerou-se:

- "*Global Positioning System*" (GPS);
- Altímetro;
- Bússola Digital;
- Sensor de Combustível;
- Velocidade;
- Sistema de Comunicação.

Utilizou-se no modelo de restrições das aeronaves e do VANT, a variável **Autonomia de Vôo**, ou seja, se uma aeronave estiver com baixa Autonomia de Vôo, isto poderá implicar, por exemplo, em uma impossibilidade da mudança de nível. Tanto a Autonomia de Vôo, quanto os demais parâmetros foram gerados

utilizando-se simulações baseadas na técnica de **Monte Carlo** (DRIAS, 1998), (THRUN et al., 2000) e (GAMERMAN; LOPES, 2006).

Para se definir o tamanho das "Zonas de Proteção" e "Zonas de Alerta" definidas no capítulo 4 - figura 4.3, baseou-se nos seguintes critérios:

- "Zona de Alerta": Distância a partir "nariz" da aeronave, até o equivalente a 5 min de vôo à sua frente;
- "Zona de Proteção": Distância do "nariz" da aeronave, até o equivalente a 1 min de vôo à sua frente;

Finalmente, para definição das métricas adotadas na avaliação dos resultados, levou-se em consideração:

- O Total de Horas de Vôo;
- A probabilidade de colisão do VANT com outra aeronave, por hora de vôo;
- O número de cruzamentos de trajetórias;
- O número de colisões que realmente ocorreram.

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos em cada cenário.

5.3 Resultados

5.3.1 Cenário 1: Amostra de Controle

Como dito anteriormente, primeiro simulou-se 5.000 horas de vôo sem que os agentes pudessem atuar, visando gerar uma amostra de dados para controle. Os resultados desta fase podem ser observados na tabela 5.3. Nota-se claramente o aumento no número de colisões decorrentes dos cruzamentos entre aeronaves e o VANT, em função da quantidade de horas de vôo executadas. Neste primeiro cenário, os parâmetros "Taxa de Cooperação", "Taxa de Falha dos Sensores" e "Taxa de Falha dos Atuadores" não foram levados em consideração, ou seja, foram configurados para zero.

Horas de Vôo	N^o **de Cruzamentos**	**P(Colisão)**	N^o **de Colisões**
100	35	$0,0285$	1
200	87	$0,0476$	4
300	142	$0,1553$	22
400	167	$0,4192$	70
500	215	$0,5116$	110
1.000	637	$0,8381$	534
1.500	1.341	$0,8896$	1.193
2.000	2.531	$0,8376$	2.120
2.500	3.834	$0,9454$	3.625
3.000	5.136	$0,9622$	4.942
3.500	7.042	$0,9681$	6.818
4.000	8.577	$0,9643$	8.271
4.500	9.974	$0,9818$	9.793
5.000	11.375	$0,9629$	10.953

Tabela 5.3: Resultados obtidos após 5.000 horas de vôo, sem atuação dos Agentes.

5.3.2 Cenário 2: Colaborativo

Após a realização das simulações sem a atuação dos agentes do Cenário 1, executou-se a reprodução das trajetórias decorrentes, porém desta vez, permitindo com que os agentes entrassem em ação realizando as tarefas de avaliação de riscos, negociação e tomada de decisão. Neste segundo cenário adotou-se:

- Taxa de Colaboração das Aeronaves: 80%;
- Taxa de Falha dos Sensores: $0,5\%$;
- Taxa de Falha dos Atuadores: $0,5\%$.

Estes ajustes dos parâmetros podem ser interpretados da seguinte maneira: A cada 10 situações de negociação, 2 são totalmente competitivas, o que equivale a dizer que a aeronave em condição de conflito **não pode mudar sua atitude de vôo**. Quanto às taxas de falhas, apesar de serem relativamente altas, servem para demonstrar a capacidade de avaliação de risco e tomada de decisão dos respectivos agentes que compõem o VANT, mediante condições de incerteza.

Os resultados das simulações podem ser observados na tabela 5.4. É interessante notar que em 5.000 horas de vôo e após 11.375 cruzamentos de rotas, **ocorreu uma colisão**. Esta colisão em especial se deu pelo fato do algoritmo de decisão ter entrado em uma condição "Semi-decidível"[6], o que demonstra a necessidade de ampliação da base de regras "*fuzzy*" do Agente Decisor. No entanto observou-se que tal fato não interfere na avaliação dos experimentos realizados de forma a inviabilizá-los, pois o objetivo desta tese é o de demonstrar o potencial de aplicação da metodologia, e o aperfeiçoamento desta base é certamente labor de uma pesquisa futura.

[6]Ou seja, nem sempre é possível encontrar um procedimento que, em tempo finito, e dado certo conhecimento, permita determinar se um dado argumento é correto ou não, ou se um dado conseqüente de uma regra é inferível de tal conhecimento.

Horas de Vôo	N^o de Cruzamentos	P(Colisão)	N^o de Colisões
100	35	$1,143 \cdot 10^{-9}$	0
200	87	$3,212 \cdot 10^{-9}$	0
300	142	$2,674 \cdot 10^{-9}$	0
400	167	$1,606 \cdot 10^{-9}$	0
500	215	$0,142 \cdot 10^{-9}$	0
1.000	637	$3,964 \cdot 10^{-8}$	0
1.500	1.341	$2,756 \cdot 10^{-8}$	0
2.000	2.531	$1,162 \cdot 10^{-8}$	0
2.500	3.834	$1,292 \cdot 10^{-7}$	0
3.000	5.136	$2,182 \cdot 10^{-7}$	0
3.500	7.042	$3,821 \cdot 10^{-6}$	0
4.000	8.577	$1,382 \cdot 10^{-6}$	0
4.500	9.974	$0,856 \cdot 10^{-6}$	0
5.000	11.375	$3,855 \cdot 10^{-5}$	1

Tabela 5.4: Resultados obtidos após 5.000 horas de vôo, com a atuação dos Agentes.

5.3.3 Cenário 3: Falha dos Atuadores

A partir do terceiro cenário, iniciou-se um processo de injeção de falhas mais rigoroso, visando-se avaliar a capacidade de decisão do VANT. Para tanto adotou-se os seguintes valores para os parâmetros de simulação:

- Taxa de Colaboração das Aeronaves: 80%;
- Taxa de Falha dos Sensores: $0,5\%$;
- Taxa de Falha dos Atuadores: 10%.

O objetivo destes ajustes é o de verificar a capacidade de reação do VANT, mediante falhas operacionais em seus atuadores. Neste ponto, se faz importante mencionar que tais falhas não impedem totalmente o VANT de manobrar, pois estas falhas ocorrem em um atuador por vez e não são necessariamente uma pane[7], forçando o Agente Decisor a tomar outra decisão com outra Probabilidade de Risco avaliada pelo Agente Avaliador de Riscos. Os resultados das simulações estão dispostos na tabela 5.5.

Das quatro colisões registradas, apenas uma se deve ao fato do algoritmo de decisão ter entrado em uma condição "Semi-decidível". As outras três ocorreram em condições de concorrência, agravada por uma dificuldade de manobra por parte do VANT.

[7]Uma falha indica um estado degradado de operação diminuindo sua confiabilidade, enquanto uma pane impede totalmente o atuador de funcionar.

Horas de Vôo	N^o de Cruzamentos	P(Colisão)	N^o de Colisões
100	35	$1,895 \cdot 10^{-8}$	0
200	87	$1,994 \cdot 10^{-8}$	0
300	142	$2,474 \cdot 10^{-7}$	0
400	167	$3,884 \cdot 10^{-7}$	0
500	215	$1,421 \cdot 10^{-7}$	0
1.000	637	$1,171 \cdot 10^{-6}$	0
1.500	1.341	$2,846 \cdot 10^{-6}$	0
2.000	2.531	$3,671 \cdot 10^{-6}$	0
2.500	3.834	$2,831 \cdot 10^{-5}$	0
3.000	5.136	$0,846 \cdot 10^{-5}$	0
3.500	7.042	$2,631 \cdot 10^{-5}$	1
4.000	8.577	$3,341 \cdot 10^{-4}$	1
4.500	9.974	$1,786 \cdot 10^{-3}$	0
5.000	11.375	$5,847 \cdot 10^{-3}$	2

Tabela 5.5: Resultados obtidos após 5.000 horas de vôo, com Taxa de Falha dos Atuadores em 10%.

5.3.4 Cenário 4: Falha dos Sensores

O objetivo do quarto cenário é avaliar a capacidade do VANT em lidar com a ausência de informações, assim sendo adotou-se:

- Taxa de Colaboração das Aeronaves: 80%;
- Taxa de Falha dos Sensores: 10%;
- Taxa de Falha dos Atuadores: $0,5\%$.

Os resultados podem ser observados na tabela 5.6. Nesta simulação, todas as 403 colisões se deram por incapacidade do VANT em detectar a aeronave em condição de conflito. Este é um fato esperado, pois está diretamente relacionado com a confiabilidade e a disponibilidade dos sensores, porém aponta para um ponto extremamente importante: **Para um vôo totalmente autônomo, os sensores também devem ser dotados de inteligência**. Os métodos clássicos apontariam para uma redundância tripla dos sensores. Porém, para um VANT esta técnica pode se tornar inviável devido principalmente ao custo e ao peso. Alguns trabalhos mais recentes apontam para a fusão de sensores como solução deste tipo de problema em robótica móvel, tal como apresentado em (BROOKS; IYENGAR, 2001) e (SMAILI et al., 2007). Certamente este é um tema a ser abordado em uma pesquisa futura.

Horas de Vôo	N^o de Cruzamentos	P(Colisão)	N^o de Colisões
100	35	$1,089 \cdot 10^{-7}$	0
200	87	$1,752 \cdot 10^{-6}$	0
300	142	$2,984 \cdot 10^{-6}$	0
400	167	$1,021 \cdot 10^{-5}$	0
500	215	$1,837 \cdot 10^{-5}$	0
1.000	637	$2,092 \cdot 10^{-4}$	0
1.500	1.341	$7,457 \cdot 10^{-4}$	1
2.000	2.531	$2,371 \cdot 10^{-3}$	6
2.500	3.834	$2,608 \cdot 10^{-3}$	10
3.000	5.136	$2,921 \cdot 10^{-3}$	15
3.500	7.042	$3,266 \cdot 10^{-3}$	23
4.000	8.577	$5,479 \cdot 10^{-3}$	47
4.500	9.974	$8,923 \cdot 10^{-3}$	89
5.000	11.375	$1,862 \cdot 10^{-2}$	212

Tabela 5.6: Resultados obtidos após 5.000 horas de vôo, com Taxa de Falha dos Sensores em 10%.

5.3.5 Cenário 5: Competitivo

No quinto cenário, o objetivo é avaliar a capacidade do VANT em lidar com situações de conflitos, pois a maioria das negociações aqui apresentadas é Competitiva. Assim adotou-se:

- Taxa de Colaboração das Aeronaves: 5%;
- Taxa de Falha dos Sensores: $0,5\%$;
- Taxa de Falha dos Atuadores: $0,5\%$.

Os resultados das simulações estão apresentados da tabela 5.7, onde pode-se observar duas colisões, as quais se devem ao fato do algoritmo de decisão ter entrado, novamente, em uma condição "Semi-decidível". Observa-se também uma queda de fator 10 na performance de manutenção de perigo nos níveis exigidos, **porém em uma condição de extrema competição**. Cabe ressaltar que quando o VANT não consegue negociar com a aeronave em conflito, este executa ações que certamente diminuem o risco de colisão, no entanto ele pode colocar-se em risco de colisão com o solo. Porém no modelo proposto do Agente Avaliador de Riscos não se considerou tal hipótese devido a complexidade deste cenário, o qual envolve avaliar a densidade populacional, as propriedades e zonas de proteção ambiental do possível local de impacto gerando um cálculo da severidade do acidente, sendo este o objeto de uma pesquisa futura onde se acrescentará uma consciência situacional no VANT atualizada durante a execução da missão.

Horas de Vôo	N^o de Cruzamentos	P(Colisão)	N^o de Colisões
100	35	$0,656 \cdot 10^{-7}$	0
200	87	$1,412 \cdot 10^{-7}$	0
300	142	$2,831 \cdot 10^{-7}$	0
400	167	$1,123 \cdot 10^{-6}$	0
500	215	$1,981 \cdot 10^{-6}$	0
1.000	637	$2,091 \cdot 10^{-6}$	0
1.500	1.341	$2,182 \cdot 10^{-6}$	0
2.000	2.531	$1,012 \cdot 10^{-5}$	0
2.500	3.834	$1,173 \cdot 10^{-5}$	0
3.000	5.136	$1,901 \cdot 10^{-5}$	0
3.500	7.042	$2,017 \cdot 10^{-5}$	0
4.000	8.577	$1,523 \cdot 10^{-4}$	0
4.500	9.974	$1,683 \cdot 10^{-4}$	0
5.000	11.375	$1,758 \cdot 10^{-4}$	2

Tabela 5.7: Resultados obtidos após 5.000 horas de vôo, com Taxa de Colaboração das Aeronaves em 5%.

5.3.6 Cenário 6: Realístico

No sexto e último cenário, o objetivo é avaliar a manutenção da probabilidade de colisão nos níveis aceitáveis, permitindo extrema colaboração e maior disponibilidade dos sensores e atuadores. Para tanto adotou-se:

- Taxa de Colaboração das Aeronaves: 95%;
- Taxa de Falha dos Sensores: $0,01\%$;
- Taxa de Falha dos Atuadores: $0,01\%$.

Os resultados das simulações estão representados na tabela 5.8. Como era esperado, as probabilidades de colisões ficaram muito baixas, porém ainda sem que se pudesse atingir os níveis exigidos. Tal afirmação não inviabiliza o modelo. Apenas aponta para fato de ser extremamente necessário realizar ajustes na base de conhecimento do Agente Decisor e realizar um aprimoramento no sistema como um todo. Permitiu para se demonstrar a extrema sensibilidade, em termos de segurança, que um VANT em condições de vôo autônomo tem em relação a sua capacidade de interagir com o seu ambiente através de seu sensores e de seus atuadores. Conclui-se deste cenário que a disponibilidade assintótica destes dispositivos deve ser de, no mínimo, $99,99\%$.

Horas de Vôo	N^o de Cruzamentos	P(Colisão)	N^o de Colisões
100	35	$0,423 \cdot 10^{-11}$	0
200	87	$0,134 \cdot 10^{-11}$	0
300	142	$0,631 \cdot 10^{-11}$	0
400	167	$0,123 \cdot 10^{-10}$	0
500	215	$0,445 \cdot 10^{-10}$	0
1.000	637	$0,091 \cdot 10^{-9}$	0
1.500	1.341	$0,182 \cdot 10^{-9}$	0
2.000	2.531	$0,012 \cdot 10^{-9}$	0
2.500	3.834	$0,173 \cdot 10^{-9}$	0
3.000	5.136	$1,975 \cdot 10^{-8}$	0
3.500	7.042	$1,721 \cdot 10^{-8}$	0
4.000	8.577	$1,009 \cdot 10^{-8}$	0
4.500	9.974	$1,108 \cdot 10^{-7}$	0
5.000	11.375	$1,098 \cdot 10^{-7}$	0

Tabela 5.8: Resultados obtidos após 5.000 horas de vôo, cenário ideal.

5.4 Considerações Finais

A realização dos experimentos apresentados neste capítulo demandou cerca de 1.500 horas de processamento, desconsiderando-se todos os ajustes e codificações necessárias. No entanto, acredita-se ter comprovado o potencial do modelo proposto nesta pesquisa, como modelo de inteligência para que um VANT possa operar de modo seguro em meio ao espaço aéreo controlado.

Pode-se concluir dos resultados apresentados, que a maior fonte de risco para um VANT não é necessariamente o número de aeronaves que por ventura cruzem o seu caminho, mas sim a confiabilidade e disponibilidade de seus sensores. Embora não seja o escopo deste trabalho, ficou evidente que maior atenção deva ser dada à tal constatação, sendo este o tema de um trabalho futuro.

Finalmente, demonstra-se que o modelo é bastante viável, demandando porém de uma engenharia de conhecimento muito mais apurada na construção da base de regras do Agente Decisor, para que se elimine a possibilidade do algoritmo de decisão vir a entrar em uma condição "Semi-decidível", o que acarreta em uma diminuição da confiabilidade do sistema. O refinamento desta base é fundamental para o sucesso do modelo e deve ser realizada como uma extensão desta pesquisa.

6 Conclusões e Recomendações

"Se enxerguei longe, foi porque estive sobre ombros de gigantes."
Sir Isaac Newton

A convivência entre aeronaves comerciais, com cada vez mais passageiros e aeronaves não tripuladas, traz sérias preocupações com relação à capacidade que o sistema atual de navegação, controle, vigilância e de Gerenciamento de Tráfego Aéreo (ATM) tem para lidar com situações de perigo decorrentes da aproximação entre estas duas categorias de aeronaves.

Em outras palavras: Dado que o principal serviço fornecido pelo Gerenciamento de Tráfego Aéreo é a garantia de separação para prevenção de colisão entre aeronaves e colisão contra terrenos e obstáculos, poderá este gerenciar aeronaves que não possuem um humano com quem se possa interagir ?

Para responder a esta questão, deve-se considerar que a principal característica do espaço aéreo controlado é que as aeronaves que nele circulam possuem alto grau de colaboração. Neste sentido, a interação entre controladores e pilotos é, em sua essência, extremamente fluente. Atualmente o espaço aéreo é rigidamente estruturado, forçando as aeronaves a seguirem rotas ao longo de trajetórias pré-definidas. O CNS/ATM (Comunicação, Navegação, Vigilância / Controle de Trafego Aéreo) surge como uma proposta para a substituição deste atual sistema, pois propõe um novo conceito, denominado *"Free Flight"*. Esse conceito tem por finalidade dar flexibilidade na operação e no gerenciamento do tráfego aéreo, pois permite aos pilotos gerenciarem e modificarem suas rotas dinamicamente, sem muitas vezes a necessidade de intervenção dos Centros de Controle de Tráfego Aéreo. No entanto se os VANTs não possuírem a capacidade de interação e de tomarem decisões, nenhum dos dois sistemas[1] será capaz de comportá-los de forma segura e é exatamente neste nicho que se concentra esta tese.

Assim, apresentou-se nesta pesquisa uma proposta de modelagem de um VANT, tendo-se como ponto de partida os conceitos de robô móvel, cujo modelo

[1] ATM e CNS/ATM.

de inteligência é fundamentado em Inteligência Artificial Distribuída (IAD), implementável segundo o paradigma de Sistemas Multi-Agentes (SMA) e que leve em consideração os principais requisitos de *"SAFETY"* exigidos pelo CNS/ATM, de modo a permitir a futura inserção destas aeronaves no espaço aéreo controlado.

Para tal modelagem, partiu-se da definição de robô móvel visando reforçar as características autônomas (ou de inteligência) de um VANT genérico, permitindo-se dessa forma modelá-lo como uma entidade inteligente inspirada no conceito de agente e que seja, de acordo com (RUSSELL; NORVIG, 2000): "... capaz de perceber seu ambiente por meio de sensores, e agir sobre esse mesmo ambiente por intermédio de atuadores". Assim sendo e utilizando-se da visão de robô móvel, fez-se uma reflexão sobre as "três leis da robótica" criadas por Isaac Asimov, em seu livro: "Eu Robô".

Outra característica importante da modelagem foi considerar-se que uma aeronave sem tripulação necessite de autonomia para cumprir suas missões. Assim, uma vez entendida a natureza robótica do VANT este, em geral, deve lidar com ambientes parcialmente observáveis, estocásticos, dinâmicos e contínuos, tendo portanto a capacidade de "Raciocinar" sobre as ações a serem executadas. Para tanto e para completar o modelo robótico, uma abordagem do ponto de vista de sistemas multi-agentes se fez necessária, considerando-se que um agente genérico seja definido como sendo uma entidade real ou virtual capaz de agir num ambiente qualquer, de se comunicar com outros agentes e que possui competências.

Neste ponto faz-se importante ressaltar que um sistema composto por um ou mais agentes é um sistema multi-agentes[2] e este, por outro lado, pode ser modelado inteiramente como sendo um único agente[3].

Assim, partindo-se deste ponto de vista, propôs-se um modelo lógico de um VANT como sendo um sistema multi-agentes composto por agentes especializados. A interação e a colaboração entre estes agentes, para a execução das tarefas (objetivos) do VANT, permite que este se comporte como um único agente físico.

[2]Visão microscópica.
[3]Visão macroscópica.

Em tal sistema multi-agente, utilizou-se do Raciocínio Probabilístico baseado na Regra de Bayes para a avaliação de riscos e para tomada de decisões optou-se em um sistema especialista baseado em regras *"Fuzzy"*. Foram modelados os seguintes componentes:

- **Sensores**;
- **Atuadores**;
- **Agente Avaliador de Riscos**;
- **Agente Decisor**;
- **Agente Executor**;
- **ACL**: "*Agent Communication Language*";
- **Base de Conhecimento**.

Finalizada a fase de modelagem e visando-se realizar a prova dos conceitos apresentados, elaborou-se e executou-se um conjunto de experimentos computacionais, concentrando-se esforços para medir-se o Perigo de Colisões em Vôo entre o VANT e outra aeronave em processo de cruzamento de sua rota. Tais experimentos foram compostos por seis cenários distintos:

1. Amostra de Controle: Ou seja, sem a atuação dos agentes modelados;
2. Colaborativo;
3. Falha dos Atuadores;
4. Falha dos Sensores;
5. Competitivo;
6. Realístico.

Em cada cenário pôde-se ajustar os seguintes parâmetros:

1. Taxa de Cooperação das Aeronaves;
2. Taxa de Falha dos Sensores;
3. Taxa de Falha dos Atuadores;

Após tais considerações e definições, primeiro simulou-se 5.000 horas de vôo sem que os agentes pudessem atuar, fazendo-se com que todos os eventos ocorressem ao acaso, visando-se gerar uma amostra de resultados para controle. Em seguida, executou-se a reprodução das trajetórias decorrentes, porém desta vez, permitindo-se aos agentes entrarem em ação, realizando as tarefas de avaliação de riscos, negociação e tomada de decisão. Assim no segundo cenário adotou-se que, a cada 10 situações de negociação, 2 são totalmente competitivas, ou seja, 80% de probabilidade de haver negociação. A partir do terceiro cenário, iniciou-se um processo de injeção de falhas mais rigoroso, visando-se avaliar a capacidade de decisão do VANT, sendo que neste o objetivo foi verificar sua capacidade de reação mediante falhas operacionais em seus atuadores.

No quarto cenário, o objetivo foi avaliar a capacidade do VANT em lidar com a ausência de informações oriundas dos sensores, injetando-se falhas nestes.

No quinto cenário, o objetivo foi avaliar a capacidade do VANT em lidar com situações de conflitos, onde a maioria das negociações ocorridas foram bastante competitivas, ou seja, apenas 5% de probabilidade de ocorrer uma negociação colaborativa. Por fim, no sexto cenário, o objetivo foi avaliar a manutenção da probabilidade de colisão nos níveis aceitáveis, permitindo-se extrema colaboração e maior disponibilidade dos sensores e atuadores.

Os resultados apresentados permitiram demonstrar que o modelo é bastante viável e promissor, uma vez que mantém a probabilidade de acidente dentro da ordem de grandeza exigidos, ou seja, 10^{-9} por hora de vôo. Pôde-se perceber que o modelo permite ao VANT tomar decisões em ambientes extremamente competitivos e com sua capacidade de manobras comprometida. Os resultados indicam também que, dadas as condições ideais de operação[4], o modelo pode ajudar a garantir a execução de um vôo seguro dentro do espaço aéreo controlado. Outra observação importante, levantada pelas simulações, é que a maior fonte de risco para que um VANT seja capaz de realizar um vôo "*Safety*" não é necessariamente o número de aeronaves com as quais poderá cruzar em sua rota, mas sim a **confiabilidade e disponibilidade de seus sensores**, conforme se pode observar no cenário de número 4.

Convém salientar que a modelagem ainda demanda de uma engenharia de conhecimento mais apurada na construção da base de regras do Agente Decisor, para que se elimine a possibilidade do algoritmo de decisão vir a entrar em uma condição "Semi-decidível", o que acarreta uma diminuição na confiabilidade do

[4]Ou seja, sensores e atuadores com alto grau de disponibilidade e ambiente mais colaborativo.

sistema. O refinamento desta base é fundamental para o sucesso do modelo e deve ser realizada como uma pesquisa inteiramente dedicada para este fim em um dos trabalhos futuros apontados nesta tese.

Ainda, visando-se a maior abrangência desta pesquisa, cabe indicar os seguintes temas, correlacionados, para trabalhos futuros:

- Fusão de dados multi-sensores: A fusão sensorial é o processo de integração de dados de diferentes sensores visando obter estimativas para uma determinada grandeza medida, cuja precisão e confiabilidade sejam superiores àquelas obtidas utilizando cada sensor isoladamente. Em aplicações de navegação robótica, a fusão sensorial pode ser utilizada com o objetivo de detectar colisões, reduzir incertezas de localização e modelar o ambiente ;
- Sensores Inteligentes: O conceito de redes de sensores inteligentes não está somente ligado há troca de informações de um transdutor para outro, mas também com o compartilhamento e disponibilização das informações em tempo real. O funcionamento dos sensores inteligentes em rede através de interfaces padronizadas torna possível o compartilhamento de informações e recursos de um sistema;
- Confiabilidade e Segurança em sistemas VANT: Metodologias de análise de risco para avaliar a probabilidade de acidentes em sistemas VANT, e propor soluções para o aumento do nível de segurança desses sistemas;

Faz-se oportuno, também, citar-se os trabalhos relacionados com o tema e em andamento no Grupo de Análise de Segurança (GAS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, sendo estes:

1. Metodologia de Análise de Segurança em Sistemas Complexos;
2. Protocolos de Comunicações em Redes de Telecomunicações Aeronáuticas;
3. Estudo da Segurança em Veículos Aéreos não Tripulados;
4. Método de Avaliação de Segurança de Software Embarcado;
5. Análise de Segurança da Inclusão de VANTs no Espaço Aéreo Brasileiro;
6. Modelo de Previsão de posição de aeronaves para uso em Sistemas de Vigilância do Espaço Aéreo;

Finalmente, dentro deste contexto de pesquisa sobre a inserção de Veículos Aéreos Não Tripulados no espaço aéreo controlado, tem-se que todas estas tecnologias somadas permitirão a construção de aeronaves cada vez mais autônomas e confiáveis. No entanto, devem-se ainda executar muitos investimentos em pesquisas relacionadas à **Regulamentação** dos VANTs e que apontem os critérios de aceitabilidade do índice de "*Safety*" exigidos e obteníveis, fechando-se assim o ciclo completo de um tema tão vasto e complexo, permitindo-se colocar o Brasil na vanguarda mundial em relação a interação de aeronaves robóticas em harmonia com aeronaves tripuladas.

Referências

ALIGHANBARI, M.; BERTUCCELLI, L. F.; HOW, J. P. Filter-embedded uav task assignment algorithms for dynamic environments. In: AERONAUTICS, A. I. of; ASTRONAUTICS (Ed.). *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. [S.l.], 2004. p. 16–19.

ALSTON, G. *How Safe is Safe Enough?* [S.l.]: Ashgate Publishing, 2003.

AMANDI, A. *Programação de Agentes Orientada a Objetos*. Tese (Doutorado) — CPGCC da UFRGS, 1997.

ANTYUFEEV; S. Fuzzy decision algorithm. *Programming and Computer Software*, MAIK Nauka Interperiodica, v. 32, n. 6, p. 317–323, December 2006.

BASTOS, R. *O Planejamento de Alocação de Recursos Baseado em Sistemas Multiagentes*. Tese (Doutorado) — UFRGS, 1998.

BELLIFEMINE, F. L.; CAIRE, G.; GREENWOOD, D. *Developing Multi-Agent Systems with JADE (Wiley Series in Agent Technology)*. [S.l.]: Wiley, 2007. Hardcover. ISBN 0470057475.

BFU. *Investigation Report - A collision between a Tupolev TU154M and a Boeing B757-200, on a flight from Bergamo/Italy to Brussels/ Belgium, occurred north of the city of Ueberlingen*. [S.l.], 2004.

BLOM, H. A. P. et al. *Sequential Monte Carlo simulation of collision risk in free flight air traffic*. [S.l.], 2005.

BOND, A.; GASSER, L. *Readings in distributed artificial intelligence*. 1988. Morgan Kaufmann.

BORDINI, R. H.; VIEIRA, R.; MOREIRA, Á. F. Fundamentos de sistemas multiagentes. In: FERREIRA, C. E. (Ed.). *Jornada de Atualização em Informática (JAI'01)*. Fortaleza, Brasil: SBC, 2001. v. 2, cap. 1, p. 3–44.

BRATMAN, M. E.; ISRAEL, D.; POLLACK, M. Plans and resource-bounded practical reasoning. In: CUMMINS, R.; POLLOCK, J. L. (Ed.). *Philosophy and AI: Essays at the Interface*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1991. p. 1–22. Disponível em: <citeseer.ist.psu.edu/bratman88plans.html>.

BROOKS, R. R.; IYENGAR, S. S. *Multi-sensor fusion: fundamentals and applications with software*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 2001. ISBN 0-13-901653-8.

CAMARGO, J. B. Metodologia de análise de risco em sistemas computacionais de aplicação crítica. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Livre Docente no Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais. 2002.

CORRÊA, M.; CAMARGO, J. B. Introducing uav in the cns/atm using cooperative multiagent negotiation. In: STAVANGER, U. of (Ed.). *Safety and Reliability Conference - ESREL*. Norway: [s.n.], 2007.

CORRÊA, M.; CAMARGO, J. B.; GIMENES, R. A. V. Integration uav in to controlated air space using cooperative multiagent negotiation. In: *V SITRAER - Simpósio de Transporte Aéreo*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 315–324.

CORRÊA, M.; CAMARGO, J. B.; GIMENES, R. A. V. Safety concerns on operation uav sing cooperative multiagent negotiation. In: *First IFAC Workshop on Multivehicle Systems*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 102–107.

CORRÊA, M.; GIMENES, R. A. V.; ALMEIDA, J. R. Integrating uav into controlled airspace using cooperative multiagent negotiation. In: *Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society*. [S.l.: s.n.], 2007. v. 3, p. 23–37.

Distributed automatic target recognition using multi-agent UAV swarms. New York, NY, USA: ACM Press, 2006. 479–481 p. ISBN 1-59593-303-4.

DEMAZEAU, Y. Multi-agent organisations. In: . Ourense, Espagne: [s.n.], 2000.

DEMAZEAU, Y.; BAEIJS, C. Organisations in multi-agent systems. In: *2nd Ibero-American Workshop on Distributed AI and Multi-Agent Systems (WDAIMAS'98)*. Toledo, Spain: [s.n.], 1998.

DOD. *Unmanned Airccraft Systems Roadmap 2005-2030*. [S.l.], 2005.

DOYLE, J. Rationality and its roles in reasoning. *Computational Intelligence*, v. 8, n. 2, p. 376–409, 1992. Disponível em: <citeseer.ist.psu.edu/doyle94rationality.html>.

DRIAS, H. A monte carlo algorithm for the satisfiability problem. In: *IEA/AIE (Vol. 1)*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 159–168.

ENDRISS, U. Monotonic concession protocols for multilateral negotiation. In: *Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. [S.l.: s.n.], 2006.

FAA/EUROCONTROL. *A Concept Paper for Separation Safety Modeling - An FAA/EUROCONTROL Cooperative Effort on Air Traffic Modeling for Separation Standards*. [S.l.], 1998.

FILHO, M. A. C. *Arquitetura de Diálogos entre Agentes Cognitivos Distribuídos*. Tese (Doutorado) — COPPE da UFRJ, 1994.

FININ, T. et al. Kqml as an agent communication language. In: ADAM, N.; BHARGAVA, B.; YESHA, Y. (Ed.). *Proceedings of the 3rd International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM'94)*. Gaithersburg, MD, USA: ACM Press, 1994. p. 456–463.

FIPA. *FIPA 97 Specification Part 2: Agent Communication Language*. 1997. Foundation for Intelligent Physical Agents. Disponível em: <http://drogo.cselt.stet.it/fipa/>.

GAMERMAN, D.; LOPES, H. F. *Markov Chain Monte Carlo: Stochastic Simulation for Bayesian Inference*. [S.l.]: Chapman and Hall/CRC, 2006. ISBN 1584885874.

GARDNER, R. Review of probability and conditionals: Belief revision and rational decision. *Philosophy of Science*, v. 67, n. 3, p. 553–557, 2000.

GINSBERG, M. L. Knowledge interchange format: the KIF of death. *AI Magazine*, v. 12, n. 3, p. 57–63, 1991.

GOLDMAN, C. V.; ROSENSCHEIN, J. S. Emergent coordination through the use of cooperative state-changing rules. In: *Proceedings of the Twelfth International Workshop on Distributed Artificial Intelligence*. Hidden Valley, Pennsylvania: [s.n.], 1993. p. 171–185. Disponível em: <citeseer.ist.psu.edu/goldman94emergent.html>.

HILL, E. F. *Jess in Action: Java Rule-Based Systems*. Greenwich, CT, USA: Manning Publications Co., 2003. ISBN 1930110898.

HILL, J. C. et al. A cooperative multi-agent approach to free flight. In: *AAMAS '05: Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*. New York, NY, USA: ACM Press, 2005. p. 1083–1090. ISBN 1-59593-093-0.

HORVITZ, E. J.; BREESE, J. S.; HENRION, M. Decision theory in expert systems and artificial intelligence. *International Journal of Approximate Reasoning*, v. 2, p. 247–302, 1988.

JAPAN UAV ASSOCIATION. *SAFETY STANDARDS FOR COMMERCIAL-USE UNMANNED ROTARY-WING AIRCRAFT IN UNINHABITED AREAS*. English version. [S.l.], August 2005.

JÁCOBO, J. E. A. *Desenvolvimento de um Robô Autônomo Móvel Versátil utilizando Arquitetura Subsumption*. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL, 2001.

JENNINGS, N. R. Coordination techniques for distributed artificial intelligence. In: OHARE, G. M. P.; JENNINGS, N. R. (Ed.). *Foundations of Distributed Artificial Intelligence,*. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1996. p. 187–210.

JENNINGS, N. R. Agent-Oriented Software Engineering. In: GARIJO, F. J.; BOMAN, M. (Ed.). *Proceedings of the 9th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World : Multi-Agent System Engineering (MAAMAW-99)*. [S.l.]: Springer-Verlag: Heidelberg, Germany, 1999. v. 1647, p. 1–7.

JENNINGS, N. R.; WOOLDRIDGE, M. J. Software agents. *IEE Review*, p. 17–20, 1996.

JONES, J. L.; FLYNN, A. M.; SEIGER, B. A. *Mobile robots (2nd ed.): inspiration to implementation*. Natick, MA, USA: A. K. Peters, Ltd., 1998. ISBN 1-56881-097-0.

JONES, M. C. A. *UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAVS) AN ASSESSMENT OF HISTORICAL OPERATIONS AND FUTURE POSSIBILITIES.* [S.l.], March 1997.

JP. *DOD Dictionary of Military and Associated Terms,.* 30 November 2005. Joint Publication. Disponível em: <http://www.dtic.mil/doctrine/jel/doddict/data/u/ 05601.html>.

KAIHARA, T.; FUJII, S. A proposal on negotiation methodology in virtual enterprise. In: *PRO-VE '02: Proceedings of the IFIP TC5/WG5.5 Third Working Conference on Infrastructures for Virtual Enterprises.* Deventer, The Netherlands, The Netherlands: Kluwer, B.V., 2002. p. 630. ISBN 1-4020-7020-9.

KFIR-DAHAV, N. E.; TENNENHOLTZ, M. Multi-agent belief revision. In: *TARK '96: Proceedings of the 6th conference on Theoretical aspects of rationality and knowledge.* San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1996. p. 175–194. ISBN 1-55860-417-9.

KUCHAR, J.; YANG, L. *A review of conflict detection and resolution modeling methods.* 2000. Disponível em: <citeseer.ist.psu.edu/kuchar00review.html>.

LOGIC, A. et al. *Agent-oriented programming.* 1993.

MACHADO, R.; FERNANDES, J.; SANTOS, H. *A Methodology for Complex Embedded Systems Design: Petri Nets within a UML Approach.* 2001. Disponível em: <citeseer.ist.psu.edu/machado00methodology.html>.

MODELING, I. S. S.; ENGINE, L. *SMILE Documentation and SMILE wrappers documentation.* [S.l.], 2008.

MOFFAT, D.; FRIJDA, N. Where there's a will there's an agent. *j-LECT-NOTES-COMP-SCI*, v. 890, p. 245–260, 1995. ISSN 0302-9743.

MURRAY; D. Decision making and decision analysis. *Anaesthesia*, Blackwell Publishing, v. 61, n. 11, p. 1119–1120, November 2006. ISSN 0003-2409.

NWANA, H. S.; LEE, L. C.; JENNINGS, N. R. Co-ordination in software agent systems. *The British Telecom Technical Journal*, v. 14, n. 4, p. 79–88, 1996.

O'HARE, G. M. P.; JENNINGS, N. R. *Foundations of Distributed Artificial Intelligence.* New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 1996.

OLIVEIRA, F. Inteligência artificial distribuída. In: *Anais: Sociedade Brasileira de Computação.* [S.l.: s.n.], 1996. p. 239.

ORCHARD, R. Fuzzy reasoning in JESS: The fuzzyj toolkit and fuzzyjess. In: *ICEIS (1).* [S.l.: s.n.], 2001. p. 533–542.

PEARL, J. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference.* [S.l.]: Morgan Kaufmann, 1988. Paperback. ISBN 1558604790.

PEDERSEN, H. M. *Speech acts and agents. A semantic analysis.* Dissertação (Mestrado) — Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, DTU, Richard Petersens Plads, Building 321, DK-2800 Kgs. Lyngby, 2002.

PITT, J.; MAMDANI, A. Some remarks on the semantics of fipa's agent communication language. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA, USA, v. 2, n. 4, p. 333–356, 1999. ISSN 1387-2532.

RAO, A. S.; GEORGEFF, M. P. Bdi-agents: from theory to practice. In: *Proceedings of the First Intl. Conference on Multiagent Systems*. San Francisco: [s.n.], 1995. Disponível em: <http://citeseer.ist.psu.edu/rao95bdi.html>.

REZENDE, S. O. *Sistemas Inteligentes:Fundamentos e Aplicações*. [S.l.]: Manole, 2003.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. New Jersey: Prentice-Hall, 2000.

SMAILI, C.; NAJJAR, M. E. E.; CHARPILLET, F. Multi-sensor fusion method using dynamic bayesian network for precise vehicle localization and road matching. In: *ICTAI '07: Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence - Vol.1 (ICTAI 2007)*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2007. p. 146–151. ISBN 0-7695-3015-X.

SOMERVILLE, K. *US Drone Takes Combat Role*. 5 November 2002. BBC News Online. Disponível em: <http://news.bbc.co.uk/1/hi/world/2404425.stm>.

SPRINKLE, J.; BUSKIRK, C. P.; KARSAI, G. Modeling agent negotiation. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 1, p. 454–459.

STEINER, D. D. Imagine: an integrated environment for constructing distributed artificial intelligence systems. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, p. 345–364, 1996.

TENNENHOLTZ, M. *Competitive safety analysis: Robust decision-making in multi-agent systems*. 2002.

THRUN, S. Probabilistic algorithms in robotics. *AI Magazine*, v. 21, n. 4, p. 93–109, 2000.

THRUN, S. et al. Robust monte carlo localization for mobile robots. *Artificial Intelligence*, v. 128, n. 1-2, p. 99–141, 2000.

TRINDADE, O.; JORGE, L. A.; AGUIAR, J. G. B. Field of dreams using uavs for precision farming. *Unmanned Systems*, v. 22, n. 6, p. 35–36, nov-dez 2004.

TURBAN, E.; ARONSON, J. *Decision Support Systems and Intelligent Systems*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 1997. ISBN 0137409370.

UVS. *UAV Systems - The Global Perspective 2005*. 2005. International UAV Community.

WATERMAN, D. A. *A guide to expert systems*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1985. ISBN 0-201-08313-2.

WEISS, G. (Ed.). *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1999.

WEISS, G. *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. [S.l.]: The MIT Press, 2000. Paperback. ISBN 0262731312.

WILLEMAIN, T. R. Factors influencing blind conflict risk in en route sectors under free-flight conditions. *Transportation Science*, INFORMS, Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), Linthicum, Maryland, USA, v. 37, n. 4, p. 457–470, 2003. ISSN 1526-5447.

WOLLKIND, S. *USING MULTI-AGENT NEGOTIATION TECHNIQUES FOR THE AUTONOMOUS RESOLUTION OF AIR TRAFFIC CONFLICTS*. Dissertação (Mestrado) — Office of Graduate Studies of Texas A&M University, December 2004.

WOLLKIND, S.; VALASEK, J.; IOERGER, T. Automated conflict resolution for air traffic management using cooperative multiagent negotiation. In: *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 16–19.

WOOLDRIDGE, M. *An Introduction to MultiAgent Systems*. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2002.

WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R. *Intelligent Agents: Theory and Practice*. 1994. 115–152 p. Disponível em: <http://citeseer.ist.psu.edu/97055.html>.

ZADEH, L. Fuzzy sets. *Information Control*, v. 8, p. 338–353, 1965.

ZIMMERMANN, H.; ZADEH, L.; GAINES, A. (Ed.). *Fuzzy Sets and Decision Analysis*. New York: North Holland, 1984.

ZLOTKIN, G.; ROSENSCHEIN, J. S. Negotiation and task sharing among autonomous agents in cooperative domains. In: SRIDHARAN, N. S. (Ed.). *Proceedings of the Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1989. p. 912–917. Disponível em: <citeseer.ist.psu.edu/zlotkin89negotiation.html>.

Apêndice A – JADE: *"Java Agent DEvelopment Framework"*

Jade[1] ("*Java Agent DEvelopment framework*") é um ambiente para desenvolvimento de aplicações baseada em agentes conforme as especificações da FIPA[2] para interoperabilidade entre sistemas multi-agentes totalmente implementado em Java. Foi desenvolvido e suportado pela Universidade de Parma na Itália. É open source (LGPL[3]). O principal objetivo do Jade é simplificar e facilitar o desenvolvimento de sistemas multi-agentes, garantindo um padrão de interoperabilidade entre os agentes através de um abrangente conjunto de serviços de sistema e de acordo com as especificações da FIPA. Tais serviços são: serviço de nomes ("*naming service*") e páginas amarelas ("*yellow-page service*"), transporte de mensagens, serviços de codificação e decodificação de mensagens e uma biblioteca de protocolos de interação (padrão FIPA) pronta para ser usada. Toda comunicação entre agentes é feita via troca de mensagens no padrão ACL.

Além destes serviços, o JADE implementa todos os demais aspectos de sistema, tais como transporte de mensagens, codificação e interpretação de mensagens e ciclo de vida dos agentes.

A.0.1 Principais Características do JADE

Apresenta-se nesta seção as principais características oferecidas pelo Jade para o desenvolvimento de sistemas multi-agentes:

- Plataforma distribuída de agentes: O JADE pode ser distribuído em várias máquinas. Por questões de performance, apenas uma aplicação Java e uma "*Java Virtual Machine*" é executada em cada máquina. Cada uma destas máquinas é denominada "*Agent Container*";

[1] Jade é uma marca registrada do TILAB (http://www.telecomitalialab.com). Foi desenvolvido pelo TILAB juntamente com o AOT (http://aot.ce.unipr.it).

[2] http://www.fipa.org

[3] LGPL ou Lesser General Public License. Mais informações podem ser encontradas em http://www.opensource.org/licenses/lgpl-license.php

- Interface Gráfica com Usuário: Interface visual que permite gerenciar vários agentes e contêiner de agentes;
- Ferramentas de Depuração: Ferramentas que auxiliam o desenvolvimento e depuração das aplicações desenvolvidas em JADE;
- Ambiente de agentes complacente COM a FIPA: No qual incluem o sistema gerenciador de agentes ("*AMS: Agent Management System*"), o diretório facilitador ("*DF: Directory Facilitator*") e o canal de comunicação dos agentes ("*ACC: Agent Communication Channel*"). Todos esses três componentes são carregados automaticamente quando o ambiente é inicializado;
- Transporte de mensagens: Transporte de mensagens no formato FIPA-ACL;
- Biblioteca de protocolos FIPA: Para interação entre agentes JADE;
- Automação de registros: Registro e cancelamento automático de agentes através do AMS;
- Serviços de nomes: Na inicialização dos agentes, estes obtêm seus "*GUID: Globally Unique Identifier*" da plataforma que são identificadores únicos em todo o ambiente;
- Integração: Mecanismo que permite aplicações externas interagirem com as agentes em um ambiente JADE;

A.0.2 FIPA e JADE

O modelo de plataforma padrão especificado pela FIPA, que pode ser visto na Figura A.1 onde o agente **1** até agente **n**, representam os agentes cujas tarefas estão definidas em função do objetivo da aplicação. O sistema gerenciador de agentes ou AMS é um agente especial que supervisiona o acesso e o uso da plataforma. Apenas um AMS pode existir em uma plataforma. Ele provê guia de endereços ("*whitepages*") e controle de ciclo-de-vida, mantendo um diretório de identificadores de agentes e seus respectivos estados. O diretório facilitador (DF) é o agente, também especial, que provê o serviço de páginas amarelas ("*yellow-pages*") dentro da plataforma. O sistema de transporte de mensagens é o agente responsável por prover toda a comunicação entre agentes dentro e fora da plataforma. Todos os agentes, inclusive o AMS e o DF, utilizam esse canal para a comunicação.

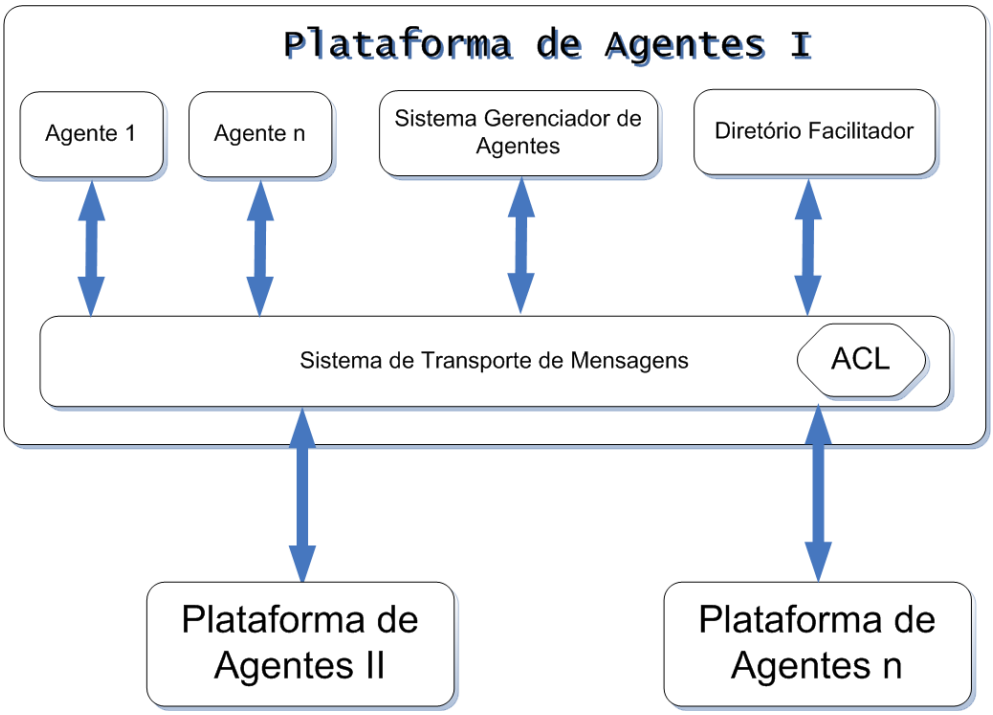

Figura A.1: Modelo padrão de plataforma de agentes definido pela FIPA.

A.0.3 Considerações

Quanto aos agentes individuais (de **1** a **n**), as abstrações mais importantes são "Agente", "Identificador", "Ambiente" e "Comportamento". Os agentes JADE são implementados como "*threads*" Java e inseridos dentro de repositórios de agentes chamados de contêineres, os quais fornecem um ambiente de execução para agentes executando concorrentemente os seus respectivos comportamentos.

Para criar um agente JADE, deve-se estender a classe *Agent*, implementar os comportamentos da aplicação, instanciá-los e associá-los ao agente. Existem vários tipos de comportamentos pré-definidos na API, todos eles são implementações da interface *Behavior*. Além de comportamentos, um contêiner deve ser instanciado a partir da classe *AgentContainer*.

Cada objeto *AgentContainer* permite o gerenciamento do ciclo de vida do conjunto de agentes associados a ele. O identificador de um agente JADE é implementado através da classe *AID*. Este identificador possui um papel fundamental no mecanismo de comunicação, sendo usado para a especificação de emissores e receptores de mensagens do tipo *ACLMessage*.

Portanto, do ponto de vista do desenvolvedor de um SMAs, um agente JADE é uma classe Java que estende a classe *Agent* da plataforma. A extensão da classe *Agent* permite a utilização de um conjunto de métodos para manipulação do ciclo de vida de agentes e um conjunto de métodos abstratos para definição de ações

específicas nas aplicações. Alguns exemplos destes métodos são:

- *setup()*: utilizado na inicialização de um agente;
- *void doDelete()*: executa procedimentos referentes à destruição do agente, sendo chamado pela plataforma ou pelo próprio agente;
- *doMove(Location destino)*: é invocado pela plataforma ou pelo próprio agente para iniciar o processo de migração;
- *beforeMove()*: é invocado automaticamente pela plataforma imediatamente antes da partida do agente para outro host;
- *afterMove()*: é invocado automaticamente pela plataforma imediatamente após a chegada do agente em novo host.