

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

PAULO ANDRÉ HAACKE

**Controle Coordenado de Grupos
Heterogêneos de Veículos Não Tripulados
para Monitoramento de Área**

Trabalho de Conclusão apresentado como
requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia da Computação

Prof. Dr. Edison Pignaton de Freitas
Orientador

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira
Co-orientador

Porto Alegre, 17 de Fevereiro de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Pró-Reitor de Graduação: Prof. Sérgio Roberto Kieling Franco

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Luís da Cunha Lamb

Coordenador do ECP: Prof. Marcelo Götz

Bibliotecário-chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

Draft 1.0 February 19, 2015
pahaacke@inf.ufrgs.br
<http://inf.ufrgs.br/~pahaacke>

"A verdade é mais estranha que a ficção, porque a ficção é obrigada a ater-se às possibilidades e a verdade não."

– Mark Twain, Seguindo o Equador

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pela educação, compreensão e, sobretudo, pelo apoio nas dificuldades enfrentadas ao longo desta jornada. Sem vocês este trabalho seria impossível.

Agradeço também a todos meus professores ao longo de todos os anos de curso. Certamente o conhecimento adquirido através destes será de vital importância em nossas vidas e carreiras.

Agradeço especialmente ao professor Edison Pignaton de Freitas por me conceder a orientação e apoio necessário ao longo deste trabalho, assim como ter influenciado diretamente na escolha do tema deste trabalho. Muito obrigado pela oportunidade.

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, me suportaram na construção deste trabalho, assim como na minha jornada acadêmica.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	7
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	13
LISTAGENS	15
LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS	17
RESUMO	19
ABSTRACT	21
1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Contexto de Aplicação	24
1.2 Estrutura	25
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1 Sistemas Multi-Agente	27
2.1.1 Agente	28
2.1.2 Organização	28
2.1.3 Alocação de Tarefas	29
2.1.4 Planejamento Multi-Agente	29
2.1.5 Reconhecimento e Resolução de Conflitos	29
2.2 Teoria dos Jogos	30
2.2.1 Jogos Cooperativos e Não-Cooperativos	30
2.2.2 Jogos Estratégicos	30

2.3	Colônia de Formigas	32
2.3.1	Comunicação	32
2.4	Algoritmos de Otimização por Colônia de Formigas	33
2.5	Veículo Não Tripulado	33
2.5.1	Aéreo	33
2.5.2	Terrestre	33
3	TRABALHOS RELACIONADOS	35
3.1	Sistema de Mercado	35
3.2	Comportamento de Enxame	36
3.3	Outras Estratégias	37
4	FERRAMENTAS	39
4.1	Hardware	39
4.1.1	Multicóptero	39
4.1.2	Aeronave de Asa Fixa	40
4.1.3	Rover	41
4.1.4	APM 2.6	42
4.2	Software	42
4.2.1	Piloto Automático APM	42
4.3	MAVLink	43
4.3.1	Estação de Controle	44
5	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO PROPOSTA	47
5.1	Delimitação do Problema	47
5.2	Solução Proposta	47
5.3	Sistema de Mercado	48
5.3.1	Consumidor	48
5.3.2	Leiloeiro	49
5.3.3	Fornecedor	50
5.3.4	Funcionamento	50
5.4	Sistema Baseado em Feromônios	50
5.4.1	Feromônio	51
5.4.2	Mapa	51
5.4.3	Agente de Enxame	51
5.4.4	Funcionamento	51

6	IMPLEMENTAÇÃO	53
6.1	Plataforma de Base	53
6.1.1	Tarefa	53
6.1.2	Habilidade	56
6.1.3	Sistema de Habilidades	56
6.1.4	Planejador	57
6.1.5	Agendador	57
6.1.6	Operador	58
6.2	Sistema de Mercado	58
6.2.1	Contrato	58
6.2.2	Sessão	58
6.2.3	Comunicação	59
6.2.4	Consumidor	59
6.2.5	Fornecedor	59
6.2.6	Leiloeiro	60
6.3	Sistema Baseado em Feromônios	60
6.3.1	Feromônio	61
6.3.2	Mapa	61
6.3.3	Comunicação	62
6.3.4	Agente de Enxame	62
7	EXPERIMENTOS	65
7.1	Configurações Gerais	65
7.1.1	Sistema de Mercado	66
7.1.2	Sistema Baseado em Feromônios	67
7.2	Cobertura de Área	67
7.2.1	Resultados e Análise	67
7.3	Distribuição de Alvos	69
7.3.1	Resultados e Análise	70
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
8.1	Conclusão	75
8.2	Trabalhos Futuros	75
	REFERÊNCIAS	77

APÊNDICES	81
APÊNDICE A ARTIGO TRABALHO DE GRADUAÇÃO 1	83
A.1 Abstract	83
A.2 Resumo	83
A.3 Introdução	83
A.4 Trabalhos Relacionados	84
A.5 Contextualização	84
A.5.1 Veículo Não Tripulado	84
A.5.2 Sistemas Multi-Agente	85
A.6 Delimitação do Problema	87
A.7 Solução Proposta	87
A.7.1 Sistema de Mercado	88
A.7.2 Sistema Baseado em Feromônios	89
A.8 Trabalho de Graduação 2	91
A.8.1 Proposta de Implementação	91
A.8.2 Proposta de Experimento: Aerofotogrametria	92
A.8.3 Ambiente de Teste	93
A.8.4 Viabilidade do Projeto	94
A.8.5 Proposta de Atividades Prática	94
A.9 Conclusão	95
APÊNDICE B TUTORIAL PARA EXECUÇÃO DO SISTEMA	97
B.1 QGroundControl	97
B.2 Executar uma Simulação	97
B.3 Execução de Múltiplos Veículos Não Tripulados	98

LISTA DE FIGURAS

4.1	Multicópteros modelo 3DR APM:Copter	40
4.2	Avião modelo 3DR Aero-M.	41
4.3	Rover modelo APM:Rover.	41
4.4	Placa controladora de voo APM 2.6.	42
4.5	Estação de controle MAVProxy.	44
4.6	Estação de controle APM Planner.	45
4.7	Estação de controle QGroundControl.	45
5.1	Passos de uma sessão de leilão.	49
5.2	Interação entre os veículos no sistema de feromônios.	52
6.1	Organização abstrata da plataforma de base implementada.	54
6.2	Transição entre os estados de uma tarefa.	55
6.3	Máquina de estados do planejador.	57
6.4	Máquina de estados do consumidor.	60
6.5	Máquina de estados do fornecedor.	61
6.6	Máquina de estados de um leiloeiro.	62
6.7	Máquina de estados do agente de exame.	63
7.1	Área de patrulhamento.	66
7.2	Posição inicial de cada um dos Veículos Não Tripulados (VNTs). . .	67
7.3	Trajatória dos VNTs testados para uma instância do experimento de cobertura de área.	68
7.3	Trajatória dos VNTs testados para uma instância do experimento de cobertura de área.	68
7.4	Posição inicial de cada um dos VNTs.	69
7.5	Posição inicial de cada um dos alvos configurados.	70
7.6	Trajatória dos VNTs testados para uma instância experimento de dis- tribuição de alvos.	72

A.1	Cenário demonstrando as relações em uma estrutura de mercado.	88
A.2	Rede formada por agentes com a habilidade de representar o sistema.	90
A.3	Diagrama demonstrando as relações existentes no sistema.	90
A.4	Visão abstrata demonstrando o funcionamento do sistema de feromônios.	91
A.5	Diagrama de classes representando o sistema de mercado.	91
A.6	Diagrama de classes representando o sistema de feromônio.	92
A.7	Cenário demonstrando o experimento de aerofotogrametria utilizando Sistema Multi-Agente (SMA).	92
B.1	Conteúdo do script de execução para múltiplos VNTs.	99
B.2	Telas abertas após execução do script para múltiplos VNTs.	99

LISTA DE TABELAS

4.1	Anatomia de um pacote MAVLink.	43
6.1	Habilidades desenvolvidas sobre a habilidade base.	56
7.1	Referência contendo o identificador numérico de cada VNT usado nos experimentos.	65
7.2	Proporção de utilidade dos sensores presentes em cada veículo. . . .	66
7.3	Lista de alvos artificiais configurados para o experimento de distribuição de alvos.	69
7.4	Tabela de resultados obtidos pelo sistema de feromônios para uma instância do experimento de distribuição de alvos.	71
7.5	Tabela de resultados obtidos pelo sistema de mercado para uma instância do experimento de distribuição de alvos.	71
7.6	Tabela de lances com o valor de benefício subido por cada um dos VNT durante as sessões de leilão no sistema de mercado e calculados em uma instância do experimento de distribuição de alvos.	71
7.7	Tabela com o valor de benefício para cada um dos alvos alocados pelo sistema de feromônios e calculados em uma instância do experimento de distribuição de alvos.	71
7.8	Tempo de resolução para o conjunto de cinco testes.	73
A.1	Relação entre habilidade e tarefa para o sistema de mercado.	89
A.2	Relação entre habilidades e tarefas para o sistema de feromônios. . .	89
A.3	Cronograma de Atividades Práticas	94

LISTAGENS

6.1	Exemplo de definição de uma função de ação	54
6.2	Registro de uma habilidade dinâmica	56

LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS

AOCF	Algoritmo de Otimização por Colônia de Formigas.
APM	Ardu Pilot Mega.
BDI	Belief-Desire-Intention.
BEE	Behavioral Evolution and Extrapolation.
CNP	Contract Net Protocol.
EC	Estação de Controle.
GPS	Global Positioning System.
HITL	Hardware In The Loop.
IA	Inteligência Artificial.
MAVLink	Micro Air Vehicle Communication Protocol.
PPP	Ponto a Ponto.
RC	Remotamente Controlado.
S.I.	Sistema Internacional de Unidades.
SITL	Software In The Loop.
SMA	Sistema Multi-Agente.
TG2	Trabalho de Graduação 2.
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado.
VCG	Vickrey-Clarke-Groves.
VNT	Veículo Não Tripulado.
VTNT	Veículo Terrestre Não Tripulado.

RESUMO

Nos últimos anos veículos não tripulados remotamente pilotados têm sido utilizados na realização de missões em diversas áreas. Organizações militares e de inteligência tem utilizado veículos aéreos não tripulados para localizar, estimar e atacar alvos que se encontram a quilômetros de distância da estação de controle terrestre. Propostas de utilização de veículos não tripulados para monitorar e estimar parâmetros do ambiente em sistemas tem sido feitas com a promessa de melhoria do controle de pragas e aumento da produtividade.

O sistema proposto neste trabalho é composto por veículos não tripulados expostos à ação de um ambiente dinâmico. Diferentes tipos de veículos podem entrar e sair do sistema, ou seja, o sistema também é dinâmico e relações podem ser criadas e quebradas sem aviso prévio. Além disso, é preciso levar em conta que alvos, ou seja, pontos específicos do ambiente que devem ser tratados, podem aparecer e desaparecer de maneira dinâmica.

Considerando um sistema heterogêneo consistindo de diferentes tipos de veículos não tripulados aéreos e terrestres o presente trabalho busca apresentar um sistema que permite distribuir o tratamento de alvos entre os membros do sistema, bem como explorar a maior área possível de um mapa de maneira eficiente, ou seja, de maneira a diminuir a sobreposição entre áreas cobertas do sistema.

Para o problema exposto duas soluções foram propostas. A primeira é baseada no paradigma de uma economia de mercado e a segunda utiliza a comunicação através de uma implementação análoga ao conceito de feromônios usados por animais na natureza. Ambos sistemas foram implementados e validados através de simulações.

O sistema de mercado utiliza agentes leiloeiros para realizarem sessões de leilão sobre alvos encontrados por agentes consumidores e alocar os fornecedores com melhor capacidade de resolução para o alvo encontrado.

O sistema de feromônios utiliza uma representação do ambiente para depositar e sentir os feromônios com os sabores de cada veículo, através desta abordagem o sistema evita com que áreas exploradas recentemente por outros veículos sejam exploradas novamente.

Palavras-chave: Inteligência Artificial, Alocação de Alvos, Sistema de Mercado, Comportamento de Enxame.

Coordinated Control of Heterogeneous Unmanned Vehicles Groups for Area Monitoring

ABSTRACT

Over the last years remotely piloted vehicles have been used to execute missions in several fields. Military and intelligence organizations use unmanned aerial vehicles to localize, estimate and attack targets that are placed far from the ground control station. Proposals for use of unmanned vehicles to monitor and estimate environmental parameters in systems have been made with promises of plague control improvement and increases in the productivity. However, the use of autonomous vehicles in dynamic environments is still an open area for research.

The system proposed in this work consists of autonomous unmanned vehicles exposed to the dynamic environmental action. Any kind of vehicle can enter or leave the system, that is, the system is also dynamic and relations can be created and broken without any previous warning. Furthermore, an important concept called target, that is, a specific environment point that have to be solved, can appear and disappear dynamically.

Given an heterogeneous system containing different types of aerial and land unmanned vehicles this work presents a system that allows the distribution of target handling among the members of the system, and the exploration of the broadest possible area of a map in a efficient fashion, that is, in order to decrease the overlap among covered areas of the system.

Two social behavior based solutions were proposed to solve the exposed problem. The first one was based in a market economy paradigm and the second one uses a concept analogous to the pheromones used by animals in nature in order to communicate among the vehicles. Both systems were implemented and verified through simulation.

The market system uses auctioneer agents to realize auction sessions over targets found by consumer agents and, then, allocating the best supplier for this target resolution.

The pheromones system uses an environmental representation in order to leave and feel the pheromone with the flavor of each vehicle, through this approach it's possible for the system to avoid explore recently explored areas again.

Keywords: Artificial Intelligence, Multi Agent System, Allocation of Target, Market System, Swarm Behavior.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, veículos não tripulados remotamente pilotados têm sido utilizados na realização de missões em diversas áreas. Organizações militares e de inteligência tem utilizado veículos aéreos não tripulados para localizar, estimar e atacar alvos que se encontram a quilômetros de distância da estação de controle terrestre. Propostas de utilização de veículos não tripulados para monitorar e estimar parâmetros do ambiente em sistemas tem sido feitas com a promessa de melhoria do controle de pragas e aumento da produtividade. Entretanto, a utilização de veículos autônomos em ambientes dinâmicos ainda é área aberta de pesquisa. Além disso, atualmente diversas missões táticas, como missões de busca e resgate em ambientes de desastre, missões militares em ambientes montanhosos, urbanos, aéreos ou subaquáticos se valem da utilização de robôs operados remotamente, como é o caso de diversos Veículos Não Tripulados (VNTs). Vale destacar que Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) foram usados com algum sucesso no Iraque e durante os esforços de resgate do furacão Katrina. VNTs reduzem significativamente o custo e o risco para a vida humana enquanto amplificam as capacidades de reação e de combate.

Entretanto, existe uma barreira formidável para atingir a visão de múltiplos veículos operando cooperativamente, que é o de encontrar uma solução ótima para controlar os veículos do sistema. Sistemas desse tipo costumam aplicar idéias do ramo da inteligência artificial para resolver seus problemas. A área que estuda aplicações voltadas a coordenação de múltiplos veículos é chamada de Sistemas Multi-Agente (SMAs). SMAs devem equilibrar capacidade, confiabilidade, e robustez com tarefas e objetivos da missão ao criar uma estratégia efetiva para coordenar os múltiplos agentes presentes no sistema.

O interesse em SMAs tem crescido nos últimos anos. Estes sistemas estão começando a serem usados em uma grande variedade de aplicações como controle de tráfico aéreo, monitoramento de pacientes, jogos, patrulhamento de áreas de resgate, entre outros. Este apelo ocorre devido ao fato de SMAs apresentarem meios bastante atrativos de se entender, projetar e implementar diversas classes de sistemas distribuídos complexos e concorrentes. Esta crescente atenção para a tecnologia de multi-agentes está sendo cada vez mais acentuada com o aumento no uso da internet, a qual integra uma infraestrutura existente apresentando uma organização espacial na qual agentes autônomos interagem entre si.

Alguns trabalhos interessantes já foram realizados para tentar resolver problemas semelhantes. Como exemplo podemos citar o trabalho proposto em (MATHEWS et al., 2010), onde um sistema de comunicação baseado em um LED e uma câmera serve para estabelecer uma comunicação *peer to peer*. Este sistema considera a utilização de veícu-

los heterogêneos consistindo de VANTs e Veículos Terrestres Não Tripulados (VTNTs). Os LEDs instalados em cada VTNT indicam o estado interno do mesmo para que o VANT possa coordenar o sistema. Em (BURGARD et al., 2000), uma abordagem probabilística é proposta para resolver o problema de explorar certa área de um mapa com a maior eficiência possível. Esta solução funciona definindo uma função de utilidade para diferentes alvos no mapa, esta função depende da quantidade de alvos já visitados no mapa. Por fim a utilidade definida é usada para definir o próximo alvo objetivo de cada VNT.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo modelar um SMA baseado em uma abordagem organizacional centrada em torno do conceito de alvo, ou ponto de interesse. Um alvo, no contexto de sistemas de VNTs, é um desvio qualquer no ambiente que é sensível aos VNTs. Duas soluções foram propostas inicialmente, a primeira baseada em conceitos de mercado através de um sistema de leilão, já o segundo foi baseado no conceito de feromônios. Conforme os sistemas foram sendo desenvolvidos, por necessidades de implementação e eficiência, o sistema de feromônios acabou focado em resolver o problema de distribuição dos alvos e o sistema de mercado focou-se no patrulhamento, ou cobertura, da maior área possível.

1.1 Contexto de Aplicação

Este trabalho pode ser aplicado em diversas áreas, como exemplo pode-se citar duas de particular interesse, a agricultura de precisão e sistemas de suporte para resgate e salvamento em casos de desastre.

O mapeamento de áreas agrícolas através de imagens desde a fase do plantio até a colheita ajuda a monitorar safras, bem como a gestão e logística da produção. Esse tipo de aplicação pode ser feita através de aeronaves de asa fixa que varrem a região buscando adquirir imagens que cubram a mesma, entretanto existem pontos em que a câmera da aeronave de asa-fixa pode falhar, não possuir resolução suficiente para retratar certos detalhes ou então algumas áreas importantes podem ficar escondidas por morros e outros tipos de interferências, chama-se a esta área de um ponto de interesse, ou alvo. Este ponto de interesse pode ser tratado por outros veículos que possam encontrar a área não coberta ou com falha e garantir a captura de uma imagem de qualidade. É vantajoso que um veículo para essa tarefa seja flexível e capaz de pairar na mesma posição, logo seria adequado usar um multi-cóptero, ou um veículo com maior capacidade que estiver na vizinhança.

No caso de buscas em áreas de desastres um veículo maior e com capacidade de cobrir mais rapidamente certa área pode mapear pontos em que existam possíveis resgates a serem realizados. Em seguida este veículo avisa aos veículos vizinhos para que verifiquem este ponto de interesse em maior detalhe. Como em áreas de desastre estes pontos se encontram normalmente em áreas de difícil acesso, é importante que o veículo a verificar os pontos de interesse seja flexível. Novamente é possível que o primeiro veículo encontre os veículos vizinhos com maior capacidade para a tarefa.

Em ambas aplicações as áreas que devem ser varridas são vastas, justificando a utilização de múltiplos veículos. Além disso existe a necessidade de veículos com diferentes capacidades, logo a necessidade de uma aplicação capaz de gerenciar múltiplos veículos heterogêneos é importante.

1.2 Estrutura

O capítulo 2 apresenta as teorias utilizadas como base para a construção e implementação deste trabalho. Este capítulo apresenta os principais conceitos tratados neste trabalho, incluindo SMAs, algoritmos baseados em colônia de formigas, teoria dos jogos, veículos não tripulados, entre outros.

Ao longo do capítulo 4 são explicadas as ferramentas utilizadas no desenvolvimento deste trabalho, assim como as ferramentas de hardware para as quais as simulações realizadas foram pensadas.

Finalmente, no capítulo 5 é apresentado o problema tratado e as soluções propostas para o mesmo. Cada uma destas soluções é detalhada explicando-se como cada parte do problema é resolvido.

O capítulo 6 expõe a implementação desenvolvida ao longo deste trabalho, explicando os limites e detalhes de cada uma das classes desenvolvidas.

Em seguida, no capítulo 7, são explicados os experimentos realizados e são apresentados os resultados e a análise dos mesmos.

Por último, no capítulo 8, são apresentadas as conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sistemas Multi-Agente

O objetivo geral de um SMA é criar sistemas que interconectem agentes desenvolvidos separadamente, permitindo assim que um conjunto de agentes atinja capacidades além daquelas possíveis com apenas um agente.

A capacidade de um agente é limitada pelo seu conhecimento, seus recursos computacionais e sua perspectiva. Este limite na racionalidade (SIMON, 1957) é um dos motivos pelo qual são criados grupos para resolver problemas. A ferramenta mais poderosa para lidar com a complexidade dos problemas é a modularidade e a abstração.

A pesquisa com SMAs está relacionada com o estudo, comportamento, e construção de uma coleção de agentes autônomos possivelmente pre-existentes que interagem entre si e com o ambiente. O estudo deste tipo de sistemas vai além da inteligência individual de cada agente considerando, adicionalmente, a resolução de problemas que envolvam componentes sociais.

O principal objetivo de um SMA é, baseando-se em agentes, criar uma organização social capaz de resolver os problemas apresentados pelo ambiente. Neste contexto, trataremos um SMA como uma analogia a sistema constituído por agentes que, recebendo como entrada o estado atual do ambiente e um estado objetivo, deve ser capaz de coordenar seus agentes para manipular o ambiente e gerar como estado final o estado objetivo.

De acordo com (JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998), as características de um SMA são as seguintes:

- Cada agente possui informações ou capacidades incompletas para resolver o problema e, sendo assim, possui um ponto de vista limitado;
- Não existe um controle global do sistema;
- Os dados são descentralizados;
- A computação é assíncrona.

Este problema pode ser abordado de diversas maneiras. Neste trabalho trataremos a transição entre estados do ambiente como tarefas a serem realizadas pelos agentes. Essa tarefa pode ser vista também como uma representação da diferença entre o estado final e o inicial do ambiente. A seguir apresentaremos e definiremos alguns conceitos importantes para a realização deste projeto.

2.1.1 Agente

De acordo com (WOOLDRIDGE; JENNINGS et al., 1995), um agente é um sistema computacional situado em algum ambiente, e que é capaz de ações autônomas nesse ambiente de modo a se conformar com os objetivos de projeto. Autonomia, neste contexto, significa simplesmente que o agente deveria ser capaz de agir sem a intervenção direta de humanos ou outros agentes, e deve ter controle sobre suas próprias ações e estados internos.

Agentes com esquemas sofisticados de racionalização podem aumentar a coerência do SMA porque cada agente individualmente pode raciocinar sobre efeitos globais de ações locais, formar expectativas sobre o comportamento dos outros, ou explicar e possivelmente reparar conflitos e interações nocivas. Diversos trabalhos em Inteligência Artificial (IA) tentam formalizar uma axiomatização lógica para agentes racionais. Esta axiomatização é obtida pela formalização do comportamento de um agente em termos de crenças, desejos, objetivos, etc. Estes trabalhos são conhecidos como sistemas de Belief-Desire-Intention (BDI)¹(ver (BRATMAN; ISRAEL; POLLACK, 1988)). Um agente que possui uma arquitetura BDI pode também ser chamado de deliberativo.

O conceito de agentes reativos foi introduzido em (BROOKS, 1991), onde é feita a crítica a agentes deliberativos e se argumenta que inteligência é o produto da interação entre um agente e seu ambiente e comportamentos inteligentes emergem da interação entre vários comportamentos mais simples organizados em camadas através de uma relação mestre-escravo de inibição. Agentes reativos agem usando comportamentos baseados em resposta a estímulos e dessa forma estes não possuem uma representação do ambiente. Eles respondem ao estado atual do ambiente em que estão inseridos. Eles não tem memória ou planejam o futuro. Através de interação com outros agentes, comportamentos complexos podem surgir. Em sistemas reativos, a relação entre comportamentos individuais, ambiente e comportamento global não é bem entendida, o que necessariamente torna difícil projetar agentes para completar tarefas específicas. Em geral se faz uso de diligentes processos de experimentação, tentativa e erro.

Para a maioria dos problemas, não se usa uma estratégia puramente reativa ou puramente deliberativa, mas arquiteturas híbridas que podem combinar aspectos de ambas abordagens. Tipicamente arquiteturas deste tipo são feitas através de um certo de número de camadas de software, cada uma lidando com um nível diferente de abstração.

2.1.2 Organização

Uma organização oferece um conjunto de ferramentas para interação entre agentes através da definição de cargos, comportamento esperado e relações de autoridade. Organizações são, em geral, conceituadas em termos de suas estruturas, ou seja, o padrão de informações e relações de controle que existem entre os agentes e a distribuição de suas capacidades de resolver problemas. Na resolução de problemas de cooperação, uma estrutura oferece a cada agente uma visão de alto nível de como o grupo resolve os problemas. A estrutura deve também oferecer as informações de conexão entre os agentes para que eles possam distribuir os problemas a agentes competentes.

A estrutura organizacional impõe limitações na maneira com que os agentes se co-

¹Crença-Desejo-Intenção.

municam e se coordenam. De acordo com (HORLING; LESSER, 2004), os principais exemplos de organizações que foram exploradas na literatura de SMA incluem hierarquias, holarquias, coligações, times, congregações, sociedades, federações, mercados e organizações matriciais.

2.1.3 Alocação de Tarefas

Uma tarefa em um SMA é um conjunto de ações que devem ser executadas por um time de agentes para se atingir ao objetivo desejado. Por ser um conjunto de ações, toda tarefa pode ser vista como um conjunto de tarefas menores que devem obedecer a algumas limitações impostas pela natureza da própria ação.

Algumas tarefas podem ser divididas entre diversos agentes enquanto outras devem ser executadas por apenas um agente. Por exemplo, a tarefa de percorrer certa área de um mapa pode ser dividida na tarefa de percorrer diversas áreas menores, enquanto a tarefa de fotografar um ponto de um mapa pode ser feita apenas por um agente. Duas ou mais tarefas podem apresentar inter-dependência temporal, ou seja, para o início de uma tarefa, a tarefa anterior deve ter sido concluída.

Alocação de tarefas é o problema de atribuir responsabilidade e recursos para resolução de problemas a um agente. Em um extremo, o engenheiro pode fazer todas atribuições de tarefas antecipadamente, criando assim uma organização fixa para resolução do problema. Esta abordagem é limitante e inflexível para ambientes com alto grau de dinamismo, abertura e incerteza. Entretanto, a atribuição de tarefas pode ser feita de maneira flexível e dinâmica. O problema de alocação de recursos foi tratado em (DAVIS; SMITH, 1983) onde foi proposto o amplamente conhecido Contract Net Protocol (CNP).

2.1.4 Planejamento Multi-Agente

Planejamento, para um agente individual, é o processo de construir uma sequência de ações considerando somente objetivos, capacidades e restrições do ambiente. Entretanto, planejamento em um ambiente de SMA também considera as restrições que as atividades de outros agentes, os compromissos que o próprio agente tem com outros, e a evolução imprevisível do ambiente para determinar as decisões de ação em um agente.

2.1.5 Reconhecimento e Resolução de Conflitos

Como SMAs possuem apenas uma visão local, existe potencial para disparidade e inconsistências nos objetivos, planos, conhecimentos, crenças e resultados de um agente. Para resolver o problema de maneira coerente, estas disparidades devem ser identificadas e resolvidas. Disparidades podem ser resolvidas fazendo com que um agente saiba o estado de todos agentes, logo, este poderia determinar onde estão as disparidades e como resolvê-las. Esta abordagem é limitante pois faz deste agente um gargalo do sistema. Detectar e corrigir disparidades e conflitos usando apenas uma perspectiva local pode ser muito difícil. Para facilitar a detecção e resolução de conflitos, agentes podem contar com modelos do ambiente e de outros agentes. A resolução de disparidades pode ser influenciada pela estrutura organizacional da sociedade em que o agente participa e seu papel nela, os tipos de modelos que um agente tem acesso, e os algoritmos de raciocínio do agente.

A principal abordagem utilizada para resolver disparidades em SMAs é a negociação. Neste tipo de estratégia os agentes se comunicam e iterativamente trocam propostas e contrapropostas. Alguns trabalhos desenvolvidos utilizando a abordagem de negociação podem ser vistos em (SYCARA, 1990; KRAUS; WILKENFELD; ZLOTKIN, 1995; WANYAMA; HOMAYOUN FAR, 2007).

2.2 Teoria dos Jogos

A teoria dos jogos envolve um conjunto de ferramentas analíticas projetadas para ajudar a entender os fenômenos observados quando agentes tomadores de decisão interagem. A suposição básica que sustenta esta teoria é que agentes tomadores de decisão perseguem objetivos exógenos bem-definidos e levam em conta seu conhecimento ou expectativa do comportamento de outros agentes tomadores de decisão, ou seja, eles são racionais e pensam estrategicamente.

Um jogo é uma descrição das interações estratégicas que inclui as ações possíveis de um jogador e seus interesses, mas não especifica as ações que os jogadores tomam. Uma solução é uma descrição sistemática dos resultados que podem emergir em uma família de jogos. A teoria dos jogos sugere soluções razoáveis para classes de jogos e examina suas propriedades. (ver (OSBORNE; RUBINSTEIN, 1994))

Existem diversos modelos inseridos na teoria dos jogos, entretanto neste trabalho apresentaremos somente o modelo de jogos estratégicos.

2.2.1 Jogos Cooperativos e Não-Cooperativos

Em jogos não-cooperativos o foco do estudo é na estratégia individual do jogador e sua influência nos resultados, tentando prever a estratégia que será escolhida pelo jogador.

Em jogos cooperativos abstraímos a estratégia individual de cada jogador e focamos na aliança que os jogadores poderão formar. Se assume que cada aliança pode atingir algum resultado, e então tenta-se prever que tipo de aliança se formará e, por conseguinte, o retorno que cada agente irá obter.

2.2.2 Jogos Estratégicos

Um jogo estratégico é um modelo de situação não-cooperativa em que cada jogador escolhe seu plano de ação apenas uma vez durante o jogo, e as decisões de todos jogadores são feitas simultaneamente (ou seja, ao escolher um plano de ação cada jogador não está informado do plano de ação escolhido por qualquer outro jogador).

Este tipo de jogo é comumente representado por uma matriz mostrando os jogadores, estratégias, e pagamentos. Por exemplo, quando existem dois jogadores, um escolherá as linhas e o outro escolherá as colunas. Os pagamentos são registrados no seu interior. Essa é a chamada matriz de ganhos.

2.2.2.1 Utilidade

Em economia, utilidade é a representação de preferências sobre algum conjunto de bens e serviços. A utilidade não pode ser medida ou observada diretamente, mas somente

indiretamente, através dos fenômenos externos para os quais estas deram origem: e nestes casos a medida é encontrada através do preço que uma pessoa aceita pagar para satisfazer seu desejo. (MARSHALL, 1920)

2.2.2.2 *Equilíbrio de Nash*

A teoria dos jogos é usada por economistas para analisar uma grande variedade de fenômenos econômicos, incluindo leilões, barganhas, oligopólios, formação de rede social, e sistemas de votação. Neste contexto um conjunto particular de estratégias é focado, as quais são conhecidas como equilíbrio do jogo. Este tipo de solução é comumente baseada naquilo que é requerido pelas normas de racionalidade. A mais famosa destas é o equilíbrio de Nash. (HOLT; ROTH, 2004)

Um conjunto de estratégias é um equilíbrio de Nash se cada uma representa a melhor resposta para as outras estratégias. Então, se todos os jogadores estiverem jogando a estratégia em um equilíbrio de Nash, eles não terão nenhum incentivo a se desviar dela, se suas estratégias são as melhores que eles podem obter dado que os outros façam.

Quando cada resposta a um jogo representa a melhor estratégia em relação as outras estratégias temos um equilíbrio de Nash. Dessa forma, se todos os jogadores estiverem usando a estratégia em um equilíbrio de Nash, eles não terão qualquer incentivo a se desviar dela, já que estas estratégias são as melhores possíveis dada a estratégia dos outros jogadores.

2.2.2.3 *Jogos de Mercado*

Na teoria econômica, um jogo de mercado é um jogo explicando a formação de preços através da teoria dos jogos. Tipicamente implementando uma saída geral de equilíbrio como um equilíbrio de Nash. Fundamentalmente em um jogo de mercado, os ingredientes chave para modelagem são a definição de postos de troca, e seus mecanismos de formação de preços como uma função da ação dos jogadores. (GIRAUD, 2003)

2.2.2.3.1 *Leilão de Primeiro Preço*

Leilões de primeiro preço são caracterizados por um lance submetido por cada licitante, em envelopes lacrados ou sem a observação dos demais jogadores. O vencedor é o comprador com o maior lance. Este tipo de leilão gera vantagens aos vendedores, já que possui a tendência de resultar em preços maiores que o valor ótimo. (MCAFEE; MCMILLAN, 1987)

2.2.2.3.2 *Leilão de Segundo Preço (Vickrey)*

Em leilões de segundo preço, também chamados de leilão *vickrey*, o jogador com o melhor lance vence, entretanto o preço de liquidação corresponde ao segundo melhor lance, ou seja, ao melhor lance perdedor. (KRISHNA, 2002)

Nesse tipo de leilão o preço de fechamento possui a tendência de ser inferior ao preço ótimo, o que ocorre geralmente em consequência da ignorância, por parte dos compradores, em relação ao fato de que a estratégia dominante é dar um lance igual ao valor de oportunidade. É importante notar que este tipo de leilão é incentivador, já que faz

com que os participantes subam lances equivalentes a valoração real do item. (MCAFEE; MCMILLAN, 1987)

2.3 Colônia de Formigas

Algumas espécies de formigas empregam uma das mais complexas formas de comunicação química entre os animais e sua organização social apresenta um contraste intrigante àquela dos seres humanos.

Uma colônia de formigas pode ser vista como um super-organismo (HÖLLDOBLER, 1990). Ela pode ser analisada como uma unidade coerente e comparada a um único organismo, tratando indivíduos como células de um sistema. O estudo da organização social de formigas é necessariamente uma tarefa reducionista e holística, pois o comportamento das colônias como um todo pode ser entendido apenas através do entendimento dos mecanismos atuantes em cada formiga.

Sendo assim formigas são excelentes organismos para analogias comportamentais e sociais de agentes. Elas exemplificam princípios destas disciplinas e oferecem regras e mecanismos simplificados que operam em nível local. A seguir será apresentada uma breve explicação teórica sobre o sistema de comunicação utilizado por colônias de formigas, o qual é de fundamental importância para que dessa sociedade de insetos possa emergir um comportamento coerente.

2.3.1 Comunicação

Durante o século 20 o entomólogo francês Pierre-Paul Grassé observou que algumas espécies de cupins reagem ao que ele chamou um "estímulo significativo" (GRASSÉ, 1949). Ele observou que os efeitos destas reações podem agir como novos estímulos significativos tanto para o inseto que as produziu quanto para os outros insetos da colônia. Grassé usou o termo *estigmergia* (GRASSÉ, 1959) para descrever este tipo particular de comunicação no qual os agentes são estimulados pela performance atingida pelos mesmos.

As duas principais características que diferenciam esta de outras formas de comunicação são as seguintes:

- Estigmergia é uma forma de comunicação indireta, não simbólica mediada pelo ambiente: insetos trocam informação modificando o ambiente;
- A informação estigmergic é local: pode ser acessada somente por insetos que visitem o ponto do ambiente no qual esta informação foi liberada.

Colônias de formigas são sistemas que utilizam estigmergia, sendo este um dos principais aspectos em seu sistema social. Em muitas espécies deste inseto, formigas entrando e saindo de uma fonte de alimento depositam uma substância chamada feromônio; outras formigas percebem a presença deste feromônio e tendem a seguir caminhos onde a concentração de feromônio é maior. Através deste mecanismo, formigas conseguem transportar comida para seu ninho de uma maneira extremamente efetiva.

2.4 Algoritmos de Otimização por Colônia de Formigas

Algoritmos de Otimização por Colônia de Formigas (AOCFs) tomam como inspiração o sistema de comunicação utilizado por formigas e, utilizando-se desse conceito, um mecanismo similar é explorado na resolução de problemas de otimização.

2.5 Veículo Não Tripulado

VNT são veículos onde a presença de um piloto é desnecessária. Estes veículos podem ser controlados por uma estação de controle ou funcionar de maneira autônoma, embora ambas estratégias sejam usadas de maneira cooperativa.

Um VNT autônomo, ou agente, possui capacidades que são influenciadas pelo hardware e pelo firmware embarcados no mesmo. Em geral, diversos sensores se conectam a um sistema central, que funciona como um piloto automático, rodando um firmware que é responsável por monitorar os sensores, determinar a próxima ação e gerar a saída para controlar o agente. Além disso, esse sistema central é geralmente responsável por gerenciar a comunicação entre os diversos agentes, e também com a estação de controle.

Os VNTs podem ser das mais diversas naturezas, como aéreos, terrestres, aquáticos, subaquáticos, entre outros. A seguir serão descritos, de maneira breve, as principais características de sistemas aéreos e terrestres, que são os tipos de VNTs abordados ao longo deste trabalho.

2.5.1 Aéreo

Toda aeronave que não precisa de piloto embarcado para ser guiada é chamada de VANT. Esse tipo de aeronave é controlada remotamente através de recursos eletrônicos e computacionais, podendo-se utilizar a supervisão humana ou controladores programáveis.

Os VANTs foram idealizados para uso militar com o intuito de serem usados em missões muito perigosas para serem executadas por seres humanos, como por exemplo no controle de mísseis de cruzeiro, em diversas áreas da inteligência militar, para controle e apoio de tiro de artilharia, para apoio aéreo a tropas de cavalaria e infantaria, em atividades de patrulhamento costeiro, urbano, de fronteira e ambiental, em atividades de busca e resgate, entre outros.

2.5.2 Terrestre

Um VTNT é um veículo que opera em contato com o solo e sem a presença de um operador humano. VTNTs podem ser utilizados em diversas aplicações onde pode ser inconveniente, perigoso, ou impossível a presença de um operador humano. Geralmente, o veículo possui um conjunto de sensores para observar o ambiente, e irá tomar decisões sobre seu comportamento de maneira autônoma ou passar informações para um operador humano utilizando uma Estação de Controle (EC) para operações remotas.

A capacidade de exploração do ambiente neste tipo de veículo depende dos diversos tipos de terrenos encontrados, o que está diretamente associado ao mecanismo utilizado para locomoção.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

A seguir serão apresentados alguns trabalhos que tratam de assuntos relacionados a este projeto. Em 3.1 são apresentadas soluções que usam propostas de projetos de mecanismos através de leilões combinatoriais para resolver problemas de alocação de recursos em SMAs. Em seguida, na seção 3.2 mostram-se trabalhos que utilizam comportamento de enxame para emergir organizações ou alianças coerentes em um grupo qualquer de agentes. Por fim, em 3.3 são referenciados trabalhos utilizando outras estratégias. Os trabalhos selecionados estão focados em resolver o problema de coordenação em grupos de VNTs, entretanto não estão limitados a este tópico, também são citados trabalhos que resolvem problemas análogos ou oferecem algum tipo de introspecção para as estratégias adotadas.

3.1 Sistema de Mercado

Em (ZLOT et al., 2002) é proposta uma economia de mercado para negociar as atribuições de diversos robôs. A proposta funciona da seguinte maneira; Cada robô possui sua própria lista de alvos, onde cada alvo possui um lucro associado ao mesmo. Cada robô sempre seleciona o alvo com maior lucro presente em sua lista de alvos, em seguida quando um robô chega ao seu alvo ele observa suas fronteiras e, se sua lista de alvos não está vazia, ele inicia um leilão. Para cada fronteira em leilão todos sobem lances, quando um robô ganha um leilão este é adicionado a sua lista de alvos.

O trabalho proposto em (ZLOT; STENTZ, 2006) ataca o problema de tratar a complexidade de missões de voo levando em conta sua estrutura e semântica internas. Nele é proposto um conceito de tarefa complexa, que é um conjunto de tarefas organizadas através de uma estrutura de árvore, ou seja, uma tarefa complexa está dividida em diversas sub-tarefas complexas. Por fim, uma abordagem de mercado é utilizada para distribuir estas tarefas entre os membros do sistema. É importante notar que a organização em árvore das tarefas complexas é levada em consideração pelos cálculos de utilidade do sistema de mercado.

A proposta (SUJIT; SINHA; GHOSE, 2006) apresenta um esquema de negociação que aloca tarefas de maneira eficiente entre múltiplos VNTs. Este estudo destaca-se por pesquisar os efeitos do alcance de sensores na alocação de tarefas e por comparar seus resultados com aqueles de estratégias gulosas e com uma variação do mecanismo de negociação.

Em (GERKEY; MATARIC, 2002) é proposto o uso de um mecanismo de leilão dis-

tribuído para a coordenação de múltiplos robôs em um ambiente dinâmico. Uma variante do CNP¹ chamada MURDOCH é criada e validada em dois domínios diferentes: uma tarefa de manipulação física fortemente acoplada para múltiplos robôs e um experimento fracamente acoplado para múltiplos robôs com autonomia de longo prazo.

Um protocolo de mercado descentralizado para alocação de tarefas entre agentes que competem por recursos escassos é apresentado em (WALSH; WELLMAN, 1998). Agentes negociam tarefas e recursos sob preços determinados por um protocolo de leilão. Um conjunto simples de políticas de lances são especificados, os quais, juntamente com os mecanismos de leilão, exibem as propriedades convergentes necessárias.

3.2 Comportamento de Enxame

Em (PARUNAK; BRUECKNER; SAUTER, 2005) é apresentada uma proposta de SMA baseado em marcadores químicos, ou feromônios artificiais, para planejamento de caminho em colônias de formigas. Parunak descreve feromônios como um meio de construir campos de potencial que podem guiar a coordenação do movimento físico. Já em (PARUNAK et al., 2007) é apresentada uma proposta bastante sofisticada de implementação de um SMA envolvendo agentes reativos, chamada de modelo Behavioral Evolution and Extrapolation (BEE)². Behavioral Evolution and Extrapolation (BEE) é uma abordagem inovadora para reconhecer o estado racional e emocional de múltiplas interações entre agentes baseando-se puramente em seu comportamento.

A proposta de (PARUNAK, 1997) apresenta a síntese de diversos estudos tornando possível a derivação de um conjunto de princípios gerais que SMAs podem utilizar para modelar o comportamento de sistemas em que o comportamento global é mais complexo que o comportamento individual de seus agentes. Várias técnicas para projeto, modelagem e verificação de SMAs com comportamento de enxame foram propostas neste trabalho.

O trabalho proposto em (KOVACINA et al., 2002) apresenta uma maneira de controlar estratégias em um sistema baseado em comportamento emergente. Um algoritmo de controle baseado em regras, descentralizado, baseado em um comportamento aleatório limitado e que respeita as restrições de um VNT em relação a sensores, capacidade computacional e domínio de voo. Para demonstrar e avaliar a eficiência da proposta foi criado uma simulação de um enxame de veículos aéreos buscando e mapeando uma nuvem química em uma região de patrulhamento.

Em (SAUTER et al., 2005) o uso de feromônios digitais para controlar e coordenar enxames de VNTs é estudado em várias condições para determinar sua eficiência inseridos em múltiplos cenários militares. O estudo demonstrou, em plataformas de hardware, a eficiência destes algoritmos de feromônio para vigilância, aquisição de alvos, e rastreamento.

A solução proposta em (DASGUPTA, 2008) descreve um protótipo de sistema baseado em multi-agente utilizando técnicas de comportamento de enxame inspiradas em colônias de insetos para realizar reconhecimento automático de alvos através do uso de VNTs de maneira distribuída em um cenário simulado. São apresentados algoritmos para

¹Protocolo de Redes de Contrato.

²Evolução e Extrapolação Comportamental

diferentes operações realizadas pelos VNTs no sistema e para diferentes estratégias de comportamento de enxame.

3.3 Outras Estratégias

Em (VOKŘÍNEK; NOVÁK; KOMENDA, 2011) é proposto e avaliado uma técnica distribuída para realizar a vigilância e rastreamento cooperativos por um time de VANTs com recursos limitados. O princípio que permite um número limitado de veículos cobrir um grande conjunto de objetivos é baseado na representação de objetivos orientados a tarefas e na atribuição e troca dinâmica de tarefas entre os agentes. O problema de alocação de tarefas é resolvido através do uso de contratos inter-agente (compromissos). O sistema organizacional usado é hierárquico. Por fim, um resolvidor multi-agente decompõe o problema e o delega para agentes autônomos que resolvem individualmente as partes do problema. A solução global é obtida juntando as soluções individuais.

O trabalho proposto em (MILLER et al., 2004) usa uma metáfora de time esportivo para atingir o controle, de maneira rápida e complexa, sobre a iniciativa de agentes que podem ser representados por VANTs heterogêneos. O usuário do sistema faz uma "chamada de jogo", que é o mesmo que requisitar um serviço de um ou vários VANTs, o que pode, ou não, ser especificado na requisição.

Em (JULIÁ; GIL; REINOSO, 2012) é apresentado um estudo extensivo dos métodos mais importantes para exploração e mapeamento através de veículos autônomos. Estas técnicas de exploração foram testadas em simulação e comparadas usando diferentes critérios como tempo de exploração ou qualidade do mapa.

4 FERRAMENTAS

Os sistemas desenvolvidos neste trabalho foram elaborados sobre a plataforma de piloto automático chamada Ardu Pilot Mega (APM). Esta plataforma inclui características de hardware e software específicas. A seguir serão detalhadas algumas características desta plataforma, tanto em nível de hardware quanto software. É importante destacar que os testes foram feitos apenas através de simulações computacionais. As ferramentas de hardware serão descritas na seção 4.1. As ferramentas de software serão descritas em 4.2.

4.1 Hardware

Os testes analisados neste trabalho (ao longo do capítulo 7) foram realizados em ambiente simulado apenas. Apesar disso, esta seção irá descrever o hardware que serve como referência nestas simulações. A seguir serão descritas as principais características destes veículos, assim como do módulo de piloto automático APM 2.6.

4.1.1 Multicóptero

Um multicóptero é um veículo aéreo de mecânica simples que tem seu movimento controlado pela aceleração e desaceleração de múltiplas unidades de hélices motorizadas.

Multicópteros são aerodinamicamente instáveis e requerem necessariamente um computador de bordo (chamado de controlador de voo) para poder realizar um voo estável. Como resultado, eles são chamados de sistemas de controle por cabo elétrico (do inglês *Fly by Wire*), e se o computador não estiver funcionando não é possível realizar um voo. O controlador de voo combina dados de pequenos giroscópios de sistemas micro eletro-mecânicos e acelerômetros para manter uma estimativa de seu posicionamento e orientação.

A figura 4.1 mostra alguns tipos diferentes de multicópteros. O quadricóptero é um dos tipos mais simples e possui as características essenciais de um multicóptero, sendo assim o utilizaremos como exemplo nas explicações que seguem.

Um quadricóptero possui quatro motores/hélices, onde cada motor gira em sentido oposto aos motores de seu lado, ou seja, motores localizados em posição oposta rotacionam no mesmo sentido. Este tipo de multicóptero pode controlar seu *roll* e rotação *pitch* colocando os dois motores de um lado em uma velocidade maior que os dois do outro lado.

Por exemplo, se o quadricóptero quisesse girar a esquerda ele iria aumentar a veloci-



Figura 4.1: Multicópteros modelos 3DR APM:Copter.¹

dade dos motores no lado direito do quadro e diminuir a velocidade dos dois motores no lado esquerdo. De maneira similar se ele quiser rotacionar a frente ele precisa aumentar a velocidade dos motores traseiros e diminuir a velocidade dos motores dianteiros.

Portanto, o quadricóptero gira (também chamado de *yaw*) para a esquerda ou direita aumentando a velocidade de dois motores que estão diagonalmente transversais um do outro, e diminuindo a velocidade dos outros dois.

A movimentação horizontal de um quadricóptero é obtida através do aumento ou diminuição da velocidade de alguns motores por um certo tempo de modo que o veículo se incline na direção de voo desejada, logo se aumenta a velocidade de todos os motores para que o veículo dispare em direção frontal. Geralmente quanto maior a inclinação do veículo, maior será sua velocidade. Por fim a altitude é controlada aumentando-se ou diminuindo-se a velocidade de todos os motores ao mesmo tempo.

4.1.2 Aeronave de Asa Fixa

Uma aeronave de asa fixa é uma aeronave capaz de voar usando asas que geram sustentação causado pela velocidade de avanço do veículo e o formato das asas. A figura 4.2 mostra um destes tipos de aeronave.

Existem diversos tipos de aeronaves de asa fixa. Por exemplo, planadores de voo livre dos mais diversos tipos podem usar o movimento do ar para ganhar altura. Outro exemplo são as aeronaves motorizadas (aviões) que ganham propulsão frontal através de um motor.

Uma aeronave de asa fixa possui tanto vantagens quanto desvantagens em relação a um multicóptero. Em geral, aeronaves de asa fixa possuem a tendência de serem mais robustas no ar quando ocorrem erros (tanto técnicos quanto de pilotagem), visto que as

¹Disponível em <<http://copter.ardupilot.com/wiki/introduction/what-you-need/>>, acessado em 02/12/2014.



Figura 4.2: Avião modelo 3DR Aero-M.²

mesmas possuem capacidade de planar naturalmente sem a necessidade de energia. Além disso, elas são capazes de carregar uma grande carga por longas distâncias utilizando menor quantidade de energia.

Quando missões de precisão são necessárias, aeronaves de asa fixa estão em desvantagem, já que elas precisam de ar em movimento sobre suas asas para gerar sustentação. Isso significa que elas devem manter velocidade em relação ao solo, ou seja, elas não podem pairar em um ponto específico da mesma maneira que um multicóptero pode.

4.1.3 Rover

Um *rover* é um tipo de VTNT utilizado para exploração. A figura 4.3 mostra um modelo deste tipo de veículo.



Figura 4.3: Rover modelo APM:Rover.³

Para controlar a velocidade deste tipo de veículo é preciso controlar a velocidade dos motores ligados a rotação das rodas. O controle do sentido e da direção é feito através de

²Disponível em <<http://3drobotics.com/mapping-drones/>>, acessado em 02/12/2014.

³Disponível em <<http://diydrone.com/group/ardurover-user-group>>, acessado em 02/12/2014.

eixos diferenciais localizados nas rodas.

4.1.4 APM 2.6

A APM 2.6 é um piloto automático compatível com o Sistema Internacional de Unidades (S.I.) e baseado na plataforma Arduino Mega, que pode transformar qualquer veículo de Remotamente Controlado (RC) em um VANT ou VTNT completamente autônomo. Ela gerencia tanto a estabilização quanto a navegação Global Positioning System (GPS) e permite o completo controle de missões com planejamento de *waypoints* e da câmera. Suporta 8 canais RC e possui quatro portas seriais.

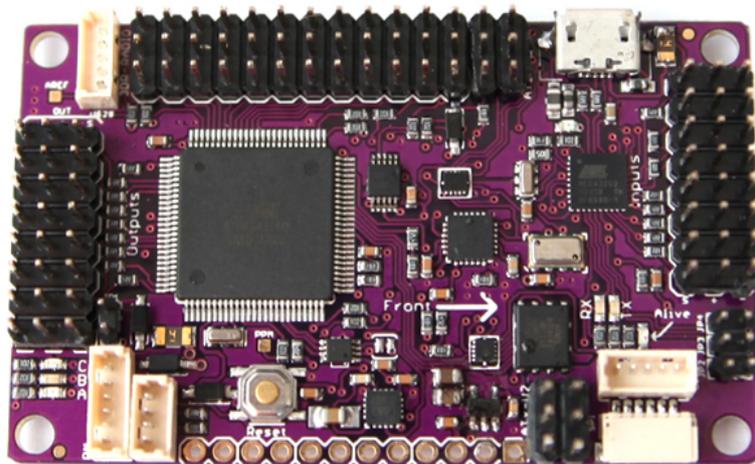


Figura 4.4: Placa controladora de voo APM 2.6.⁴

4.2 Software

As ferramentas de software utilizadas incluem o piloto automático da plataforma APM e as ECs APM Planner e MAVProxy. Todas estas ferramentas serão descritas a seguir.

4.2.1 Piloto Automático APM

O firmware de piloto automático escolhido foi o APM, devido principalmente a sua capacidade de gerenciar veículos de natureza diversificada através do mesmo hardware. Além disso o firmware disponível foi construído de uma maneira hierárquica o que permite a reutilização do código em diferentes plataformas, como a *Pixhawk/PX4*.

A plataforma APM pode rodar sobre diversas plataformas de hardware de piloto automático e pode ser configurada para diversos tipos de multicópteros, aviões ou rovers.

A família *ArduPilot* oferece três tipos diferentes de firmware para piloto automático. O *Plane* descreve um avião, o *Copter* descreve um helicóptero ou multicóptero e o *Rover* descreve um tipo de VTNT.

⁴Disponível em <<http://www.hobby-wing.com/cuav-apm2-5-apm-flight-controller-board-and-6h-gps.html>>, acessado em 02/12/2014.

4.3 MAVLink

O Micro Air Vehicle Communication Protocol (MAVLink) é um protocolo de comunicação Ponto a Ponto (PPP) utilizado inicialmente apenas para comunicação entre VANTs dentro do projeto *ArduPilot*. Atualmente ele é utilizado em todos os tipos de veículos oferecidos pela plataforma, além de ser explorado em outras plataformas com objetivo semelhante.

Com o objetivo de dar suporte a comunicação entre as mais diferentes plataformas o protocolo de comunicação utilizado foi o MAVLink 1.0.

O conteúdo de um pacote MAVLink pode ser visto na tabela 4.1. Onde "n" é o tamanho do *payload*.

Índice do Byte	Conteúdo	Valor	Explicação
0	Sinal de Início de Pacote	0xFE	Indica o início de um pacote.
1	Largura do foreignPayload	0 - 255	Indica a largura do <i>payload</i> .
2	Sequência do Pacote	0 - 255	Cada componente conta até sua sequência, permite detectar perda de pacotes.
3	ID do sistema	0 - 255	ID do sistema enviando a mensagem. Permite diferenciar diferentes VNTs no mesmo sistema.
4	ID do componente	0 - 255	ID do componente enviando a mensagem. Permite identificar diferentes componentes em um mesmo sistema.
5	ID da mensagem	0 - 255	ID da mensagem. Este identificador define o tipo de mensagem que está sendo enviada.
6 até (n+6)	Data	(0 - 255) bytes	Data da mensagem
(n+7) até (n+8)	Checksum	2 bytes	Protege o pacote de decodificar uma versão diferente do mesmo pacote.

Tabela 4.1: Anatomia de um pacote MAVLink.

Para definir novas mensagens MAVLink pode-se usar a ferramenta de geração automática. Para isso se configura um arquivo *xml* com as mensagens e campos desejados, em seguida os *scripts* de geração são utilizados. No caso do *ArduPilot* as mensagens são definidas em *ardupilotmega.xml*, arquivo localizado em `"/ardupilot/libraries/GCS_MAVLink/messages_definition/"` e o script de geração pode ser encontrado em `"/ardupilot/libraries/GCS_MAVLink"`.

4.3.1 Estação de Controle

A EC é o sistema remoto responsável por receber mensagens de status do VNT e enviar mensagens de controle. A EC é fixa e utiliza de diferentes protocolos para se comunicar com os VNTs.

4.3.1.1 MAVProxy

MAVProxy é o software utilizado como EC principal nos testes realizados. Ela não possui uma interface de usuário rebuscada, apenas uma linha de comando. Por outro lado esta EC é bastante robusta e permite maior controle sobre o veículo acessado. Esta EC foi utilizada principalmente para controlar e configurar os veículos utilizados.

A figura 4.5 mostra uma instância do MAVProxy, rodando sobre a linha de comando, e se comunicando com um quadricóptero. Além disso o módulo mapa está carregado (mostrando a posição do veículo) sobre os mesmos.

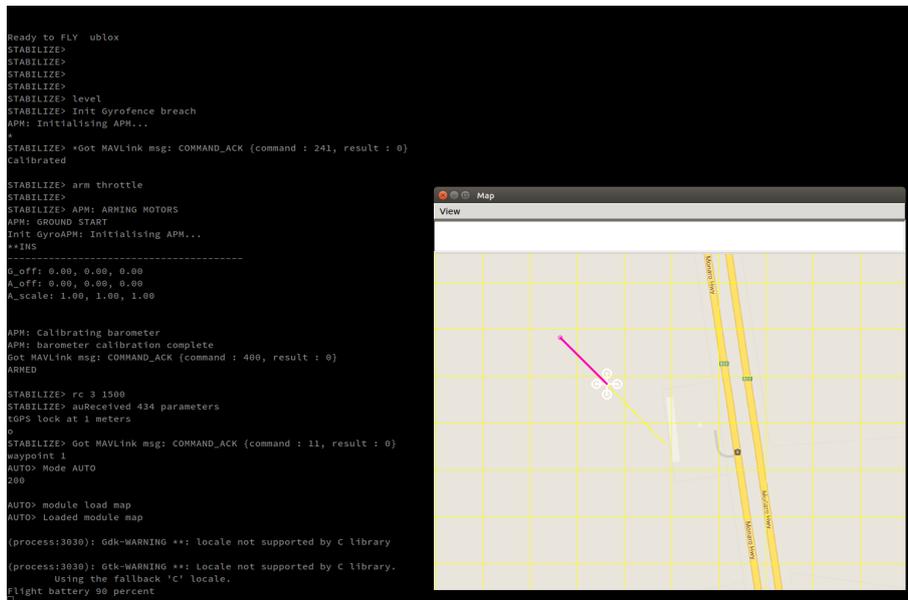


Figura 4.5: Estação de controle MAVProxy(na linha de comando), com o módulo mapa carregado.

4.3.1.2 APM Planner

O segundo software utilizado como EC é o *APM Planner*, que foi escolhido por ser aberto, poder identificar pelo menos quatro diferentes sistemas de piloto automático, e ser capaz de trabalhar com múltiplos veículos ao mesmo tempo. Esta EC foi utilizada somente para visualizar o movimento dos veículos sobre o mapa, o que ocorreu durante o desenvolvimento do sistema principalmente.

A figura 4.6 mostra uma instância desta EC. Maiores detalhes sobre esta estação de controle podem ser encontrados em (MICHAEL CARPENTER BILL BONNEY, 2015).

⁵Disponível em <<http://planner2.ardupilot.com/>>, acessado em 02/12/2014.

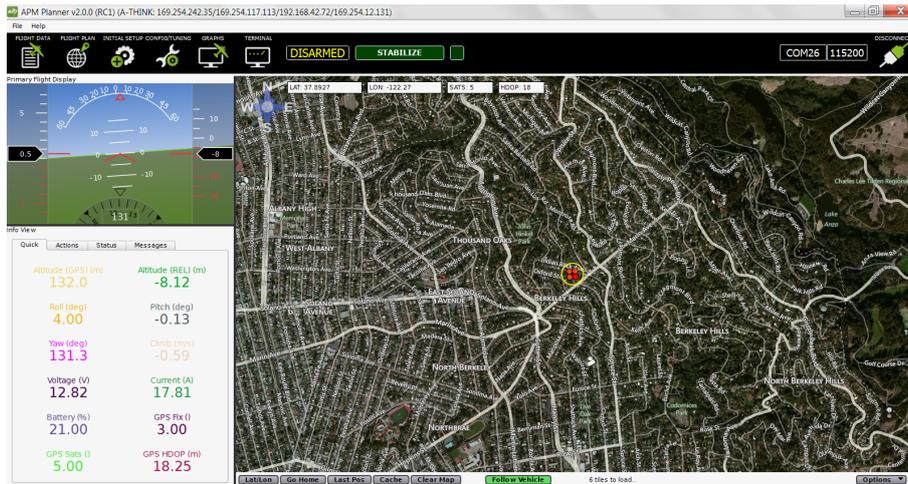


Figura 4.6: Estação de controle APM Planner.⁵

4.3.1.3 QGroundControl

Assim como a estação de controle anterior, a EC *QGroundControl*, foi desenvolvida sob uma licença de código aberto, e possui capacidades semelhantes a anterior. Esta EC foi utilizada como uma alternativa a anterior em certos momentos do desenvolvimento.

A figura 4.7 mostra uma instância desta EC em que três quadricópteros e uma aeronave de asa fixa estão sendo rastreados. Maiores detalhes sobre essa EC podem ser vistos em (MEIER, 2015).

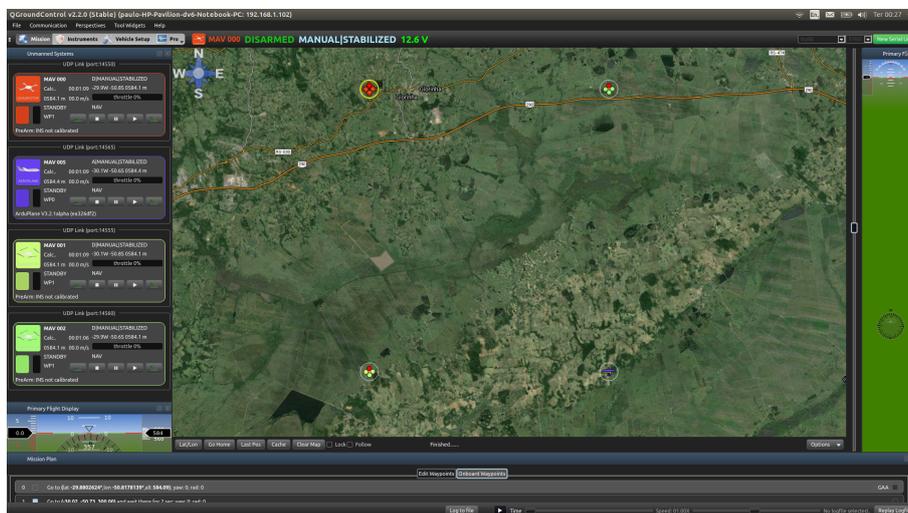


Figura 4.7: Estação de controle QGroundControl.

5 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO PROPOSTA

Este capítulo possui por objetivo apresentar o problema tratado por este trabalho, que é delimitado na seção 5.1, assim como as soluções propostas, as quais são apresentadas ao longo da seção 5.2. Detalhes sobre a implementação destas soluções podem ser vistos no capítulo 6 e os testes demonstrando seu funcionamento são expostos e analisados no capítulo 7.

5.1 Delimitação do Problema

O sistema proposto é composto por VNTs expostos a ação de um ambiente dinâmico. Diferentes tipos de veículos podem entrar e sair do sistema, ou seja, o sistema também é dinâmico e relações podem ser criadas e quebradas sem aviso prévio. Além disso, é preciso levar em conta também que alvos, ou seja, pontos específicos do ambiente que devem ser tratados, podem aparecer e desaparecer de maneira dinâmica.

Considerando o contexto apresentado, o problema tratado neste trabalho é o de monitorar uma área buscando pontos de interesse, ou alvos, e distribuir o tratamento dos mesmos entre os veículos presentes no sistema. Este problema pode ser subdividido em dois problemas menores: o primeiro é espalhar os veículos pela área de patrulhamento e o segundo é distribuir os alvos encontrados entre os membros do sistema.

Sendo assim, será apresentado uma solução que se propõe a resolver o problema de controlar e distribuir veículos heterogêneos, expostos a um ambiente dinâmico, de modo que eles consigam se coordenar para atingir o objetivo de encontrar alvos e tratá-los de maneira eficiente.

5.2 Solução Proposta

Com o objetivo de resolver o problema exposto propõe-se duas soluções. A primeira parte de uma abordagem descentralizada através da troca direta de mensagens entre os agentes, enquanto que a segunda é uma abordagem massivamente distribuída onde a área de busca é determinada através de rastros repulsivos deixados no ambiente. A primeiro chamamos de sistema de mercado e a segundo de sistema baseado em feromônios.

É importante ressaltar que ambos sistemas são complementares um ao outro. Embora os sistemas implementem uma solução geral para o problema, ao longo do desenvolvimento do trabalho o sistema de mercado teve seu foco estreitado para a resolução da

distribuição de alvos entre os veículos. Já o sistema de feromônios restringiu seu foco na movimentação dos VNTs para obtenção de uma cobertura maior e mais eficiente.

Para o correto entendimento das soluções propostas torna-se importante o conhecimento dos conceitos de habilidade e tarefa. Uma habilidade pode ser vista como a descrição dos alvos que um VNT pode tratar. Como exemplo podemos citar o caso de um VNT capaz de tratar alvos do tipo A, o que faz com que necessariamente este veículo possua uma habilidade do tipo A. Uma tarefa é a atividade que um VNT deve realizar para tratar um alvo. Por exemplo, uma habilidade do tipo A deve conter uma tarefa capaz de tratar alvos do tipo A.

Para que um SMA seja capaz de tratar corretamente os alvos do ambiente torna-se necessária a existência de um agente capaz de identificar, planejar e realizar o tratamento destes alvos. A seguir serão discutidas duas propostas, cada uma resolvendo de forma parcial o problema apresentado, baseando-se em diferentes paradigmas. A primeira, descrita em 5.3, é baseado no paradigma organizacional de mercado e a segunda, apresentada na seção 5.4, faz uma proposta baseada no depósito de feromônios artificiais.

5.3 Sistema de Mercado

Esta solução é baseada no mecanismo Vickrey-Clarke-Groves (VCG) (VICKREY, 1961; CLARKE, 1971; GROVES, 1973). Para o melhor entendimento desta solução apresentamos os conceitos e mecanismos envolvidos na mesma.

Um mercado é caracterizado por consumidores e fornecedores de serviços. Os consumidores demandam tarefas a serem realizadas e os fornecedores fazem ofertas de serviços através de lances de leilão para a realização de tais tarefas. Um lance no leilão pode ser descrito através de uma função de utilidade determinada pelas habilidades e estados do fornecedor. Além disso, um mercado precisa de um leiloeiro, o qual realiza negociações e determina ganhadores. Neste contexto uma sessão de mercado é a maneira utilizada para entregar serviços dinamicamente aos VNT participantes do sistema.

Esta solução irá contar com três tipos de agentes: o consumidor, o fornecedor e o leiloeiro. A seguir serão explicadas as tarefas e responsabilidades de cada um. É importante mencionar que, em tese, todos estes agentes poderiam estar distribuídos pelo sistema, entretanto na implementação realizada e apresentada ao longo do capítulo 6 apenas a relação fornecedor-leiloeiro funciona de forma distribuída, enquanto que a relação consumidor-leiloeiro funciona de maneira local, onde o consumidor se comunica apenas com um leiloeiro pré-especificado.

5.3.1 Consumidor

O consumidor é responsável por detectar as necessidades do veículo em que está inserido. Este agente deve verificar constantemente se novos alvos são detectados, caso um novo alvo seja encontrado o consumidor deve criar um novo contrato e informar o leiloeiro de sua nova necessidade. Assim que o leilão estiver terminado, o consumidor recebe o fornecedor com quem o contrato foi estabelecido e possui a liberdade de continuar a missão anteriormente interrompida pela chegada de um novo alvo ou monitorar o andamento da tarefa.

É importante mencionar que o contrato pode ser estabelecido com o fornecedor localizado no próprio veículo que encontrou o alvo, ou seja, localmente em relação ao consumidor. O contrato é definido através de um identificador único, um consumidor e um fornecedor. Quando um contrato é criado pelo consumidor o fornecedor é deixado indefinido no contrato, assim que o leilão do alvo terminar, o leiloeiro irá definir o fornecedor vencedor no contrato e informar o consumidor do contrato estabelecido.

5.3.2 Leiloeiro

O leiloeiro é responsável por criar, monitorar e anunciar sessões de leilão. Este agente deve aguardar por consumidores que possuem uma nova necessidade: assim que algum desses consumidores informá-lo de alguma de suas necessidades, este cria uma nova sessão de leilão e a anuncia para os fornecedores. Durante esse tempo ele aguarda e salva novos lances dados pelos fornecedores. Depois de um limite temporal a sessão é dada como terminada e o fornecedor que deu o maior lance é considerado o contemplado. Por último o contrato atualizado é informado tanto ao consumidor quanto ao fornecedor, para que ambos possam dar fim as suas atividades.

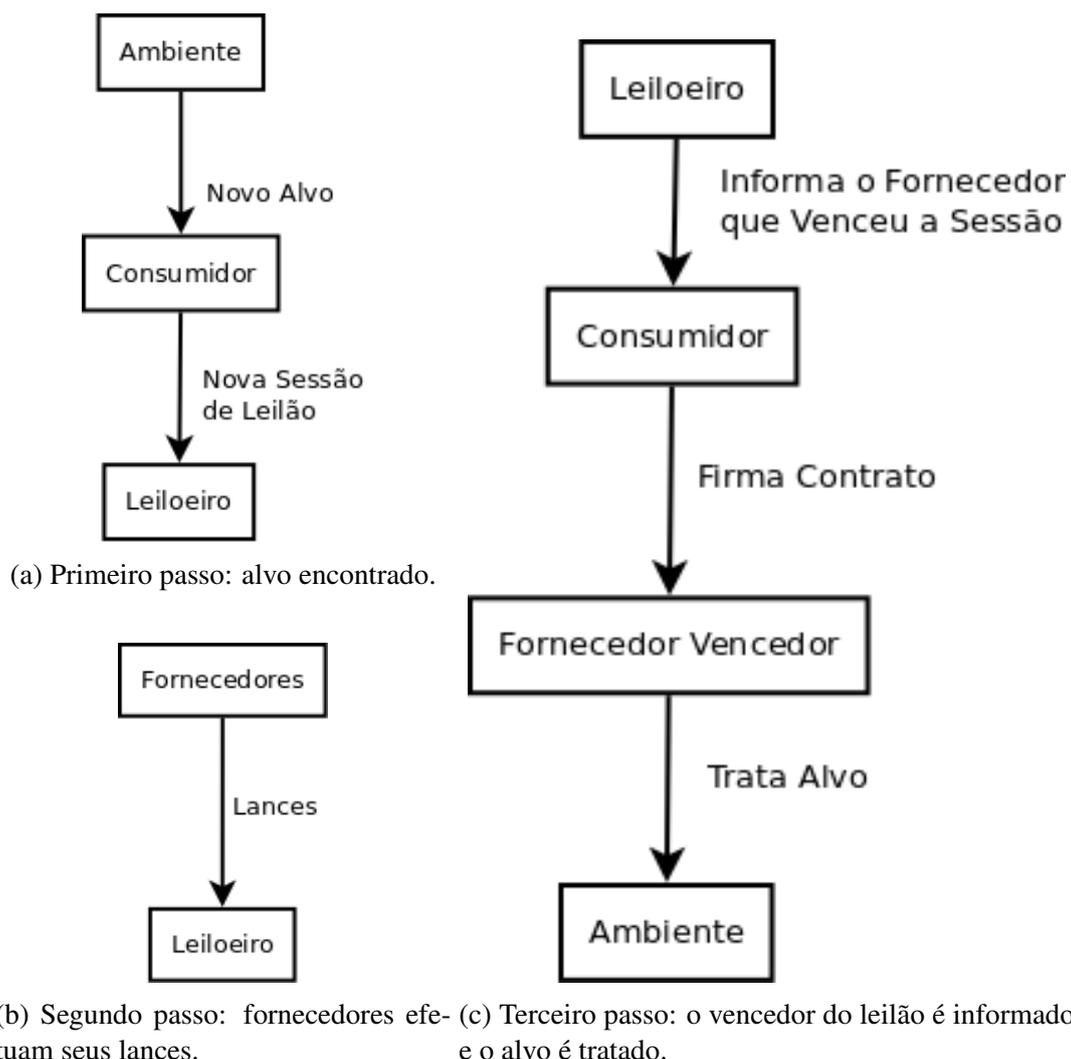


Figura 5.1: Passos de uma sessão de leilão.

5.3.3 Fornecedor

O fornecedor é responsável por executar e determinar o valor de cada tarefa para dar seu lance em sessões de leilão anunciadas. O trabalho do fornecedor é aguardar por anúncios de novas sessões de leilão, assim que receber uma informação desse tipo, ele deve dar um lance sobre a tarefa especificada. Caso seu lance for o ganhador, ele receberá um novo contrato do leiloeiro. Assim que receber o novo contrato ele começa a execução da tarefa acordada. Quando terminar a tarefa o fornecedor pode, opcionalmente, informar o consumidor que realizou a requisição da mesma.

5.3.4 Funcionamento

O funcionamento do sistema de mercado envolve a criação de um leilão assim que um alvo for encontrado. Esse leilão é gerenciado pela ação conjunta dos agentes já citados e explicados.

A figura 5.1 mostra os passos envolvidos durante o processamento de uma sessão de leilão. Assim que o consumidor identifica um alvo no ambiente, como pode ser visto na figura 5.1a, ele avisa o leiloeiro para criar um sessão de leilão para o tratamento daquele alvo. Em seguida o leilão se inicia e os fornecedores capazes de resolver este alvo enviam um lance para o leiloeiro, como pode ser visto na figura 5.1b. Assim que a sessão de leilão acaba o leiloeiro define o fornecedor com o melhor lance e avisa o consumidor que um novo contrato pode ser firmado com aquele fornecedor, como pode ser visto na figura 5.1c, em seguida o consumidor envia o contrato firmado ao fornecedor selecionado e, por último, o fornecedor se responsabiliza por tratar o alvo, que significa avançar até o mesmo e executar a tarefa referente ao tipo de alvo encontrado.

5.4 Sistema Baseado em Feromônios

Esta solução é baseada no conceito de comunicação através de feromônios utilizando-se como base a solução proposta em (FREITAS, 2011) para lidar com alarmes em redes de sensores móveis. Nesse contexto, para que os agentes possam cobrir uma área maior de maneira mais efetiva, cada um deles possui uma representação de mapa da área que vai guardar informações sobre os percursos dos VNTs. Utilizando essas informações, cada VNT evita se encaminhar para locais onde outros VNTs de mesmo tipo são encontrados. A informação armazenada no mapa imita o comportamento de feromônios emitidos por animais na natureza, os quais uma vez depositados em certo local, informam outros animais a presença anterior de outro animal. Além disto, os feromônios naturais evaporam com o tempo, característica que é representada através de um decaimento temporal no sistema baseado em feromônios. O conceito de tipo de VNT é bastante ambíguo e dependente da implementação. É importante apenas que VNTs de mesmo tipo possuam a mesma função.

Neste sistema cada VNT anda em um mapa reticulado de forma a evitar os quadros em que outros VNTs tenham soltado feromônio. Quando um alvo é encontrado por algum VNT ele deve tentar tratá-lo. Caso não tenha essa habilidade ele aloca esse alvo para algum dos VNT próximos de forma aleatória.

Portanto, em um sistema de feromônio os seguintes conceitos ou agentes são impor-

tantes: feromônio, mapa e o agente de enxame.

5.4.1 Feromônio

O conceito de feromônio é responsável por representar a comunicação entre os agentes. A informação que se deseja comunicar é basicamente que um VNT de certo tipo (capaz de realizar certa tarefa sobre determinado alvo) esteve em determinado local. Para isto, atribuí-se diferentes sabores aos feromônios de VNTs com diferentes capacidades. Cada sabor de feromônio distinto representa um veículo. Os feromônios são portanto divididos por tipo. Os VNTs podem sentir e depositar apenas feromônios de um tipo. Os feromônios soltos no mapa servem para orientar o deslocamento do agente de enxame (um VNT) sobre a área representada pelo mapa, como será explicado nas próximas seções.

É importante dizer que feromônios depositados possuem a característica de evaporação (ou decaimento com o tempo), conforme já mencionado acima, para que o agente possa "esquecer" de VNTs que há muito tempo não passam por alguma parte do mapa.

5.4.2 Mapa

O mapa tem por principal função oferecer uma representação artificial do ambiente. É através do mapa que os agentes de enxame interagem com os feromônios.

Este mapa é representado internamente em cada VNT, o qual é feito através de um reticulado de área retangular. Nessa representação cada quadro pode receber o depósito de feromônios de diferentes tipos.

O conhecimento do mapa de outros VNTs ocorre através de mensagens *broadcast* enviadas pelos mesmos indicando o depósito de feromônio. Quando um VNT dentro do alcance de comunicação recebe uma mensagem de depósito de feromônio o mesmo realiza a atualização de seu mapa interno com a nova informação recebida.

5.4.3 Agente de Enxame

O agente de enxame é responsável pelo depósito de feromônio e deslocamento do VNT.

O VNT se move de acordo com a presença de feromônio encontrado no mapa. Primeiramente ele sente o feromônio dos quadros localizados a um raio específico de sua posição atual. Um feromônio sensível ao veículo encontrado neste raio de distância limita a movimentação futura do VNT. Esse feromônio age como uma repelente e cria uma área em que o veículo não irá se mover em seu próximo passo.

Se em seu raio de distância não existe nenhuma posição livre de feromônio para seguir, o veículo escolhe aquela com a menor quantidade do mesmo.

5.4.4 Funcionamento

A figura 5.2 mostra a representação em forma de reticulado de maneira abstrata, onde dois veículos, VNT 1 e VNT 2, estão depositando feromônio sobre o mapa do VNT 0. É importante notar que feromônios do próprio VNT 0 já se encontram depositados no mapa. Os feromônios citados nessa representação servem para orientar a movimentação

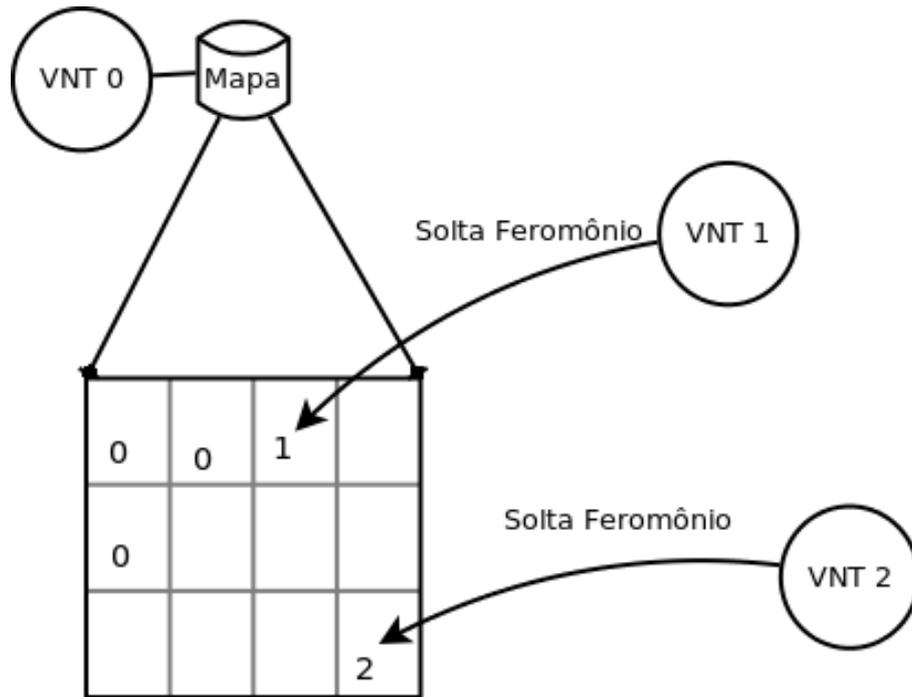


Figura 5.2: Interação entre os veículos no sistema de feromônios.

do VNT 0, que tentará evitar as posições com feromônio dos veículos 1 e 2. Funcionando de forma análoga existe uma representação de mapa em cada um dos outros veículos.

O funcionamento geral dessa solução parte do princípio que, ao se movimentar, os veículos irão sentir o feromônio dos quadros vizinhos. De acordo com o feromônio sentido o veículo irá escolher a direção de movimentação. Essa escolha privilegia os quadros com menor quantidade de feromônio.

Um veículo inicia em uma posição qualquer do mapa, este mapa se encontra sem qualquer feromônio depositado, em seguida ele observa os quadros vizinhos para escolher o próximo quadro a se movimentar. A escolha desse próximo quadro é feita de acordo com a quantidade de feromônio destes quadros vizinhos. Primeiramente ele escolhe os quadros vizinhos sem feromônio e toma aleatoriamente um destes como destino. Se não existe qualquer quadro vizinho sem feromônio ele escolhe o quadro com menor quantidade de feromônio. Em seguida o VNT se move para o quadro escolhido e durante sua movimentação solta feromônio no quadro em que se encontra no momento. Quando o quadro escolhido for atingido ele recomeça o processo de escolha do próximo quadro destino para movimentação.

Tomando como exemplo a figura 5.2, pode-se ver que os veículos VNT 1 e VNT 2 estão deixando seu feromônio no mapa do VNT 0 na posição em que se encontram. O valor "0" indica que uma posição do mapa possui feromônio do VNT 0. Logo o VNT 0 andou pelas primeiras posições do mapa e agora se encontra em uma posição de encontro com o feromônio dos veículos VNT 1 e VNT 2, neste ponto o veículo irá escolher como quadro destino um quadro que não inclua os feromônios com valor "0", "1" ou "2", ou seja, uma posição sem feromônio depositado. É importante notar que os feromônios depositados irão decair com o tempo e posições anteriormente não escolhidas poderão, novamente, ser escolhidas.

6 IMPLEMENTAÇÃO

Primeiramente foi implementada uma plataforma de base, que é uma camada sobre a qual foram implementados os sistemas de mercado e de feromônios. Nas próximas seções serão descritos em detalhes cada uma dessas implementações. Na seção 6.1 será explicada a plataforma de base, a seguir na seção 6.2 será descrito o sistema de mercado e, por último, a seção 6.3 apresentará a implementação do sistema de feromônios.

É importante notar que o sistema de feromônios utilizou sua abordagem apenas para resolver a movimentação ao longo do mapa, enquanto que a distribuição de alvos é feita de forma aleatória, ou seja, ao primeiro veículo que responder à comunicação. Já o sistema de mercado utilizou a abordagem de leilões apenas para resolver a distribuição de alvos, enquanto que a sua trajetória é elegida de forma aleatória.

6.1 Plataforma de Base

A plataforma de base tem por objetivo principal a criação de classes que possam dar suporte a criação posterior dos SMAs. Esta parte da implementação funciona apenas de maneira local, e tem como função oferecer um sistema capaz de manter registro das capacidades do veículo, além de executar e agendar tarefas locais. Qualquer cooperação ou comunicação entre agentes pode usar este sistema para despachar as tarefas que devem ser executadas pelo próprio agente.

Podemos dividir a implementação em conceitos e agentes. Os conceitos são as classes usadas pelos agentes para execução do sistema. Os conceitos podem ser divididos em tarefas, habilidades e sistema de habilidades. Os agentes criados são o planejador, o agendador e o operador. A figura 6.1 mostra esta organização através de um organograma. Nas seções que seguem serão explicados cada um dos conceitos desse sistema de forma mais detalhada.

6.1.1 Tarefa

Quando um VNT encontra um alvo, ele se dirige até a posição do alvo e inicia um procedimento que resolve o tipo de alvo encontrado. Nesse contexto uma tarefa define a ação que será executada para tentar resolver o alvo encontrado. Para realizar esta ação a definição deve utilizar alguns estados pré-definidos que foram criados para indicar o estado interno da tarefa e permitir que o agente operador coordene a execução da mesma.

Uma tarefa pode estar em um dos seguintes estados: indefinido, aguardando, pronto,

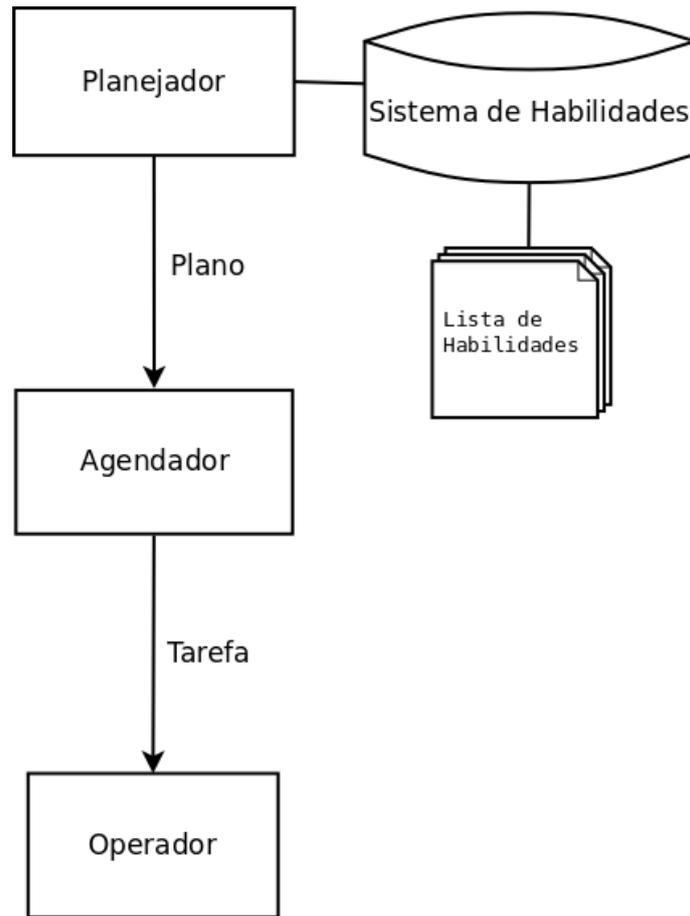


Figura 6.1: Organização abstrata da plataforma de base implementada.

executando, finalizando, finalizado, *zombie*. A troca de estados em uma tarefa depende diretamente de uma função de ação que é definida de acordo com a habilidade pelo veículo. Essa função recebe como parâmetro o estado atual da tarefa e a posição do alvo e deve retornar o próximo estado da tarefa. A função de ação deve ser definida por cada tipo de veículo.

Listagem 6.1: Exemplo de definição de uma função de ação

```

1 Task::State action(float target[2], Task::State state) {
2     switch(state) {
3         case Task::READY:
4             if(initialize_solving_target())
5                 return Task::EXECUTING;
6             break;
7         case Task::EXECUTING:
8             solve_target();
9             if(target_solved())
10                return Task::FINNISHING;
11            return Task::EXECUTING;
12            break;
13         case Task::FINNISHING:
14             if(terminate_solving_target())
15                 return Task::FINNISHED;
16            break;
17     };
18     return Task::UNDEFINED;
  
```

A listagem 6.1 apresenta um exemplo definindo uma função de ação. Esta função recebe os parâmetros *target* e *state*, que são, respectivamente, a posição do alvo e o estado interno da tarefa. O retorno da função deve ser o estado resultante após a execução da ação, ou seja, o próximo estado que a tarefa deve assumir. O *switch* apresentado no código seleciona a ação que deve ser executada de acordo com o estado interno da tarefa. Caso a tarefa esteja pronta para executar (*Task::READY*) o processo de inicialização da mesma é executado. Se o estado interno for executando (*Task::EXECUTING*) atualiza-se a execução da tarefa periodicamente, quando for determinado que a ação foi finalizada retorna-se o estado finalizando através da função de ação. Por último, quando o estado interno da tarefa for finalizando (*Task::FINNISHING*) o procedimento de finalização da ação é realizado e a tarefa é terminada, ou seja, retorna-se finalizado (*Task::FINNISHED*) como sendo o próximo estado.

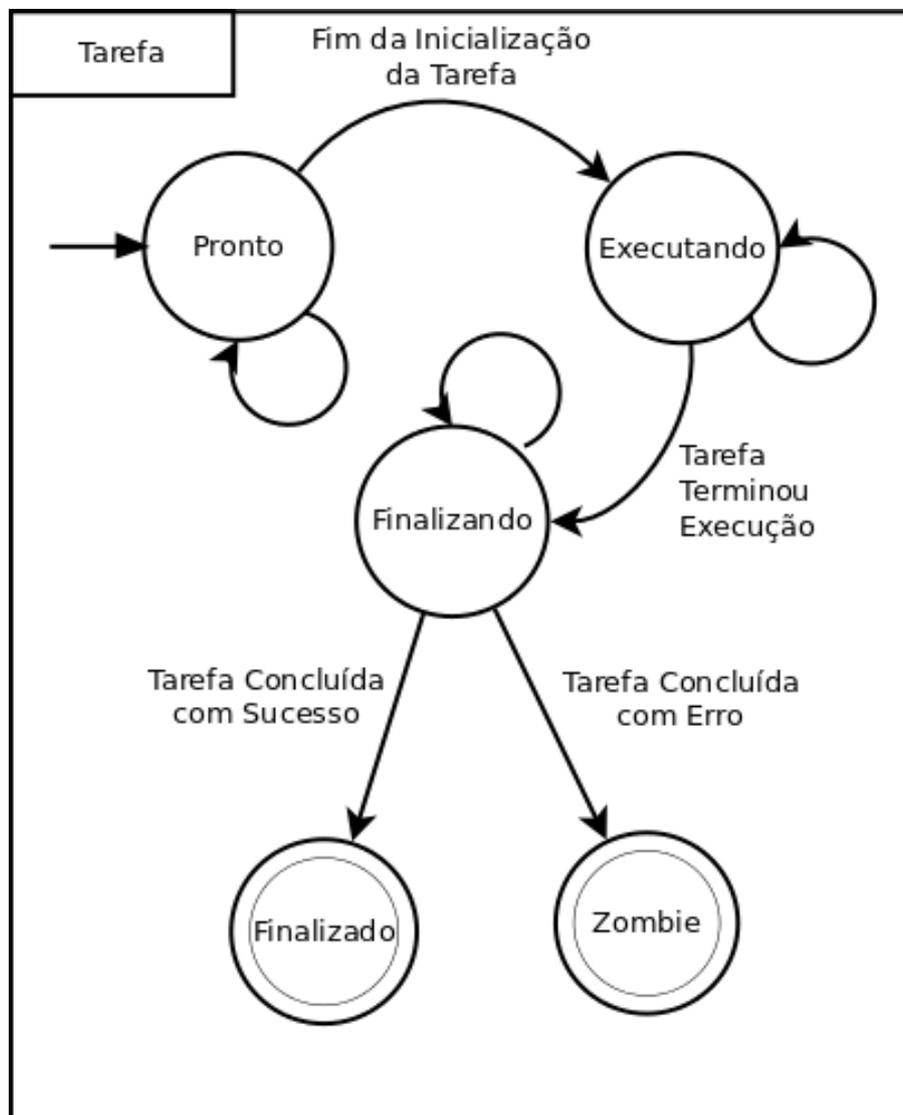


Figura 6.2: Transição entre os estados de uma tarefa.

Sintetizando o exemplo anterior, quando uma tarefa está pronta para ser executada ela passa para o estado pronto comandada pelo agendador, em seguida o operador recebe a

tarefa e chama a função de ação, a qual realiza o processo de inicialização e passa o estado da tarefa para executando, durante o estado de execução a função de ação tenta resolver o tipo de alvo encontrado. Assim que o alvo for resolvido o estado da tarefa é mudado para finalizando, nesse estado a função de ação deve realizar as últimas configurações antes de dar a tarefa por finalizada. Por último a tarefa passa para o estado finalizado. Caso algum erro ocorra durante algum destes processos a tarefa será finalizada mudando, em seguida, seu estado para zombie. A figura 6.2 mostra esta mudança de estados de uma maneira mais clara.

6.1.2 Habilidade

A habilidade básica possui um identificador único e é capaz de verificar se um alvo surgiu em sua área de vigilância. Diversos tipos de habilidades podem ser programadas herdando este conceito de habilidade e, de fato, foram implementadas as habilidades descritas na tabela 6.1.

Habilidade	Atributos
Dinâmica	Identificador próprio, verificar alvo e ação.
Mercado	Identificador próprio, verificar alvo, ação, utilidade e custo.

Tabela 6.1: Habilidades desenvolvidas sobre a habilidade base.

Uma habilidade dinâmica é especificada através dos atributos de base e de uma ação. A ação é uma função com o objetivo de especificar o que uma tarefa criada por esta habilidade deve executar, esse tipo de função e seu funcionamento já foi descrito na seção 6.1.1.

Uma habilidade de mercado é descrita por seus atributos de base, uma ação (análoga a ação descrita pela habilidade dinâmica), uma função de utilidade e uma de custo. As funções de utilidade recebem como parâmetro a posição do alvo a ser tratado e devem retornar um valor que represente a utilidade e custo daquele alvo. Esta habilidade é utilizada apenas no sistema de mercado.

6.1.3 Sistema de Habilidades

O sistema de habilidades permite manter um registro das tarefas que o veículo é capaz de realizar.

É preciso que cada veículo registre suas habilidades através deste sistema. Para que uma habilidade possa ser registrada, todos seus atributos devem ser especificados (identificadores e funções adicionais).

Listagem 6.2: Registro de uma habilidade dinâmica

```

1 Task::State action(float target[2], Task::State state) {
2     [...];
3     return Task::FINNISHING;
4 }
5
6 bool verify_target(float target[2]) {
7     [...];
8     return false;
9 }

```

```

10
11 Ability *ability = new DynamicAbility<float[2]>(0, &action, &
    verify_target);

```

Um exemplo de código descrevendo uma habilidade dinâmica genérica pode ser visto na listagem 6.2, onde *action* é a definição da ação, *verify_target* é a função com a capacidade de identificar alvos e *ability* é a instanciação de uma habilidade dinâmica consistindo das funções citadas e reconhecida pelo identificador "0".

6.1.4 Planejador

O planejador é o responsável por criar um plano de execução para as tarefas locais e alocá-lo para um agendador. Esta classe é usada principalmente como uma classe abstrata para posterior implementação em sistemas que tenham suas decisões de planejamento baseadas na comunicação e troca de informação entre veículos.

A máquina de estados que descreve este sistema pode ser vista na figura 6.3.

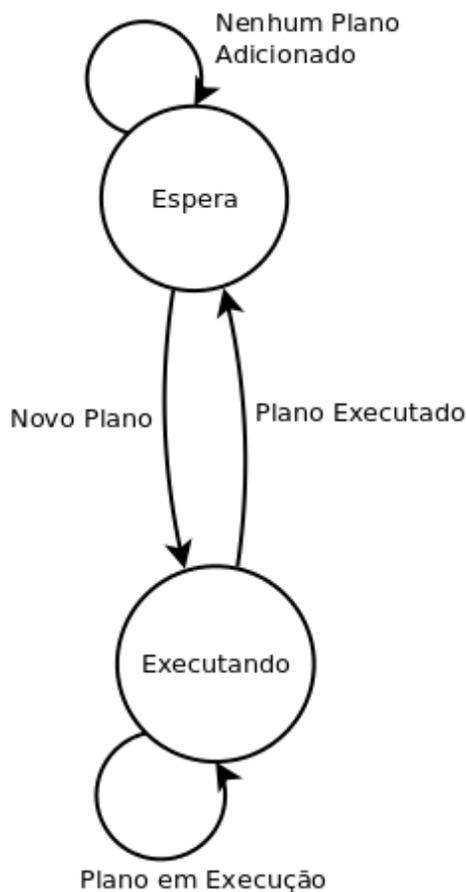


Figura 6.3: Máquina de estados do planejador.

6.1.5 Agendador

O agente responsável por alocar cada tipo de tarefa para um operador é chamado de agendador. Nesse contexto, o agendador garante a execução cronológica das tarefas, de acordo com a ordem em que foram inseridas pelo planejador.

A agendador recebe um plano do planejador e programa as tarefas para os operadores específicos.

6.1.6 Operador

O operador é o agente responsável por executar uma tarefa. O operador recebe do agendador uma tarefa em estado pronto para execução, a qual é imediatamente inicializada. Após a inicialização uma tarefa pode pular diretamente para o estado finalizando (o que ocorre geralmente em caso de erro no processo de inicialização) ou irá para o estado executando. No caso de a tarefa passar para o estado executando o operador continua executando a tarefa até que seu estado mude. Quando a tarefa vai para o estado finalizando o operador realiza a execução do processo de finalização da tarefa e avisa o agendador que aquela tarefa terminou. Mais sobre as trocas de estados de uma tarefa pode ser visto na seção 6.1.1.

Visto de uma forma mais abstrata, o operador é o agente capaz de manipular e entender os estados internos de uma tarefa e, através desta faculdade, o mesmo persegue seu único objetivo, de executar a tarefa que lhe foi dada.

6.2 Sistema de Mercado

O primeiro SMA implementado foi baseado no sistema de mercado, o qual tem por objetivo criar um sistema de leilão para decidir o veículo que irá resolver um alvo encontrado (como explicado na seção 5.3). Este sistema possui os seguintes agentes: leiloeiro, consumidor, fornecedor e comunicação. Este sistema explora, além dos conceitos apresentados na plataforma de base, adicionalmente os conceitos de sessão e contrato.

A seguir será explicado em maiores detalhes este sistema. As seções 6.2.1 e 6.2.2 irão descrever os conceitos de contrato e sessão respectivamente. Já as seções 6.2.3, 6.2.4, 6.2.5 e 6.2.6 irão apresentar os agentes desenvolvidos e seus detalhes.

6.2.1 Contrato

O contrato é o conceito responsável por representar um acordo entre um consumidor e um fornecedor. Este contrato serve para que o consumidor possa monitorar a resolução da tarefa assim como para que ambos os envolvidos neste acordo possam saber com quem firmaram contrato. Um contrato possui um identificador único (em relação ao consumidor).

6.2.2 Sessão

Quando um leilão é iniciado faz-se necessário a criação de um conceito capaz de representar cada nova abertura de leilão realizada. Neste contexto uma sessão permite que diversos leilões sejam realizados durante o mesmo período de tempo. Cada sessão é constituída por um identificador único (em relação ao leiloeiro), um temporizador para definir a duração do leilão e o identificador do contrato para o qual o leilão está sendo realizado.

6.2.3 Comunicação

O sistema de comunicação é utilizado para realizar a comunicação com outros agentes externos ao veículo. Para seu correto funcionamento diversas mensagens MAVLink são definidas, a descrição de cada um dos protocolos utilizados será descrito a seguir:

Leilão de uma Sessão O leiloeiro envia uma mensagem de anúncio de sessão para broadcast a uma certa frequência durante um tempo de duração de uma sessão. Os veículos que recebem o anúncio enviam uma mensagem indicando um lance. O leiloeiro recebe e os lances e envia uma mensagem de *acknowledgement*. Assim que o tempo de duração de uma sessão terminar, o fornecedor vencedor da sessão de leilão é determinado de acordo com o valor do maior lance.

Contrato de Serviço O consumidor cria um novo contrato com um fornecedor indefinido e envia uma mensagem para um leiloeiro definido em código. Esse leiloeiro inicia uma sessão de leilão relacionada ao código do contrato criado pelo consumidor e realiza o protocolo de leilão de uma sessão. Assim que o vencedor é definido, o leiloeiro envia uma mensagem ao consumidor indicando o endereço do fornecedor escolhido. Em seguida o consumidor envia uma mensagem ao fornecedor com a descrição do novo contrato. O fornecedor guarda o novo contrato, envia uma mensagem de *acknowledgment* e inicia a execução. O consumidor guarda o novo contrato.

Estado do Contrato Periodicamente o consumidor envia uma mensagem ao fornecedor requerendo o estado do contrato firmado. O fornecedor responde com o estado do contrato. Além disso quando o contrato chegar ao estado reconciliado o fornecedor envia uma mensagem ao consumidor avisando do novo estado do contrato. Contratos reconciliados não são mais verificados.

6.2.4 Consumidor

O consumidor é o agente responsável por encontrar novos alvos e avisar o leiloeiro de que uma nova sessão de leilão deve ser criada para o tipo de alvo encontrado. Este agente utiliza a função verificar alvo (definida para cada habilidade de um veículo) como a função capaz de retorna se certo tipo de alvo foi encontrado, o tipo de um alvo é identificado pela habilidade para a qual a função verificar alvo retornou verdadeiro.

A figura 6.4 mostra uma máquina de estados descrevendo o funcionamento do consumidor e seus estados internos.

6.2.5 Fornecedor

O fornecedor possui o objetivo de realizar as tarefas acordadas em um contrato assim como patrulhar certa área quando nenhum alvo foi encontrado. Durante uma sessão de leilão o fornecedor dá um lance que é definido de acordo com as funções utilidade e custo definida na habilidade do tipo de alvo encontrado. Para chegar ao valor de lance do fornecedor o seguinte cálculo é realizado:

$$Beneficio = Utilidade - K \cdot Custo \quad (6.1)$$

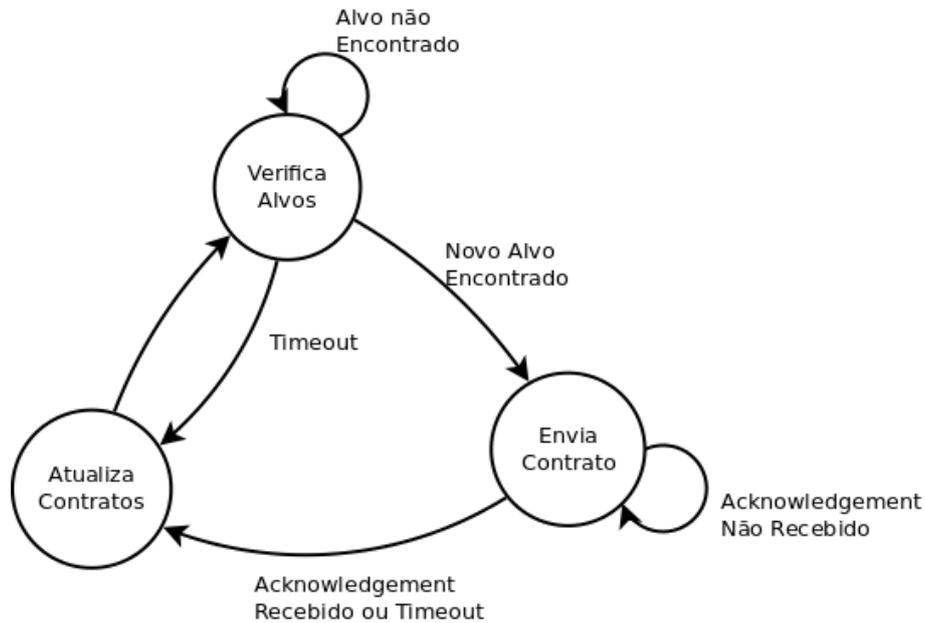


Figura 6.4: Máquina de estados do consumidor.

Onde K é uma constante definida no código de cada veículo.

A figura 6.5 mostra uma máquina de estados descrevendo o funcionamento do fornecedor e seus estados internos.

6.2.6 Leiloeiro

O agente responsável por gerenciar as sessões de leilão e avisar os vencedores é o leiloeiro. Para exercer sua função este agente cria sessões de leilão assim que avisado pelo consumidor, e distribui avisos aos fornecedores próximos para que estes possam dar lances no leilão. Assim que um leilão termina, o leiloeiro define o vencedor e avisa tanto o consumidor quanto o fornecedor do contrato estabelecido entre ambos.

A figura 6.6 mostra a transição entre estados executadas por um leiloeiro.

6.3 Sistema Baseado em Feromônios

O sistema de feromônios possui por objetivo evitar com que um VNT patrulhando uma área avance para uma área patrulhada por outro VNT. Para isso cada veículo possui uma representação do ambiente através de um mapa que recebe feromônios e os evapora conforme o tempo passa. A representação que cada veículo possui do mapa é o limite de sua área de patrulhamento, quando um veículo encontra um feromônio de outro veículo com o mesmo sabor de feromônio ele evita se aproximar daquele posição do mapa.

A seção 6.3.1 irá apresentar e explicar o conceito de feromônio. O mapa e a implementação da comunicação inter-agente serão explanados durante as seções 6.3.2 e 6.3.3 respectivamente.

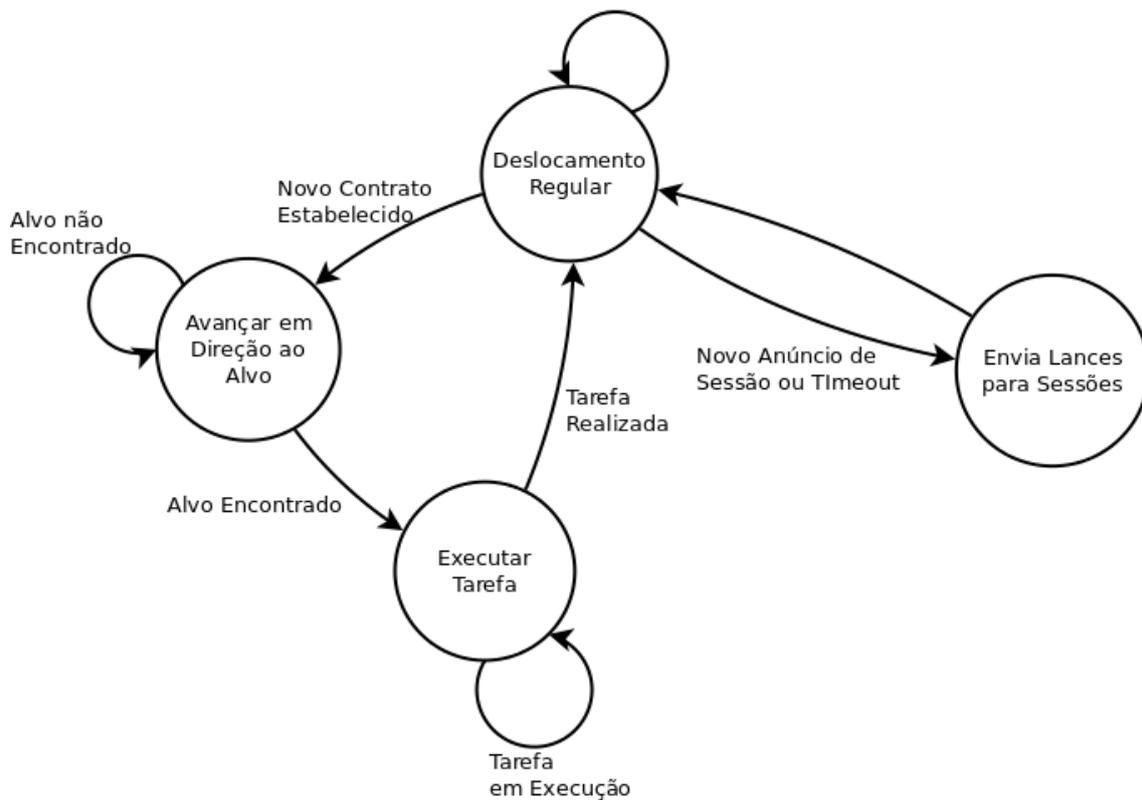


Figura 6.5: Máquina de estados do fornecedor.

6.3.1 Feromônio

O conceito de feromônio é utilizado para representar o meio de comunicação utilizado para evitar a intersecção entre áreas de patrulhamento de diversos VNTs. O sabor de um feromônio é definido pelo id do veículo que o depositou e um inteiro sem sinal que representa o seu tipo. Veículos sentem apenas o cheiro do tipo de feromônio que são capazes de depositar.

6.3.2 Mapa

O mapa é responsável por representar parcialmente o ambiente e dividi-lo em um reticulado de modo que cada posição do reticulado represente uma posição passível de receber feromônio. Além disso o conceito de mapa precisa possuir um sistema de evaporação dos feromônios depositados.

Nesse contexto criou-se um sistema representado por uma matriz de dimensão pré-definida em código. Essa matriz guarda os feromônios depositados pelo próprio veículo assim como feromônios depositados por outros veículos.

O depósito de feromônio pode ser realizado através do próprio mapa ou do sistema de comunicação. O sistema de comunicação recebe uma mensagem do tipo *ADDPHEROMONE* e adiciona o feromônio ao mapa do veículo.



Figura 6.6: Máquina de estados de um leiloeiro.

6.3.3 Comunicação

O agente de comunicação possui por objetivo receber mensagens indicando adição de feromônio e realizar o protocolo para alocar um veículo na resolução de um alvo encontrado. Os protocolos utilizados e a troca de mensagens realizada será descrita a seguir:

Depositar Feromônio Assim que o agente deposita feromônio no mapa ele também envia uma mensagem descrevendo o novo feromônio adicionado para *broadcast*.

Anunciar Alvo Quando um alvo é encontrado e não pode ser executado pelo veículo o protocolo para anunciar alvo é iniciado. Uma mensagem de anúncio de alvo é enviada com uma certa frequência durante um certo período de tempo. Quando um veículo capaz de tratar o alvo recebe a mensagem de anúncio ele responde com uma mensagem requisitando o alvo para tratamento. Quando o veículo que iniciou o protocolo receber esta última mensagem ele aloca o alvo para o veículo especificado e responde com uma mensagem indicando a localização e os detalhes do alvo. Por último o veículo com capacidade de tratar o alvo inicia o processo de tratamento de alvo.

6.3.4 Agente de Enxame

O agente de enxame é responsável por orientar a movimentação do veículo de acordo com os feromônios depositados em seu mapa. Esse tipo de agente possui uma representação de mapa (que é o próprio mapa do veículo, acessado também pelo agente de comunicação). Através destes conceitos esse veículo se movimenta para os pontos com

menor quantidade de feromônio dentro do mapa, ao encontrar um alvo que ele mesmo não possui a capacidade de resolver, o protocolo para alocação de alvo (explicado na seção 6.3.3) é iniciado e o veículo entra em modo de *loiter*. Assim que o protocolo terminar o VNT sai do modo *loiter* para o modo *auto* novamente e volta a patrulhar o mapa.

Os modos de um VNT são implementados pela plataforma APM. O modo *loiter* faz com que o VNT fique estagnado em uma posição, no caso de aeronaves de asa fixa o modo *loiter* significa que o VANT irá andar em trajetória circular em relação a um ponto específico. O modo *auto* faz com que VNT siga pontos de missão especificados de maneira automática, é também dentro deste modo que o sistema de feromônios é executado.

A figura 6.7 mostra a máquina de estados que representa o processo de execução explicado.

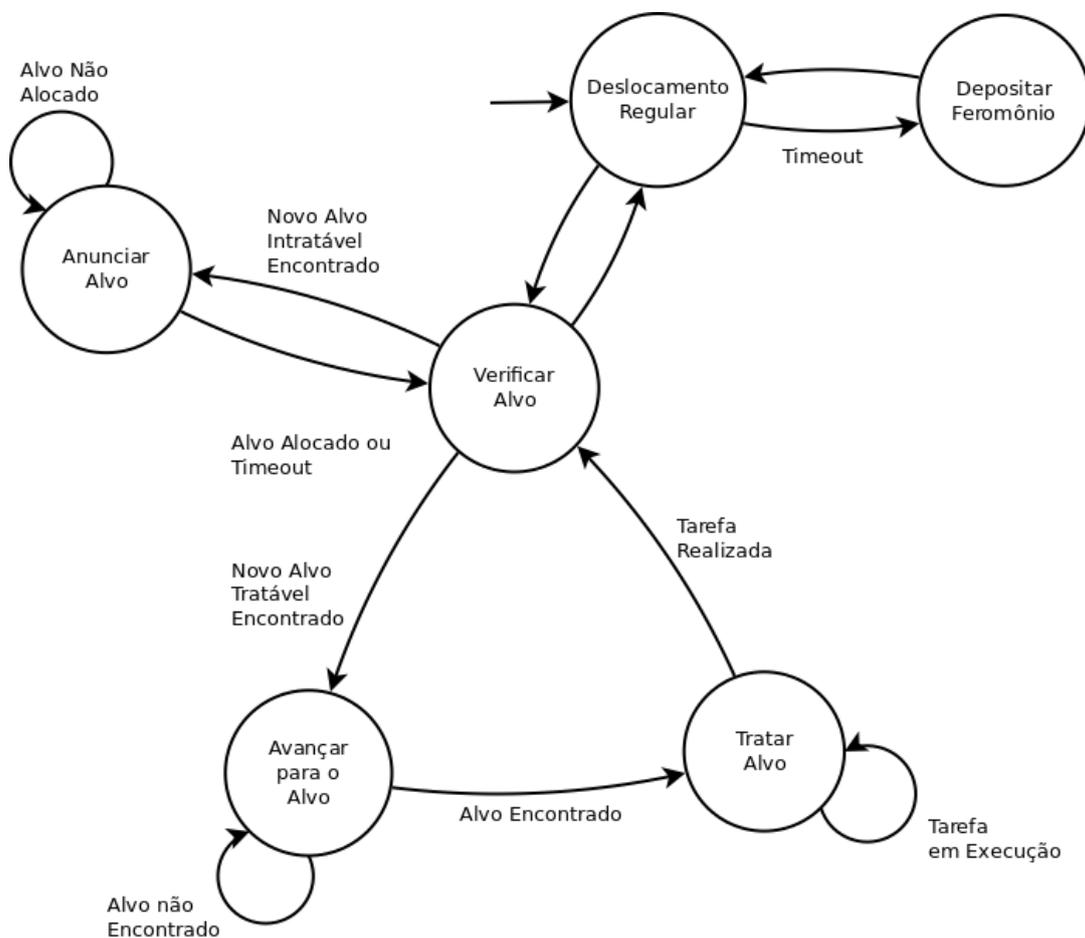


Figura 6.7: Máquina de estados do agente de enxame.

7 EXPERIMENTOS

Dois tipos de experimentos foram realizados: o primeiro tenta mostrar a cobertura de área e o segundo tem o objetivo demonstrar o sistema de distribuição de alvos. Nesse contexto foram configurados alguns alvos artificiais dentro de uma área limite. Maiores detalhes sobre os testes serão apresentados nas seções que seguem, a seção 7.1 apresenta as configurações gerais efetuadas para a realização de ambos experimentos, enquanto que as seções 7.3 e 7.2 apresentam as configurações específicas de cada experimento, assim como os resultados obtidos e uma análise dos mesmos.

7.1 Configurações Gerais

Considerando as aplicações para as quais estes sistema foram propostos - por exemplo a agricultura de precisão e sistemas de suporte para resgate e salvamento em casos de desastre - é importante a realização de testes com áreas de patrulhamento de dimensões realísticas, ou seja, que representem uma área na qual estes tipos de sistemas costumam ser utilizados. Sendo assim, escolheu-se uma área de patrulhamento com $86km^2$. Isso possibilitou também que os experimentos proporcionassem concorrência entre área patrulhada e, ao mesmo tempo, uma extensão de área que possibilitasse aos veículos encontrarem com grande frequência áreas de patrulhamento ainda não encontradas por outro veículos, como de fato pode ocorrer numa aplicação real. Ao longo desta área foram dispostos uma série de VNTs, que são especificados ao início da seção de cada tipo de experimento. A figura 7.1 mostra a área de patrulhamento escolhida.

A partir de agora iremos nos referir aos números identificadores de cada veículo, dessa forma referenciamos estes dados através da tabela 7.1.

Veículo	Latitude	Lon
0	-50.804814	-30.008262
1	-50.744814	-30.008262
2	-50.804814	-30.048262
3	-50.744814	-30.008262

Tabela 7.1: Referência contendo o identificador numérico de cada VNT usado nos experimentos.

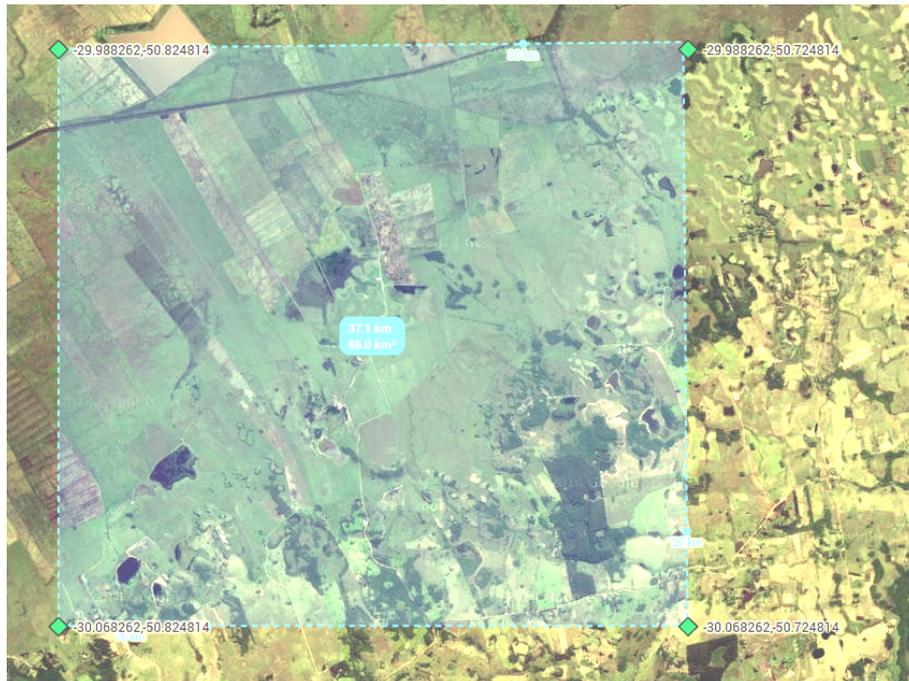


Figura 7.1: Área de patrulhamento.

7.1.1 Sistema de Mercado

Especificamente para o sistema de mercado foi criada uma classe responsável por armazenar a relação entre os sensores e a maneira como os mesmos influenciam no custo e utilidade de uma habilidade.

A tabela 7.2 mostra os sensores registrados e a proporção com que eles influenciam no valor de benefício. Esses valores de proporção multiplicam o valor de benefício de uma habilidade fazendo com que a mesma assuma apenas uma porcentagem de seu valor original. Os sensores dos quadricópteros são os únicos com relevância neste contexto pois são estes os veículos que subirão lances durante os experimentos. O sensor utilizado é um sensor de propósito geral, criado apenas para exemplificar um método de definição de preços no sistema de mercado.

Veículo	Sensor	Proporção de Utilidade	Proporção de Custo
0	Propósito Geral	100%	96%
1	Propósito Geral	100%	94%
2	Propósito Geral	100%	92%

Tabela 7.2: Proporção de utilidade dos sensores presentes em cada veículo.

A função de utilidade para o sistema de mercado foi definida através de um valor constante de 10000 multiplicado pelo valor de proporção de utilidade do sensor. Já a função de custo foi definido como a distância em relação ao alvo multiplicada pelo valor de proporção de custo do sensor.

7.1.2 Sistema Baseado em Feromônios

O reticulado do sistema de feromônio foi configurado de modo que cada retângulo medisse $200m \times 250m$, atingindo uma área de $50000m^2$ por quadro. O decaimento de feromônios do sistema está configurado para $0,01\%$ por turno e roda à uma frequência de $100Hz$. Estes valores foram encontrados explorando-se diferentes valores de variáveis buscando-se uma configuração realística face aos cenários de utilização considerados, ou seja, essa exploração levou em conta a busca de uma área adequada para aplicações voltadas a resgate em ambientes de desastre, assim como aplicações de agricultura de precisão.

7.2 Cobertura de Área



Figura 7.2: Posição inicial de cada um dos VNTs.

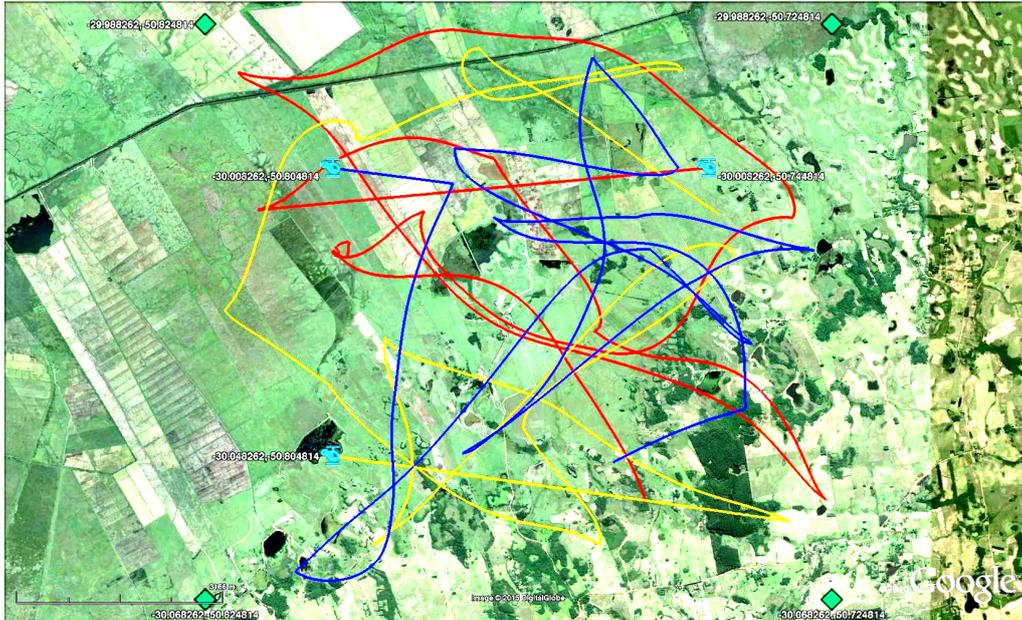
Este experimento possui por objetivo demonstrar a capacidade do sistema de feromônio em cobrir de maneira eficiente certa área de uma mapa. Nesse contexto distribuiu-se 3 quadricópteros pelo mapa de maneira aleatória, como pode ser visto na figura 7.2. Os dois experimentos foram executados pelo período aproximado de $50min$.

O êxito deste experimento deve ser retratado por resultados com uma maior área de cobertura e um baixo nível de redundância na trajetória dos VNTs. O sistema de feromônios será comparado com um sistema em que a trajetória do veículo se dá de maneira aleatória ao longo de um mapa reticulado com as mesmas características daquele encontrado no sistema de feromônios.

7.2.1 Resultados e Análise

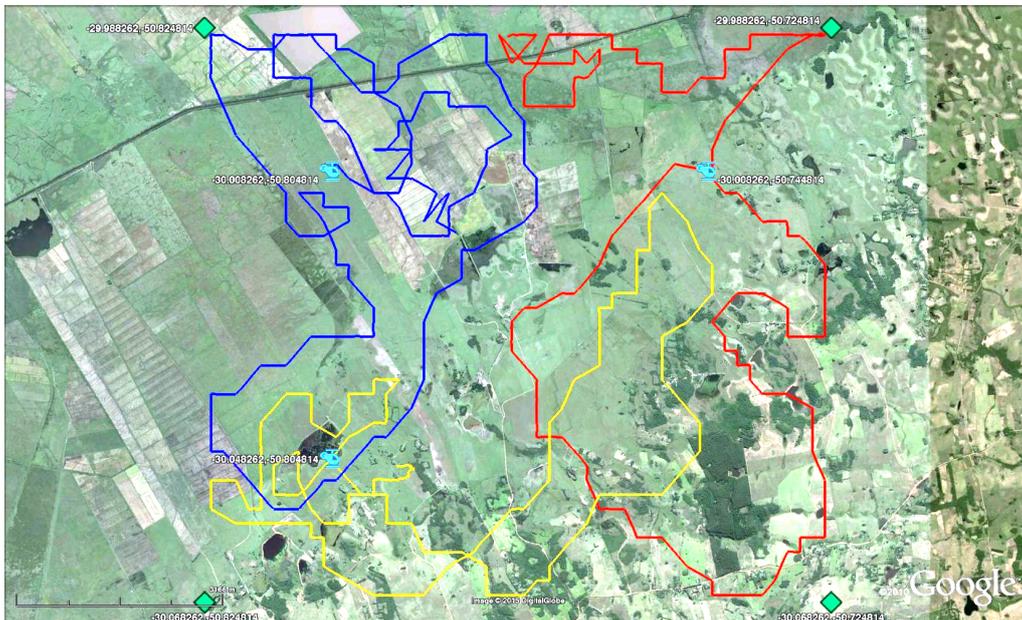
A figura 7.3a mostra os resultados obtidos com o sistema de movimentação aleatória. É possível perceber que houve grande redundância e pequena área de cobertura. É importante notar que este experimento foi realizado com apenas uma instância para cada um dos sistemas.

O resultado obtido com o sistema de feromônios pode ser visto através da figura 7.3b,



(a) Trajetória resultante do sistema aleatório para uma instância do experimento de cobertura de área.

Figura 7.3: Trajetória dos VNTs testados para uma instância do experimento de cobertura de área.



(b) Trajetória resultante do sistema de feromônios para uma instância do experimento de cobertura de área.

Figura 7.3: Trajetória dos VNTs testados para uma instância do experimento de cobertura de área.

a qual mostra que o sistema obteve uma grande área de cobertura, e a redundância nas trajetórias tomadas foram pequenas, especialmente se comparadas com os resultados obtidos pelo sistema aleatório. Dessa forma, os resultados obtidos estão de acordo com os esperados pela implementação e configuração do sistema de feromônios, demonstrando

que o mesmo é capaz de cobrir certa área de um mapa com maior eficiência que um sistema aleatório.

7.3 Distribuição de Alvos

Para demonstrar a capacidade de distribuição de alvos do sistema de mercado iremos compará-lo com a distribuição aleatória feita pelo sistema de feromônios. O ambiente de teste irá incluir 3 quadricópteros e 1 aeronave de asa fixa distribuídos da maneira aleatória, como pode ser visto na figura 7.4. O objetivo deste experimento é que somente o avião encontre alvos e os distribua para um dos quadricópteros dentro de sua área de comunicação. Os dois experimentos foram executados pelo período aproximado de 90min.



Figura 7.4: Posição inicial de cada um dos VNTs.

Com o objetivo de demonstrar as diferenças obtidas com o sistema de distribuição de alvos desenvolvido através do conceito de mercado iremos compará-lo com o sistema de distribuição implementado através do conceito de feromônios. É importante lembrar que o sistema de feromônios implementado faz a distribuição dos alvos de forma aleatória, onde o primeiro veículo a realizar o protocolo de comunicação com sucesso é o responsável por resolver o alvo.

Alvo	Longitude	Latitude
1	-50.784814	-30.018262
2	-50.814814	-30.058262
3	-50.748867	-29.992483
4	-50.814442	-30.001700
5	-50.765690	-30.044802

Tabela 7.3: Lista de alvos artificiais configurados para o experimento de distribuição de alvos.

Com o objetivo de simular o aparecimento de alvos no ambiente alguns alvos artificiais foram configurados, a posição dos alvos em relação a área de patrulhamento pode ser vista na figura 7.5. A tabela 7.3 mostra a localização exata destes alvos.



Figura 7.5: Posição inicial de cada um dos alvos configurados.

Todos os VNTs foram configuradas com uma habilidade de teste. A aeronave de asa fixa foi configurada de forma a possuir somente a capacidade de identificar os alvos encontrados pelo mapa, já os quadricópteros foram configurados apenas com a capacidade de tratar estes alvos. Dessa forma, quando uma aeronave de asa fixa encontra um alvo, ela irá iniciar um leilão em que somente os quadricópteros poderão dar lances. Ao mesmo tempo os quadricópteros não serão capazes de identificar os alvos distribuídos ao longo do mapa.

7.3.1 Resultados e Análise

A apresentação dos resultados para o experimento de distribuição de alvos mostra primeiro os resultados detalhados para apenas uma instância deste experimento. Em seguida, no item 7.3.1.1, são apresentados os resultados médios para um conjunto de 10 instâncias deste mesmo experimento.

A figura 7.6a em conjunto com a tabela 7.4 mostram os resultados obtidos com o sistema de feromônios. É possível perceber que os alvos estão sendo distribuídos de forma aleatória, sem dar preferência aos veículos mais próximo ou qualquer tipo de padrão que possa existir no sistema.

Os resultados obtidos pelo sistema de mercado podem ser vistos através da figura 7.6b, que mostra a trajetória dos VNTs e da tabela 7.5, que apresenta a momento em que cada veículo foi alocado para resolver algum alvo. É possível perceber, como esperávamos, que a distribuição dos alvos é mais eficiente através deste sistema, pois VNT são alocados para resolver alvos onde a distância seja menor e o sensor seja melhor.

Comparando os resultados observados em cada um dos sistemas é possível perceber que o sistema de mercado consegue alocar de maneira mais eficiente seus alvos, isso ocorre devido ao fato que esse sistema é capaz de levar em consideração as qualidades de cada VNT, como o tipo de sensor que possuem, seu estado atual, a distância em relação ao alvo, entre outros que podem ser incluídos utilizando os conceitos de utilidade e custo.

A eficiência dos resultados pode ser percebida por um menor tempo de resolução dos

Alvo	VNT Alocado	Tempo para Descoberta	Tempo de Resolução
1	1	10,8 min	5,7538 min
2	0	69,6 min	5,1517 min
3	1	48,39 min	7,5594 min
4	0	79,13 min	20,8279 min
5	1	23,37 min	9,23 min
Média	-	46,26 min	9,7049 min

Tabela 7.4: Tabela de resultados obtidos pelo sistema de feromônios para uma instância do experimento de distribuição de alvos.

Alvo	VNT Alocado	Tempo para Descoberta	Tempo de Resolução
1	1	37,29 min	5,0806 min
2	1	10,98 min	9,1984 min
3	-	Não encontrado	Não encontrado
4	2	23,65 min	9,8877 min
5	2	4,44 min	7,8236 min
Média	-	19,09 min	7,9976 min

Tabela 7.5: Tabela de resultados obtidos pelo sistema de mercado para uma instância do experimento de distribuição de alvos.

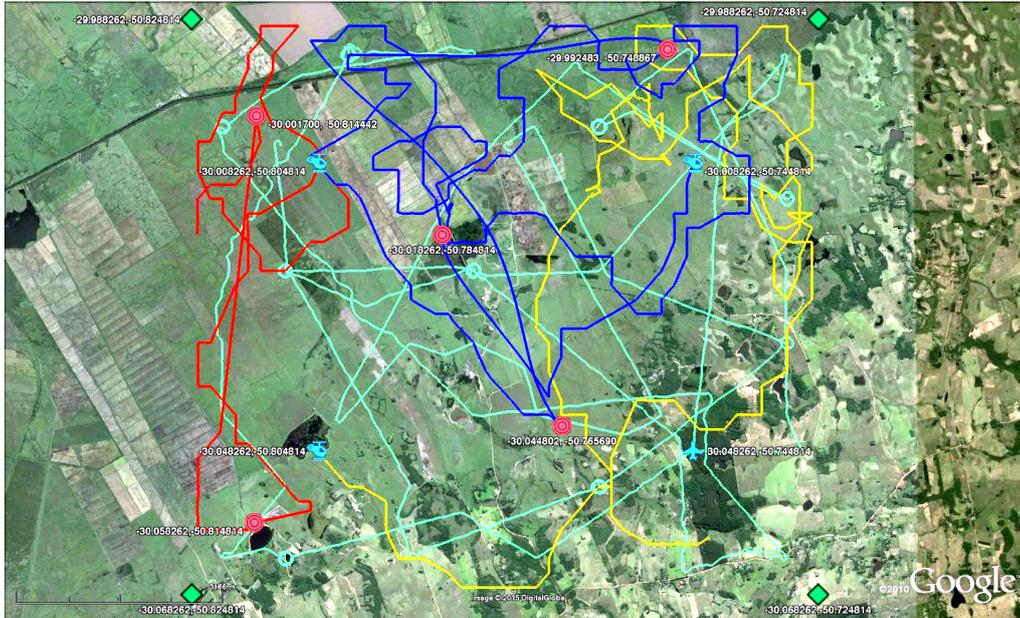
Alvo	Quadróptero 0	Quadróptero 1	Quadróptero 2	VNT Vencedor
1	5256,84	9184,41	Ocupado	1
2	6726,95	7244,88	Ocupado	1
3	Não encontrado	Não encontrado	Não encontrado	-
4	2581,98	Ocupado	3852,06	2
5	5237,7	5987,43	7039,12	2

Tabela 7.6: Tabela de lances com o valor de benefício subido por cada um dos VNT durante as sessões de leilão no sistema de mercado e calculados em uma instância do experimento de distribuição de alvos.

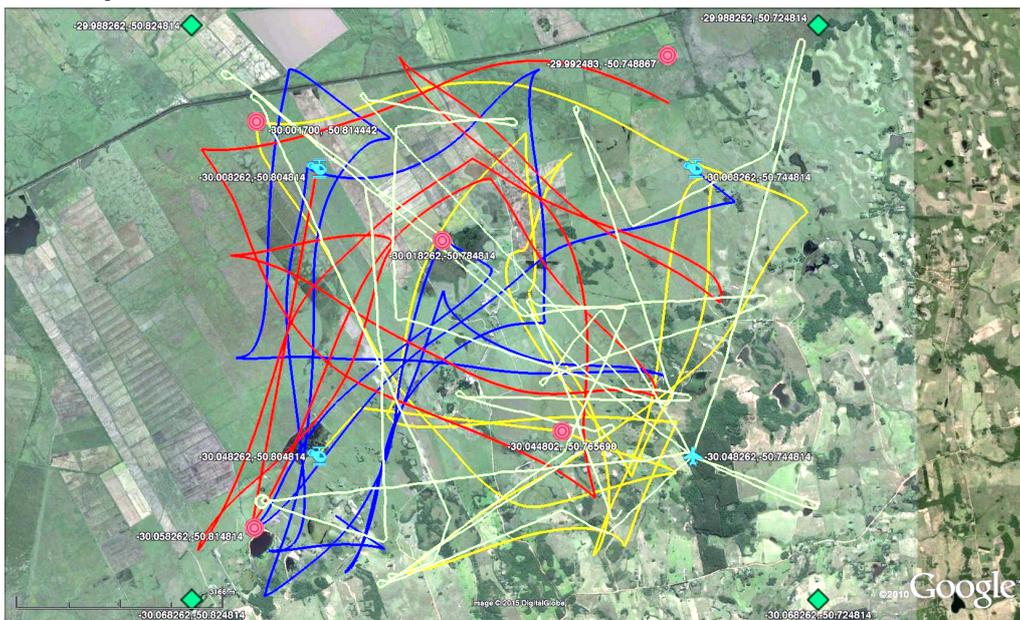
Alvo	Quadróptero 0	Quadróptero 1	Quadróptero 2	VNT Vencedor
1	5962,4	7129,6	6305,8	1
2	9127,8	5113,6	2273,2	0
3	2414,8	5276,8	8655,8	1
4	5198	5248,5	3015,8	0
5	4463,7	3193,6	6625,4	1

Tabela 7.7: Tabela com o valor de benefício para cada um dos alvos alocados pelo sistema de feromônios e calculados em uma instância do experimento de distribuição de alvos.

alvos, por exemplo, observando o tempo de resolução médio dos alvos é possível perceber que o sistema de mercado consegue um ganho médio de $1,7073min$ em relação a distribuição aleatória realizada pelo sistema de feromônios. Essa diferença ocorre visivelmente devido ao fator distância em relação ao alvo, e retrata de maneira clara o que se queria demonstrar nesta seção.



(a) Trajetória resultante do sistema de feromônios para uma instância do experimento de distribuição de alvos.



(b) Trajetória resultante do sistema de mercado para uma instância do experimento de distribuição de alvos.

Figura 7.6: Trajetória dos VNTs testados para uma instância experimento de distribuição de alvos.

A distribuição do tratamento de alvos entre os VNT obteve maior valor benefício através do sistema de mercado. Observando as tabelas 7.6 e 7.7 é possível perceber que no sistema de feromônios os veículos com valor de benefício máximo foram escolhidos em apenas 40% dos alvos encontrados, enquanto o sistema de mercado sempre escolhe o VNT com maior benefício para o alvo a ser tratado.

É importante notar que o sistema de feromônio permitiu cobrir com maior eficiência a área especificada do mapa, tendo influenciado inclusive no número de alvos encontrados.

Enquanto o sistema de mercado foi capaz de encontrar apenas 4 alvos o sistema baseado em feromônios encontrou todos alvos distribuídos pelo mapa. Observa-se, portanto, um *trade-off* entre eficiência na área de cobertura e alocação dos alvos.

7.3.1.1 Tempo de Resolução para um Conjunto de Testes

A tabela 7.8 mostra um gráfico dos tempos de resolução médios obtidos para um conjunto de cinco instâncias do mesmo experimento de distribuição de alvos. A tabela mostra que os resultados médios para o sistema de mercado foram melhores que os obtidos para o sistema de feromônios. Estes resultados nos permitem concluir que os resultados obtidos demonstram que o sistema de mercado consegue distribuir de maneira mais eficiente os alvos encontrados.

Teste	Sistema Baseado em Feromônios	VNT Sistema de Mercado
1	9,7049 min	7,9976 min
2	12,1435 min	7,8245 min
3	10,764 min	11,2422 min
4	9,5674 min	8,4367 min
5	10,0164 min	7,9501 min
6	10,24 min	8,8893 min
7	11,704 min	9,7336 min
8	10,7293 min	9,3644 min
9	9,5487 min	8,9734 min
10	9,4334 min	8,2769 min
Média	10,3852 min	8,869 min

Tabela 7.8: Tabela informando o tempo de resolução médio para um conjunto de cinco instâncias do experimento de distribuição de alvos.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 Conclusão

O presente trabalho teve por objetivo a criação e implementação de uma solução para o problema de alocação e distribuição do tratamento de alvos em um ambiente dinâmico. Neste contexto duas soluções foram propostas inicialmente, cada qual baseada em uma abordagem diferente.

A primeira solução proposta foi um sistema baseado em uma abordagem de mercado. Nesse sistema a distribuição dos alvos foi resolvida através de sessões de leilões onde os veículos capazes de tratar aquele alvo subiam lances para o sistema, e o vencedor ficava responsável por resolver o alvo encontrado. A movimentação foi implementada de forma aleatória, enquanto a distribuição dos alvos foi realizada através de leilão. Os resultados obtidos mostraram que, a respeito da distribuição de alvos, o sistema de mercado conseguiu melhores tempos de resolução médio, tornando-se a solução mais viável para o problema de distribuição de alvos.

A segunda solução proposta foi um sistema baseado em uma abordagem de mapas de feromônios. Este sistema foi implementado para o sistema de movimentação de modo que cada VNT evitasse andar por caminhos percorridos por outros VNTs de mesmo tipo. O sistema de feromônios teve seu foco voltado para resolver o problema de cobrir eficientemente uma área do mapa enquanto a distribuição de alvos foi realizada aleatoriamente. Os resultados obtidos com o sistema de feromônios demonstraram a eficiência do mesmo em cobrir uma área maior quando comparado com um sistema de movimentação aleatória.

Considerando as soluções propostas e os experimentos realizados, é possível classificar o resultado dos experimentos como satisfatórios, demonstrando que, para trabalhos futuros, a junção das propostas desenvolvidas provavelmente chegaria a resultados capazes de resolver o problema apresentado de maneira completa.

8.2 Trabalhos Futuros

A abordagem de distribuição de alvos do sistema de mercado complementa de maneira exata a abordagem de movimentação do sistema de feromônios, de modo que um trabalho futuro poderia contar de implementar os dois de forma conjunta e obter o benefício de ambas abordagens. Os resultados obtidos demonstraram que este tipo de implementação pode tirar maior proveito das soluções propostas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BRATMAN, M. E.; ISRAEL, D. J.; POLLACK, M. E. Plans and resource-bounded practical reasoning. **Computational intelligence**, [S.l.], v.4, n.3, p.349–355, 1988.
- BROOKS, R. New approaches to robotics. **Science**, [S.l.], v.253, n.5025, p.1227–1232, 1991.
- BURGARD, W. et al. Collaborative multi-robot exploration. In: ROBOTICS AND AUTOMATION, 2000. PROCEEDINGS. ICRA'00. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2000. v.1, p.476–481.
- CLARKE, E. H. Multipart pricing of public goods. **Public choice**, [S.l.], v.11, n.1, p.17–33, 1971.
- DASGUPTA, P. A multiagent swarming system for distributed automatic target recognition using unmanned aerial vehicles. **Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.38, n.3, p.549–563, 2008.
- DAVIS, R.; SMITH, R. G. Negotiation as a metaphor for distributed problem solving. **Artificial intelligence**, [S.l.], v.20, n.1, p.63–109, 1983.
- FREITAS, E. Pignaton de. **Cooperative Context-Aware Setup and Performance of Surveillance Missions Using Static and Mobile Wireless Sensor Networks**. 2011. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Halmstad University.
- GERKEY, B. P.; MATARIC, M. J. Sold!: auction methods for multirobot coordination. **Robotics and Automation, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.18, n.5, p.758–768, 2002.
- GIRAUD, G. Strategic market games: an introduction. **Journal of Mathematical Economics**, [S.l.], v.39, n.5, p.355–375, 2003.
- GRASSÉ, P.-P. **Les Insectes et leur univers**. [S.l.]: Université, 1949. n.22.
- GRASSÉ, P.-P. La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *Belligositermes natalensis* et *Cubitermes* sp. la théorie de la stigmergie: essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. **Insectes sociaux**, [S.l.], v.6, n.1, p.41–80, 1959.
- GROVES, T. Incentives in teams. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, [S.l.], p.617–631, 1973.
- HÖLLDOBLER, B. **The ants**. [S.l.]: Harvard University Press, 1990.

- HOLT, C. A.; ROTH, A. E. The Nash equilibrium: a perspective. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [S.l.], v.101, n.12, p.3999–4002, 2004.
- HORLING, B.; LESSER, V. A survey of multi-agent organizational paradigms. **The Knowledge Engineering Review**, [S.l.], v.19, n.4, p.281–316, 2004.
- JENNINGS, N. R.; SYCARA, K.; WOOLDRIDGE, M. A roadmap of agent research and development. **Autonomous agents and multi-agent systems**, [S.l.], v.1, n.1, p.7–38, 1998.
- JULIÁ, M.; GIL, A.; REINOSO, O. A comparison of path planning strategies for autonomous exploration and mapping of unknown environments. **Autonomous Robots**, [S.l.], v.33, n.4, p.427–444, 2012.
- KOVACINA, M. A. et al. Multi-agent control algorithms for chemical cloud detection and mapping using unmanned air vehicles. In: INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 2002. IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2002. v.3, p.2782–2788.
- KRAUS, S.; WILKENFELD, J.; ZLOTKIN, G. Multiagent negotiation under time constraints. **Artificial intelligence**, [S.l.], v.75, n.2, p.297–345, 1995.
- KRISHNA, V. **Auction Theory**. [S.l.]: Academic press, 2002. 9p.
- MARSHALL, A. **Principles of Economics**: an introductory volume, eight edition. [S.l.]: London: The Macmillan Press.(First edition published 1890), 1920.
- MATHEWS, N. et al. Establishing spatially targeted communication in a heterogeneous robot swarm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTONOMOUS AGENTS AND MULTIAGENT SYSTEMS: VOLUME 1-VOLUME 1, 9. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2010. p.939–946.
- MCAFEE, R. P.; MCMILLAN, J. Auctions and bidding. **Journal of economic literature**, [S.l.], p.699–738, 1987.
- MEIER, L. **QGroundControl**. 2015.
- MICHAEL CARPENTER BILL BONNEY, S. D. **APM Planner 2.0**. 2015.
- MILLER, C. et al. A playbook approach to variable autonomy control: application for control of multiple, heterogeneous unmanned air vehicles. In: FORUM 60, THE ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN HELICOPTER SOCIETY. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2004. p.7–10.
- OSBORNE, M. J.; RUBINSTEIN, A. **A course in game theory**. [S.l.]: MIT press, 1994.
- PARUNAK, H. V. D. "Go to the ant": engineering principles from natural multi-agent systems. **Annals of Operations Research**, [S.l.], v.75, p.69–101, 1997.
- PARUNAK, H. V. D.; BRUECKNER, S. A.; SAUTER, J. Digital pheromones for coordination of unmanned vehicles. In: **Environments for Multi-Agent Systems**. [S.l.]: Springer, 2005. p.246–263.

- PARUNAK, H. V. D. et al. Real-time agent characterization and prediction. In: AUTONOMOUS AGENTS AND MULTIAGENT SYSTEMS, 6. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2007. p.278.
- SAUTER, J. A. et al. Performance of digital pheromones for swarming vehicle control. In: AUTONOMOUS AGENTS AND MULTIAGENT SYSTEMS. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2005. p.903–910.
- SIMON, H. A. **Models of man: social and rational; mathematical essays on rational human behavior in society setting.** [S.l.]: New York: Wiley, 1957.
- SUJIT, P.; SINHA, A.; GHOSE, D. Multiple UAV task allocation using negotiation. In: AUTONOMOUS AGENTS AND MULTIAGENT SYSTEMS. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2006. p.471–478.
- SYCARA, K. P. Negotiation planning: an ai approach. **European Journal of Operational Research**, [S.l.], v.46, n.2, p.216–234, 1990.
- VICKREY, W. Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders. **The Journal of finance**, [S.l.], v.16, n.1, p.8–37, 1961.
- VOKŘÍNEK, J.; NOVÁK, P.; KOMENDA, A. Ground tactical mission support by multi-agent control of UAV operations. In: **Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing**. [S.l.]: Springer, 2011. p.225–234.
- WALSH, W. E.; WELLMAN, M. P. A market protocol for decentralized task allocation. In: MULTI AGENT SYSTEMS, 1998. PROCEEDINGS. INTERNATIONAL CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 1998. p.325–332.
- WANYAMA, T.; HOMAYOUN FAR, B. A protocol for multi-agent negotiation in a group-choice decision making process. **Journal of Network and Computer Applications**, [S.l.], v.30, n.3, p.1173–1195, 2007.
- WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R. et al. Intelligent agents: theory and practice. **Knowledge engineering review**, [S.l.], v.10, n.2, p.115–152, 1995.
- ZLOT, R. et al. Multi-robot exploration controlled by a market economy. , [S.l.], 2002.
- ZLOT, R.; STENTZ, A. Market-based multirobot coordination for complex tasks. **The International Journal of Robotics Research**, [S.l.], v.25, n.1, p.73–101, 2006.

Referência

Apêndices

APÊNDICE A ARTIGO TRABALHO DE GRADUAÇÃO 1

A.1 Abstract

This work try to solve the problem of coordinating multiple unmanned vehicle systems. The presented approach is based in solving missions, e.g. solving a group of global tasks. Then we propose two solutions based on multi-agent systems. The first is a market based solution and the second uses artificial pheromones.

A.2 Resumo

O presente trabalho oferece uma resolução ao problema de coordenação em sistemas constituídos por múltiplos Veículo Não Tripulado. A abordagem apresentada do problema é baseada em missões, que são conjuntos de tarefas globais. Nesse contexto propomos duas soluções baseadas em Sistema Multi-Agente. A primeira solução é baseada no paradigma de mercado e a segunda é baseado em feromônios artificiais.

A.3 Introdução

Por anos veículos não tripulados autônomos têm sido utilizados na realização de missões em diversas áreas. Organizações de inteligência e militares tem utilizado veículos aéreos não tripulados pra localizar, estimar e atacar alvos que se encontram a quilômetros de distância da estação de controle terrestre. Sistemas que envolvem agricultura de precisão utilizam veículos não tripulados para monitorar e estimar parâmetros do ambiente. Além disso, atualmente diversas missões táticas, como missões de busca e resgate em ambientes de desastre, missões militares em ambientes montanhosos, urbanos, aéreos ou subaquáticos se valem da utilização de robôs operados remotamente, como é o caso de diversos VNT. Vale destacar que VANTs foram usados com algum sucesso no Iraque e durante os esforços de resgate do furacão Katrina. VNTs reduzem significativamente o custo e o risco para a vida humana enquanto amplificam as capacidades de reação e de combate.

Entretanto, existe uma barreira formidável para atingir a visão de múltiplos veículos operando cooperativamente. Sistemas desse tipo costumam aplicar idéias do ramo da inteligência artificial para resolver seus problemas. A área que estuda este tipo de aplicação de é chamada de SMA. SMAs devem equilibrar capacidade, confiabilidade, e robustez com tarefas e objetivos da missão ao criar uma estratégia efetiva para coordenar os múlti-

plos agentes presentes no sistema.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo modelar um SMA baseado em uma abordagem organizacional centralizada em torno do conceito de missão. Uma missão, no contexto de sistemas de VNT, é uma tarefa ou conjunto de tarefas que devem ser realizados pelo sistema. Duas soluções foram propostas, a primeira de caráter centralizado e a segunda de caráter distribuído.

A seção A.4 apresenta alguns trabalhos propondo uma estratégia para resolver um problemas similares ao debatido neste trabalho. Em A.5 são apresentados os conceitos e ferramentas relacionados com o trabalho. Na seção A.6 o problema a ser tratado é delimitado e alguns cenários são propostos. Em seguida, na seção A.7, são discutidas as soluções teóricas propostas. Em A.8 são dadas algumas explicações relacionadas a implementação do projeto para o Trabalho de Graduação 2 (TG2). Por último, são traçadas as devidas conclusões em A.9.

A.4 Trabalhos Relacionados

Em (VOKŘÍNEK; NOVÁK; KOMENDA, 2011) é proposto e avaliado uma técnica distribuída para realizar a vigilância e rastreamento cooperativos por um time de VANTs com recursos limitados. O princípio que permite um número limitado de veículos cobrir um grande conjunto de objetivos é baseado na representação de objetivos orientados a tarefas e na atribuição e troca dinâmica de tarefas entre os agentes. O problema de alocação de tarefas é resolvido através do uso de contratos inter-agente (compromissos). O sistema organizacional usado é hierárquico. Por fim, um resolvidor multi-agente decompõe o problema e o delega para agentes autônomos que resolvem individualmente as partes do problema. A solução global é obtida juntando as soluções individuais.

O trabalho proposto em (MILLER et al., 2004) usa uma metáfora de time esportivo para conseguir tanto rápido quanto complexo controle sobre a iniciativa de agentes através de uma variedade de VANTs. O usuário do sistema faz uma "chamada de jogo", que é o mesmo que requisitar um serviço de um ou vários VANTs, o que pode ou não ser especificado na requisição.

Em (PARUNAK; BRUECKNER; SAUTER, 2005) é apresentada uma proposta de SMA baseado em marcadores químicos, ou feromônios artificiais, para planejamento de caminho em colônias de formigas. Parunak descreve feromônios como um meio de construir campos de potencial que podem guiar a coordenação do movimento físico. Já em (PARUNAK et al., 2007) é apresentada uma proposta bastante sofisticada de implementação de um SMA envolvendo agentes reativos, chamada de modelo BEE, o qual é um abordagem inovadora para reconhecer o estado racional e emocional de múltiplas interações entre agentes baseando-se puramente em seu comportamento.

A.5 Contextualização

A.5.1 Veículo Não Tripulado

VNT são veículos onde a presença de um piloto é desnecessária. Estes veículos podem ser controlados por uma estação de controle ou funcionar de maneira autônoma, embora

ambas estratégias sejam usadas de maneira cooperativa.

Um VNT autônomo, ou agente, possui capacidades que são influenciadas pelo hardware e pelo firmware embarcados no mesmo. Em geral, diversos sensores se conectam a um sistema central, que funciona como um piloto automático, rodando um firmware que é responsável por monitorar os sensores, determinar a próxima ação e gerar a saída para controlar o agente. Além disso, esse sistema central é geralmente responsável por gerenciar a comunicação entre os diversos agentes, e também com a estação de controle.

A.5.2 Sistemas Multi-Agente

A capacidade de um agente é limitada pelo seu conhecimento, seus recursos computacionais e sua perspectiva. Este limite na racionalidade (SIMON, 1957) é um dos motivos que são criados grupos para resolver problemas. A ferramenta mais poderosa para lidar com a complexidade dos problemas é a modularidade e a abstração. A pesquisa com SMAs está preocupada com o estudo, comportamento, e construção de uma coleção de agentes autônomos possivelmente pre-existentes que interagem entre si e com o ambiente. O estudo deste tipo de sistemas vai além da inteligência individual de cada agente considerando, adicionalmente, a resolução de problemas que envolvam componentes sociais. De acordo com (JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998), as características de um SMA são as seguintes:

- Cada agente possui informações ou capacidades incompletas para resolver o problema e, sendo assim, possui um ponto de vista limitado;
- Não existe um controle global do sistema;
- Os dados são descentralizados;
- A computação é assíncrona.

A seguir serão apresentados alguns dos principais desafios de projeto dentro de um SMA.

A.5.2.1 Agente

De acordo com (WOOLDRIDGE; JENNINGS et al., 1995), um agente é um sistema computacional situado em algum ambiente, e que é capaz de ações autônomas nesse ambiente de modo a se conformar com os objetivos de projeto. Autonomia, neste contexto, significa simplesmente que o agente deveria ser capaz de agir sem a intervenção direta de humanos ou outros agentes, e deve ter controle sobre suas próprias ações e estados internos.

Agentes com esquemas sofisticados de racionalização podem aumentar a coerência do SMA porque cada agente individualmente pode raciocinar sobre efeitos globais de ações locais, formar expectativas sobre o comportamento dos outros, ou explicar e possivelmente reparar conflitos e interações nocivas. Diversos trabalhos em IA tentam formalizar uma axiomatização lógica para agentes racionais. Esta axiomatização é obtida pela formalização do comportamento de um agente em termos de crenças, desejos, objetivos, etc. Estes trabalhos são conhecidos como sistemas de BDI¹ (ver (BRATMAN; ISRAEL; POL-

¹Crença-Desejo-Intenção.

LACK, 1988)). Um agente que possui uma arquitetura BDI pode também ser chamado de deliberativo.

O conceito de agentes reativos foi introduzido em (BROOKS, 1991), onde é feita uma crítica a agentes deliberativos e se argumenta que inteligência é o produto da interação entre um agente e seu ambiente e comportamentos inteligentes emergem da interação entre vários comportamentos mais simples organizados em camadas através de uma relação mestre-escravo de inibição. Agentes reativos agem usando comportamentos baseados em resposta a estímulos, dessa forma estes não possuem uma representação do ambiente, eles respondem ao estado atual do ambiente em que estão inseridos. Eles não tem memória ou planejam o futuro. Através de interação com outros agentes comportamentos complexos podem emergir. Em sistemas reativos, a relação entre comportamentos individuais, ambiente e comportamento global não é bem entendida, o que necessariamente torna difícil projetar agentes para completar tarefas específicas, em geral se faz uso de diligentes processos de experimentação, tentativa e erro.

Para a maioria dos problemas, não se usa uma estratégia puramente reativa ou puramente deliberativa, mas arquiteturas híbridas que pode combinar aspectos de ambas abordagens. Tipicamente arquiteturas deste tipo são feitas através de um certo de número de camadas de software, cada uma lidando com um nível diferente de abstração.

A.5.2.2 *Organização*

Uma organização oferece um conjunto de ferramentas para interação entre agentes através da definição de cargos, comportamento esperado e relações de autoridade. Organizações são, em geral, conceituadas em termos de suas estruturas, ou seja, o padrão de informações e relações de controle que existe entre os agentes e a distribuição de suas capacidades de resolver problemas. Na resolução de problemas de cooperação uma estrutura oferece a cada agente uma visão de alto nível de como o grupo resolve os problemas. A estrutura deve também oferecer as informações de conexão entre os agentes para que eles possam distribuir os problemas a agentes competentes.

A estrutura organizacional impõe limitações na maneira com que os agentes se comunicam e se coordenam. De acordo com (HORLING; LESSER, 2004), os principais exemplos de organizações que foram exploradas na literatura de SMA incluem hierarquias, holarquias, coligações, times, congregações, sociedades, federações, mercados e organizações matriciais.

A.5.2.3 *Alocação de Tarefas*

Alocação de tarefas é o problema de atribuir responsabilidade e recursos para resolução de problemas a um agente.

Em um extremo, o engenheiro pode fazer todas atribuições de tarefas antecipadamente, criando assim uma organização fixa para resolução do problema. Esta abordagem é limitante e inflexível para ambientes com alto grau de dinamismo, abertura e incerteza. Entretanto, a atribuição de tarefas pode ser feita de maneira flexível e dinâmica. O problema de alocação de recursos foi tratado em (DAVIS; SMITH, 1983) onde foi proposto o amplamente conhecido CNP².

²Protocolo de Redes de Contrato.

A.5.2.4 *Planejamento Multi-Agente*

Planejamento, para um agente individual, é o processo de construir uma sequência de ações considerando somente objetivos, capacidades e restrições do ambiente. Entretanto, planejamento em um ambiente de SMA também considera as restrições que as atividades de outros agentes, os compromissos que o próprio agente tem com outros, e a evolução imprevisível do ambiente para determinar as decisões de ação em um agente.

A.5.2.5 *Reconhecimento e Resolução de Conflitos*

Como SMAs possuem apenas uma visão local existe potencial para disparidade e inconsistências nos objetivos, planos, conhecimentos, crenças e resultados de um agente. Para resolver o problema de maneira coerente, estas disparidades devem ser identificadas e resolvidas. Disparidades podem ser resolvidas fazendo com que um agente saiba o estado de todos os agentes, logo este poderia determinar onde estão as disparidades e como resolvê-las. Esta abordagem é limitante pois faz deste agente um gargalo do sistema. Detectar e corrigir disparidades e conflitos usando apenas uma perspectiva local pode ser muito difícil. Para facilitar a detecção e resolução de conflitos, agentes podem contar com modelos do ambiente e de outros agentes. A resolução de disparidades pode ser influenciada pela estrutura organizacional da sociedade em que o agente participa e seu papel nela, os tipos de modelos que um agente tem acesso, e os algoritmos de raciocínio do agente. A principal abordagem utilizada para resolver disparidades em SMAs é a negociação. Neste tipo de estratégia os agentes se comunicam e iterativamente trocam propostas e contrapropostas. Alguns trabalhos desenvolvidos utilizando a abordagem de negociação podem ser vistos em (SYCARA, 1990; KRAUS; WILKENFELD; ZLOTKIN, 1995; WANYAMA; HOMAYOUN FAR, 2007).

A.6 **Delimitação do Problema**

O sistema proposto será composto por VNTs expostos a ação de um ambiente dinâmico. Diferentes tipos de veículos podem entrar e sair do sistema, ou seja, o sistema social também é dinâmico e relações podem ser criadas e quebradas sem aviso prévio. A natureza dos veículos é heterogênea. Os recursos disponíveis em cada veículo dependem da natureza do veículo e das funções disponíveis no mesmo. Considerando uma missão pré-determinada, o sistema deve ser capaz de se organizar e realizar a mesma da melhor maneira possível, ou seja, usando os recursos de cada indivíduo de maneira equilibrada, eficiente e robusta.

Dado a situação exposta, iremos expor uma solução que se propõe a resolver o problema de controlar veículos heterogêneos, expostos a um ambiente dinâmico, de modo que eles consigam se coordenar com o objetivo de realizar uma missão qualquer.

A.7 **Solução Proposta**

Esta proposta irá explorar dois conceitos principais: habilidade e tarefa. Uma habilidade pode ser vista como uma função que um agente é capaz de realizar, ou seja, são as capacidades daquele agente. Cada habilidade é constituída por um conjunto de tarefas que

devem ser realizadas pelo agente que possuir aquela habilidade. Uma missão é descrita por um conjunto de tarefas. De um ponto de vista prático, uma habilidade pode ser vista como uma função (ou classe) que deve ser embarcada no VNT através de seu firmware, onde cada veículo pode possuir diferentes habilidades.

Todo agente deve possuir pelo menos a habilidade de registrar habilidades, para que o mesmo possa ter acesso a suas habilidades de uma maneira estruturada e saber diferenciar quando é, ou não, capaz de realizar uma tarefa.

Para que um SMA seja capaz de realizar missões é preciso que exista pelo menos um agente capaz de interpretar as tarefas descritas na missão e planejar a alocação de recursos do sistema. A seguir serão discutidas duas propostas para resolver este problema, baseando-se em diferentes paradigmas. A primeira, descrita em A.7.1, é baseado no paradigma organizacional de mercado e a segunda, apresentada na seção A.7.2, faz uma proposta baseada no depósito de feromônios artificiais.

A.7.1 Sistema de Mercado

Um mercado é caracterizado por consumidores e fornecedores de serviços. Os consumidores disponibilizam um conjunto de tarefas a ser realizado e os fornecedores fazem ofertas de serviços através de lances de leilão. O lance no leilão pode ser descrito através de uma função de utilidade determinada pelas habilidades e estados do fornecedor. Um mercado precisa de um leiloeiro, o qual realiza negociações e determina ganhadores. Uma sessão de mercado é o veículo pelo qual serviços são entregues dinamicamente aos agentes participantes.

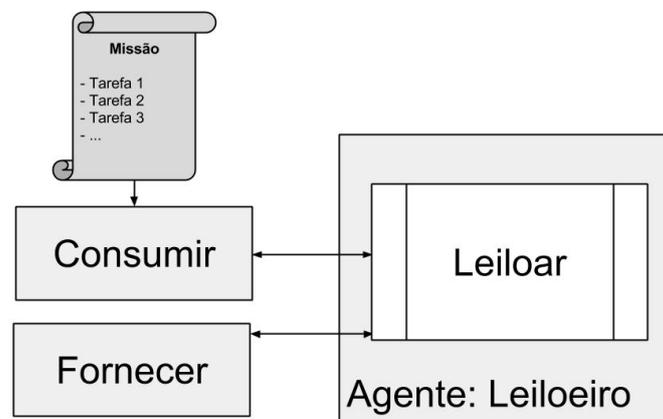


Figura A.1: Cenário demonstrando as relações em uma estrutura de mercado.

Um sistema baseado no paradigma de mercado precisa possuir as habilidades de consumir, fornecer e leiloar serviços. A tabela A.1 apresenta essas habilidades e as tarefas relacionadas a cada uma delas.

A figura A.1 mostra um diagrama, onde estão especificadas as devidas habilidades e a relação entre as mesmas. Em geral uma missão é especificada em algum agente através de sua habilidade de consumir. Este inicia uma sessão, constituída por essas mesmas tarefas, através de um leiloeiro. O leiloeiro anuncia a sessão aos fornecedores. Estes, por sua vez, fazem ofertas nas tarefas. Então o leiloeiro determina o vencedor e informa o fornecedor do serviço a ser fornecido.

Habilidade	Tarefas
Consumir	- Registrar missão.
Fornecer	- Fornecer serviço.
Leiloar	- Iniciar leilão; - Determinar vencedor; - Gerar oferta de serviço.

Tabela A.1: Relação entre habilidade e tarefa para o sistema de mercado.

A.7.2 Sistema Baseado em Feromônios

Uma abordagem baseada no depósito de feromônios artificiais depende de dois tipos de habilidades. Primeiramente, é preciso que exista uma representação do ambiente, para que os agentes possam depositar e sentir feromônios, podemos resolver essa restrição através de um agente com a habilidade de representar o ambiente. Para que possamos basear nosso sistema na utilização de missões os agentes precisam ter a capacidade de registrar missões. O registro de uma missão envolve a distribuição de tarefas, para isso precisamos de agentes com a capacidade de distribuir tarefas. Além disso precisamos que todo agente tenha a habilidade de realizar as tarefas.

A propósito de clarificar a explicação, passaremos a identificar feromônios indicando alguma tarefa a ser realizada pela cor azul e feromônios indicando que uma tarefa está sendo resolvida pela cor vermelha. Em geral, feromônios azuis possuem propriedade atrativas e feromônios vermelhos possuem propriedade repulsivas.

A tabela A.2 apresenta a relação de habilidades e tarefas que nosso sistema possui.

Habilidade	Tarefas
Registrar Missão	- Distribuir tarefas.
Distribuir Tarefas	- Depositar feromônios atrativos.
Realizar Tarefa	- Depositar feromônio repulsivo.
Representar Ambiente	- Conectar ambiente; - Depositar feromônio; - Sentir feromônio.

Tabela A.2: Relação entre habilidades e tarefas para o sistema de feromônios.

É importante notar que a habilidade de representar o ambiente assume um conceito importante, o de rede de ambientes. Representar o ambiente de forma centralizada pode fazer com que o agente responsável por tal tarefa seja um gargalo no sistema. Para evitar problemas desse tipo, propomos que o ambiente seja construído através de representações locais por diferentes agentes, e formação de uma conexão quando os ambientes se interseccionam.

A figura A.2 mostra 5 agentes em suas devidas posições dentro de um ambiente qualquer, todos agentes com a habilidade de representar o ambiente. As arestas entre ambientes indicam que uma conexão formada, apresentando assim as redes formadas. Cada um dos agentes possui uma representação de parte do ambiente, o agente A1 do ambiente 1, o A2 do ambiente 2, seguindo assim analogamente para os outros.

A figura A.3 mostra uma diagrama explicitando as relações existentes entre as habili-

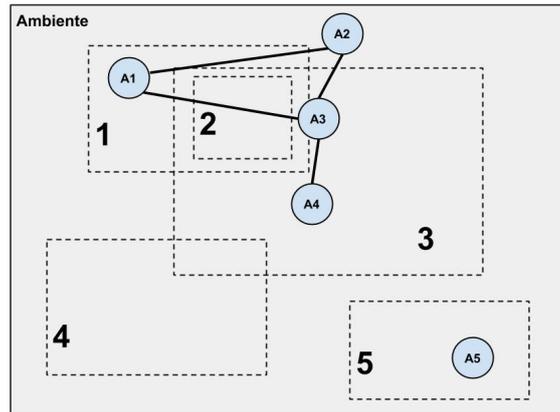


Figura A.2: Rede formada por agentes com a habilidade de representar o sistema.

dades do sistema.

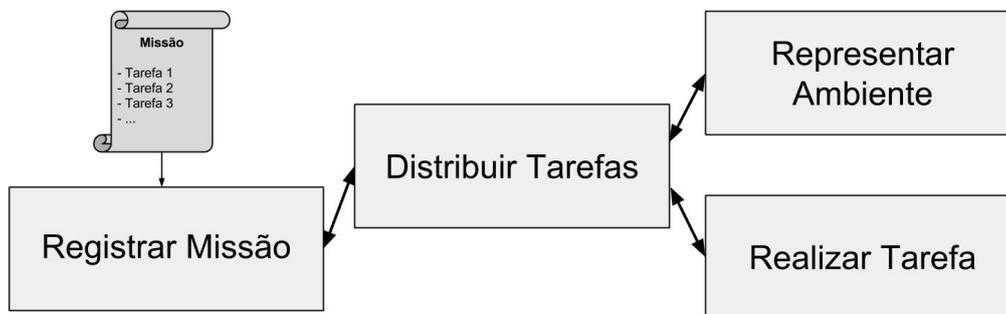


Figura A.3: Diagrama demonstrando as relações existentes no sistema.

A figura A.4 demonstra um cenário de nosso sistema, em que existe um feromônio de tarefa depositado(feromônio azul) e diversos agentes tentam chegar até a tarefa para realizá-la. É possível perceber também o feromônio vermelho, que é depositado por agentes realizando a tarefa, e que impede outros agentes tentando realizar a mesma tarefa de chegarem até a mesma.

A seguir serão descritas as interações típicas de nosso sistema:

- Um agente com capacidade de registrar missões recebe uma missão, identifica as tarefas e informa o agente com habilidade de distribuir tarefas das mesmas;
- O agente com habilidade de distribuir tarefas deposita um tipo de feromônio azul para cada tarefa, através da rede representando o ambiente;
 - Se a localização de uma tarefa é importante, o feromônio é depositado apenas naquele local;
 - Se uma tarefa não tem local específico o feromônio é depositado em uma área do ambiente;
 - As sensibilidades dos agentes dependem das habilidades que o mesmo possui;
- Os agentes orientados por algum feromônio azul depositam feromônios vermelhos equivalentes indicando que estão resolvendo a tarefa identificada;

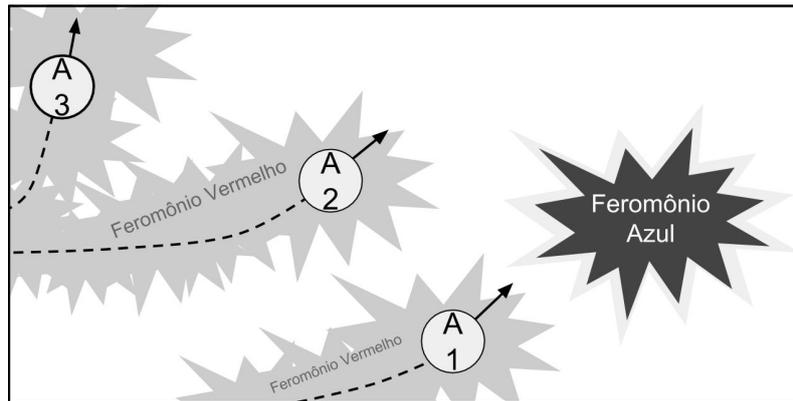


Figura A.4: Visão abstrata demonstrando o funcionamento do sistema de feromônios.

- Se um agente encontra feromônio vermelho de uma tarefa ao qual ele é sensível, o agente evita aquela posição;

A.8 Trabalho de Graduação 2

A seguir serão traçadas algumas explicações sobre implementação, experimentação e viabilidade do projeto. Além disso será proposto um cronograma de atividades práticas para o TG2.

A.8.1 Proposta de Implementação

A solução proposta na seção A.7 representa uma visão abstrata do sistema, para aplicação precisamos propor uma implementação. Para isso iremos descrever diagramas de classe capazes de representar estas entidades abstratas, e com os quais poderíamos implementar o sistema em nossos VNTs. Iremos modelar cada habilidade como uma classe, e cada tarefa será um método dessa classe.

A.8.1.1 Paradigma de Mercado

A figura A.5 apresenta o diagrama de classe responsável por representar o sistema de mercado.

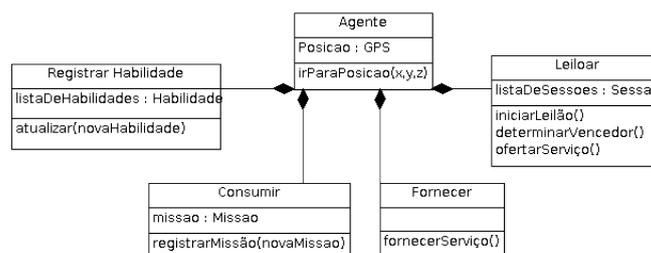


Figura A.5: Diagrama de classes representando o sistema de mercado.

A.8.1.2 Sistema Baseado em Feromônios

O diagrama de classes responsável por representar o sistema baseado em feromônios pode ser visto na figura A.6.

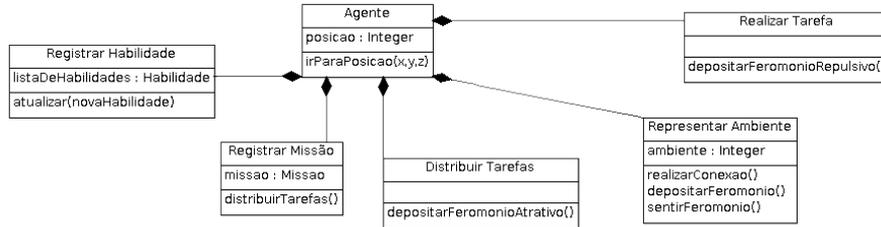


Figura A.6: Diagrama de classes representando o sistema de feromônio.

A.8.2 Proposta de Experimento: Aerofotogrametria

Iremos propor um cenário baseado no problema de fazer a aerofotogrametria de uma área utilizando múltiplos VNTs. A aerofotogrametria é utilizada para mapear áreas através de cobertura fotográfica. Diversas fotos de um espaço são utilizados para gerar um mosaico do terreno.

O cenário proposto é constituído por 1 avião e 2 ou mais multicópteros. O sistema recebe a missão de fotografar certa área do mapa. Todos agentes iniciarão a tarefa, supondo que todos possuam esta habilidade. O avião, sendo o mais rápido, pode perceber que existe certa área que precisa ser fotografada com maiores detalhes e que ele mesmo não possui a habilidade para fazer, logo ele cria uma nova missão e a repassa ao sistema. Com a nova missão estabelecida, o avião deve continuar a realizar a primeira missão, já para os multicópteros a segunda missão deverá ter prioridade, o que está relacionado com a maneira que a habilidade é vista dentro do sistema. A figura A.7 apresenta o cenário descrito.

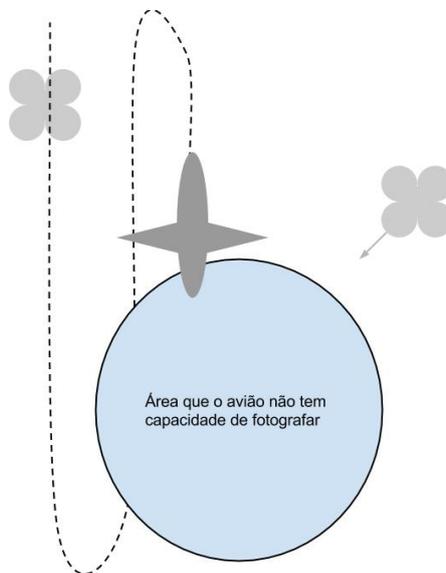


Figura A.7: Cenário demonstrando o experimento de aerofotogrametria utilizando SMA.

A.8.3 Ambiente de Teste

A seguir serão descritas as escolhas de hardware e software feitas para realizar os experimentos no TG2, tanto simulados quanto reais. O projeto *ArduPilot* é uma família de pilotos automáticos baseados na plataforma de código aberto Arduino. Ela consiste de um tipo de sistema APM de piloto automático e diversas versões de software gratuito para diferentes veículos. Por isso e por poder gerenciar diferentes tipos de VNT baseamos nosso ambiente nessa família.

A.8.3.1 Hardware

A plataforma de piloto automático escolhida foi a APM, devido principalmente a sua capacidade de gerenciar veículos de natureza diversificada através do mesmo hardware. Além disso o firmware disponível é montado de uma maneira hierárquica o que permite a reutilização do código em diferentes plataformas, como a *Pixhawk/PX4*. A APM 2.6 é um piloto automático compatível com o S.I. e baseado na plataforma Arduino Mega, que pode transformar qualquer veículo de RC em um VANT ou VTNT completamente autônomo. Ela gerencia tanto a estabilização quanto a navegação GPS e permite o completo controle de missões com planejamento de *waypoints* e da câmera. Suporta 8 canais RC e possui quatro portas seriais.

A.8.3.2 Comunicação

Com o objetivo de dar suporte a comunicação entre as mais diferentes plataforma o protocolo de comunicação a ser utilizado será o MAVLink 1.0. A estação de controle a ser utilizada será a QGroundControl.

A.8.3.3 Estação de Controle

A EC é o sistema remoto responsável por receber mensagens de status do VNT e enviar mensagens de controle. A EC é fixa e utiliza de diferentes protocolos para se comunicar com os VNTs. O software utilizado como estação de controle é o *QGroundControl*, que foi escolhido por ser aberto e poder identificar pelo menos quatro diferentes sistemas de piloto automático.

A.8.3.4 Firmware

A família *ArduPilot* oferece três tipos diferentes de firmware pré-estabelecidos. O *Plane* descreve um avião, o *Copter* descreve um helicóptero ou multicóptero e o *Rover* descreve um tipo de VTNT.

A.8.3.5 Simulação

Simulação permite maior segurança no processo de testes com códigos e configurações experimentais. Em nossos testes utilizaremos basicamente simulação Software In The Loop (SITL), quando o sistema estiver maduro poderão ser feitos testes reais e utilizando Hardware In The Loop (HITL) serão usados.

A.8.3.5.1 Hardware In The Loop

Simulação através de HITL substitui o veículo e o ambiente com um simulador. O simulador possui um modelo de alta fidelidade da dinâmica do veículo e um modelo do ambiente. O hardware físico é configurado exatamente como se estivesse em funcionamento, mas conecta a sua EC rodando o simulador.

A.8.3.5.2 Software In The Loop

Em relação ao modelo de simulação HITL, o SITL tanto virtualiza o hardware APM quanto o ambiente e o veículo. SITL é útil para o rápido desenvolvimento e quando o hardware físico não está disponível ou não é requerido.

A.8.4 Viabilidade do Projeto

Em termos de programação, como descrito anteriormente, iremos utilizar as ferramentas Ardupilot. Estas ferramentas oferecem um firmware escrito em C, e é baseado em um paradigma de camadas, de modo que podemos estabelecer pontos no mapa para o veículo se mover sem nos preocuparmos muito com como isso ocorre. O nosso sistema funcionaria em uma camada superior a esta. Implementar o firmware de nosso sistema não deve envolver grande complexidade, já que habilidades podem ser facilmente vistas como estruturas ou classes de um linguagem de programação e tarefas podem ser vistas como métodos ou funções. Entretanto o desenvolvimento da rede responsável por representar o ambiente pode envolver algoritmos de alta complexidade e com baixa escalabilidade, mas principalmente que sofrem do fato de estarem inseridos em um ambiente sem fio, sujeito a perdas por ruído.

Por outro lado, devido a sua característica reativa, a solução baseada em feromônios possui detalhes de implementação que podem levar o sistema a um estado caótico. Isso pode exigir grande quantidade de experimentos e ajuste da solução para que o comportamento emergente do grupo esteja de acordo com o esperado.

A.8.5 Proposta de Atividades Prática

As atividades práticas a serem desenvolvidas no TG2 estão descritas na tabela A.3.

Mês	Atividade
Mar/2014	Implementação da organização baseada em um paradigma de mercado, proposta em A.7.1.
Mar/2014	Implementação do sistema híbrido proposto em A.7.2.
Abr/2014	Realizar o experimento descrito em A.8.2.
Mai/2014	Comparar resultados obtidos entre as duas implementações.

Tabela A.3: Cronograma de Atividades Práticas

A.9 Conclusão

Este trabalho trouxe conceitos relacionados a SMAs. Também foram apresentados alguns desafios, pesquisas e estratégias utilizadas nessa área. Estes conceitos foram utilizados de maneira híbrida para propor uma arquitetura de sociedade em que participam VNTs heterogêneos. Neste contexto foi proposto uma generalização, através de habilidades, tarefas e missão, para descrever a funcionalidade de cada veículo. Conceitos como o de feromônios e de paradigma organizacional de mercado foram utilizados para a construção de duas soluções que resolvessem o problema de alocação de recursos e tarefas.

APÊNDICE B TUTORIAL PARA EXECUÇÃO DO SISTEMA

B.1 QGroundControl

A EC QGroundControl pode ser usada para se conectar as simulações e visualizar diversos veículos (com diferentes identificadores) sobrevoando uma mesma área, para que isso funcione corretamente algumas configurações devem ser realizadas. A seguir explicaremos passo a passo como se conectar a uma instância de simulação. Iremos tomar como premissa que a EC iniciada na simulação está redirecionando seus pacotes para a porta 127.0.0.1:14550.

- Primeiramente é preciso ir para a pasta do QGroundControl e iniciar o programa.
- Em seguida vá no menu *Communication > Add Link*.
- Em *Link Type* escolha UDP.
- Se você redirecionou sua simulação para outro ip, que não 127.0.0.1, então clique em *Add Ip* e escreva seu ip e porta. Caso seu ip seja local mesmo, então é só escrever a porta em *UDP port*.
- Em seguida clique em *Connect*.
- Por último é só aguardar, que quando a sua instância do QGroundControl receber um mensagem de *heartbeat* da simulação ela irá identificar automaticamente todos veículos que estão conectados a porta UDP especificada.

B.2 Executar uma Simulação

A execução de uma simulação é realizada através de um *script* pré-existente na ferramenta ardupilot. Esse *script* irá abrir uma instância do veículo em conjunto com uma instância da EC *mavproxy.py* e o simulador necessário para o veículo escolhido. A seguir explicaremos passo a passo o processo de execução utilizado.

- Em primeiro lugar é preciso ir para a pasta do VNT desejado, que são */ardupilot/ArduCopter/* ou */ardupilot/ArduPlane/*;
- Em seguida é preciso rodar o seguinte comando: `foreignsim_vehicle.sh -I0 -out 127.0.0.1:14550`". É importante notar que este comando possui várias opções. A

opção *-L* serve para carregar a localização (através do arquivo */ardupilot/Tools/autotest/locations.txt*), a opção *-I* representa o identificados do veículo a ser iniciado e a opção *-out* indica o endereço para o qual os pacotes do mavproxy serão replicados, isso serve para se comunicar com uma terceira EC. Por último, a opção *-w* serve para limpar a EEPROM do veículo e recarregar os parâmetros, isso é importante na primeira vez que o VNT é executado. É importante notar que quando for feita a execução de múltiplos veículos, cada um deles deve ser configurado com um identificador diferente.

- Após a execução do script os seguintes programas irão abrir: uma instância do veículo, uma instância do *mavproxy.py* e uma instância do simulador (que difere para cada veículo). A instância do *mavproxy.py* é aberta na própria linha de comando que iniciou o script, já as outras são abertas em novas janelas.
- Em seguida alguns comandos devem ser executados na instância do *mavproxy.py*, o comando e o VNT em que o mesmo deve ser executado serão descritos a seguir. Todos os comandos devem ser executados na ordem em que estão descritos.
- Para rodar a rotina de nivelamento nos multicópteros execute *level* na instância *mavproxy.py*.
- Para armar os motores nos multicópteros o seguinte comando deve ser executado na instância *mavproxy.py*: *arm throttle*.
- Para configurar o nível de aceleração para que os VNT possam voar use o seguinte comando na instância *mavproxy.py*: *rc 3 1500*.
- Em seguida você pode iniciar a EC de sua preferência e configurar uma porta para escutar na mesma porta que você usou redirecionar os pacotes do *mavproxy*, que em nosso caso é o endereço 127.0.0.1:14550. Um explicação de como fazer isso no *QGroundControl* foi explicada na seção B.1.

B.3 Execução de Múltiplos Veículos Não Tripulados

Para a execução de múltiplos veículos não tripulados foi criado um *script* que pode ser encontrado em */ardupilot/Tools/autotest/sim_multiple_vehicles.sh*. A seguir será explicado os passos necessários para rodar este *script*, assim como os detalhes envolvidos.

Para definir as habilidades de um sistema o arquivo *Abilities.h*(encontrado na pasta de cada VNT) é utilizado, e um exemplo de habilidade pode ser encontrada dentro do mesmo. A definição do tipo de sistema a ser utilizado é feita através de um *define* das seguintes constantes: *MULTIAGENT_SWARMSYSTEM* para utilizar o sistema de feromônios ou *MULTIAGENT_MARKETSYSTEM* para o sistema de mercado. Os detalhes de configuração para cada um dos sistemas deve ser feito dentro do arquivo *.pde* principal de cada veículo e também dentro do arquivo *system.pde*.

Para configurar quantos veículos devem ser rodados pelo sistema é preciso editar o arquivo */ardupilot/Tools/autotest/sim_multiple_vehicles.sh*. A figura B.1 mostra o conteúdo deste arquivo. Cada uma das linhas iniciadas por *usr/bin/xterm* é um novo VNT que será iniciado. A seguir será explicado os passos que devem ser realizados para rodar este *script*.

```

1 #!/bin/sh
2 name0="ArduCopter0"
3 dir0="/home/paulo/ardupilot/ArduCopter"
4 name1="ArduCopter1"
5 dir1="/home/paulo/ardupilot/ArduCopter"
6 name2="ArduCopter2"
7 dir2="/home/paulo/ardupilot/ArduCopter"
8 name3="ArduPlane3"
9 dir3="/home/paulo/ardupilot/ArduPlane"
10
11 #sudo rm /dev/shm/targets
12 /usr/bin/xterm -iconic -name $name0 -n $name0 -T $name0 -hold -e "cd $dir0 && sim_vehicle.sh -M2 -j 2 -w -N -L GAS0 --out 10.127.62.85:14550 --aircraft copter0" &
13 /usr/bin/xterm -iconic -name $name1 -n $name1 -T $name1 -hold -e "cd $dir1 && sim_vehicle.sh -M3 -j 2 -w -N -L GAS1 --out 10.127.62.85:14555 --aircraft copter1" &
14 /usr/bin/xterm -iconic -name $name2 -n $name2 -T $name2 -hold -e "cd $dir2 && sim_vehicle.sh -M4 -j 2 -w -N -L GAS2 --out 10.127.62.85:14560 --aircraft copter2" &
15 /usr/bin/xterm -iconic -name $name3 -n $name3 -T $name3 -hold -e "cd $dir3 && sim_vehicle.sh -M5 -j 2 -w -N -L GAS3 --out 10.127.62.85:14565 --aircraft plane0" &

```

Figura B.1: Conteúdo do script de execução para múltiplos VNTs.

- Primeiramente rode *sim_multiple_vehicle.sh*.
- Em seguida as janelas da EC *mavproxy* e da instância do VNT irão abrir, como pode ser visto na figura B.2.
- Na instância do *mavproxy* os comandos explicados na seção B.2 devem ser executados para cada um dos veículos abertos.
- É importante notar que algumas vezes um veículo pode não iniciar a se movimentar imediatamente após executar o comando *auto*, nestes casos mudar o modo para *stabilize* e, em seguida, novamente para *auto* pode resolver o problema.

```

ArduCopter0
set FLTMODE4 to 3,000000
set FLTMODE5 to 5,000000
set FLTMODE6 to 0,000000
set SUPER_SIMPLE to 0,000000
set SIM_GPS_DELAY to 2,000000
set SIM_ACC_RND to 0,000000
set SIM_GYR_RND to 0,000000
set SIM_WIND_SPD to 0,000000
set SIM_WIND_TURB to 0,000000
set SIM_BARO_RND to 0,000000
set SIM_MAG_RND to 0,000000
set AHRS_EKF_USE to 1,000000
Loaded 49 parameters from /home/paulo/ardupilot/Tools/autotest/copter_params.parm
(changed 49)
Requested parameter list
STABILIZE> APM: ArduCopter V3.3-dev (48c6a10b)
APM: Frame: QUAD
APM: PreArm: INS not calibrated
Received 437 parameters
Saved 437 parameters to copter0/logs/2015-01-18/flight1/mav.parm
fence breach
waypoint 1
GPS lock at 0 meters
[]

ardupilot
Setting instance 7...
Camera sensor 2 registered.
Starting sketch 'ArduCopter'
Starting SITL input
bind port 5762 for 2
Serial port 2 on TCP port 5762
bind port 5760 for 0
Serial port 0 on TCP port 5760
Waiting for connection ....
Serial port 3 on Multicast(226.0.0.1) UDP port 5763
MULTICAST SETTED
Serial port 3 on UDP port 5763
Mavsysid = 0

```

Figura B.2: Telas abertas após execução do script para múltiplos VNTs.