

Sumário

1. Introdução.....	2
2. Inteligência e robótica de enxames	5
2.1 UAV.....	6
2.2 Cenário Brasileiro na produção de UAVs.....	8
3. Rede de Sensores Sem Fio	11
3.1 Topologias de uma rede de sensores sem fio	12
3.2 Protocolo <i>Flooding</i>	13
3.3 Protocolo <i>Geographic</i>	15
3.3.1 Algoritmos geográficos em RSSF.....	15
4. Protocolo proposto.....	20
4.1 Premissas e funcionamento do protocolo proposto.....	20
4.2 Simulador utilizado e adaptações propostas	26
5. Experimentos e resultados	30
5.1 Análises dinâmicas	30
5.1.1 Inicialização dos UAVs próximos à base.....	30
5.1.2 Efeitos observados ao longo das simulações	32
5.2 Estatística do fluxo de pacotes.....	36
5.2.1 Conjunto Experimental 1	36
5.2.2 Conjunto Experimental 2.....	39
6. Conclusões e Trabalhos Futuros	43
7. ReferênciasBibliográficas	45

1. Introdução

O uso de veículos aéreos não tripulados – UAV (do inglês, *Unmanned Aerial Vehicle*) em missões de patrulha, por exemplo, é algo que, além de estar se tornando cada vez mais frequente, tem despertado o interesse, sobretudo, da área militar (Nascimento, 2011). Uma das principais razões é que devido aos riscos, o sensoriamento de regiões inabitadas e ações de vigilância por aeronaves tripuladas são tarefas que se tornam inviáveis.

Embora o uso de UAVs venha sendo difundido pelo mundo em virtude da possibilidade de utilização em aplicações diversas e pelo relativo baixo custo, para que esses veículos possam realizar suas ações de forma efetiva, algumas funções são primordiais. Dentre elas: o uso de sensores de percepção (de alvo e de obstáculos), controle de seus motores e, principalmente, comunicação com outros UAVs (Nascimento, 2011). A utilização desses agentes em um comportamento coletivo tem introduzido a abordagem de robótica de enxame que, proveniente da inteligência artificial, emerge da interação não apenas entre os robôs e o ambiente, mas principalmente entre os próprios membros do enxame.

Um dos fatores importantes para garantir a colaboração entre os membros de um enxame de UAVs são os enlaces de comunicação sem fio confiáveis e de alto desempenho (Davari, *et. al.*, 2005). Contudo, os dados de roteamento para comunicação entre os UAVs enfrentam vários desafios que vão desde a perda de pacotes, até falhas no caminho de roteamento, sendo a alta mobilidade dos veículos o principal fator responsável por esses percalços (Lin, L., *et. al.*, 2012). Mesmo existindo inúmeras estratégias que visem a minimização dessas perdas e problemas de roteamento, a grande maioria está associada a um alto consumo de energia.

Considerando a importância eminente do fator de comunicação entre os membros de um enxame de UAVs, este trabalho busca propor a hibridização de dois protocolos, a saber, o *flooding* e o *geographic* (Park, H., *et. al.*, 2008), na tentativa de estabelecer um diálogo eficiente entre os agentes na realização de atividades como patrulha territorial e sensoriamento. Os testes do protocolo proposto foram feitos em um ambiente de simulação já desenvolvido por (Pinheiro, 2011) e que utiliza inteligência de enxames para a coordenação dos agentes.

Diversos são os motivos que têm levado os UAVs a receber um interesse considerável ao longo dos últimos anos. Esses motivos vão desde os investimentos em computação embarcada e comunicações, por exemplo, até a capacidade que esses agentes possuem de desempenhar tarefas cada vez mais complexas e sofisticadas.

Além de ações como patrulha territorial, a utilização dos UAVs para fins civis e militares ainda é bastante comum, existindo vários tipos desses dispositivos construídos e utilizados por vários países, principalmente, Israel e Estados Unidos (Pinheiro, 2011).

A modelagem de um enxame de UAVs está inserida em um contexto ainda mais amplo: as redes de sensores sem fio. Estas redes estão situadas na nova geração da computação pessoal, a era da computação ubíqua. Nessa era, os dispositivos se conectam entre si, permitindo diversas aplicações nas áreas militares e civis, a exemplo dos veículos aéreos não tripulados.

Os pequenos dispositivos sensores são poderosos, e, na medida do possível, são auto-configuráveis e autônomos. Para que esses indivíduos possam ser portáteis, por exemplo, eles devem interagir formando um sistema em rede.

Um dos mais importantes desafios para um projeto de redes de sensores sem fio é o consumo de energia, ao invés da complexidade na integração. A fonte de energia é frequentemente limitada às baterias internas, pois a operação dessas redes é não assistida para permitir a portabilidade e mobilidade dos nós. Basicamente o consumo de energia pode ser dividido em três domínios: sensoriamento, comunicação e processamento dos dados. A unidade de sensoriamento e seus componentes dependem da complexidade da detecção do evento. No cenário dos UAVs, ambientes com um maior número de alvos e obstáculos podem elevar a complexidade da detecção. A energia gasta para o processamento dos dados é muito menor que a energia necessária na comunicação.

Considerando os aspectos de comunicação em uma rede de sensores sem fio um dos fatores de maior importância é o protocolo utilizado para o gerenciamento das informações que passam a circular na rede. Em uma rede de sensores sem fio, o protocolo é o responsável por gerenciar a comunicação em geral, tanto entre os nós sensores, como entre a rede e o mundo exterior. O protocolo exerce papel fundamental, pois um simples acréscimo de nós na rede pode prejudicar todo o sistema, precisando que o protocolo gerencie adequadamente a comunicação para evitar e corrigir congestionamento, devendo balancear a carga de informação gerada de modo a, ainda assim, atender aos requisitos que se quer medir.

Protocolos foram desenvolvidos para solucionar os problemas relacionados às redes de sensores. Porém devido a complexidade envolvendo principalmente a disposição espacial e limitações físicas, o uso de um único protocolo pode representar uma forma incompleta de transmissão de informação associada a um baixo consumo de energia da

rede.

O objetivo deste trabalho é propor uma arquitetura híbrida de comunicação entre um enxame de UAVs. A ideia consiste em utilizar as características de dois protocolos de comunicação e testar essa proposta em um simulador de veículos aéreos não tripulados. A intenção não é apenas verificar o fluxo de informações ao longo da rede, mas também analisar dinamicamente o comportamento dos UAVs ao longo do ambiente.

O trabalho está organizado em 7 capítulos. No capítulo 2, além de um descritivo sobre inteligência e robótica de enxames, serão abordadas as principais aplicações dessa abordagem. Em seguida, no Capítulo 3, serão descritas as redes de sensores sem fio (RSSF), especificando os dois protocolos utilizados na hibridização proposta. O Capítulo 4 aborda a junção da coordenação de algoritmos de enxames de robôs com protocolos de RSSF, trazendo uma descrição do protocolo proposto e abordando as modificações que se fizeram necessárias no simulador para testá-lo no Capítulo 4. O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nas simulações, bem como as considerações finais. Por fim, no Capítulo 6 serão apresentadas as principais conclusões deste trabalho, assim como propostas para trabalhos futuros.

2. Inteligência e robótica de enxames

A inteligência de enxames é um ramo da inteligência computacional que lida com os sistemas naturais e artificiais compostos por indivíduos que coordenam com controle descentralizado e auto-organização (Dorigo, 2009). Ao invés da centralização das ações, o sistema como um todo é baseado em várias entidades simples e que cooperam entre si, objetivando a exibição de um comportamento desejado. O projeto para o desenvolvimento deste tipo de sistema é inspirado no comportamento coletivo de vários insetos sociais como formigas, cupins, abelhas, vespas, além de outros tipos de sociedade, como por exemplo, um bando de pássaros ou mesmo um cardume de peixes (Mendonça, 2009).

Muito embora esses membros sejam simples, a cooperação entre eles permite que a realização de tarefas complexas passe a se tornar algo possível. Bons exemplos desse comportamento vão desde a construção de ninhos sofisticados feitos por formigas, vespas e cupins sem que haja um guia de como esse tipo de atividade deve ser feito, até o comportamento exploratório exibido por formigas e abelhas quando procuram por comida. De um lado, através de uma dança específica, as abelhas realizam a comunicação entre si na exploração de ricas fontes de comida, enquanto que do outro, a fim de encontrar caminhos mais curtos entre os seus ninhos e as fontes de alimento, as formigas utilizam uma estratégia de comunicação indireta através de trilhas de feromônio. (Blum, 2008).

A aplicação desses princípios para novas abordagens, por exemplo, na otimização e no controle de robôs, é uma linha fortemente estudada por alguns cientistas, sendo o campo de pesquisa voltado para o comportamento coletivo em sistemas auto-organizados e descentralizados chamado de *inteligência de enxames*.

Alguns estudos realizados mostram que a partir das ideias da robótica cooperativa, que corresponde ao campo da robótica dedicado ao estudo de técnicas que permitem que robôs agrupados em equipes cooperem entre si e com seres humanos para realizar determinada tarefa, e da inteligência de enxames, surja o paradigma chamado *enxame de robôs* (Mendonça, 2009).

Conforme (Sahin *et al.*, 2008), três propriedades funcionais devem ser observadas na operação de um sistema de enxame robótico. A primeira delas é a *robustez*. Fatores como o sensoriamento distribuído e coordenação descentralizada são inerentes às operações de insetos sociais, e quando vistas em um sistema robótico, permitem que ele possa operar ainda que ocorram perturbações no ambiente ou perante o mau funcionamento dos seus indivíduos.

A segunda característica é a *flexibilidade*. Os indivíduos de um enxame devem ser capazes de coordenar seus comportamentos para realizar tarefas de natureza distinta. Um bom exemplo disso é que os membros de uma colônia de formigas podem encontrar o caminho mais curto para uma fonte de comida ou transportar uma presa grande por meio da utilização de diferentes estratégias de coordenação, sendo capazes de se adaptar às mudanças do ambiente.

Por fim, tem-se a *escalabilidade*. A operação do sistema como um todo não deve ter seu desempenho afetado de forma considerável a partir do momento que o mesmo passa a operar com um grande número de indivíduos. Isso significa que os mecanismos e estratégias de coordenação desenvolvidas para o enxame de robôs devem garantir o funcionamento para diferentes tamanhos e grupos de indivíduos (Mendonça, 2009).

De maneira geral, para que seja feita uma distinção no que se refere à arquitetura de enxame de robôs, alguns critérios são propostos em (Sahin, 2005), a saber:

- grande quantidade de indivíduos, dependendo da aplicação;
- indivíduos autônomos, no que concerne à tomada de decisão;
- pouca homogeneidade no grupo de indivíduos, onde as diferenças de características tornam o sistema mais versátil e completo, utilizando menos recursos;
- indivíduos com sensoriamento local e capacidade de comunicação;
- indivíduos simples, isto é, relativamente incapazes ou ineficientes para realizar suas tarefas sozinhos.

Diversas aplicações no mundo real dos enxames robóticos podem ser citadas, tais como: operações de pesquisa e resgate em lugares perigosos ou em lugares onde seres humanos não têm acesso, transporte de objetos pesados, monitoramento de ambientes, vigilância, etc. Além disso, as possibilidades de aplicações de enxames robóticos se ampliam consideravelmente a partir dos avanços esperados com o desenvolvimento da nanotecnologia. Pode-se pensar, por exemplo, em milhões de nanorobôs sendo injetados dentro de um ser humano para o combate de células cancerígenas, ou mesmo sendo úteis para a construção e manipulação de outras nanoestruturas (Mendonça, 2009).

2.1 UAV

UAV (do inglês - *Unmanned Aerial Vehicle*) consiste em uma aeronave não tripulada. Controlada remotamente ou autocontrolada, foi idealizado inicialmente para fins militares, em que a aeronave carregava bombas para serem lançadas em locais específicos, sem colocar em risco a vida do piloto (Nascimento, 2011). Entretanto, atualmente há outros que foram construídos

para o uso em inteligência militar, apoio aéreo e controle de tiro em artilharia, por exemplo, além de atividades de resgate, patrulhamento ambiental (Pessin, *et. al.*, 2012) (Figura 1 a)), urbano (Figura 1 b)) e de fronteiras, atividades de busca e resgate.



Figura 1 - UAV sendo utilizado no controle de queimadas (a) e no patrulhamento de áreas urbanas (b).

Fonte: Araripe, 2006.

Além das razões para a utilização desses agentes em detrimento do uso de seres humanos, os UAVs de uso militar, conhecidos como UAVs de combate, apresentam uma vantagem estratégica quanto ao seu uso: a ausência de risco de constrangimento diplomático no caso de ocorrer a captura da aeronave, caso a mesma venha a cair e o piloto seja capturado. Outros fatores que também potencializam o uso dessas aeronaves são justamente a capacidade de multiplicação de forças, melhor inteligência, bombardeio estratégico, e também por constituírem uma melhor opção para o uso em ataques (Sullivan, 2005).

Idealizado para fins militares, os veículos aéreos não tripulados ou *drones*, foram inspirados nas bombas voadoras alemãs do tipo V-1, conforme a Figura 2, e nos inofensivos aeromodelos rádio-controlados. Atualmente, o desenvolvimento de pesquisas e fabricação desses veículos são realizadas e estimuladas por militares estadunidenses, onde cerca de 51 estados americanos já dispõem dessa tecnologia, e pelas Forças Armadas de Israel. Nas últimas décadas, os *drones* foram usados sobretudo no Kosovo, Tchad e também nos ataques americanos ao Paquistão e contra a pirataria marítima, havendo, contudo, relatos de inúmeras mortes no Paquistão causadas por ataques feitos pela CIA e Pentágono utilizando essas aeronaves.



Figura 2 – Bomba alemã do tipo V-1.
Fonte: Lysiak, I., 1944/1945

2.2 Cenário Brasileiro na produção de UAVs

No Brasil, o primeiro veículo aéreo não tripulado que se tem registro foi o BQM1BR, fabricado pela extinta Companhia Brasileira de Tratores (CBT). De propulsão a jato, esse protótipo serviria como alvo aéreo e realizou um voo em 1983. Outro UAV que sem conhecimento é o Galha Azul, produzido pela Embravant (Empresa Brasileira de Veículos Aéreos Não Tripulados). A aeronave possui mais de 4 metros de envergadura, com autonomia para até 3 horas de voo. Os dois primeiros protótipos de Galha Azul realizaram vários ensaios em voo, operando com rádio-controle.

A partir do ano 2000, os UAVs para uso civil começaram a ganhar força para o mercado. Foi quando surgiu o Projeto Arara (Aeronave de Reconhecimento Autônoma e Remotamente Assistida), desenvolvido pela empresa AGX Tecnologia junto com o Instituto de Ciências Matemáticas e Computação da Universidade de São Paulo (ICMC-USP) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), especialmente para utilização de agricultura de precisão. O projeto deu origem, em abril de 2005, ao primeiro VANT de asa fixa desenvolvido com tecnologia 100% brasileira, conforme a Figura 3.



Figura 3 - Projeto Arara (Aeronave de Reconhecimento Assistida por Rádio e Autônoma).
Fonte: Defesanet, 2011

Em 2009, deu-se início ao projeto VANT-SAR entre as empresas AGX Tecnologia, Aeroalcool e Orbisat que foi financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos). Em 2010 foi iniciado o projeto da aeronave Tiriba. Assumido pela AGX Tecnologia e pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT-SEC), no final de 2011 resultou na primeira aeronave de propulsão elétrica com tecnologia 100% nacional em imageamento aéreo e aerofotogrametria, que consiste na aerofotografia executada para fins de mapeamento. Mais recentemente, no ano de 2012, uma licitação da aeronáutica foi vencida pela empresa brasileira *Flight Technologies* que atua no mercado de defesa e segurança aeronáutica. O projeto visa o desenvolvimento de um UAV de decolagem e pouso automático (DPA-VANT), com investimento previsto de 4,5 milhões de reais em dois anos. O projeto, ainda em andamento, está sendo financiado pela FINEP, e conta com o apoio do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, do Ministério da Defesa e a participação do Centro Tecnológico de Exército e do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM).

A montagem desses veículos também venho sendo feita na região Sul do país. Na cidade de Santa Maria, localizada no Rio Grande do Sul, a FAB (Força Aérea Brasileira) passou a montar VANTs produzidos pela AEL Sistemas, subsidiária da *Elbit Systems*, a maior empresa privada fabricante de produtos de defesa de Israel. Esses veículos são parte de um acordo de 48 milhões de reais firmado com o Brasil em 2010 e serão usados em operações ao longo da fronteira e possivelmente durante grandes eventos como a Copa do Mundo, em 2014, e as Olimpíadas de 2016 (Revista Galileu, Veículos Aéreos Não Tripulados, 2012).

A partir de 2012 o uso militar e civil dos veículos aéreos não-tripulados, também conhecidos como *drones*, passou a seguir regras para a segurança, privacidade, responsabilidade por danos a terceiros, e uso de faixas de

frequência de comunicação. De acordo com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e a Aeronáutica, além desses fatores, é preciso ter cuidado com o mau uso do equipamento, que tem capacidade de monitorar informações privadas e ainda oferece risco de colisões com aviões tripulados e outros obstáculos aéreos e de queda em áreas habitadas.

No Brasil, o uso desses equipamentos tem se tornado cada vez mais frequente, e o que se debate mais atualmente não são as possibilidades de aplicação, mas sim a qualidade desse tipo de produto, a automatização do processo e a regulamentação do setor. Em abril de 2013, uma pesquisa feita pela revista *MundoGEO* quanto ao modelo de negócio mais adequado, revelou que para 62,4% dos entrevistados, o ideal seria adquirir e manter o próprio UAV, enquanto os outros preferem contratar o serviço a partir de empresas especializadas. Com relação ao tipo de equipamento utilizado, pouco mais da metade, 51,3%, está pesquisando o uso de equipamentos de asa fixa, 17,4% usa UAVs de asa removível, 15,6% multi-rotor (Figura 4) e 6,9% dirigível (Figura 5).



Figura 4 – Multi-rotor *Draganflyer X4-P*.
Fonte: Saskatoon, 2012



Figura 5 – Exemplo de dirigível.
Fonte: Carvalho, 2010

O desenvolvimento de UAVs em outros locais também tem tido números cada vez maiores como pode ser observado na Tabela 1. É importante observar que esse número tem crescido nos mais diversos domínios, embora o uso em cenários militares e civis ainda seja dominante

Tabela 1 – Números de sistemas de UAVs nos últimos anos (adaptado de Van Blyenburgh, 2007).

	2004	2005	2006	2007
Civil	33	55	47	61
Militar	362	397	413	491
Dupla finalidade	39	44	77	117
Pesquisa	43	35	31	46
Desenvolvimento		219	217	269

3. Rede de Sensores Sem Fio

Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) consiste, tipicamente, em uma subclasse das redes *ad hoc*, na qual todos os terminais funcionam como roteadores, não havendo, portanto, nó ou terminal especial. Pode ser considerada como um sistema de aquisição de informações relativamente novo e como uma das tecnologias de ponta que tem grande impacto sobre o desenvolvimento humano na era do século 21 (Yueqing e Lixin, 2010).

Uma RSSF tem como objetivo o monitoramento de algum fenômeno, possuindo grande aplicação em locais de difícil acesso ou áreas perigosas, como:

- Militar – funções de monitoramento, rastreamento, segurança, controle e manutenção;
- Industrial – funções de monitoramento, particularmente em áreas de difícil acesso;
- Aviação – substituindo as redes com fio, como já são usadas atualmente;
- Ambiente – monitorando variáveis ambientais como prédios, florestas e oceanos;
- Tráfego – monitoramento de vias e estacionamentos;
- Engenharia – monitoramento (e modelagem) de estruturas.

As principais características de uma rede sensorial são: o sensor, o observador e o fenômeno. O sensor é quem faz a monitoração do fenômeno que está sendo analisado. É formado por processador, rádio para comunicação, memória e bateria. Ele realiza a leitura (medida) do fenômeno e repassa essa informação para o observador, logo, quanto maior a distância do fenômeno com relação ao sensor, menor será a precisão desse sensor. O observador é o usuário final que deseja estudar e obter respostas sobre o fenômeno, sendo este o objeto de estudo do observador, e o que está sendo monitorado pela rede sensorial.

Um dos maiores gargalos no contexto das RSSFs é o consumo de energia. Devido à criticidade desse fator, a necessidade de protocolos eficientes no consumo de energia torna-se cada vez mais importante, pois leva a um prolongamento da vida útil do sistema, permitindo que o mesmo venha a operar de forma mais autônoma.

Outro ponto importante é a tolerância a falhas. Tendo em vista que os sensores na maioria das vezes encontram-se em locais de difícil acesso ou áreas perigosas, são necessários algoritmos de roteamento e técnicas para auto-organização da rede, contribuindo para que o sistema continue em operação mesmo diante de algum problema na rede.

3.1 Topologias de uma rede de sensores sem fio

A topologia de uma rede de sensores sem fio pode ser: *estrela (star)*, *árvore (cluster tree)* ou *malha (mesh)* (Arruda e Oliveira, 2010) A topologia em *estrela* é a mais antiga em virtude da sua estrutura simples. Devido aos longos enlaces, o consumo associado a essa topologia acaba sendo alto. Esse mecanismo é composto por um nó coordenador, que é responsável pelo gerenciamento da rede, e pelos dispositivos finais (*end-devices*). Os dispositivos podem mandar mensagens para o coordenador e, se quiserem enviar mensagens uns para os outros, dependem também do coordenador para efetuarem a transmissão.

Na topologia em *malha* as redes dinâmicas são constituídas por nós cuja comunicação, no nível físico, é feita por uma das variantes do padrão IEEE 802.11, cujo roteamento é dinâmico. Já a topologia em *árvore* consiste em um caso especial das redes ponto a ponto, onde a maioria dos dispositivos são mais completos (FFD – *Full-Function Device*) e um dispositivo de menor capacidade (RFD – *Reduced-Function Device*) pode conectar-se no final de um ramo. Qualquer um dos nós mais completos pode agir como coordenador e prover serviços de sincronização para outros dispositivos e coordenadores, porém somente um desses coordenadores será o coordenador da rede sem fio local. A Figura 6 apresenta as principais topologias de uma RSSF.

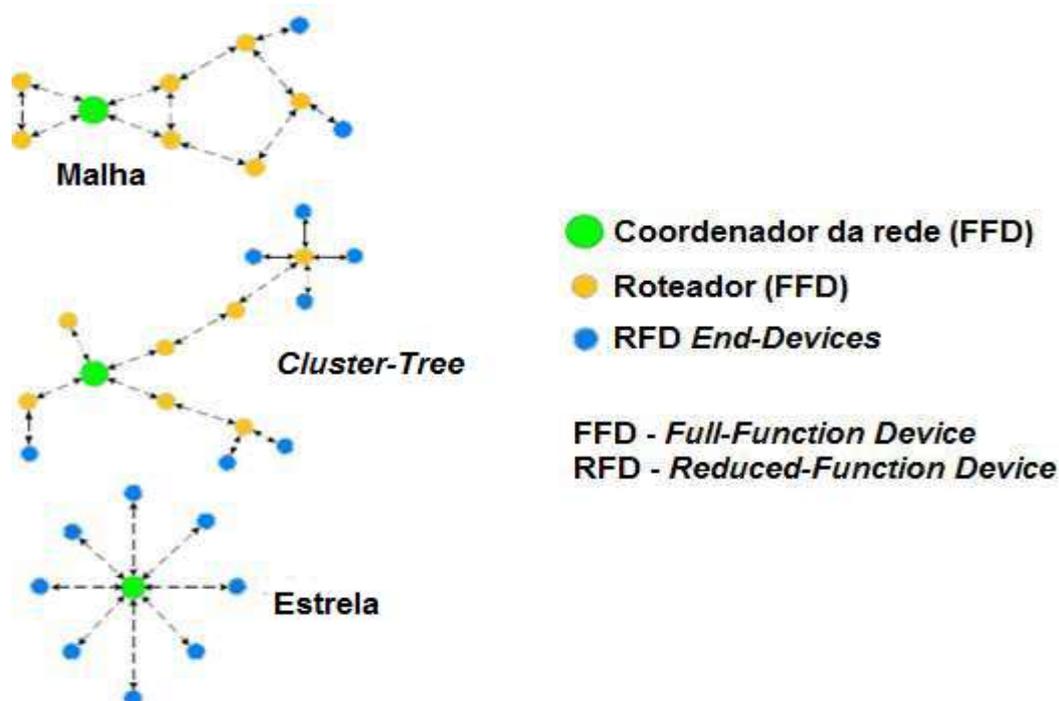


Figura 6 - Topologias de uma RSSF.
Fonte: Arruda e Oliveira, 2010.

Há também o conceito de uma formação híbrida no que se refere à topologia das RSSF, que como o próprio nome sugere, consiste na junção de duas ou três topologias juntas (Yueqing e Lixin, 2010).

Em uma rede de sensores sem fio, o protocolo é o responsável por gerenciar a comunicação em geral, tanto entre os nós sensores, como entre a rede e o mundo exterior. O protocolo exerce papel fundamental, pois um simples acréscimo de nós na rede pode prejudicar todo o sistema, precisando que o protocolo gerencie adequadamente a comunicação para evitar e corrigir congestionamento, devendo balancear a carga de informação gerada de modo a, ainda assim, atender aos requisitos que se quer medir.

O protocolo de roteamento é responsável por calcular as melhores rotas, utilizando-se de critérios heurísticos, para que os pacotes de dados fluam pela rede e cheguem ao seu destino final consumindo o mínimo de energia.

3.2 Protocolo *Flooding*

Uma antiga técnica de roteamento usada em redes de sensores é o *flooding* (inundação), baseada em *broadcast*. A maioria dos protocolos de roteamento utiliza algum tipo de inundação de informações para descobrir a localização e a rota de um nó móvel (Jain, *et. al.*, 2002). A ideia é que os nós-sensores propagam sua informação para todos os vizinhos, em *broadcast*, e esses vizinhos fazem o mesmo procedimento com a informação, até que esta atinja o que se chama de sorvedouro (Frank, *et. al.*, 2008). Embora a técnica se mostre imune a mudanças na topologia da rede e a alguns ataques de impedimento de serviço (*DoS – Denial of Service*), pode causar uma sobrecarga muito alta. Outros dois problemas muito comuns decorrentes da utilização do *flooding* são a implosão e a superposição.

Na implosão, como ilustrado na Figura 7 (a), um nó recebe a mesma mensagem por dois vizinhos diferentes. Isto gera uma redundância na disseminação de informação, provocando um maior gasto de energia que, na maioria das vezes, já é limitada.

Já no segundo caso, como o próprio nome sugere, há uma superposição da área sensoriada, conforme Figura 7 (b). Como o *flooding* não anuncia antes a sua informação, pode acontecer de um sensor *D* receber duas vezes a mesma informação, vinda de sensores *B* e *C* diferentes. Novamente, este tipo de redundância acarreta um maior gasto de energia tanto para enviar o dado quanto para receber.

Além desses problemas, no *flooding* não há considerações quanto à disponibilidade de energia para um dado nó. Os sensores podem, ao invés de usar *broadcast*, se comunicar diretamente com o sorvedouro (através do roteamento *multihop*) ou com um *cluster-head*, usando mensagem *unicast*, ou seja, os nós sensores podem se comunicar diretamente com o ponto de acesso

usando protocolos de roteamento multi-saltos. Para reduzir essa sobrecarga (*overhead*) pode-se utilizar agregação de dados.

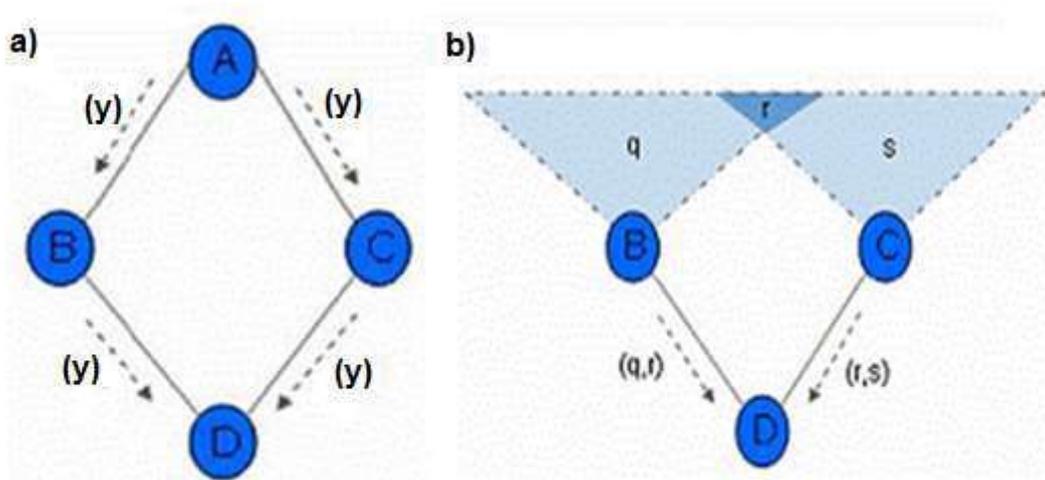


Figura 7 – Implosão (a) e Superposição (b)
Fonte: Teleco, 2013

Outro protocolo bastante utilizado em redes de sensores sem fio é o *Gossiping*. Diferente do *Flooding* em que os nós sensores enviam seus dados para seus vizinhos que por sua vez encaminham adiante até o processo alcançar o coletor, o *Gossiping* é uma versão modificada do *Flooding*, em que o nó sensor envia o pacote para um vizinho selecionado aleatoriamente, que escolhe outro vizinho aleatório para transmitir o pacote e assim por diante até o coletor (Henning, M., 2005).

Assim como o *Flooding*, embora a implementação seja relativamente simples, existem vários inconvenientes. Embora o *Gossiping* consiga evitar o problema da implosão presente no *Flooding*, acaba gerando atrasos na propagação dos dados através dos nós.

3.3 Protocolo *Geographic*

O roteamento geográfico, como o próprio nome sugere, utiliza informações geográficas para rotear seus dados. Estas informações costumam incluir a localização dos nós vizinhos. Os dados de localização podem ser definidos a partir de um sistema de coordenadas globais (GPS – *Global Position System*) ou mesmo de um sistema local válido somente para os nós da rede ou válidos somente para subconjunto de nós vizinhos. Alguns dos principais algoritmos geográficos utilizados em RSSFs são apresentados na subseção a seguir.

3.3.1 Algoritmos geográficos em RSSF

LEACH-C

O primeiro algoritmo geográfico, e bastante conhecido, é o LEACH-C (do inglês, *Low Energy Adaptative Clustering Hierarchy Centralized*) [Lindsey *et al.*, 2002] é uma variação de LEACH (Heinzelman *et al.*, 2000) que centraliza as decisões de formação dos grupos na estação base. A maior vantagem desta abordagem centralizada é a criação e distribuição mais eficiente de grupos na rede. Cada nó, na fase de iniciação da rede, envia sua posição geográfica e energia disponível para a estação base. Baseando-se nesta informação, a estação base através de processos de *simulated annealing*, determina os grupos de forma centralizada. Quando os grupos e seus líderes são determinados, a estação base envia uma mensagem que contém o identificador do líder para cada nó. Após esta fase, os nós agem como LEACH original comunicando-se apenas com seu líder.

ICA

O ICA (*Inter Cluster Routing Algorithm*) [Habib *et al.*, 2004] é baseado no LEACH, sendo idealizado para aumentar o tempo de vida e o número de pacotes enviados na rede. O ICA inicia com a estação rádio base enviando um *broadcast* para todos os nós informando sua posição geográfica. Após esta fase, os nós sabem a posição geográfica da estação base e é assumido que também sabem suas próprias posições. No ICA, os nós são agrupados em *clusters* que seguem as mesmas regras de formação do LEACH, a não ser pela decisão de qual *cluster* os nós vão participar. Esta informação é dada pela proximidade dos nós às bases locais. O nó vai estar ligado sempre à base local mais próxima. O processo de formação de *clusters* dissemina a informação da formação de *clusters* pelos *clusters* vizinhos.

No ICA, ao contrário do LEACH, as bases locais tentam não enviar as mensagens diretamente para a estação base. Ao invés disto, eles, em uma

abordagem gulosa, enviam as mensagens para a base local mais próxima, na direção da estação base. O objetivo é economizar energia enviando as mensagens ponto a ponto para nós que estão a uma distância menor da estação base. Desta forma, a quantidade de energia consumida por cada nó da rede diminui, aumentando a quantidade total de energia. As bases locais do ICA podem se recusar a retransmitir mensagens de outros *clusters* para a estação base para evitar a morte prematura dos nós próximos a ela. Isto ocorre quando a base percebe que está ficando sem energia. Quando ocorre uma recusa na retransmissão dos dados, a base local que requisitou o serviço de roteamento envia a mensagem diretamente à estação base, da mesma maneira que ocorre no LEACH.

O que esta abordagem tenta é impedir o aparecimento de áreas descobertas perto da estação base, o que deveria ocorrer rapidamente uma vez que todas as mensagens da rede teriam que passar por estes nós antes de chegar à estação base.

Geographic Routing without Location Information

O *Geographic Routing without Location Information* [Rao *et al.*, 2003] é um algoritmo que visa atribuir coordenadas virtuais aos nós. Assim, os nós não precisam necessariamente saber sua coordenada real. Apesar de assumir que os nós sensores sabem onde estão, a localização dos nós não é necessária para o funcionamento do protocolo. Há três cenários possíveis nesse algoritmo no qual os nós podem possuir coordenadas virtuais:

- Os nós da borda da rede sabem sua localização. A partir das posições dos nós da borda, é possível determinar as coordenadas dos nós restantes. A ideia é que o pacote seja transmitido para o nó mais próximo do nó destino, se e somente se esse nó estiver mais próximo do nó destino que o nó atual.
- Os nós da borda da rede sabem que estão fora dela, mas não sabem a sua localização. Uma mensagem de *HELLO* é enviada pelos nós da borda para toda a rede para que possam determinar sua distância em relação aos outros nós que estão na borda. Com isso, todos os nós da borda descobrem as coordenadas de todos os outros nós da borda utilizando triangulação (Rao, *et. al.*, 2003). Em seguida, os nós que estão na borda utilizam o método descrito no primeiro cenário para descobrir as suas coordenadas;
- Os nós não sabem que estão na borda e nem a sua localização. Neste caso, é adicionado um passo inicial ao cenário anterior. Uma mensagem de *HELLO* é enviada para toda a rede, com o intuito de identificar os nós que estão na borda. Caso um nó esteja em uma maior distância da mensagem de *HELLO* que todos os nós que estão a uma distância de dois saltos do nó, então este é um nó de borda. Após a determinação dos nós da borda, o método descrito no

cenário anterior é utilizado para determinar as coordenadas dos nós restantes. Determinada sua coordenada virtual, os nós da borda realizam o roteamento segundo as seguintes regras:

- O pacote é roteado para o nó mais próximo em direção ao destino;
- Não havendo nenhum nó mais próximo do destino do que o nó atual, é verificado se o pacote é destinado a este nó. Assim sendo, o pacote chegou ao seu destino. Do contrário, não é possível entregar o pacote.

GeoMote

O *GeoMote* (*Geographic Multicast for networked sensors*) [Broadwell *et al.*, 2004], é baseado no *GeoCast*. Os destinatários das mensagens são endereçados através de polígonos. Desta forma é possível realizar comunicações *multicast* centralizadas. No *GeoMote*, cada nó possui uma função específica durante todo o tempo de vida da rede, definida no momento de sua programação. Existem três categorias de nós sensores: *GeoHosts* (que produzem dados), *GeoRouters* (que repassam dados produzidos pelos *GeoHosts*) e os *GeoGateways* (que atuam como pontos de entrada e saída de dados).

GEAR

O GEAR (*Geographical and Energy Aware Routing*) é um algoritmo de roteamento geográfico que procura minimizar o consumo de energia da rede [Yu *et al.*, 2001]. Destaca-se dos demais algoritmos geográficos encontrados na literatura por utilizar informações de toda a rota até o destinatário. O uso de informação de nós distantes permite uma rota até o mais eficiente, ao custo de um maior tempo de convergência. Em redes onde há mobilidade de nós, o algoritmo irá prover rotas menos eficientes que aquelas encontradas em cenários fixos. Além disto, existem vários casos críticos que necessitam de mecanismos específicos para seu tratamento, o que aumenta a complexidade do protocolo.

GPSR

Diferentemente das abordagens anteriores, o GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) permite o endereçamento de apenas um nó [Karp e Kung, 2000]. Ele utiliza dois algoritmos para rotear dados. Quando um nó identifica um vizinho que está mais próximo do destino, o protocolo repassa

os dados para esse vizinho. Caso não exista um vizinho mais próximo, o pacote deve ser repassado para um nó mais distante, para evitar uma região onde a cobertura de nós é baixa. Nesse tipo de situação, o protocolo utiliza o algoritmo de roteamento de perímetro que constrói um grafo planar para identificar para qual vizinho os dados devem ser repassados. Uma vez montado o grafo, a regra da mão direita (Figura 8 (a)) determina o próximo salto de comunicação conforme ilustrado na Figura 8 (b), onde o nó x repassa o pacote para o seu vizinho à direita da semirreta xD , até encontrar um nó que esteja mais próximo de D em relação à x . Ao determinar que a distância do pacote até o seu destinatário, volta a rotear os dados utilizando a abordagem gulosa. A regra da mão direita define que ao chegar em um nó x vindo do nó y , a próxima borda a ser percorrida será a borda subsequente de (x,y) , no sentido anti-horário em relação a x . A Figura 8 (a) mostra um exemplo do emprego da regra da mão direita, onde o caminho percorrido no grafo é formado por $y \rightarrow x \rightarrow z \rightarrow y$.

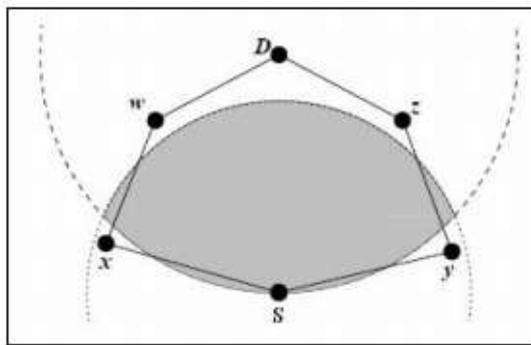


Figure 8 (a) – Funcionamento da regra da mão direita.

Fonte: PUC-Rio

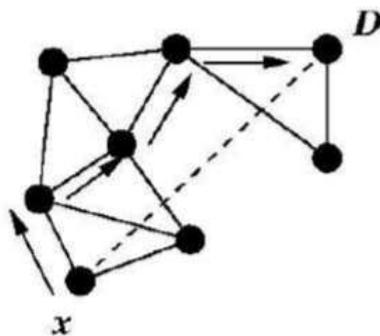


Figura 8 (b) - Ilustração do protocolo GPSR.

Fonte: Mendonça, 2009

As principais vantagens do algoritmo consistem no uso de informações locais da vizinhança para roteamento e o uso de algoritmos geométricos simples, que possibilitam a implementação do protocolo em nós sensores com poucos recursos de memória e processador.

O algoritmo assume que é possível identificar todos os nós da rede

eficientemente via informações geográficas. Para facilitar a construção desta tabela, os nós da rede operam em modo promíscuo, armazenando as informações de localização contidas nos pacotes interceptados. Com esta abordagem, a atualização dos dados geográficos é facilitada. Contudo, o consumo de energia acaba sendo maior, pois a base precisa permanecer ligada. A Tabela 2 apresenta um comparativo entre os principais algoritmos geográficos considerando aspectos como consumo de energia e disseminação dos dados, por exemplo.

De maneira geral, como as RSSFs geram dados, um problema importante é a qualidade da informação obtida ao longo do tempo. Tendo em vista o papel de um protocolo de roteamento para as RSSFs e levando em conta as muitas particularidades existentes em cada RSSF, o entendimento da taxonomia da rede auxilia bastante na construção desses protocolos. A partir da construção de um protocolo, em casos de longas distâncias entre os sensores, mais sensores acabam sendo necessários, podendo ocorrer aumento na transmissão de dados, o que também aumenta as chances de colisões e retransmissões de pacotes, ou ainda, maior potência utilizada nas transmissões.

Fatores como estes ocasionam uma diminuição na vida útil da rede, uma vez que esta opera por uma fonte de energia finita (baterias), onde cada transmissão representa o uso desta energia. O protocolo de roteamento deve buscar as melhores rotas, evitar a geração de caminhos cíclicos, ou seja evitar que a mensagem permaneça fluindo pela rede indefinidamente, impedir retransmissões desnecessárias, e por fim, ter a capacidade de balancear a energia da rede (Sperque, *et. al.*, 2012).

Algoritmo	Consumo de Energia	Escalabilidade	Latência	Overhead	Disseminação dos Dados
LEACH-C	Alto	Boa	Baixa	Alto	Cluster-head
ICA	Mod.	Boa	Baixa	Alto	Cluster-head
Geographic Routing without Location Information	Alto	Boa	Alta	Alto	Sob demanda
GeoMote	Ltd.	Boa	Baixa	Alto	Sob demanda
GEAR	Ltd.	Ltd.	Mod.	Mod.	Sob demanda
GPSR	Ltd.	Boa	Mod.	Mod.	Sob demanda

Tabela 2 – Comparativo entre os principais algoritmos geográficos (adaptado de Li, *et. al.*, 2006).

4. Protocolo proposto

Existem muitas aplicações em redes de sensores sem fio que utilizam veículos aéreos não tripulados. Como exemplo, tem-se a utilização de nós de revezamento, coleta de dados de uma rede de área ampla em um ambiente remoto ou hostil, e até mesmo na localização de um nó de suporte na rede móvel (Sousa *et. al*, 2013). Contudo, além da hostilidade oferecida por alguns ambientes, algumas áreas de interesse de monitoramento também encontram-se isoladas do ponto de vista da infraestrutura em termos de comunicação.

O consumo de energia em redes de sensores tradicionais configura uma questão desafiadora, uma vez que se refere a atravessar as camadas de *design*, como a topologia da rede, algoritmos de agrupamento e métodos de transmissão.

Como abordado no capítulo anterior, devido a sua eficiência e baixo custo computacional nos nós da rede, o algoritmo LEACH-C é um dos mais utilizados. No entanto, em redes de sensores que abrangem uma grande área, a conservação de energia torna-se um fator muito mais desafiador do que em redes de sensores sem fio tradicionais.

Sendo assim, faz-se necessária a proposta de um protocolo de comunicação para redes de sensores sem fio onde os agentes possam operar de forma eficiente no desempenho de suas funções, sem que isso esteja ligado diretamente a um alto consumo de energia. É justamente nessa relação que se apoia o protocolo apresentado neste projeto.

4.1 Premissas e funcionamento do protocolo proposto

O protocolo proposto contempla, como já fora mencionado anteriormente, características de outras topologias de comunicação. Visando o seu funcionamento em cenários distintos, algumas considerações foram feitas. A primeira delas foi a *igualdade entre os nós sensores*. Aspectos como o comportamento e tamanho físico, bem como os recursos de processamento, energia e memória não apresentam diferença entre os nós.

A segunda premissa levada em consideração é a *fixação do estação base ou sorvedouro*. As redes *wireless* convencionais normalmente assumem uma estação base fixa, existindo, porém, sistemas compostos por sensores móveis onde cada nó da rede pode ser, aleatoriamente,

transformado em outra estação base.

O terceiro pressuposto é a *mobilidade dos nós sensores*. Os nós, no protocolo proposto, têm liberdade para se moverem ao longo do espaço de busca, diferente de nós sensores que são colocados, por exemplo, numa floresta para coletar dados de umidade e temperatura e que são tipicamente estáticos. Embora isso acarrete um aumento no custo e na complexidade da rede, a compensação é feita pela melhora no seu desempenho como um todo.

Pacotes de dados transmitidos pelos nós sensores. Essa corresponde à quarta premissa. A partir do momento em que os nós sensores e a base estão dentro do alcance de comunicação uns dos outros, ocorre a retransmissão dos pacotes ao longo da rede.

A quinta premissa levada em consideração é o *empilhamento dos pacotes*. Cada nó sensor é dotado de uma pilha responsável por armazenar os pacotes que foram recebidos ao longo do funcionamento da rede. Essa característica permite a otimização do protocolo, pois ajuda a diminuir a quantidade de mensagens que serão trocadas pelos sensores, já que os pacotes que eventualmente já tenham sido recebidos, não serão armazenados novamente.

Os pacotes que foram empilhados passam a configurar a sexta premissa: *retransmissão de pacotes*. Considerando a distância entre os nós sensores, os pacotes podem ser retransmitidos ou não. Essa tomada de decisão é feita da seguinte forma:

- Para nós sensores que estão a uma distância maior que a metade do raio de comunicação, o pacote recebido é retransmitido de forma imediata.
- Para nós sensores que estão a uma distância menor que a metade do raio de comunicação, aguarda-se um intervalo de tempo T para verificar se um pacote igual não foi recebido, realizando, com isso, a retransmissão e evitando repetições.

A estação base deve notificar a todos os nós sensores quanto à retransmissão de pacotes. A ausência de restrições quanto à infraestrutura da base permite que o número de pacotes retransmitidos por ela seja ilimitado. Essa corresponde à sétima premissa: *broadcasting de pacotes pela base*.

O *formato do pacote* é a oitava premissa assumida pelo protocolo. Na troca de comunicação entre os nós sensores, o pacote apresenta basicamente dez campos com um determinado número de *bits* cada, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Formato do pacote utilizado na troca de informações.

ID	Tipo	Nº UAV Origem	Nº UAV Retrans	X UAV Origem	Y UAV Origem	X UAV Retrans	Y UAV Retrans	X Alvo	Y Alvo
32 bits	2 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits

Onde:

ID – Representa o identificador único do pacote por nó sensor;

Tipo – Tipo do pacote que está sendo enviado;

Nº UAV Origem – Número do nó sensor que originou a transmissão do pacote;

Nº UAV Retrans – Número do último nó sensor que retransmitiu o pacote;

X UAV Origem – Coordenada *X* da posição do nó que originou a transmissão do pacote;

Y UAV Origem – Coordenada *Y* da posição do nó que originou a transmissão do pacote;

X UAV Retrans – Coordenada *X* do último nó sensor que retransmitiu o pacote;

Y UAV Retrans – Coordenada *Y* do último nó sensor que retransmitiu o pacote;

X Alvo – Coordenada *X* do alvo perseguido pelo nó sensor que originou a transmissão do pacote;

Y Alvo – Coordenada *Y* do alvo perseguido pelo nó sensor que originou a transmissão do pacote;

O *tipo do pacote* é a última premissa que é levada em consideração. O mesmo conta com quatro tipos de pacotes que, embora herdem o formato do pacote apresentado na Tabela 3, apresentam diferenças quanto ao preenchimento de alguns campos.

No pacote *Tipo 1*, conforme a Tabela 4, o nó sensor interroga sua comunicação com a base. Mensagens com este tipo de pacote são enviadas constantemente pelo nó sensor para saber se ele possui ou não comunicação com a estação base. A resposta desse teste de comunicação é dada a partir do envio de outro tipo de pacote como pode ser visto na Tabela 5, pela base, sendo nesse momento realizado o *broadcasting*. Vale ressaltar que a limitação de energia da base foi desconsiderada, permitindo que a transmissão de pacotes ocorra a uma distância muito maior que os nós.

Tabela 4 - Formato do pacote Tipo 1 para informação de comunicação com a base.

ID	Tipo	Nº UAV Origem	Nº UAV Retrans	X UAV Origem	Y UAV Origem	X UAV Retrans	Y UAV Retrans		
32 bits	1	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits		

Tabela 5 - Pacote Tipo 3 enviado como resposta do pacote Tipo 1.

ID	Tipo		Nº UAV Retrans	X UAV Origem	Y UAV Origem				
32 bits	3		32 bits	32 bits	32 bits				

Já no segundo tipo de pacote gerado pelos nós sensores, o *Tipo 2*, o que ocorre é a notificação que um determinado nó sensor está perseguindo um alvo. Essa mensagem de detecção de alvo apresenta informações de posicionamento tanto do nó emissor quanto do alvo, como pode ser observado na Tabela 6. O *feedback* desse envio é dado por um *broadcasting* pela estação base com o envio do último tipo de pacote, o *Tipo 4*. De acordo com a Tabela 7, as informações contidas nesse tipo de pacote são de posicionamento tanto do nó sensor que detectou o alvo quanto do alvo que está sendo perseguido.

Tabela 6 - Pacote Tipo 2 para informação de detecção de alvo.

ID	Tipo	Nº UAV Origem	Nº UAV Retrans	X UAV Origem	Y UAV Origem	X UAV Retrans	Y UAV Retrans	X Alvo	Y Alvo
32 bits	2	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits

Tabela 7 - Pacote Tipo 4 enviado como resposta do pacote Tipo 2.

ID	Tipo	Nº UAV Origem		X UAV Origem	Y UAV Origem				
32 bits	4	32 bits		32 bits	32 bits				

O protocolo funciona basicamente procurando, de forma otimizada, obter um bom desempenho na troca de pacotes, sem que isso esteja atrelado, necessariamente, a um alto consumo de energia da rede como um todo. Para que isso possa ser feito, o ambiente de simulação foi modelado de modo que os nós sensores (UAVs) funcionassem como agentes simples, com

propriedades de percepção, processamento de informações e atuação no ambiente.

O comportamento desses agentes, no que se refere à coordenação e mobilidade, é baseado em uma técnica de otimização estocástica chamada PSO (do inglês, *Particle Swarm Optimization*). Desenvolvida em 1995 por James Kennedy e Russel Eberhart (Kennedy & Eberhart, 2005), o PSO busca simular graficamente o comportamento de um bando de pássaros. Tendo em vista que um enxame também pode ser descrito como uma coleção estruturada de organismos interativos, onde, embora cada indivíduo seja extremamente simples, o comportamento coletivo se torna bastante complexo. O comportamento global do enxame de organismos sociais, portanto, emerge de maneira não linear através do comportamento dos indivíduos dentro do enxame, o que configura um forte acoplamento entre o comportamento individual e o coletivo. Entretanto, o comportamento do enxame não é regido somente pelo comportamento dos indivíduos de forma independente. Em vez disso, o aspecto de interação entre os agentes é o papel fundamental para a formação do comportamento coletivo.

A interação social é um dos aspectos que dirige o PSO. A partir de um aprendizado mútuo, cada agente move-se no com o intuito de se aproximar mais de seus melhores vizinhos. Tal estrutura social é determinada pela formação de vizinhanças, onde os indivíduos, dentro dos limites dessa vizinhança, procuram trocar informações entre si (Pinheiro, 2011).

Essas vizinhanças podem ser de diferentes topologias como citado no Capítulo 3. Mas independentemente do tipo de vizinhança, cada partícula (agente) armazena as seguintes informações:

- $\vec{x}_i(t)$ (posição atual) – vetor de valores reais que são os parâmetros para a solução do problema;
- $\vec{v}_i(t)$ (velocidade atual) – vetor que determina a velocidade de movimentação dos agentes;
- $\vec{P}_{best}(t)$ – a melhor posição encontrada pela partícula;
- $\vec{G}_{best}(t)$ – melhor posição encontrada pelo enxame, ou seja, da $\vec{P}_{best}(t)$ melhor partícula;
- *fitness* – valor que define a partícula qualitativamente, geralmente, é o retorno da função a ser otimizada.

A posição $\vec{x}_i(t)$ é modificada pela adição do vetor velocidade $\vec{v}_i(t)$ ao seu posicionamento. O comportamento do PSO consiste em, a cada iteração, modificar o valor da velocidade da partícula de acordo com as posições $\vec{P}_{best}(t)$ e o $\vec{G}_{best}(t)$. A velocidade das partículas, no PSO, é determinada por

$$\vec{v}_i(t+1) = \omega \vec{v}_i(t) + c_1 r_1 [\vec{P}_{besti} - \vec{x}_i(t)] + c_2 r_2 [\vec{G}_{besti} - \vec{x}_i(t)], \quad (1)$$

onde $\vec{v}_i(t+1)$ será a nova velocidade da partícula \vec{P}_i , enquanto $\vec{v}_i(t)$ e $\vec{x}_i(t)$

são, respectivamente, a velocidade atual e posição atual da partícula. Existem dois componentes que influenciam o comportamento do PSO. O primeiro é o coeficiente cognitivo c_1 , que representa a influência individual da partícula em relação a melhor posição encontrada a partir de sua experiência pessoal, \vec{P}_{best} , no cálculo de sua velocidade. O segundo coeficiente é o c_2 . Ele especifica a influência social em relação a melhor posição encontrada pelo grupo, \vec{G}_{best} , no cálculo de sua velocidade.

Para conceder a característica contínua ao PSO, no cálculo da velocidade, são escolhidos dois coeficientes aleatórios, r_1 e r_2 no intervalo [0,1], associados aos componentes cognitivo e social, respectivamente. Por fim, o valor da inércia ω provê o balanceamento entre a busca em amplitude e profundidade, tendo aumentado a eficácia das soluções encontradas em um grande número de aplicações.

A velocidade da partícula, após efetuado seu cálculo, é utilizada no cálculo da sua nova posição que, somada à nova velocidade, gera a posição final da partícula, conforme

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{v}_i(t+1) + \vec{x}_i(t). \quad (2)$$

O tempo é a unidade de iteração e possui valor unitário no PSO, não sendo, portanto, levado em consideração como fator que multiplica a velocidade. Em resumo, o PSO funciona de acordo com o pseudocódigo descrito no Algoritmo 1.

1. Inicialize as partículas aleatoriamente no espaço de busca;
2. Avalie o *fitness* de cada partícula;
3. Determine o \vec{G}_{best} ;
4. Enquanto *critério de parada não for alcançado faça*
5. **para cada partícula faça**
6. Atualize velocidade e posição (Equações 1 e 2);
7. Avalie o *fitness* da partícula;
8. Atualize o \vec{P}_{best} ;
9. Atualize o \vec{G}_{best} ;
10. Retorne o \vec{G}_{best} ;

Algoritmo 1 - Pseudocódigo do PSO.

4.2 Simulador utilizado e adaptações propostas

O protocolo proposto foi testado em um simulador desenvolvido por (Pinheiro, D. M., 2011) denominado SUAVS (*Swarm Unmanned Aerial Vehicle Simulator*) ilustrado na Figura 9. Ele foi construído utilizando a linguagem de programação JAVA e os conceitos de Orientação a Objetos. Para a captura da ação dos componentes modelados foi utilizada a biblioteca AWT, e padrões de projeto como o *Strategy* e *State* que implementam as estratégias dos UAVs e dos sensores (anti-colisão, comunicação e percepção), respectivamente.

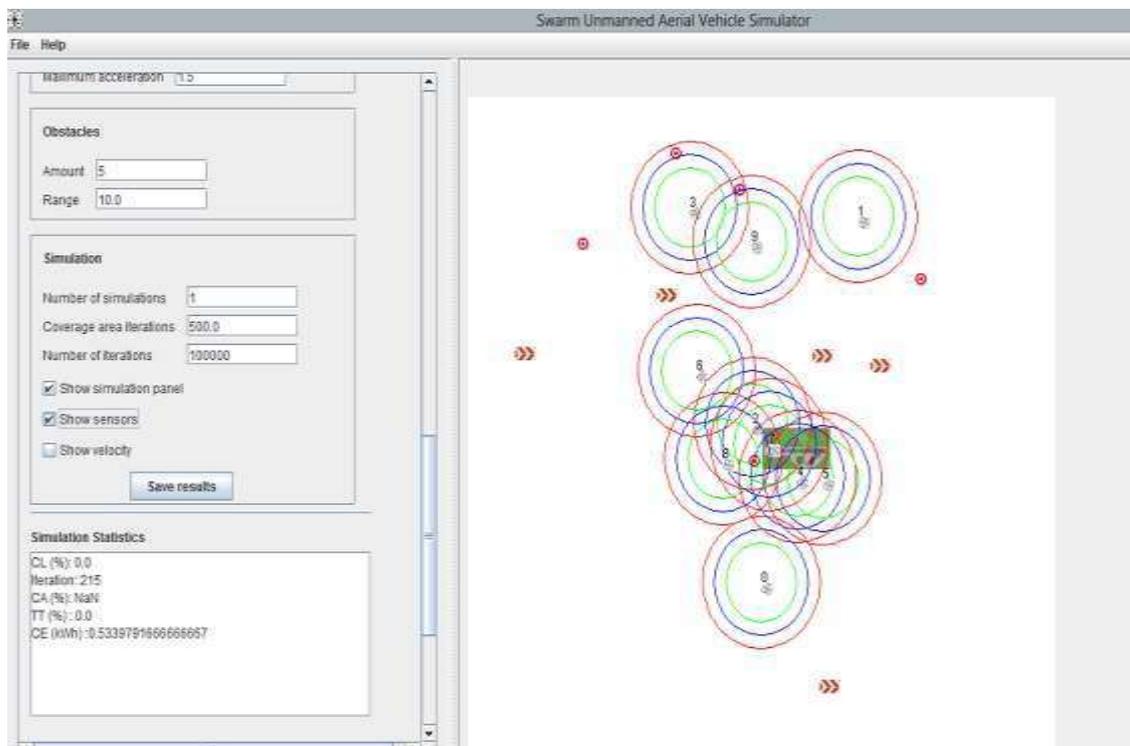


Figura 9 - Tela de simulação do SUAVS.

O simulador faz uso do modelo de agente que, consistindo de uma entidade que percebe o ambiente a partir de sensores, processa sobre as informações obtidas desses mesmos sensores e conhecimentos *a priori*, atuando, dessa forma, no ambiente.

Os componentes modelados no sistema são:

- UAVs – representam os principais agentes do simulador. A coordenação entre esses indivíduos é que permitirá que as

atividades para os quais eles foram propostos como patrulha e rastreamento, por exemplo, possam ser feitas de forma eficiente;

- Alvos – configuram toda e qualquer entidade que trafega, sem permissão, através do ambiente. São percebidos pelo sensor de percepção do UAV e de seus vizinhos, e perseguidos ao longo do ambiente de simulação;
- Obstáculos – qualquer estrutura fixada no ambiente de simulação, com exceção da base, é considerada um obstáculo. Ao longo da movimentação dos agentes pelo ambiente, esses obstáculos são detectados pelo sensor de anti-colisão do UAV e desviados;
- Base terrestre – entidade que busca dar o suporte necessário aos UAVs ao longo da simulação. Atua também no recebimento de informações de perseguição de alvo enviadas pelos UAVs, por exemplo, bem como na transmissão destas, podendo também atuar como ponto de retorno dos UAVs nos momentos de perda de comunicação;
- Limites – o simulador desenvolvido apresenta limites nos quatro pontos cardeais (norte, sul, leste e oeste), o que permite traçar estratégias de retorno no caso de uma possível invasão do espaço aéreo vizinho.

Os principais mecanismos levados em conta no simulador desenvolvido para o funcionamento dos UAVs são:

- Mecanismo de localização – tarefas como as de patrulha e sensoriamento, por exemplo, exigem dos UAVs o conhecimento referente à sua localização no ambiente. Essa informação é chave para que tomadas de decisão de retorno à base e desvio de obstáculos, dentre outras, possam ser realizadas eficazmente;
- Mecanismo de locomoção – os aspectos de aerodinâmica dos UAVs levados em conta no desenvolvimento do simulador são: aceleração horizontal e aceleração horizontal máxima, ambas expressas em metros/unidade de tempo ao quadrado, velocidade horizontal e velocidade máxima, ambas em metros/unidade de tempo direção em graus, sincronismo, cognição e social;
- Mecanismo de anti-colisão – visa a locomoção segura do UAV ao longo do ambiente. Para isso, considera os parâmetros de: raio de alcance, limiar e segurança

- Mecanismo de comunicação – a característica dinâmica do ambiente leva a uma topologia de comunicação sem fio. No simulador desenvolvido, cada UAV atua como ponte de roteamento, a partir de uma topologia *ad hoc* baseada no padrão IEEE 802.15.4. Os parâmetros levados em conta para esse mecanismo são: raio de alcance, limiar, segurança e número máximo de vizinhos.
- Mecanismo de percepção do ambiente – a percepção ambiental utilizada é determinada pelos parâmetros de: raio de percepção, habilidade de detectar a mudança do ponto ótimo no ambiente e encontrar sua nova posição e habilidade de seguir o ótimo do problema.

Os agentes ao longo da simulação podem assumir diferentes estados, dentre eles o de agrupamento, o de rastreamento e o de retorno à base (Pinheiro, 2011), sendo este último a principal modificação realizada no simulador neste trabalho, sobretudo em termos de visualização.

As operações dos UAVs são iniciadas no modo de agrupamento, e ao se envolverem em alguma colisão sua missão é encerrada. Esse aspecto esteve presente no simulador em sua versão inicial e foi mantido após as modificações propostas nesse projeto, além do critério de parada da simulação, que ocorre com o alcance do número máximo de iterações.

O sincronismo dos UAVs ocorre de acordo com a Equação (3) de forma a englobar três objetivos principais e ocorre em todas os modos de operação. São eles:

1. Evitar colisões – na simulação, uma colisão representa o término da missão para os UAVs envolvidos. O desvio das mesmas deve ocorrer não apenas quando um obstáculo é detectado, mas também quando dois ou mais UAVs estão muito próximos uns dos outros;
2. Manter conexões – o comportamento em grupo dos UAVs configura um dos pontos mais importantes da simulação. Tendo em vista que os agentes passaram a iniciar todos próximos da base e com duas conexões no mínimo, manter as conexões ativas entre eles contribui para que uma eventual perda de comunicação com base seja mais difícil de ocorrer;
3. Respeitar os limites do espaço aéreo – uma vez que a falta de um piloto a bordo de uma aeronave é considerado um risco potencial para outros usuários do espaço aéreo, a utilização de UAVs é feita mediante a segregação desse espaço, sendo necessário, com isso, o respeito a esses limites;

$$\vec{a}_{sincronismo} = \vec{a}_{antiColisao} + \vec{a}_{comunicacao} + \vec{a}_{correcao}, \quad (3)$$

onde:

$$\vec{a}_{antiColisao} = \sum_{i=1}^{n_{obstaculos}} \vec{x}_{uav} - \vec{x}_{obstaculo_i}, \quad (4)$$

$$\vec{a}_{comunicacao} = \sum_{i=1}^{n_{vizinhos}} \vec{x}_{vizinho_i} - \vec{x}_{uav}, \quad (5)$$

$$\vec{a}_{correcao} = B \cdot \vec{d}_{base} \cdot c_3 \cdot r_3, \quad (6)$$

e

$$\vec{d}_{base} = |\vec{x}_{base} - \vec{x}_{uav}|. \quad (7)$$

Sendo:

- $\vec{a}_{antiColisao}$ – corresponde ao vetor de anti-colisão resultante da Equação (4);
- $\vec{a}_{comunicacao}$ – corresponde ao vetor de comunicação resultante da Equação (5);
- $\vec{a}_{correcao}$ – corresponde ao vetor de retorno à base resultante da Equação (6);
- B – representa o fator *booleano* (0 ou 1) que é ativado caso o UAV perca comunicação com a base;
- \vec{d}_{base} – representa a distância entre a base e o UAV;
- c_3 e r_3 – constantes que representam o peso de retorno à base e um fator de aleatoriedade para a mesma finalidade, respectivamente.

Para o teste do protocolo proposto, algumas mudanças e adaptações se fizeram necessárias, dentre elas a inserção de mais um termo no vetor resultante de sincronismo, o $\vec{a}_{correcao}$, permitindo resultados tanto em termos de visuais quanto numéricos e que são abordados no Capítulo 5 deste documento.

5. Experimentos e resultados

Esta seção trata dos experimentos realizados com o protocolo proposto no simulador *SUAVS* e os resultados encontrados.

5.1 Análises dinâmicas

As modificações feitas no simulador apresentaram resultados estatísticos quanto ao fluxo de pacotes entre os próprios UAVs e a base, mas também trouxeram alguns resultados em termos de visualização no simulador.

5.1.1 Inicialização dos UAVs próximos à base

A primeira modificação realizada objetivando uma maior aproximação de experimentos no mundo real foi a inicialização de todos os UAVs próximos da base como pode ser visto na Figura 10. O posicionamento inicial dos agentes na primeira versão do simulador era feita de forma aleatória, não trazendo os resultados esperados quando avaliada troca de pacotes e a comunicação com a base. Essa modificação visa não apenas diminuir os impactos que uma inicialização aleatória traria em um ambiente real, mas inclusive permitir aspectos com *health monitoring*, levando em conta que, com os UAVs próximos da base, a manutenção no caso de alguma falha dos componentes passa a ser agilizada, além de se ter um maior controle de possíveis áreas não patrulhadas.

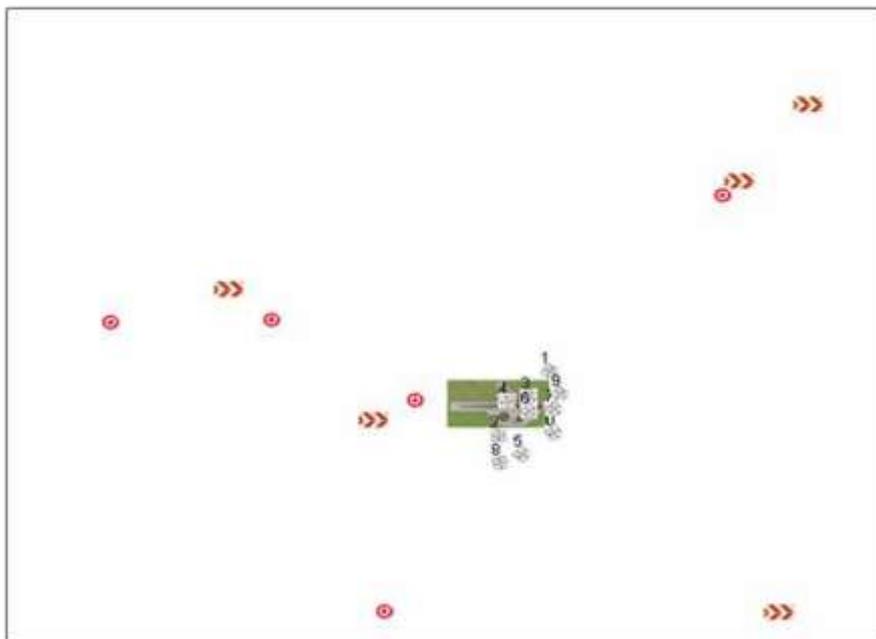


Figura 10 – UAVs em torno da base no momento da inicialização.

A estratégia de inicialização dos UAVs próxima à base é análoga a uma simulação feita em um ambiente e com agentes reais.

Embora a inicialização dos agentes de forma agora controlada possa parecer levar a uma patrulha territorial limitada, é esperado que com o tempo os eles se espalhem ao logo da área monitorada, mesmo estando, a princípio, próximos à base. E considerando o relativo baixo custo no desenvolvimento desses robôs, um número maior de agentes com o comportamento que vem sendo apresentado poderá levar a resultados ainda mais satisfatórios, como pode ser observado na Figura 11, onde um maior número de UAVs foi considerado e a presença dos alvos ignorada, reforçando a ideia de comunicação com a base.

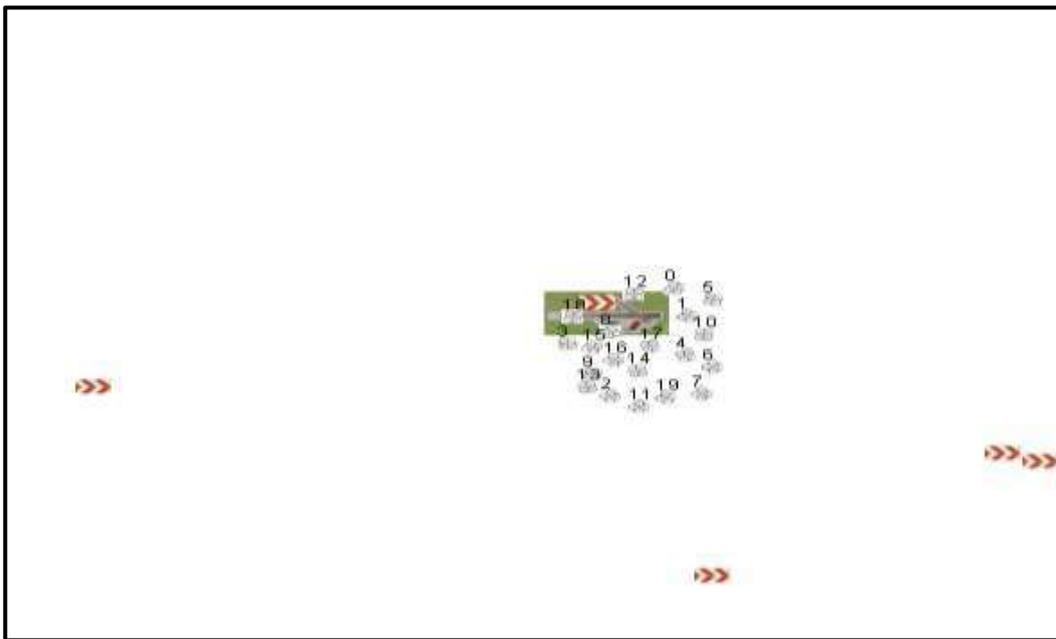


Figura 11 – Inicialização de simulação com 20 UAVs.

O comportamento coletivo dos UAVs no simulador é responsável por desencadear as principais ações do mesmo, a saber, a patrulha do ambiente e o rastreamento dos alvos. Essa estratégia de agrupamento passa a ser fortemente facilitada a partir da inicialização dos agentes próximos da base e, conseqüentemente, próximos uns dos outros, pois leva a uma economia de tempo considerável na formação de redes *ad hoc* em qualquer que seja o ambiente, não sendo mais necessários os saltos de locomoção dos agentes a procura de comunicação, o que também levava a um maior consumo de energia.

Vale ressaltar que essa estratégia foi adotada por decisão de projeto, considerando uma situação mais próxima da realidade onde os UAVs partiriam da base de vigilância para as buscas em torno da base na região de interesse.

5.1.2 Efeitos observados ao longo das simulações

a) Diminuição da formação de sub-enxames

Os UAVs em sua essência são construídos para perseguir alvos detectados, afinal, de nada adianta uma patrulha territorial quando, diante de algo hostil ou de natureza duvidosa, nenhuma ação é tomada. A estratégia de rastreamento inicial do simulador era, além de priorizar o alvo mais próximo visto que a probabilidade de perde-lo é menor, fazer o UAV atuar no rastreamento do alvo através dos termos de comunicação, $\vec{a}_{comunicacao}$, e atualização do termo da velocidade, $\vec{v}_i(t)$ em relação à posição $\vec{x}_i(t)$ do alvo, mesmo que isso implicasse na sua perda de comunicação com o enxame como um todo, tendo como principal consequência, a formação de sub-enxames. As modificações propostas levam a um comportamento diferente como pode ser visto na Figura 12. Como o fator de comunicação com a base, $\vec{a}_{correcao}$, é priorizado, a formação de sub-enxames sofre uma diminuição, permitindo, por exemplo, que a segregação do espaço aéreo seja sempre obedecida.

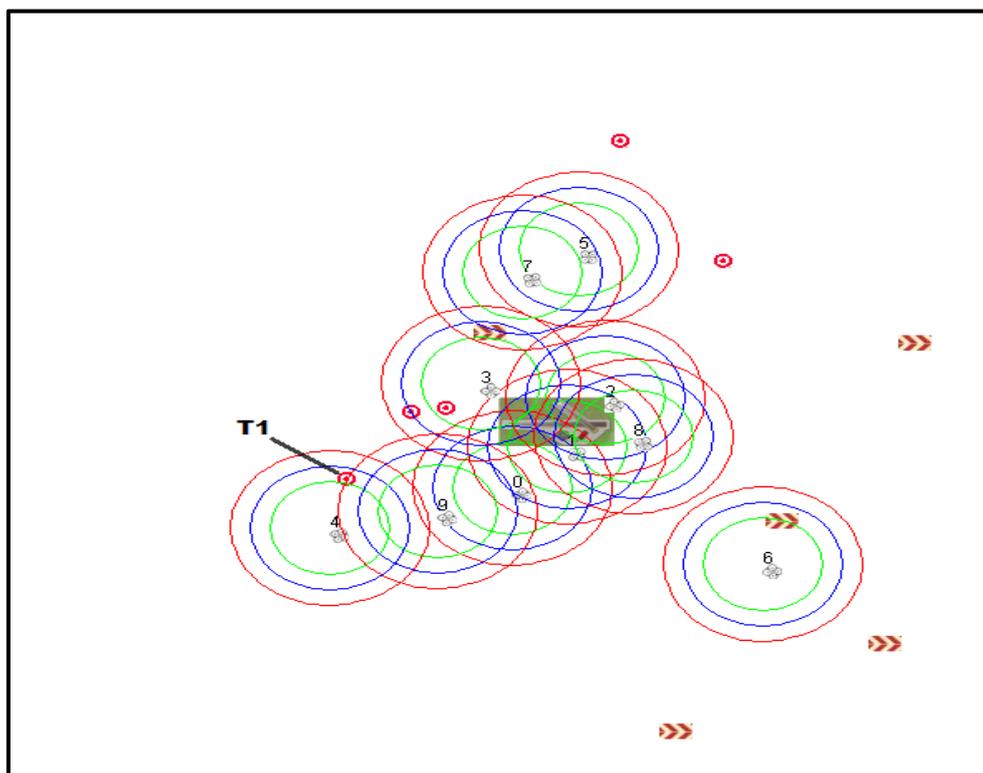


Figura 12 – Detecção de alvo sem formação de sub-enxame. Os círculos em vermelho representam a região de alcance do sensor de colisão, e os círculos azul e verde o alcance dos sensores de percepção e comunicação, respectivamente.

Na Figura 12, o alvo *T1* poderia levar os UAVs 4 e 9 à formação de um sub-enxame, porém, devido à necessidade de comunicação com a base, essa formação não acontece, uma vez que tem-se o conhecimento da localização da base terrestre. A partir do momento em que os UAVs percebem que a comunicação está sendo perdida, eles são atraídos de volta, procurando manter a comunicação com a base sempre ativa. Vale ressaltar que, no simulador, cada agente é regido por um conjunto de forças que determina o seu comportamento, e a cada iteração a posição $\vec{x}_i(t)$ da partícula é modificada pela adição do vetor velocidade $\vec{v}_i(t)$, cuja resultante é obtida pela Equação (1). Alguns alvos não estão sendo detectados, pois não se encontram dentro do raio de alcance do sensor de detecção dos UAVs.

Cada um desses fatores corresponde a uma força que impulsiona o UAV em determinada direção. O protocolo proposto basicamente procura inserir mais um componente que possa atuar em conjunto com os já existentes. Dessa forma, embora a comunicação com a base tenha sido priorizada, comportamentos diferentes do esperado podem acontecer, como a perda de comunicação ou mesmo a formação de sub-enxames, mas não configuram o comportamento do enxame na sua totalidade.

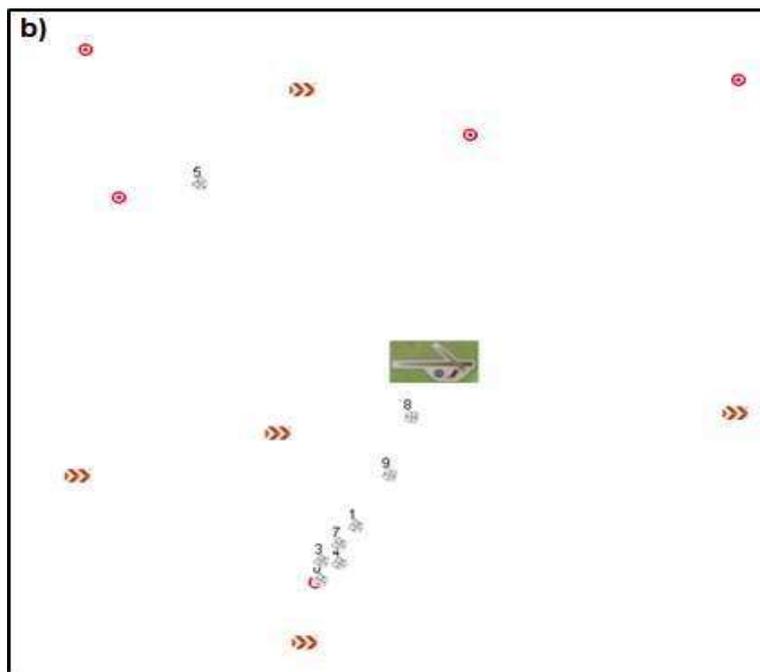
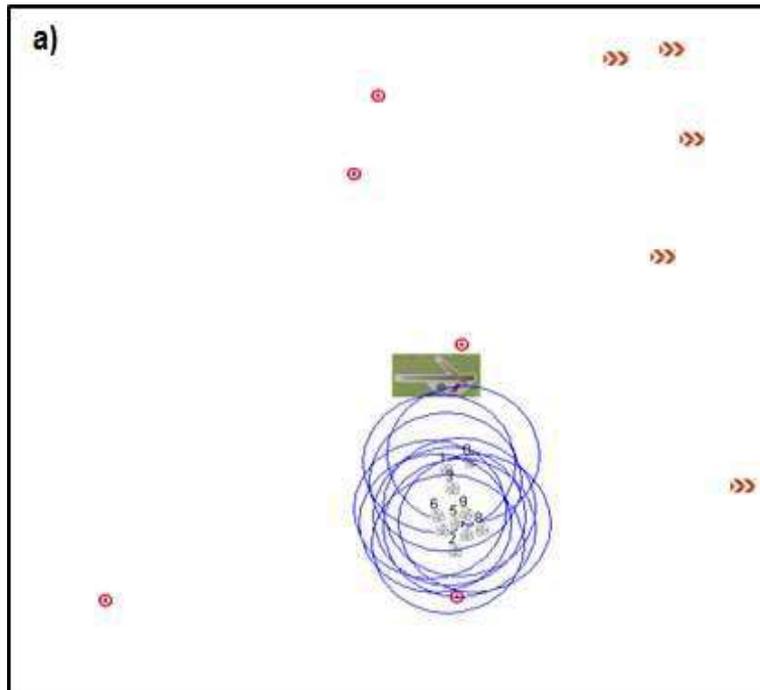
Uma consequência importante que provém da estratégia proposta está no número de colisões. A inicialização de forma aleatória dos UAVs sem a preocupação de manter constante comunicação com a base, levava os agentes a patrulhar áreas que eventualmente pudessem ter muitos obstáculos. A nova abordagem permite uma diminuição desses desvios com relação aos obstáculos, embora aumente, inicialmente, o número de desvios necessários entre os UAVs, já que através da formação das pontes de roteamento conforme descrito no Seção 5.1.3 e dos espalhamento dos UAVs ao longo do tempo, esse problema tende a ser amenizado.

b) Pontes de Roteamento

Uma das principais mudanças no comportamento dos UAVS causadas pelo protocolo proposto com relação à primeira versão do simulador é a formação de pontes de roteamento como pode ser visto nas Figuras 13 a) e b). A formação dessas pontes também se dava na versão inicial do simulador, mas com um tamanho menor, já que ocorria entre sub-enxames.

A ideia consiste em que um número mínimo de UAVs possa manter sua comunicação direta com a base, e essa mesma comunicação ser distribuída para os seus vizinhos. Sendo assim, a formação dessa ponte leva em conta não só o estado do UAV que mantém comunicação com a base, mas principalmente o número de vizinhos que esse UAV possui, uma vez que quanto maior esse número, maior será a ponte de roteamento formada. Essa ponte permite, inclusive, que haja um aumento da área patrulhada, sem contudo, perder a comunicação com a base.

É importante ressaltar, entretanto, que a formação dessa ponte pode ser desfeita a partir do momento que as demais forças que atuam sobre os agentes passam a ser maior que a força resultante que os mantém conectados uns com os outros, e conseqüentemente com a base. Porém, essa “quebra” acaba sendo rapidamente percebida, já que ao menos uma conexão com a base precisa ser mantida, bem como a avaliação de conectividade com os vizinhos, ou seja, o processo como um todo acaba funcionando como uma “cascata” na avaliação de comunicação.



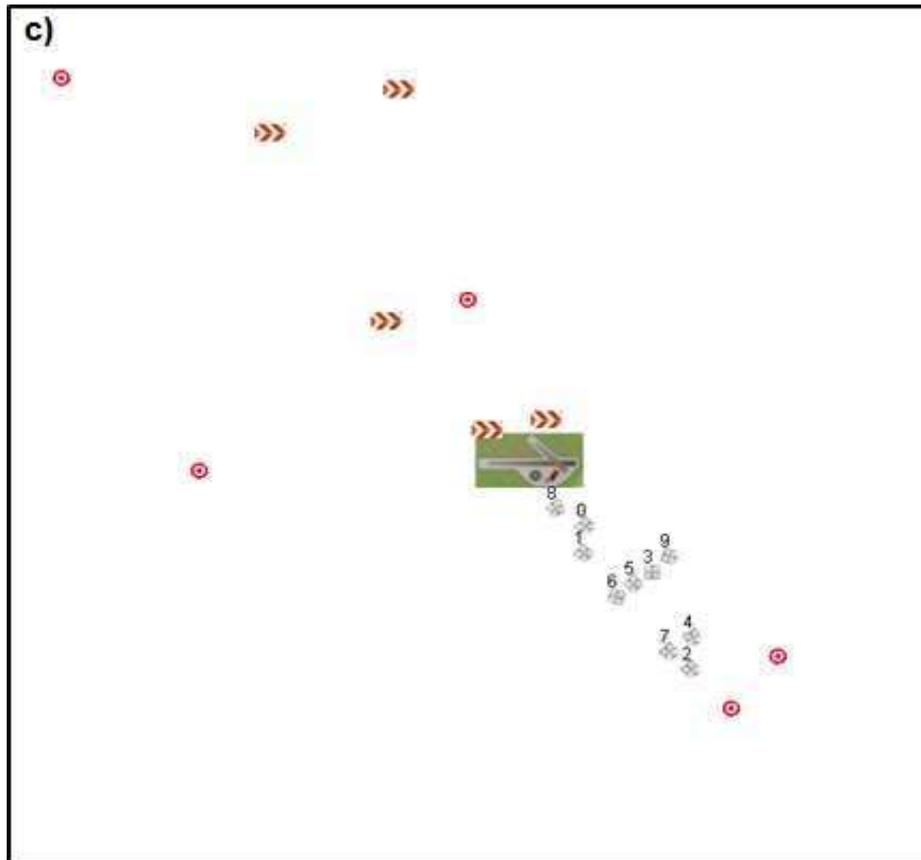


Figura 13 – Formação de pontes de roteamento com demonstração do raio dos sensores mantidos iguais (a). Outras formações de pontes, com a visualização dos sensores desativada (b) e (c).

É importante ressaltar a perda de comunicação com a base do UAV 5 na Figura 13 b). Como existem os coeficientes aleatórios multiplicados pelos pesos, esse pode ser um caso em que o peso de retorno à base, c_3 , tenha ficado com um valor muito pequeno.

A formação paralelo entre os UAVs 6, 5, 3 e 9, bem como a não detecção de alguns alvos nas figuras anteriores, deu-se basicamente devido à conectividade mínima (2-conectado) considerada desde a versão inicial do simulador (Seção 4.2). Algumas adaptações levaram o simulador a esses comportamentos e, a modificação em alguns pontos do código, acabava interferindo em outras que já haviam sido desenvolvidas.

5.2 Estatística do fluxo de pacotes

As análises dinâmicas permitiram a visualização de resultados interessantes, mas que não comprovam, em termos numéricos, a eficácia do protocolo proposto. Sendo assim, alguns resultados numéricos foram extraídos com base nas simulações realizadas tomando como base os parâmetros descritos por (Pinheiro, 2013).

5.2.1 Conjunto Experimental 1

O objetivo dessa análise é avaliar o comportamento dos pacotes que fluem pela rede levando em conta o número máximo de alvos de acordo com a Tabela 6.

Os gráficos das Figuras 14 e 15 representam a geração dos pacotes Tipos 1 e 2, respectivamente.

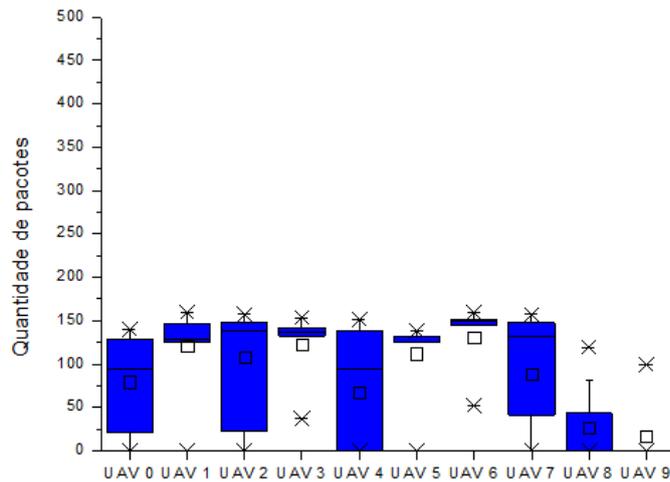


Figura 14 – Geração de pacotes Tipo 1 com 5 alvos.

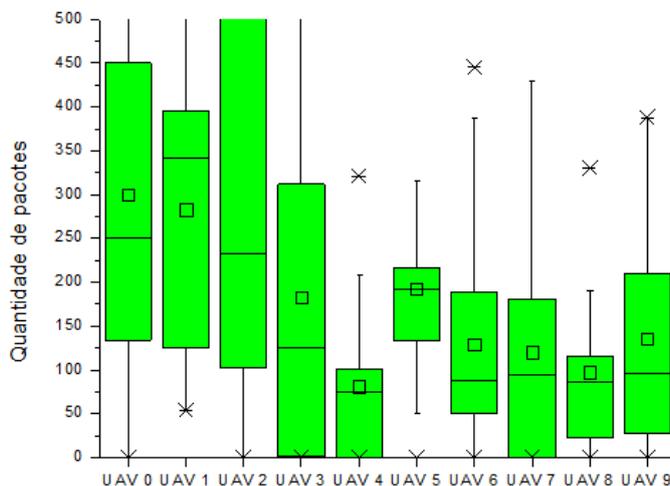


Figura 15 – Geração de pacotes Tipo 2 com 5 alvos.

Como pode ser observado na Figura 15, a média de geração de pacotes Tipo 2 é maior com relação ao Tipo 1 (Figura 14). Pode-se observar que em média, a geração de pacotes Tipo 1 é entre 20 e 40 pacotes por UAV, enquanto que o surgimento dos pacotes Tipo 2 varia entre 100 e 300 pacotes por UAV. Essa diferença era esperada, e confirma a hipótese de que com um número maior de alvos no ambiente, a tendência é que os pacotes Tipo 2 circulem em maior número pela rede.

A recepção dos pacotes pelos UAVs ao longo da rede também apresenta um comportamento interessante como pode ser observado nas Figuras 16 e 17. De acordo com a distribuição da Figura 16, em média cada UAV recebe entre 25 e 125 pacotes do Tipo 1. Já os pacotes do Tipo 2, como pode ser observado na Figura 17, têm a sua recepção média bem maior, com valores de recepção que chegam a mais de 500 pacotes por UAV. A grande diferença entre os valores de recepção de alguns UAVs (UAV 2 e 4 da Figura 17) ocorre devido a uma provável colisão sofrida por um dos agentes.

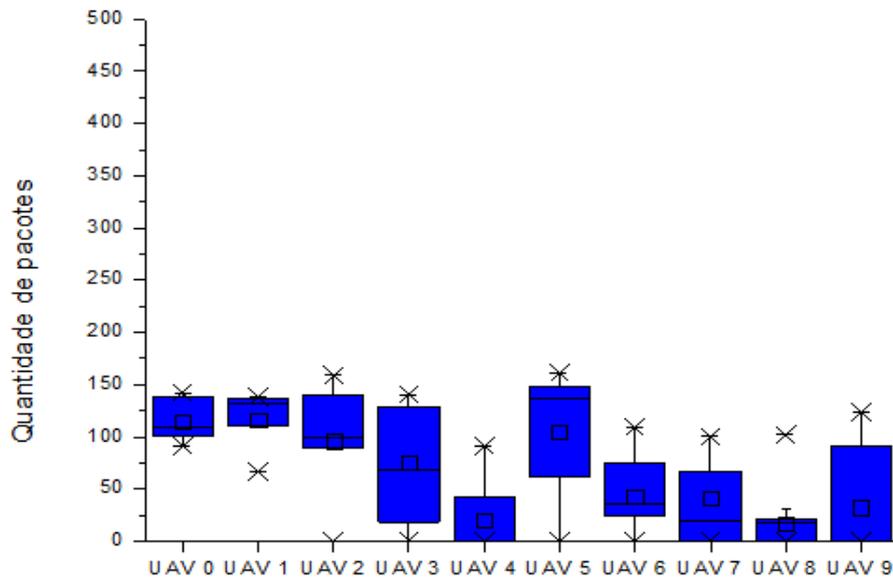


Figura 16 – Recepção de pacotes Tipo 1 com 5 alvos.

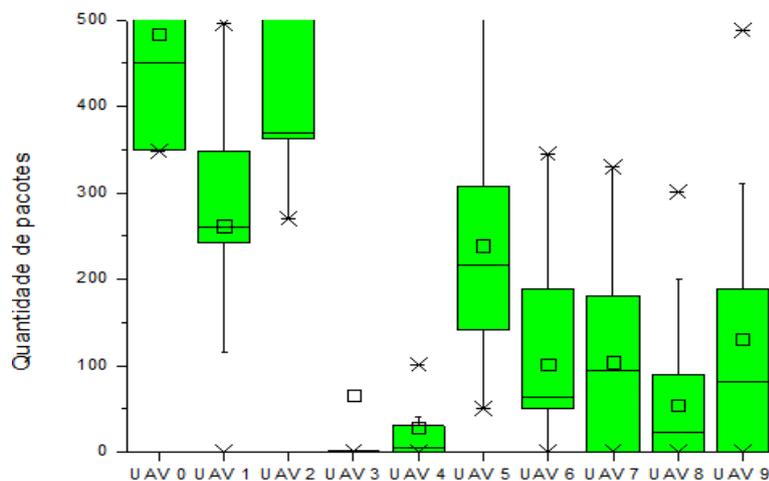


Figura 17 – Recepção de pacotes Tipo 2 com 5 alvos.

Por fim, o Conjunto Experimental 1 visa analisar o comportamento dos pacotes Tipo 2 quanto ao quesito de retransmissão.

A geração dos pacotes, no protocolo proposto, ocorre com uma periodicidade de 50 iterações. Cada simulação leva 10000 iterações e o ambiente de simulação conta com 10 UAVs, o que leva a uma média de cerca de 200 pacotes por UAV circulando na rede, o que levaria, em média, a cerca de 2000 retransmissões.

Um dos pontos chaves do protocolo é a otimização quanto à retransmissão dos pacotes que foram recebidos. Como pode ser observado na Figura 18, a quantidade de pacotes retransmitidos é relativamente pequena se comparada com o número de pacotes recebidos na Figura 17.

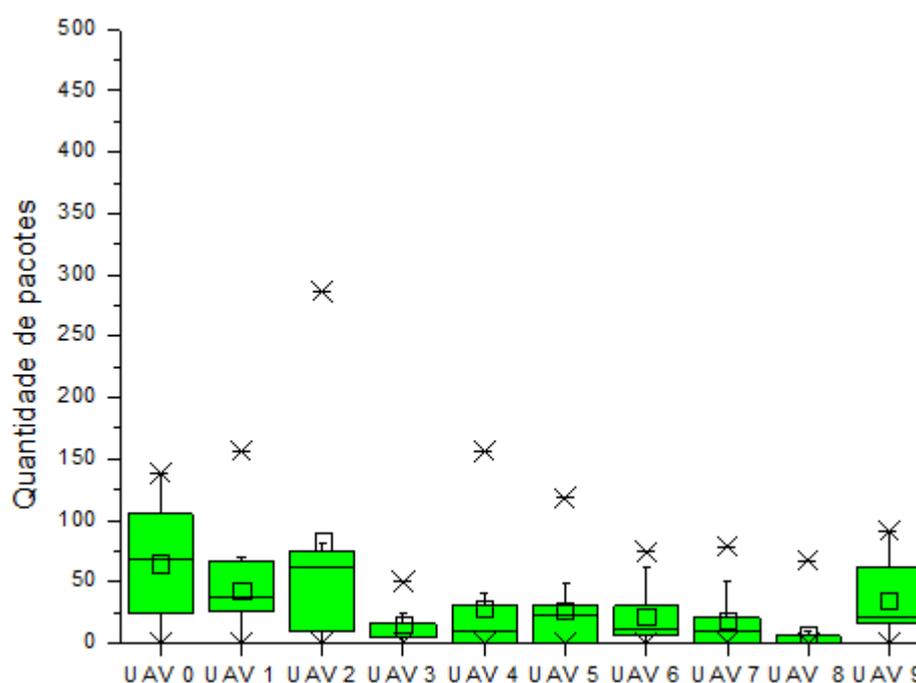


Figura 18 – Retransmissão de pacotes Tipo 2 com 5 alvos.

Pela análise do gráfico da Figura 18 os resultados quanto à otimização do protocolo proposto podem ser confirmados. A média de retransmissões não alcançou seu valor máximo se comparado com o protocolo *Flooding*, por exemplo, onde o número de pacotes retransmitidos seria igual ao número de pacotes recebidos, permitindo uma economia de energia da rede como um todo em, aproximadamente, 84%.

Para o ambiente de simulação considerado no projeto, algoritmos como o LEACH-C não levariam a um consumo mais homogêneo da rede, além de não apresentar um tempo maior de vida da rede. Esse tipo de vantagem pode ser observada em algoritmos como ICA, por exemplo (Habib, 2012).

5.2.2 Conjunto Experimental 2

O objetivo dessa segunda análise é verificar o comportamento dos pacotes ao longo da rede levando em consideração um número bem menor de alvos. A análise agora passa a ser feita considerando apenas 1 alvo no ambiente de simulação.

Como pode ser observado nas Figuras 19 e 20, a geração de pacotes Tipo 1 (Figura 19) é bem maior se comparada com a geração de pacotes Tipo 2 (Figura 20). Em média, cerca de 150 pacotes Tipo 1 são gerados por UAV, enquanto que a geração de pacotes Tipo 2 é, em média, quase nula. Os *outliers* presentes na Figura 20 correspondem aos pacotes que foram gerados no momento em que o único alvo no ambiente foi detectado.

Esse tipo de resultado também já era esperado, uma vez que levando em consideração não só a quantidade de alvos, mas os parâmetros da Tabela 6, a detecção de um único alvo passa a ser reduzida, diminuindo, conseqüentemente, a geração de pacotes Tipo 2.

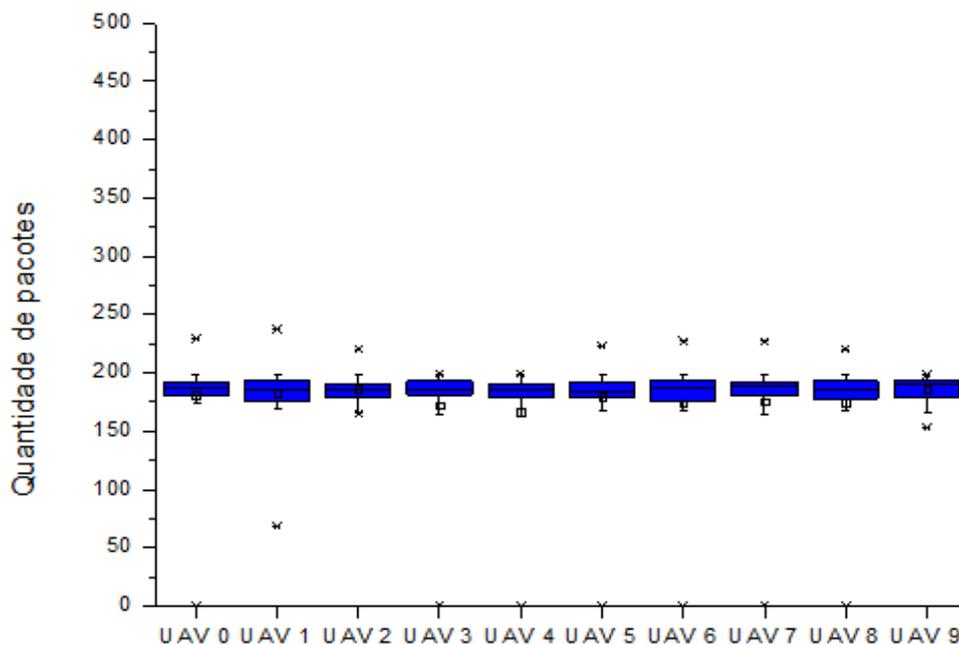


Figura 19 – Geração de pacotes Tipo1 com 1 alvo.

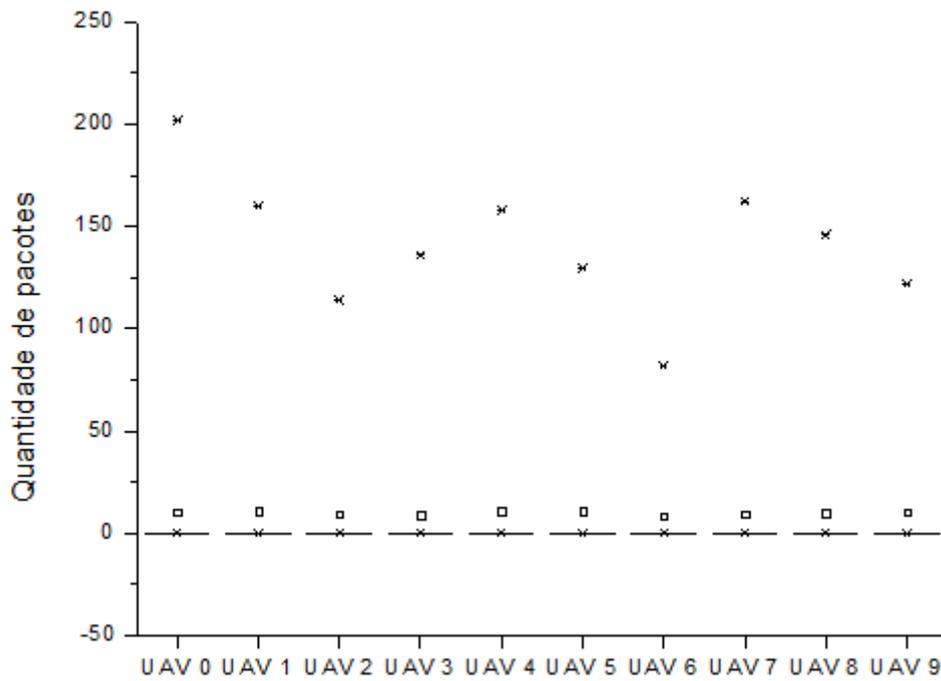


Figura 20 – Geração de pacotes Tipo 2 com 1 alvo.

Quanto à recepção dos pacotes, o Conjunto Experimental 2 estabelece que a quantidade de pacotes recebidos do Tipo 1 seja maior, uma vez que com um número reduzido de alvos no ambiente, a tendência é que haja um número maior de pacotes Tipo 1 circulando pela rede, o que é confirmado pelas distribuições contidas nas Figuras 21 e 22.

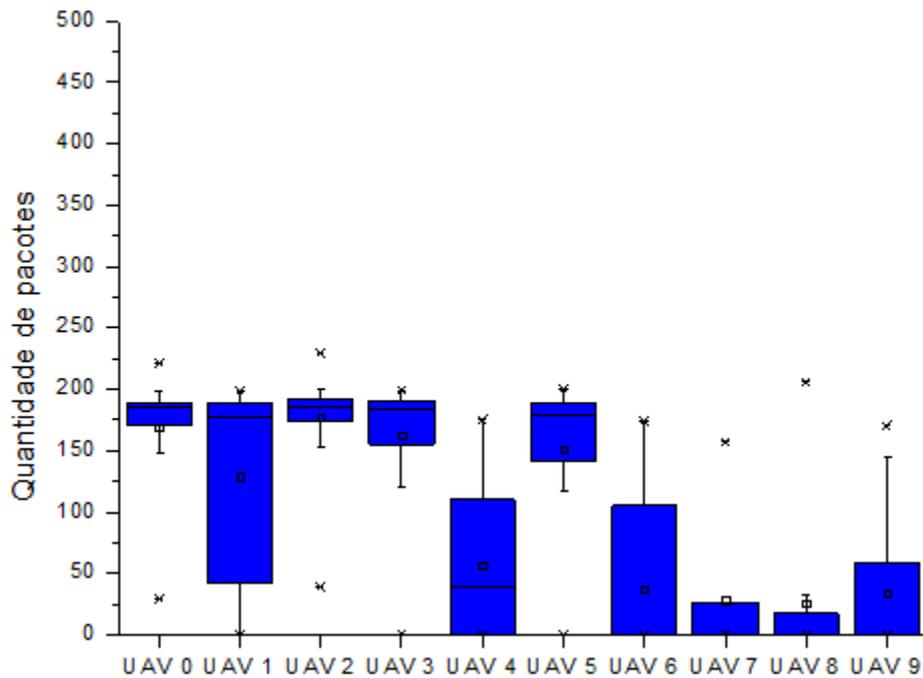


Figura 21 – Recepção de pacotes Tipo 1 com 1 alvo.

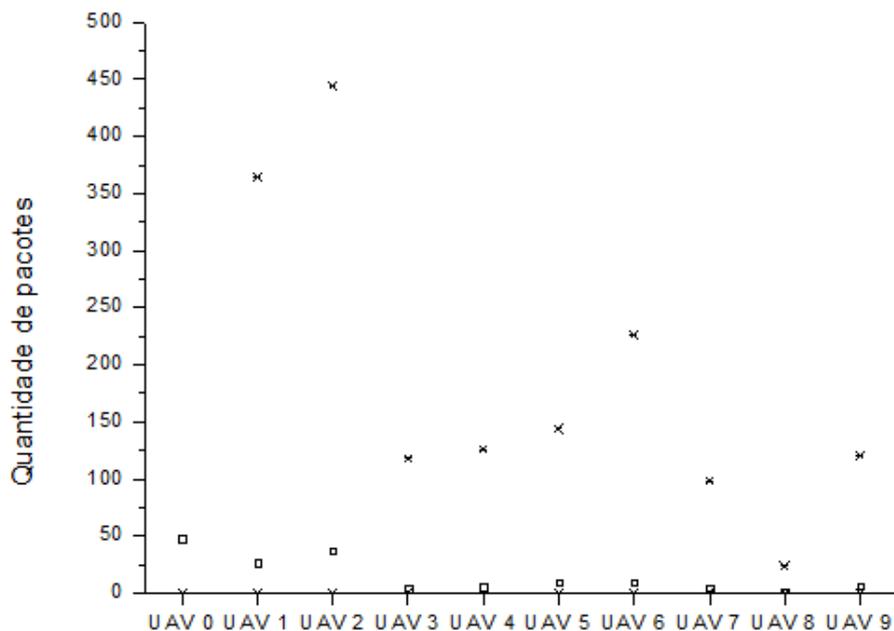


Figura 22 – Recepção de pacotes Tipo 2 com 1 alvo.

O gráfico da Figura 21 permite inferir que, em média, a recepção de pacotes Tipo 1 varia entre 25 e pouco mais de 150 pacotes por UAV. Já na Figura 22, a recepção de pacotes ocorre apenas em momentos isolados, tendo em vista a quantidade limitada de alvos no ambiente.

Por fim, tem-se a análise quanto à otimização do protocolo proposto a partir do aspecto de retransmissão dos pacotes. Tomando como referência as regras quanto ao número de UAVs e iterações descritas no Conjunto Experimental 1, e observando a distribuição presente na Figura 23, o protocolo permitiu um número menor de retransmissões.

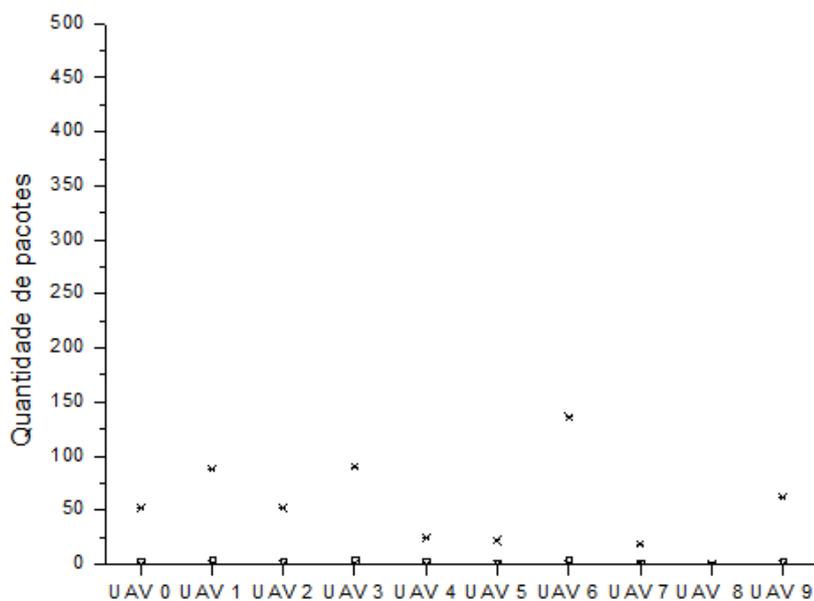


Figura 23 – Retransmissão de pacotes Tipo 2 com 1 alvo.

Pode-se perceber que mesmo com uma quantidade de alvos menor, o protocolo mostrou-se eficiente, já que as retransmissões dos pacotes Tipo 2 não atingiram o pico máximo de retransmissões que seria observado em protocolos como o *Flooding*.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

O protocolo proposto permitiu uma análise inicial, em um ambiente de simulação, do comportamento dos UAVs visando a otimização dos aspectos de comunicação frente a outros protocolos comumente utilizados.

Os resultados encontrados permitem concluir que:

1. As alterações no simulador foram bem sucedidas e permitiram a investigação de novos protocolos de comunicação e novas formas de coordenação do enxame;
2. O protocolo propiciou uma economia de energia da rede como um todo. Mesmo sendo um fator considerável na produção de UAVs, o baixo custo na fabricação desses equipamentos precisa estar atrelado a características como uma comunicação eficaz aliada a uma economia de energia. A redução da quantidade de retransmissões de pacotes fazem do protocolo proposto uma boa ferramenta nesse quesito.
3. A comunicação com a base pôde ser mantida na maior parte do tempo pela maioria dos UAVs, aproximando o ambiente de simulação do que se espera no mundo real em termos de comunicação com a base.

De maneira geral, o trabalho foi realizado cumprindo os requisitos levantados e o protocolo proposto mostrou-se como uma boa ferramenta para análise do fluxo de troca de informações ao longo da rede.

O simulador utilizado para a realização dos testes também configurou uma boa ferramenta e permitiu que as análises preliminares quanto ao protocolo proposto pudessem ser também realizadas.

As alterações que permitiram as análises dinâmicas mencionadas no Capítulo 5 também foram feitas com êxito. O comportamento esperado dos UAVs no ambiente de simulação ao serem realizadas as mudanças ao longo do desenvolvimento foi correspondido. Os testes realizados no simulador confirmaram essa premissa quanto ao comportamento.

Sendo assim, como trabalhos futuros os seguintes requisitos podem ser considerados:

1. Simular o protocolo proposto em outros ambientes de simulação. O simulador utilizado configurou uma ótima ferramenta, mas para uma análise mais verossímil seria interessante utilizar plataformas mais robustas.

2. Implementação de uma interface de monitoramento em tempo real. A ideia consiste, basicamente, em apresentar em uma tela com a área que esteja sendo monitorada utilizando aspectos de coloração, por exemplo.
3. Validar o protocolo proposto, bem como outras abordagens, realizando experimentos de voo com UAV quadrotor levando em consideração os requisitos de *hardware* levantados por (Nascimento, 2011).
4. Analisar outros formatos de pacote e sua influencia no consumo de energia da rede. A economia de energia da rede pôde ser verificada para o tamanho do pacote utilizado. Contudo, caso um tipo de pacote com tamanho menor, por exemplo, seja utilizado, o consumo de energia com um número maior de transmissão pode não necessariamente muito elevado.
5. Verificar o protocolo proposto quanto ao rastreamento maior dos alvos. No projeto, manter constante comunicação com a base foi traçado com objetivo prioritário, sendo alcançado conforme os resultados do Capítulo 5. Contudo, o rastreamento dos alvos sofreu uma alteração, sendo necessária uma análise futura visando compensar essa diminuição.

7. Referências Bibliográficas

Araripe, F. Projeto VANT - Histórico e Situação Atual (Outubro de 2006). 2º Workshop Nanotecnologia Aeroespacial. Acesso em: 10 de Novembro de 2013. Disponível em: <http://www.ieav.cta.br/nanoaeroespacial2006/pdf_arquivos/1710%200850%20Projeto%20VANT.pdf >

Arruda, L. e Oliveira, R. (Julho de 2010). Rede de Sensores como suporte à pesquisa – análise ambiental integrada da sub-bacia sangue-arinós (MT). III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. p. 001-005.

Blum, C.; Li, X. Swarm Intelligence. In: ____.[S.1]: Springer Berlin Heidelberg, 2008. (Natural Computing Series), cap. Swarm Intelligence in Optimization, p. 43 – 85.

Bosque, M. M. (Dezembro de 2009). Implementação do Controle de Enxames de Robôs Utilizando a Hidrodinâmica de Partículas Suavizadas. *Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Minas Gerais*. Belo Horizonte, Minas Gerais.

Broadwell, P. Polastre, J., e Rubin, R. (2004). Geomote: Geographic multicast for networked Sensors.

Carvalho, I. Isac PRO. Balão dirigível. Acesso em: 01 de Dezembro de 2013. Disponível em: < http://isacvcpro.blogspot.com.br/2010_08_01_archive.html >

DefesaNet. O Vant Nacional ‘VSX’ de Longo Alcance. Democracia e Política. Acesso em: 01 de Dezembro de 2013. Disponível em: <<http://democraciapolitica.blogspot.com.br/2011/12/o-vant-nacional-vsx-de-longo-alcance.html>>

Dorigo, M. Swarm-Bots and Swarmanoid: Two Experiments in Embodied Swarm Intelligence. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Web Intelligence and Intelligent Agent Technologies, 2009. WI-AT '09. IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on. p. 2-3, 2009.

Frank, R.; Sherer, T.; Engel, T. Tree Based Flooding Protocol for Multi-Hop Wireless Networks. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Third International Conference on Broadband Communications, Information Technology & Biomedical Applications, p. 318-323, 2008.

Habib, E., Câmara, D. e Loureiro, A. A. (2004). ICA: Um novo algoritmo de roteamento para redes de sensores.

Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A. e Balakrishnan, H. (2000). Energy-efficient communication protocols for information dissemination in wireless

sensor networks.

Henning, M. (Curitiba, 2013). Protocolo de Roteamento para Redes de Sensores Sem Fio Baseado em Políticas. *Dissertação de Mestrado – Universidade Católica do Paraná*. Curitiba, Paraná.

Ho, D.; Ingar, E.; Sousa, J.B.; et. al., Cluster-based Communication Topology Selection and UAV Path Planning in Wireless Sensor Networks. Institute of Electrical and Electronics Engineers. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). p. 59-68, 2013.

Jain, R., Dash, D., Duresi, A., Paruchuri, V., Optimal Flooding Protocol for Routing in Ad-hoc Networks. Department of Computer and Information Science and Electrical Engineering. Ohio State University Technical Report, 2002

Karp, B. e Kung, H. T. (2000). GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks.

Kennedy, J., & Eberhart, R. (November 2005). Particle Swarm Optimization. *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, pp. 1942 – 1948 vol. 4

Lin, L.; Qibo, S., et. al., A Geographic Mobility Prediction Routing Protocol for Ad Hoc UAV Network. Institute of Electrical and Electronics Engineers. The 3rd Workshop on Wireless Networking & Control for Unmanned Autonomous Vehicles: Architectures, Protocols and Applications. p. 1597-1602, 2012.

Lindsey, S. e Raghavendra, C. S. (2002). Pegasus: Power-efficient gathering in sensor information systems.

Lixin, X.; & Yueqing, R. A Study on Topological Characteristics of Wireless Sensor Network Based on Complex Network. Institute of Electrical and Electronics Engineers. International Conference on Computer Application and System Modeling, p. V15-486 – V15-489

MundoGEO. (Novembro de 2013). *MundoGEO*. Acesso em 21 de Novembro de 2013, disponível em VANTs e Drones: <http://mundogeo/blog/category/noticias/vants-e-drones/>

Nascimento, D. A. (Outubro de 2011). Análise de Requisitos de *Hardware* em Projeto de UAV Quadrotor. *Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Pernambuco*. Recife, Pernambuco.

Park, H.; et. al. Restricted Linear Flooding Scheme to Obtain Sink Location in Wireless Sensor Networks. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM '08. 4th International Conference on, p. 1-5, 2008.

Pessin, G.; et. al. The Use of Unmanned Aerial Vehicles and Wireless Sensor Network in Agricultural Applications. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Published in: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International, p. 5045-5048, 2012.

Pinheiro, D. M. (Dezembro de 2011). Coordenação de Veículos Aéreos Não Tripulados Utilizando Inteligência de Enxames. *Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Pernambuco*. Recife, Pernambuco.

Pinheiro, D. M. (Recife, 2013). Coordenação de Veículos Aéreos Não Tripulados Utilizando Inteligência de Enxames. *Dissertação de Mestrado – Universidade de Pernambuco*. Recife, Pernambuco.

PUC-Rio de Janeiro. Redes Ad-hoc Projeto terminode. Acesso em 02 de Dezembro de 2013. Disponível em: < http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/11484/11484_3.PDF>

Rao, A., Ratnasamy, S., Papadimitriou, C., Shenker, S. e Stoica, I. (2003). Geographic Routing without Location Information.

Revista Galileu. (Dezembro de 2012). Veículos Aéreos não Tripulados Acesso em: 04 de Dezembro de 2013. Disponível em: <http://www.stormdefense.com.br/clipping/revista-galileu/>.

Sahin, E. (2005) Swarm Robotics: From Sources of Inspiration to Domains of Application. *Lecture Notes in Computer Science*, 10-20.

Saskatoon, SK. Draganfly. Draganfly X4-P RC Multi Rotor VTOL UAV is the Perfect Economical and Compact Solution for High Quality Aerial Videography and Photography. Acesso em: 01 de Dezembro de 2013. Disponível em: <<http://www.draganfly.com/news/2012/05/15/draganflyer-x4-p-multi-rotor-uav-provides-an-economical-and-compact-solution-for-high-quality-aerial-video-and-photography/>>

Silva, D.M.P.F, de Oliveira, L.F.F. e Bastos Filho, C.J.A. A Influência da Comunicação Sem Fio *Ad Hoc* na Coordenação de Veículos Aéreos Não Tripulados Utilizando Inteligência de Enxames. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, vol. 2, nº 2, 2012.

Sperque, A., & Carvalho, O. (Julho de 2012). Estudos e Implementação de Protocolos de Roteamento para Rede de Sensores. 64ª Reunião Annual da SBPC, 2012.

Sullivan, J. M. (8-10 Junho de 2005). Revolution or Evolution? The Rise of the UAVs. *Technology and Society*, 2005. Weapons and Wires: Prevention and Safety in a Time of Fear. ISTAS 2005. Proceedings. 2005 International Symposium on, p. 94-101.

Teleco. Redes de Sensores Sem Fio: Protocolos. *Teleco Inteligência em Telecomunicações*. Acesso em: 01 de Dezembro de 2013. Disponível em: < http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrssf/pagina_6.asp>

Vand Blyenburgh, P. (ed.). UAS Unmanned Aircraft Systems, The Global Perspective 2007/2008.

Wu, Z.; Kumar, H.; Davari, A. Performance Evaluation of OFDM Transmission in UAV Wireless Communication. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Proceedings of the Thirty-Seventh Southeastern Symposium on System Theory. p. 6-10, 2005.

Yu, Y., Govindan, R. e Estrin, D. (2001). Geographical and energy aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks

