



**MOIZES CLODOALDO PAPA FILHO**

**RESTAURANDO A CONECTIVIDADE DE RSSFS  
ATRAVÉS DE NÓS MÓVEIS**

**LAVRAS - MG**

**2011**

**MOIZES CLODOALDO PAPA FILHO**

**RESTAURANDO A CONECTIVIDADE DE RSSFS ATRAVÉS DE NÓS  
MÓVEIS**

Monografia apresentada ao Colegiado do  
Curso de Ciência da Computação do De-  
partamento de Ciência da Computação,  
para a obtenção do título de Bacharel em  
Ciência da Computação.

Orientador

Prof. Tales Heimfarth

**LAVRAS - MG**

**2011**

**MOIZES CLODOALDO PAPA FILHO**

**RESTAURANDO A CONECTIVIDADE DE RSSFS ATRAVÉS DE NÓS  
MÓVEIS**

Monografia apresentada ao Colegiado do  
Curso de Ciência da Computação do De-  
partamento de Ciência da Computação,  
para a obtenção do título de Bacharel em  
Ciência da Computação.

*Aprovada em 04 de Julho de 2011*

Prof. João Carlos Giacomini

Prof. Eric Fernandes de Mello Araújo

Prof. Tales Heimfarth

Orientador

**LAVRAS - MG**

**2011**

*Dedico esse trabalho primeiramente aos meus pais, que me deram sempre todo amor e apoio necessário e que são para mim o melhor exemplo pra seguir. Dedico também a todos que amo e que tem me ajudado de alguma forma nessa caminhada. A todos aqui citados, só me resta agradecer.*

*Obrigado por serem parte de minha vida!*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, o que seria de mim sem a fé que eu tenho nele. Aos meus pais Moizes Clodoaldo Papa Filho e Silvana Aparecida da Silva e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Aos amigos que fiz durante o curso, pela verdadeira amizade que construímos em particular aqueles que estavam sempre ao meu lado (Adauto, Thiago, Willian) por todos os momentos que passamos durante esses quatro anos e meio meu especial agradecimento. Sem vocês essa trajetória não seria tão prazerosa.

Ao professor e orientador Tales Heimfarth por seu apoio no amadurecimento dos meus conhecimentos e conceitos que me levaram a execução e conclusão desta monografia e principalmente pela confiança depositada em mim para desenvolver um projeto completo em apenas um período.

A todos os professores do curso de Ciência da Computação, pela paciência, dedicação e ensinamentos disponibilizados nas aulas, cada um de forma especial contribuiu para a conclusão desse trabalho e conseqüentemente para minha formação profissional.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus amigos e familiares, em especial a meu avô Antônio Julio Papa (*in memoriam*), pelo carinho e pela compreensão nos momentos em que a dedicação aos estudos foi exclusiva, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para que esse trabalho fosse realizado meu eterno AGRADECIMENTO.

## **RESUMO**

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um modelo de movimento para UAVs. A meta é estabelecer uma sequência de pontos de modo a formar uma trajetória entre pontos desconexos da rede. Nesta situação o UAV servirá de ponte entre as ilhas isoladas de nós, permitindo às mesmas se comunicarem. Inicialmente o UAV navega de modo aleatório até que encontre pontos de falha na rede, e cada ponto encontrado é incluído na trajetória do UAV. Assim o UAV percorre esses pontos de desconexão periodicamente, mantendo a conectividade da RSSF.

Palavras-chave: Redes de Sensores Sem Fio; Veículos Aéreos Não Tripulados; Planejamento de Trajetória; RSSF, UAV.

## **ABSTRACT**

This research aim to develop a movement model for UAVs. The goal is to establish a sequence of points to form a path between disconnected points from the network. In this situation, the UAV will serve as a bridge between the isolated islands of nodes, allowing them to communicate. Initially, the UAV navigates randomly until it finds points of network failure, and found each item is included in the trajectory of the UAV. Once the UAV traverses these points of disconnection periodically, keeping the connectivity of the WSN.

**Keywords:** Wireless Sensor Networks; Unmanned Aerial Vehicles, Path Planning, WSN, UAV.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Redes Ad hoc. ....	18
Figura 2	Exemplo de uma RSSF [29]. ....	20
Figura 3	Comunicação em uma RSSF. ....	22
Figura 4	Alguns modelos de UAVs [28]. ....	27
Figura 5	Modelo de UAV de grande porte: Global Hawk [30]. ....	30
Figura 6	Modelo de UAV de pequeno porte: AR Drone [27]. ....	31
Figura 7	UAVs e sua área de cobertura em uma RSSF. ....	39
Figura 8	Possível rota de um UAV em uma RSSF. ....	41
Figura 9	Visualizador do Simulador GrubiX ....	43
Figura 10	UAV restabelecendo a conexão em um ponto da rede. ....	48
Figura 11	Dead end em uma RSSF. ....	50
Figura 12	RSSF com ponto de desconexão. ....	51
Figura 13	Modelo de trajetória ordem de chegada. ....	54
Figura 14	Modelo de trajetória mais próximo primeiro. ....	55
Figura 15	Gráfico: Percentagem de pacotes perdidos. ....	61
Figura 16	Gráfico: Percentagem de pacotes perdidos(Visão Global). ....	62
Figura 17	Gráfico: Tempo necessário para realização de um <i>round</i> . ....	63
Figura 18	Gráfico: Tempo necessário para que um pacote chegue a seu destino. ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	<i>Comparação de métodos de planejamento de trajetória. ....</i>	37
Tabela 2	<i>Parâmetros para a simulação da Restauração da Conectividade de RSSFs Utilizando Nós Móveis .....</i>	58
Tabela 3	<i>Comparação: Percentagem de pacotes perdidos. ....</i>	59
Tabela 4	<i>Comparação: Percentagem de pacotes perdidos(Visão Global). ...</i>	59
Tabela 5	<i>Comparação: Tempo médio de “round” do UAV. ....</i>	60
Tabela 6	<i>Comparação: Tempo médio gasto pelo pacote para chegar ao destino. ....</i>	60

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>14</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização do Trabalho .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>Referencial Teórico .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Redes Móveis Ad hoc .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Definições .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Aplicações de Redes Móveis Ad hoc .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Definições .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Características .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Aplicações.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Desafios.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3</b>	<b>Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs).....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Definições .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Missões realizadas por UAVs .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Alguns tipos de UAVs .....</b>	<b>29</b>
<b>2.4</b>	<b>Planejamento de Trajetórias de Robôs .....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Definições .....</b>	<b>31</b>
<b>2.4.2</b>	<b>O Problema do Planejamento .....</b>	<b>32</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Técnicas de Planejamentos de Trajetórias .....</b>	<b>34</b>
<b>2.5</b>	<b>Planejamento de Trajetórias de UAVs .....</b>	<b>37</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Planejamento de Trajetórias de UAVs X RSSFs.....</b>	<b>38</b>
<b>2.6</b>	<b>Simulação Orientada a Eventos .....</b>	<b>40</b>
<b>2.6.1</b>	<b>Definições .....</b>	<b>40</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Simulador Orientado a Eventos - GRUBiX .....</b>	<b>42</b>
<b>3</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>Procedimentos Metodológicos .....</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>Algoritmo de Planejamento de Trajetória .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1</b>	<b>Descrição do Problema .....</b>	<b>47</b>
<b>4.2</b>	<b>Roteamento Geográfico .....</b>	<b>49</b>
<b>4.3</b>	<b>Descoberta de Áreas com Desconexão .....</b>	<b>50</b>
<b>4.4</b>	<b>Definição da Trajetória a ser Seguida .....</b>	<b>53</b>

4.4.1	Ordem de Chegada .....	53
4.4.2	Mais Próximo Primeiro .....	55
4.5	Tamanho do <i>Buffer</i> Utilizado .....	56
4.6	Realização do <i>Round</i> .....	56
5	Resultados e Discussões .....	57
5.1	Construção da Trajetória .....	57
5.2	Configurações da Simulação .....	57
5.3	Resultados .....	58
6	Conclusão e Trabalhos Futuros .....	65

# 1 Introdução

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) têm sido cada vez mais utilizadas em muitos tipos de aplicações. Essas aplicações podem ser científicas, militares e comerciais, dentre muitas outras. Como exemplo dessas aplicações podemos citar o monitoramento para controle de riscos (incêndios, enchentes e abalos sísmicos), monitoramento de áreas de interesse militar, automação industrial, áreas de difícil acesso ou até inacessíveis a pessoas, como áreas de risco (de contaminação, com atividades vulcânicas, altas ou baixas temperaturas).

Várias vezes temos a necessidade de realizar o monitoramento de áreas as quais não temos acesso. Sendo assim uma das melhores formas de realizar esse monitoramento seria a utilização de uma rede de sensores sem fio. Porém, um dos maiores desafios no desenvolvimento de tais aplicações em redes de sensores encontra-se em como prover coordenação entre os nós envolvidos, atendendo, assim, às necessidades dos usuários [21].

Uma aplicação muito importante das RSSFs são as aplicações emergentes, muitas delas sujeitas a variados ambientes [13]. As condições em tais ambientes levam a falhas na rede devido a uma série de condições adversas, tais como interferências de comunicação. Estas falhas podem criar ilhas de nós isolados, que não podem informar os dados adquiridos por eles para os utilizadores finais. Este tipo de situação pode ser transitória ou permanente, dependendo das causas das falhas. [33].

Uma forma de resolver esse problema seria oferecer sensores móveis que permitam a rede superar tanto problemas permanentes quanto transitórios de comu-

nicação. As soluções baseadas nesta idéia podem variar em sua concepção. Uma possibilidade é ter um ou mais nós móveis no recolhimento de dados dos nós isolados, periodicamente ou esporadicamente. Desta forma, os nós ficariam esperando por um nó móvel para coleta dos dados, como apresentado em [12].

A solução para o problema apresentado pode ser também relacionada com o conceito de redes tolerantes a atraso [19], onde esse tipo de conexão e desconexão dos nós é controlado. Outra possibilidade seria a de ter um número de nós móveis que movem-se de tal maneira que possam cobrir toda a área em que a RSSF está implantada.

Neste trabalho estaremos abordando este último caso, onde teremos os Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs) como sendo os nós móveis da rede. Estes serão os agentes responsáveis por manter essa conectividade, atuando como uma "ponte", evitando assim o isolamento de um ou vários conjuntos de nós sensores.

## **1.1 Motivação**

As RSSFs apresentam algumas limitações quanto ao raio de alcance dos nós para comunicação. Sendo assim, o uso de nós móveis para fazer a interligação desses nós terrestres pode trazer uma significativa melhora nessa comunicação. Segundo [11], nós sensores móveis podem prover habilidades para que a rede possa se adaptar dinamicamente aos eventos ocorridos no ambiente, bem como colaborar para se aumentar a conectividade dentro da rede.

A ideia por trás da presente proposta é a utilização de um ou mais UAVs para manter a conexão de todas as ilhas de nós sensores em uma RSSF. A fim de cumprir com esta missão, os UAVs devem se movimentar de forma a manter ao máximo a conectividade da rede.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo global, desenvolver e aplicar um algoritmo de planejamento de trajetória para UAVs para que os mesmos mantenham uma RSSF conectada.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

**A elaboração de uma algoritmo de planejamento de trajetória para UAVs** - desenvolvimento de um algoritmo de planejamento de trajetória de UAVs para manter a RSSF conectada.

**A simulação do algoritmo no ambiente de simulação GRUBiX** - implementação do algoritmo no ambiente de simulação *open source* GRUBiX, mantido pelo Grupo de Redes Ubíquas do Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Lavras.

## 1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho encontra-se organizado em sete capítulos. No capítulo 1, há uma breve introdução ao problema, a motivação, os objetivos e a definição do problema estudado. No capítulo 2, se encontra o referencial teórico onde podem ser

encontradas as definições e as bases teóricas para o entendimento do problema. O capítulo 3 apresenta a metodologia para realização do trabalho. O algoritmo de para o restabelecimento da conectividade é apresentado no Capítulo 4. No capítulo 5, constam o desenvolvimento e os resultados da simulação realizada com a aplicação do algoritmo de restabelecimento da conectividade em uma RSSF. O capítulo 6 apresenta as conclusões referentes ao trabalho realizado.

## **2 Referencial Teórico**

Neste capítulo será abordada a revisão da literatura que dá sustentação teórica ao trabalho. Os conceitos dos aplicativos e como eles são utilizados estão distribuídos em sete partes com tópicos interligados, a saber:

- Redes Móveis Ad hoc
- Redes de Sensores Sem Fio
- UAVs
- Planejamento de Trajetórias para Robôs e UAVs
- Simulação Orientada a Eventos

### **2.1 Redes Móveis Ad hoc**

Esta seção aborda as definições e aplicações das Redes Móveis Ad hoc.

#### **2.1.1 Definições**

Redes Móveis Ad hoc são ambientes ainda em evolução dentro da comunicação sem fio e possuem fortes motivações que vêm impulsionando seu desenvolvimento e principalmente sua utilização.

Uma das motivações originais dessas redes foi inicialmente encontrada na necessidade de sobrevivência dos militares em campos de batalhas [24]. Como essas redes trouxeram um grande benefício, logo foram estendidas para lugares onde é

muito difícil, ou até impossível a montagem de uma infraestrutura fixa. Dentre esses locais podemos citar florestas densas, desertos. Também podem ser utilizadas em atividades de sensoriamento onde existe o risco de vida para seres humanos.

As Redes Ad Hoc, segundo [1], são redes que são implantadas sem uma infraestrutura existente. Os dispositivos móveis se comunicam entre si, transmitindo a mensagem sobre vários dispositivos. Neste caso, cada dispositivo móvel funciona como um usuário e um *switch* de roteamento, ao mesmo tempo. Normalmente, Redes Ad Hoc, são redes que se estabelecem em uma pequena área geográfica em situação de emergência.

A Figura 1 mostra três exemplos de Redes Ad hoc.

Segundo[5], as redes ad hoc representam sistemas distribuídos complexos que incluem nós móveis sem fio podendo se organizar livre e dinamicamente de forma arbitrária, dentro de uma topologia de rede temporária.

### **2.1.2 Aplicações de Redes Móveis Ad hoc**

O interesse nas redes móveis ad hoc vem apresentando um crescimento, que pode ser justificado pelas vantagens que estas podem dar a determinados tipos de aplicação. Uma de suas vantagens principais é a de que essas redes podem ser construídas rapidamente, sem a necessidade de uma infraestrutura fixa. Sendo assim, elas se tornam adequadas a situações e locais onde redes cabeadas não são viáveis.



**Figura 1:** Redes Ad hoc.

Outra grande vantagem das Redes Ad Hoc é o fato delas não dependerem de pontos que determinam sua organização e controle como *switches* e roteadores. Assim, o funcionamento da rede não é afetado caso algum nó em particular venha a falhar.

Dentre as possíveis aplicações das Redes Móveis Ad Hoc, podemos citar algumas conforme :

**Aplicações Militares:** as aplicações militares deram origem às redes ad hoc com a tarefa de proporcionar a comunicação de combatentes no campo de batalha, visto que tais ambientes não possibilitam a comunicação por meio de uma infraestrutura fixa;

**Redes de Sensores:** com o aumento da popularidade do uso de sensores no meio ambiente, temos a possibilidade de operar automaticamente a monitoração e coleta de dados. Também podemos fazer a transmissão dessas informações sem que haja uma infraestrutura fixa. Esse tipo de rede será tratado mais detalhadamente mais adiante neste trabalho.

## **2.2 Redes de Sensores Sem Fio (RSSF)**

Esta seção aborda as definições, características, aplicações e os principais desafios envolvendo as Redes de Sensores Sem Fio, visto que a desconexão dessas redes é o problema principal tratado neste trabalho.

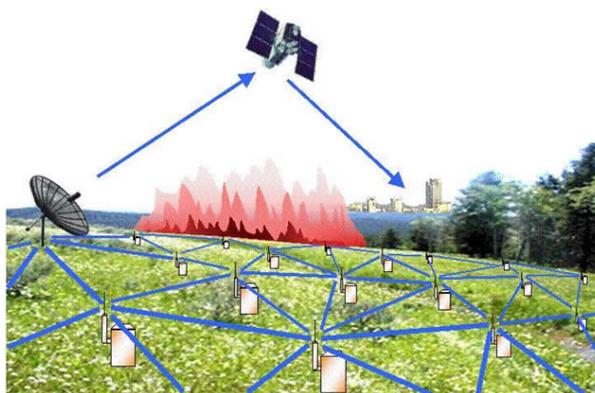
### **2.2.1 Definições**

Rede de sensores é uma tecnologia chave para o futuro. Em Setembro de 1999, a revista Business Week Magazine anunciou as redes de sensores como uma das 21 mais importantes tecnologias para o século 21. Como são baratos, dispositivos inteligentes com múltiplos sensores a bordo, conectados em rede através de ligações sem fios e da Internet, e implantado em grande número, oferecem oportunidades sem precedentes para instrumentação e controle de casas, cidades e do meio ambiente [4].

Redes de sensores consistem de um grande número de nós que são implantados em uma determinada área [1]. O objetivo da RSSF é monitorar o ambiente relatando o que acontece na área na qual a rede foi implantada. As RSSFs podem ser utilizadas em muitas aplicações. Em aplicações militares são utilizadas para a vigilância e rastreamento de alvos ou áreas de interesse. Em aplicações industriais, redes de sensores são utilizadas no monitoramento de produtos químicos nocivos à saúde humana. Também podem ser utilizadas no monitoramento do ambiente e no aviso de início de incêndio em florestas, bem como conjuntos de dados sísmicos.

Uma RSSF é composta de nós sensores que monitoram vários fenômenos ambientais e formam uma rede ad hoc para fins de processamento e transmissão de dados para as partes interessadas.

Na Figura 2 temos um exemplo de uma RSSF, onde podemos ver uma determinada área onde está ocorrendo um incêndio e essa rede está detectando este evento e comunicando o mesmo as partes interessadas.



**Figura 2:** Exemplo de uma RSSF [29].

Nas redes de sensores, cada nó está equipado com um ou mais sensores, a fim de realizar o monitoramento e rastreamento. Na maioria das vezes as baterias desses nós não são recarregáveis, as redes funcionam enquanto houver alimentação. A partir do momento que a energia é desligada, a rede deixa de funcionar [1].

Tipicamente, as redes de sensores podem funcionar em dois modos. O primeiro, um modo de operação contínua e o segundo um modo de consulta. No modo de operação contínua, o nó sensor monitora continuamente o ambiente enviando as medições para um nó vizinho ou um nó base. Já no modo de consulta, o nó sensor permanece na maioria do tempo desligado à espera de um sinal de um nó base ou um nó vizinho. Quando este nó recebe este sinal, ele coleta os dados do sensor, processa e envia para o nó solicitante [1].

### 2.2.2 Características

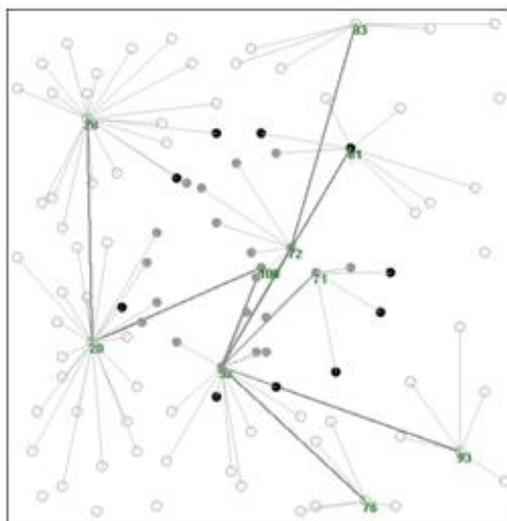
Redes de sensores sem fio possuem várias características, dentre elas, segundo , podemos citar:

**Homogeneidade:** diferindo das redes ad hoc, uma rede de sensor sem fio é composta por nós com mesmas características. Com o intuito de aumentar a capacidade de monitoramento e o tempo de vida dessa rede, podem ser usados nós com mais memória, ou até com uma faixa de transmissão maior.

**Dispersão relativa dos nós sensores:** característica comum também às redes ad hoc, onde a rede é formada por nós espalhados em uma região geograficamente grande. Este fato impossibilita a comunicação *single-hop*(salto único).

**Alta densidade populacional:** tipicamente, a quantidade de nós compondo uma rede de sensores sem fio é muito grande podendo chegar a milhares de nós sensores.

A Figura 3 mostra uma RSSF, onde existe a comunicação entre os sensores pertencentes a esta rede.



**Figura 3:** Comunicação em uma RSSF

### 2.2.3 Aplicações

A investigação sobre redes de sensores foi, originalmente, motivada por aplicações militares. Exemplos de redes de sensores militares vão desde os grandes sistemas de escuta para a vigilância do oceano, até pequenas redes de sensores terrestres autônomas, para a detecção de alvos terrestres [4]. No entanto, a dis-

ponibilidade de sensores de baixo custo e redes de comunicação resultaram no desenvolvimento de inúmeras outras aplicações. Alguns exemplos:

**Segurança e Infraestrutura** - Redes de sensores podem ser usadas para a segurança da infraestrutura e aplicações de contraterrorismo. Edifícios e instalações, como usinas de energia e centros de comunicação, têm de ser protegidos contra potenciais terroristas. Estes sensores permitem a detecção precoce de possíveis ameaças.

**Vigilância de Ambientes Selvagens** - Meio Ambiente e monitoramento de ambientes selvagens, segundo [32], são candidatos naturais para a aplicação de redes de sensores, uma vez que as variáveis a serem monitoradas por exemplo temperatura, são normalmente distribuídos em uma grande região.

**Sensores nas Indústrias** - O setor comercial tem sido desde muito tempo interessado em sensoriamento como um meio de reduzir custos, melhorar o desempenho e durabilidade do maquinário. O monitoramento de máquinas, através da determinação de níveis de vibração ou desgaste e lubrificação, e a inserção de sensores em regiões inacessíveis por seres humanos são apenas dois exemplos de aplicações industriais de sensores.

**Controle de Tráfego** - Redes de sensores têm sido utilizados para monitoramento de veículos e controle de tráfego há um bom tempo. Além disso, câmeras de vídeo são frequentemente usadas para monitorar segmentos de estrada com tráfego intenso. Esses vídeos são enviados para operadores humanos em locais centrais.

Segundo [6], RSSFs tem uma gama de aplicações que podem ser diferenciadas em:

- espaço de monitoramento;
- monitoramento de eventos;
- monitoramento das interações dos eventos entre si e com o espaço envolvente.

A primeira categoria inclui a monitoração do ambiente e habitat em questão, agricultura de precisão, controle do clima interno e vigilância. A segunda inclui a monitoração estrutural, ecofisiologia, condição de manutenção de equipamentos baseados em diagnósticos médicos e mapeamento de terreno urbano. As aplicações mais complexas envolvem um controle de interações complexas, incluindo o habitat dos animais selvagens, a gestão de desastres, respostas de emergência, os ambientes de computação ubíqua, rastreamento de ativos, saúde e fluxo de processo de fabricação.

Segundo [4], sensores inteligentes descartáveis podem ser implantados no solo, no ar, na água, nos corpos, nos veículos e no interior dos edifícios. Um sistema de redes de sensores pode detectar e rastrear ameaças (por exemplo, asas e rodas de veículos, pessoal, agentes químicos e biológicos) e serem usados para armas de segmentação. Cada nó sensor embutido tem a capacidade de processamento, e, potencialmente, possuir vários sensores a bordo que podem ser acústicos, sísmicos, modos de infravermelho (IR), e magnéticos, bem como sistemas de imagens e micro radares. As redes de sensores fornecem a tecnologia para um amplo espectro de sistemas na área de defesa, gerando novos recursos para o reconhecimento e vigilância, bem como outras aplicações táticas.

#### 2.2.4 Desafios

De acordo com [5], redes de sensores sem fio possuem vários desafios a serem superados dentre eles podemos citar:

**Disponibilidade de energia:** se a redução do consumo de energia de um nó é importante em redes ad hoc, isso se torna vital em redes de sensores sem fio [4]. Como os nós sensores possuem um tamanho bastante reduzido sua bateria possui uma capacidade energética bastante limitada. Porém, é esperado que essas redes funcionem por um período relativamente longo. Sabendo que a troca/reposição dessas baterias é inviável, um dos grandes desafios dessas redes é usar o nó sensor de forma a aproveitar de melhor forma essa energia disponível.

**Baixa qualidade na comunicação:** na maioria das vezes os nós sensores são dispostos em ambientes abertos e hostis, várias vezes tendo que operar sobre condições de tempo ruins. Com todos esses fatores, a qualidade da comunicação fica muito precária, dificultando a tarefa de coleta de dados. Isto torna necessário que estes nós sejam projetados cuidadosamente.

**Limitação dos recursos computacionais:** se nas redes ad hoc os recursos são escassos, nas redes de sensores sem fio essa escassez se intensifica. Sendo assim os protocolos para essas redes de sensores devem tentar suprir essa deficiência para prover requisitos de qualidade de serviço suficiente.

Segundo [20], nós sensores são dispositivos autônomos equipados com capacidades de sensoriamento, processamento e comunicação. Quando estes nós são dispostos em rede em um modo ad hoc, formam as redes de sensores. Os nós coletam dados via sensores, processam localmente ou coordenadamente entre vi-

zinhos podendo enviar a informação para o usuário ou, em geral, para um coletor de dados.

Os nós sensores apresentam em sua maioria um tamanho bastante reduzido, porém existem nós sensores maiores onde vários sensores são agrupados em um único nó.

### **2.3 Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs)**

Nesta seção abordaremos as definições de UAVs, mostraremos algumas missões realizadas por estes e também veremos alguns tipos desses UAVs. Neste trabalho os UAVs são muito importantes, pois eles são os responsáveis por manter a conectividade da RSSF.

#### **2.3.1 Definições**

UAVs são veículos aéreos que não carregam um operador humano, usam forças aerodinâmicas para voar, podendo voar de forma autônoma ou serem pilotados remotamente, podem ser dispensáveis ou recuperáveis[31]. Exatamente por não carregarem operadores humanos esses veículos são utilizados nos mais variados tipos de aplicação. Como exemplos, podemos citar áreas de florestas densas, áreas contaminadas com substâncias tóxicas, e também áreas com baixa oxigenação.

Os UAVs, em geral, são robôs desenvolvidos sobre plataformas aéreas, como aeronaves de asa fixa (os aviões), aeronaves com asa rotativa (quadrirotos e helicópteros), dentre outras (balões e dirigíveis). Os UAVs representam uma categoria

especial de robôs móveis, necessitando de tipos de sensores e técnicas de controle específicas para a realização de tarefas [22].

Os UAVs de hoje exigem, geralmente, vários operadores para o controle, mas num futuro próximo os UAVs serão projetados para tomar suas próprias decisões táticas e serão integrados em equipes coordenadas para atingir objetivos de alto nível, permitindo assim que um único operador controle uma frota inteira [26].

A Figura 4 mostra alguns modelos de UAVs.



**Figura 4:** Alguns modelos de UAVs [28].

### 2.3.2 Missões realizadas por UAVs

UAVs possuem duas vantagens principais em relação às aeronaves tripuladas: eles são indiscutivelmente mais baratos, e eliminam o risco à vida de um piloto. UAVs protegem a vida dos pilotos realizando as missões “3-D” que não requerem um piloto no *cockpit* [3].

[31] define as missões “3-D” como:

**Dull - Fatigantes:** Equipes que voaram em missões de ida e volta de 30 horas do Missouri nos Estados Unidos até a Sérvia durante 34 dias no conflito do Kosovo em 1999 sendo a gestão de fadiga uma preocupação dominante dos comandantes dessas unidades [31]. Essa situação demonstra a utilização de UAVs para missões consideradas fatigantes para pilotos.

**Dirty - Sujas:** A força Aérea (The Air Force) e a Marinha (The Navy) utilizaram em 1946 e em 1948 aeronaves não tripuladas para voar dentro das nuvens nucleares minutos após a detonação da bomba para recolher amostras radioativas, claramente, uma missão suja [31]. Essa situação demonstra a necessidade da utilização de UAVs para monitoramento de uma área contaminada.

**Dangerous - Perigosas:** O reconhecimento tem sido historicamente uma missão perigosa; 25% dos pilotos do 3º grupo de reconhecimento da Força Aérea Americana foram perdidos no norte da África durante a segunda Guerra Mundial [31].

Os UAVs vêm cada dia mais se espalhando pelo mundo, devido a sua grande utilidade em diversos tipos de atividades. Segundo [31], atualmente, cerca de 32 países estão em fase de desenvolvimento ou de produção de mais de 250 mode-

los; 41 países operam cerca de 80 tipos de UAVs, principalmente para missões de reconhecimento.

### **2.3.3 Alguns tipos de UAVs**

Segundo [10], os UAVs podem ser divididos em dois grupos:

#### **UAVs de Grande Porte**

Os UAVs de grande porte podem tipicamente ser lançados e recuperados através de comunicações de LOS(Linha de Visão). O voo sobre a área alvo, bem como dados e/ou imagem dos registros do UAV podem ser enviados para um local separado através de comunicações por satélite.

Como exemplos de UAVs de grande porte podemos citar:

- Global Hawk;
- Predator;

A Figura 5 mostra o Global Hawk, um UAV de grande porte.

#### **UAVs de Pequeno Porte**

Os UAVs de pequeno porte, na maioria das vezes, são usados para o monitoramento de uma situação individual podendo ser transportados e lançados por um único indivíduo. Os dados captados por UAVs de pequeno porte, geralmente, são enviados de volta para o operador para que sejam avaliados em tempo real. Como exemplos de UAVs de pequeno porte podemos citar:



**Figura 5:** Modelo de UAV de grande porte: Global Hawk [30].

- Pointer;
- Raven;
- AR Drone.

A Figura 6 mostra o AR Drone, um UAV de pequeno porte.

## 2.4 Planejamento de Trajetórias de Robôs

Um fator importante ao se observar num sistema autônomo que objetiva a obtenção de uma flexibilidade necessária (ou mesmo suficiente) para ter sua lista de tarefas reconfiguradas a qualquer instante é que o planejamento do comportamento do robô móvel deve ser realizado com relativa rapidez e melhor otimização possível com menor custo computacional [23]. Neste contexto, o primeiro problema a ser resolvido é o planejamento da rota a ser seguida pelo robô móvel.



**Figura 6:** Modelo de UAV de pequeno porte: AR Drone [27].

#### 2.4.1 Definições

Segundo [7], as etapas básicas envolvidas no planejamento de trajetória de um robô móvel são:

- O planejamento da trajetória;
- A determinação do modelo cinemático;
- Execução do plano.

O planejamento da trajetória é a etapa onde são determinados todos os pontos por onde o robô deve seguir dentro do seu espaço de trabalho para que assim possa cumprir seus objetivos. Este conjunto de pontos estabelece uma trajetória.

A cinemática inversa mapeia pontos no espaço bidimensional em ângulos de rotação. Alguns problemas como existência da solução e unicidade da solução

surtem quando do uso do modelo inverso. Além disso, pode não ser possível encontrar uma solução analítica - apenas numérica - para o modelo cinemático inverso.

A última etapa é a responsável pela execução do planejamento, pelo efetivo alcance dos pontos desejados e pela correção de possíveis desvios da trajetória planejada através de realimentação sensorial.

A trajetória deve ser construída à medida que o robô móvel avança. Isto permite um comportamento reativo dele onde qualquer mudança no ambiente seja imediatamente levada em consideração. Primeiro, possíveis soluções são geradas a cada nível. Em seguida, a melhor opção deve ser encontrada [7].

#### **2.4.2 O Problema do Planejamento**

Neste ponto, determina-se o trajeto que o robô deve percorrer, evitando ao máximo a redundância e o desperdício de energia, ou seja, otimizando-se a rota com a melhor relação custo *versus* benefício [23].

O problema de planejamento de trajetória pode ser abordado de três maneiras diferentes [7]:

**Robótica Clássica** - Baseada em uma modelagem matemática relacionando o robô e o ambiente no qual ele se encontra. Desta maneira, qualquer alteração estrutural no ambiente deve ser acompanhada também de uma remodelagem matemática do robô.

**Redes Neurais Artificiais (RNAs)** - Um novo paradigma utilizado para a solução do problema de planejamento de trajetória de robôs são as RNAs.

**Inteligência Artificial (IA)** - Tentam encontrar a solução do problema baseando-se principalmente em heurísticas de busca. Algoritmos baseados nessas heurísticas permitem que o robô determine sua trajetória a partir de consultas em árvores ou grafos contendo estados válidos.

O planejamento da trajetória pode ser dividido em duas visões: planejamento em um ambiente estático e o planejamento em um ambiente dinâmico.

Denomina-se ambiente estático o ambiente no qual os obstáculos não apresentam qualquer movimento, permanecendo imóveis durante todo o trajeto do robô [17].

Enquanto que no ambiente dinâmico os obstáculos se movem, necessitando que o processo de planejamento de trajetória seja recalculado dinamicamente durante o percurso do robô [17].

Nas duas situações em questão, pode-se ter um ambiente totalmente conhecido. O reconhecimento pode também ser feito através de câmeras.

O planejamento prévio do caminho de inspeção a ser realizado pode gerar um aumento de desempenho no procedimento de navegação, planejamento e controle de um robô móvel [23].

### 2.4.3 Técnicas de Planejamentos de Trajetórias

Através do uso de um mapa é possível planejar ações de alto-nível, como definir previamente uma trajetória a ser executada pelo robô, especificando as ações elementares a serem realizadas de modo a se deslocar de uma posição-origem até uma posição-alvo [34].

De acordo com [15], as três principais abordagens utilizadas pelas técnicas de navegação de robôs móveis autônomos são:

- Sensoriais / Reativas,
- Roadmaps e
- Matriciais.

Estas técnicas serão descritas a seguir.

#### **Sensoriais / Reativas**

Ao contrário das técnicas de navegação clássica, onde é preciso um conhecimento geral sobre a geometria do ambiente antes de iniciar-se o processo de planejamento, a navegação baseada em sensores incorpora as informações sensoriais, retornando o estado atual do ambiente, diretamente no processo de planejamento do robô. Desse modo, pode-se citar algumas vantagens da navegação baseada em sensores em relação à navegação clássica. Dentre elas:

- em muitos casos o robô não possui conhecimento antecipado sobre o ambiente onde ele irá atuar;

- o robô dispõe de um conhecimento parcial sobre o ambiente devido a limitação de memória;
- os modelos de ambiente geralmente não são precisos;
- no ambiente podem ocorrer situações inesperadas ou mudanças rápidas.

Há também diversas técnicas baseadas em sensores. Dentre elas:

- DistBug;
- Navegação Baseada em Comportamentos;
- Mapas Neurais;

### **Abordagem Roadmap**

Na abordagem roadmap os caminhos são gerados reduzindo as informações ambientais a um grafo que representa os possíveis caminhos a serem percorridos para alcançar o ponto desejado. A abordagem roadmap para a geração de caminhos consiste em reduzir as informações ambientais em um grafo representando os possíveis caminhos existentes. Uma vez que um roadmap foi construído, um caminho pode ser calculado conectando a posição atual e o objetivo ao grafo encontrando uma trajetória dentro deste grafo.

Em geral os métodos roadmap são rápidos e simples de se implementar, mas eles não fornecem uma boa forma de representação das informações do ambiente [15].

Algumas técnicas baseadas na abordagem roadmap são:

- Grafos de visibilidade;
- Diagramas de Voronoi;
- Decomposição celular.

### **Abordagem utilizando matrizes**

A abordagem utilizando matrizes representa o ambiente utilizando uma matriz de tamanho fixo. Cada célula da matriz pode conter diferentes atributos que auxiliam na navegação do robô. Cada célula, por exemplo, pode indicar a presença de um obstáculo na região correspondente do ambiente, ou indicar a probabilidade desta determinada região estar ou não ocupada por um obstáculo [15].

Dentre as técnicas que utilizam matrizes constam:

- Transformada de distância;
- Campos potenciais;
- AStar(A\*);
- DStar(D\*).

A seguir há uma tabela comparativa dos métodos citados anteriormente, baseada em [15].

Método	Representação	Custo Computacional	Ambiente Dinâmico	Posição Precisa
DistBug	Não Utiliza	Baixo	Não	Não
Navegação Baseada em Comportamentos	Não Utiliza	Baixo	Sim	Não
Mapas Neurais	Campo Neural	Alto	Não	Sim
Grafo de Visibilidade	Poligonal	Alto	Não	Sim
Voronoi	Poligonal	Baixo	Não	Sim
Decomposição Celular	Poligonal, Topológica	Médio	Não	Sim
Transformada de Distância	Grade	Médio	Não	Sim
Campos Potenciais	Grade, Poligonal	Médio	Sim	Não
A*	Grade	Baixo	Sim	Não
D*	Grade	Médio	Sim	Sim

**Tabela 1:** Comparação de métodos de planejamento de trajetória.

## 2.5 Planejamento de Trajetórias de UAVs

Assim como no caso dos robôs terrestres, os robôs aéreos necessitam de alguma capacidade deliberativa que lhes permita realizar tarefas de maneira autônoma, ou com o mínimo necessário de intervenção humana. Uma das tarefas mais fundamentais é o planejamento do movimento do veículo[22]. Quando o parâmetro tempo é considerado, pode-se conceituar dois tipos de planejamento de movimento:

- planejamento de caminhos e

- planejamento de trajetórias;

A diferença entre esses dois tipos de planejamento se dá no fato de que no planejamento do caminho não temos a preocupação com o fator “tempo”.

Dada uma sequência de pontos-alvos definidos para o veículo no espaço, o objetivo é gerar funções de navegação que permitam ao robô alcançar todos esses pontos de maneira eficiente do ponto de vista de manter ao máximo a interconectividade das ilhas de nós sensores.

O planejamento automático de movimento ou trajetória é essencial para diversas tarefas que conduzem ao aumento de autonomia de Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs).

### **2.5.1 Planejamento de Trajetórias de UAVs X RSSFs**

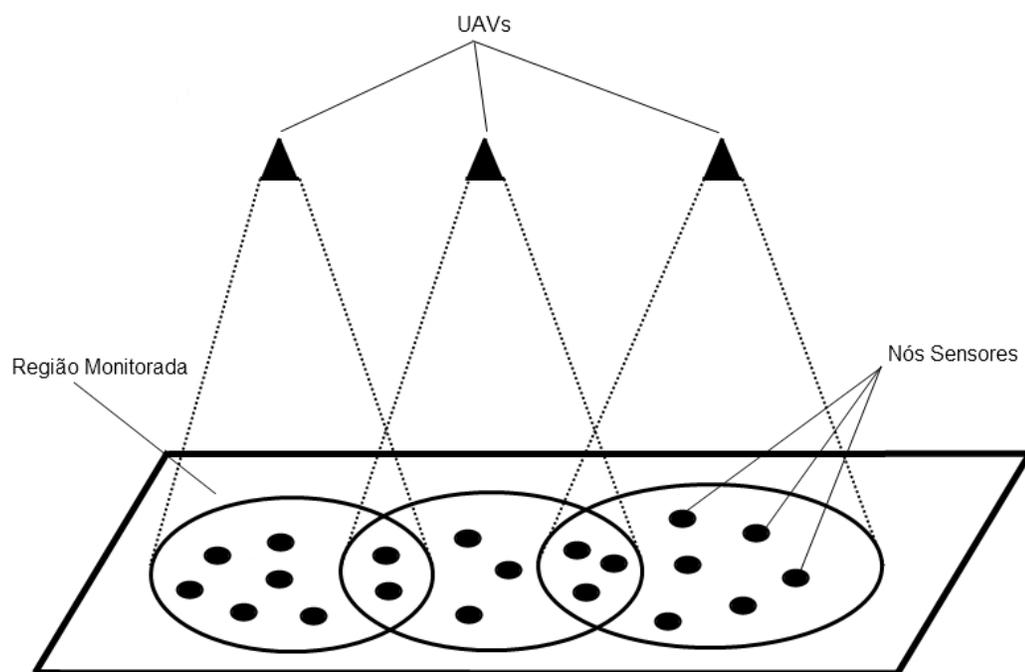
Com o aumento da robustez de tecnologias de RSSF, UAVs equipados com transmissores sem fio podem se comunicar com nós sensores terrestres, bem como com outros UAVs, essa combinação resulta na formação de uma rede móvel ad hoc. Essa configuração se torna muito útil em situações onde o terreno é muito acidentado e montanhoso, e onde a comunicação de nós sensores terrestres entre si não é muito eficiente.

Porém quando se tem um cenário terra-ar, e ar-ar livre a utilização de UAVs torna essa comunicação mais eficiente, pois ela pode ser estendida a distâncias

maiores com os UAVs podendo até servir como estações base para os nós sensores terrestres.

Neste tipo de configuração, a quantidade e o posicionamento dos UAVs em relação aos nós terrestres são muito importantes, pois estes fatores regulam a área de cobertura e o throughput da rede [2].

Na figura 7 podemos ver os UAVs com suas respectivas áreas de cobertura.



**Figura 7:** UAVs e sua área de cobertura em uma RSSF.

O voo dos UAVs está sujeito a algumas restrições:

- Eles não podem ficar absolutamente parados em um ponto para que seja mantida a conectividade com os nós terrestres;
- O UAV a todo momento possui uma orientação (direção a ser seguida) e o deslocamento entre dois pontos está diretamente ligado a essa orientação.

A cooperação entre nós estáticos e dinâmicos pode atender as situações onde ocorrem falhas de comunicação de RSSF, mantendo a conectividade das mesmas. Segundo [14] uma vez que falhas são encontradas, na área de cobertura da RSSF, esses sensores móveis incluem em sua rota essas regiões para uma posterior visita. Sendo o problema principal a ser abordado, seria a eficiência desses nós móveis em manter a conexão, sem que o funcionamento da rede seja afetado.

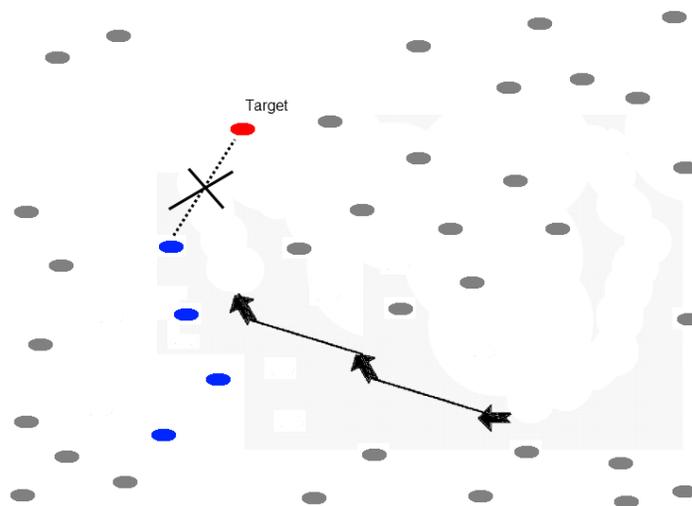
Na Figura 8, podemos ver uma possível rota de um UAV em uma RSSF com o objetivo de restabelecer a conexão da rede em um ponto previamente adicionado a sua lista de posições a serem visitadas.

## **2.6 Simulação Orientada a Eventos**

Esta seção mostra algumas definições de Simulação Orientada a Eventos e em seguida trata do simulador utilizado neste trabalho.

### **2.6.1 Definições**

Segundo [8], na simulação orientada a evento, um sistema é modelado pela definição das mudanças que ocorrem no tempo de evento. Deste modo a tarefa



**Figura 8:** Possível rota de um UAV em uma RSSF.

do modelador é determinar os eventos que podem causar a mudança no estado do sistema e assim a lógica associada a cada tipo de evento pode ser desenvolvida. A simulação do sistema é produzida pela execução da lógica associada a cada evento em uma sequência ordenada no tempo.

Na simulação orientada a eventos existe um procedimento associado com cada tipo de evento no sistema. O simulador ciclicamente escala eventos, atualiza o relógio para o próximo evento a ocorrer e executa o procedimento associado ao evento. A execução no simulador envolve retirar o evento de uma lista global de eventos e processá-lo por um componente do sistema. O componente executará sua lógica e poderá gerar novos eventos. O tempo não é absoluto, mas uma quantidade virtual. Os eventos podem ser agendados para um determinado instante e esses

serão ordenados por tempo de ocorrência. A ocorrência de um evento afeta o estado da simulação. Também são atualizados os contadores de estatísticas que permitem a geração dos relatórios da simulação.

A simulação orientada a eventos utiliza uma lista onde os eventos são armazenados por ordem cronológica de acontecimento. Os eventos vão sendo disparados no meio simulado de forma sequencial fazendo com que a representação do tempo seja apenas em função do atributo tempo de ocorrência dos eventos. Caso estes eventos não possuam uma variável explícita de tempo de acontecimento, eles devem ser organizados simplesmente por suas ordens de acontecimentos [25].

### **2.6.2 Simulador Orientado a Eventos - GRUBiX**

Nesta seção temos a definição do Simulador GRUBiX, utilizado neste trabalho.

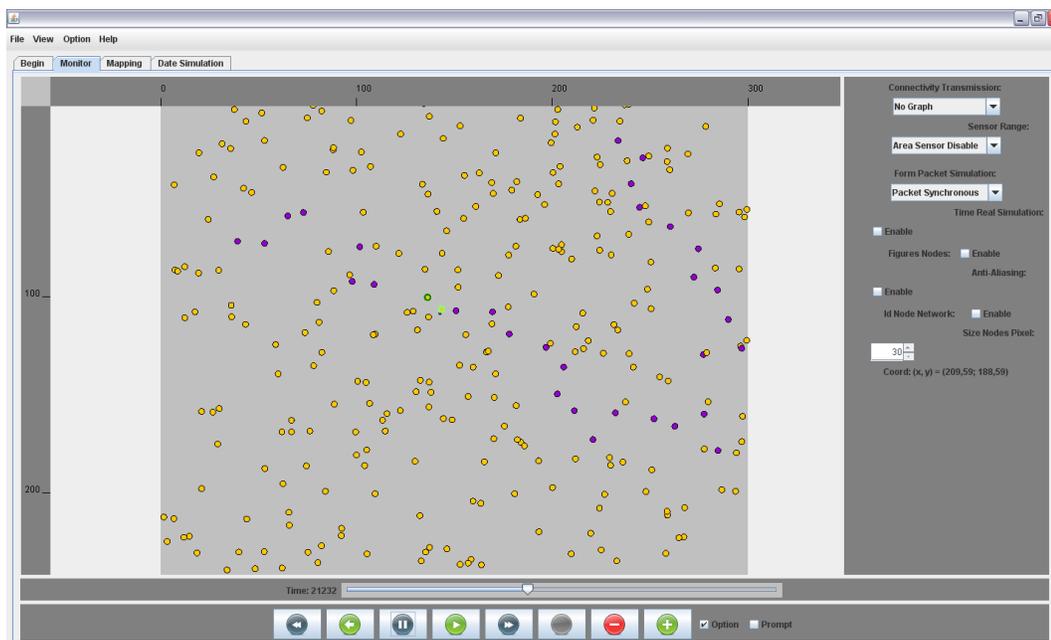
#### **Definição**

O GRUBiX é um ambiente de simulação Open Source mantido pelo Grupo de Redes Ubíquas do Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Lavras (GRUBi - UFLA). Esse ambiente é uma extensão de um conhecido simulador para rede móveis ad hoc, o ShoX [ShoX: A scalable ad hoc network simulator] [18]. O simulador GRUBiX é identificado como um ambiente de simulação orientado a eventos e utiliza a linguagem de programação Java.

Sua utilização deve-se a tarefa de verificação e avaliação do comportamento da rede. O simulador GrubiX já apresenta uma versão estável e suas simulações fazem uso de eventos para exibir o comportamento da rede [9].

Este ambiente assume que um evento pode ocorrer em qualquer ponto do tempo. Cada evento tem uma marca indicando quando ele deve ser processado.

Na Figura 9 temos o visualizador do simulador GRUBiX mostrando o cenário utilizado neste trabalho, onde temos vários nós. Temos também o fluxo de mensagens caracterizado pela cor roxa. O UAV neste caso é caracterizado por um nó com borda cor verde claro.



**Figura 9:** Visualizador do Simulador GrubiX

O GRUBiX foi desenvolvido para ser utilizado em simulação de redes móveis ad hoc, que apresentam uma característica muito importante neste trabalho: a não-existência de uma entidade central para gerenciar a comunicação das entidades da rede [9].

### **3 Metodologia**

A descrição do tipo de pesquisa foi baseada em [35].

Quanto à sua natureza, o trabalho é classificado como pesquisa Aplicada ou tecnológica, pois visa o tratamento de um problema concreto. É esperado que ao fim do trabalho a pesquisa apresente resultados sólidos no que diz respeito a resolução do problema apresentado.

Quanto aos objetivos, o trabalho se classifica como pesquisa exploratória, visto que a proposta é a construção de um algoritmo de controle de movimento para UAVs, para que os mesmos mantenham uma RSSF conectada.

No que diz respeito aos procedimentos, o trabalho é considerado uma pesquisa experimental, por visar a descoberta/desenvolvimento de novos métodos, algoritmos e técnicas de modelos de movimento.

A realização do trabalho se deu em laboratório, pois dessa forma todos os parâmetros do experimento puderam ser controlados. Foram utilizadas simulações baseadas em eventos a partir do simulador GRUBiX, o que permitiu a realização de vários testes e a avaliação do algoritmo desenvolvido.

#### **3.1 Procedimentos Metodológicos**

Todos os experimentos realizados neste trabalho foram baseados em simulação. O uso de simulação é justificado pela dificuldade em se aplicar o algoritmo pro-

posto em uma grande quantidade de nós sensores e UAVs, por questões financeiras e questões relacionadas ao tempo necessário para o teste do algoritmo.

## **4 Algoritmo de Planejamento de Trajetória**

Este capítulo discute o funcionamento do algoritmo desenvolvido para o planejamento de trajetória de UAV a fim de restaurar a conexão em RSSFs. As próximas seções descrevem o problema tratado e apresentam a solução proposta para a resolução deste problema.

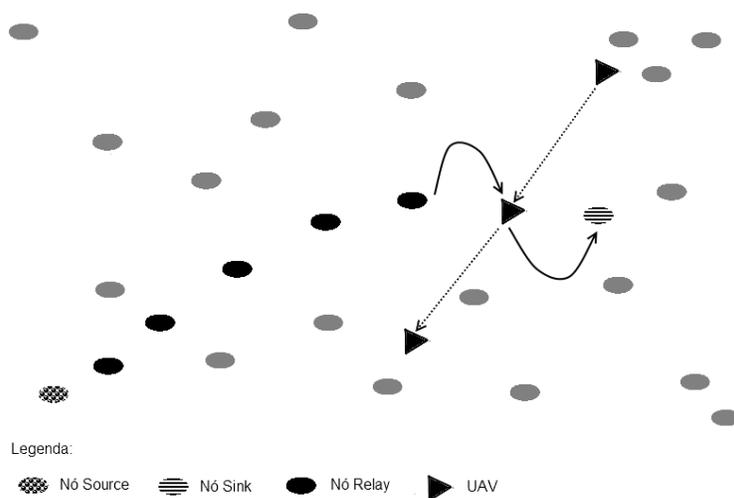
### **4.1 Descrição do Problema**

As RSSFs possuem várias aplicações como mostrado anteriormente no referencial teórico. Com essa gama de aplicações surgem também problemas na utilização dessas redes. Dentre estes, temos o problema de desconexão em uma rede, onde as mensagens não conseguem chegar a seu destino devido a esta desconexão. Este é o principal problema abordado neste trabalho. Deste modo, este trabalho preocupa-se em pesquisar e desenvolver um algoritmo de planejamento de trajetória para restauração da conectividade em uma RSSF.

A rede em questão necessita realizar a comunicação entre diversos pontos, e para realização dessa comunicação são utilizados nós sensores terrestres e também UAVs, todos eles equipados com enlaces de comunicação sem fio.

Os UAVs, como já visto anteriormente possuem várias aplicações. A justificativa e motivação para a utilização destes nesse trabalho encontram-se no fato desses nós móveis auxiliarem no encaminhamento de mensagens em pontos de desconexão da rede, tornando possível assim que uma mensagem possa chegar a seu destino caso a infraestrutura terrestre não permita essa comunicação por si só.

A Figura 10 mostra um UAV auxiliando no encaminhamento de mensagens e restabelecendo a conexão em um ponto da rede.



**Figura 10:** UAV restabelecendo a conexão em um ponto da rede.

Primeiramente podemos classificar os nós da simulação em três tipos:

- Nó fonte ou *source*: nó responsável pela geração do tráfego de mensagens na simulação
- Nó caminho ou *relay*: nó responsável pelo roteamento das mensagens
- Nó destinatário ou *sink*: nó responsável por tratar as mensagens

Um nó *source* gera periodicamente um fluxo de mensagens que serão enviadas a um nó *sink*, e para que essas mensagens possam chegar até seu destinatário elas são

roteadas pelos nós *relays*. Cada nó da simulação possui um *buffer* para guardar as mensagens caso ele não seja o destinatário das mesmas e nem consiga passá-las adiante.

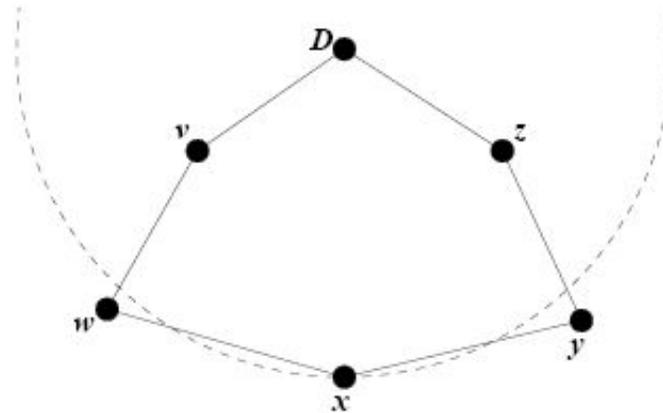
## 4.2 Roteamento Geográfico

Neste trabalho, para realizar o roteamento de mensagens foi utilizado o “roteamento geográfico”. Este algoritmo funciona da seguinte maneira: ao receber uma mensagem, primeiramente o nó verifica se ele não é o destinatário. Nesse caso, ele envia a mensagem para a camada de cima. Caso contrário, este nó cria uma mensagem de “requisição de posição” e a envia a todos os seus vizinhos.

Cada nó ao receber esta mensagem de “requisição de posição”, cria uma mensagem de resposta que contém sua posição e a envia de volta ao nó que fez a requisição. Ao receber as mensagens de resposta de todos os vizinhos, o nó calcula qual deles é o nó mais próximo do destinatário da mensagem, e envia a mensagem a este nó, que por sua vez repete todo o processo.

A maioria dos protocolos de roteamento geográfico utilizam o vizinho mais próximo do destino como próximo salto. Essa abordagem gulosa muitas vezes leva-nos a situações onde o nó não possui nenhum vizinho mais próximo do seu destino do que ele próprio. Essa situação é chamada dead-end e está ilustrada na Figura 11 [16].

O nó  $x$  é o mais próximo de  $D$  dentre seus vizinhos, porém o caminho possível passa por  $w$  ou  $y$ , que estão mais distantes.



**Figura 11:** Dead end em uma RSSF.

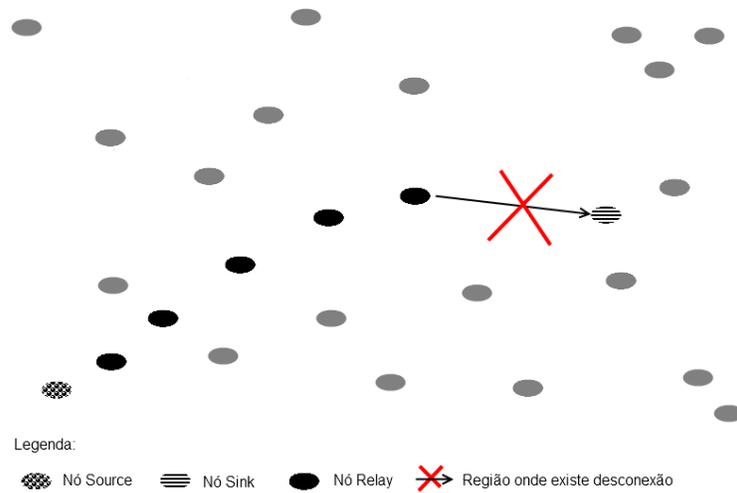
Caso não exista um candidato para realizar o encaminhamento da mensagem, a camada de rede do nó sensor coloca a mensagem um *buffer* e entra em modo de procura, a espera de algum nó móvel que possa realizar o roteamento. Isso pode ser visto na Figura 12.

O roteamento geográfico implementado neste trabalho não trata *dead-end* para que o algoritmo desenvolvido tenha mais pontos para testes.

### 4.3 Descoberta de Áreas com Desconexão

O movimento do UAV depende da metodologia utilizada para encontrar os pontos de desconexão na rede.

Periodicamente, o UAV envia mensagens de reconhecimento (*beacons*) para todos os nós dentro de seu alcance. Essa mensagem alerta os nós terrestres da existên-



**Figura 12:** RSSF com ponto de desconexão.

cia de um UAV nas proximidades. Assim, se alguma mensagem estiver no *buffer* de algum nó de terra com problema de desconexão, o UAV poderá ser utilizado para encaminhá-la.

Caso o UAV possa auxiliar no encaminhamento dessas mensagens ele recebe a mensagem do nó e a encaminha para um nó que seja mais próximo do *sink*. Cada vez que uma desconexão é reconhecida pelo UAV, essa informação de posição é adicionada a lista. Dessa maneira periodicamente o UAV voltará àquela posição para restabelecer a conexão.

Conforme as posições são inseridas nesta lista o UAV já pode criar uma trajetória para que todos os pontos desta lista sejam visitados periodicamente. Os

seguintes métodos são utilizados para o UAV localizar os pontos de desconexão da rede:

- **Random Walk:** O método *random walk* implementado neste trabalho funciona da seguinte maneira: o UAV percorre uma trajetória aleatória, e durante o percurso envia mensagens de reconhecimento. Assim que um nó de terra recebe essa mensagem, verifica se existem mensagens que não estão sendo roteadas devido a existência de desconexão. Existindo desconexão, o UAV é avisado e adiciona a região a sua lista de posições a serem visitadas.
- **Visão Global:** O método “visão global” implementado neste trabalho funciona da seguinte maneira: o UAV inicialmente está livre para percorrer a trajetória desejada, podendo inclusive estar parado. Os fluxos de mensagens são criados, como nas simulações normais. Porém quando ocorre um ponto de desconexão o UAV tem esse ponto automaticamente inserido em sua lista de posições a serem visitadas.

Desta maneira, tem-se uma otimização do processo de restabelecimento da conexão, visto que o UAV não precisa “descobrir” este ponto enquanto realiza sua trajetória. A utilização deste método permite a cobertura total de toda a rede, restabelecendo a comunicação em todos os pontos de desconexão.

Este método foi implementado na simulação a título de comparação, pois desta maneira pode ser visto como o UAV trabalharia caso todos os pontos

de desconexões da rede fossem conhecidos. Este método porém é de pouca aplicação real.

- **Feromônio:** Neste método, o UAV sobrevoa continuamente a área de interesse da aplicação e durante esse sobrevoo o UAV se comunica com os nós terrestres. Estes nós, por sua vez armazenam um valor com a intensidade do sinal com que a mensagem foi recebida. Neste momento é formado um gradiente que corresponde a um rastro artificial do UAV. Sendo assim, quando um ponto de desconexão é encontrado, um agente é gerado e segue o rastro até encontrar um UAV para que este possa se deslocar até a posição de desconexão. Este método não foi implementado no trabalho.

#### 4.4 Definição da Trajetória a ser Seguida

Como visto anteriormente no referencial teórico, a definição da trajetória a ser seguida é muito importante, pois essa trajetória influenciará diretamente no sucesso da simulação. Para decidir qual posição será visitada primeiramente pelo UAV foram implementados dois modelos de planejamento de trajetória:

- Ordem de chegada (*First Come First Served*)
- Mais próximo primeiro (*Shortest First*)

##### 4.4.1 Ordem de Chegada

O modelo Ordem de chegada assume que o UAV deve visitar os locais de acordo com a ordem pela qual as falhas na rede são descobertas. Assim, o UAV mantém

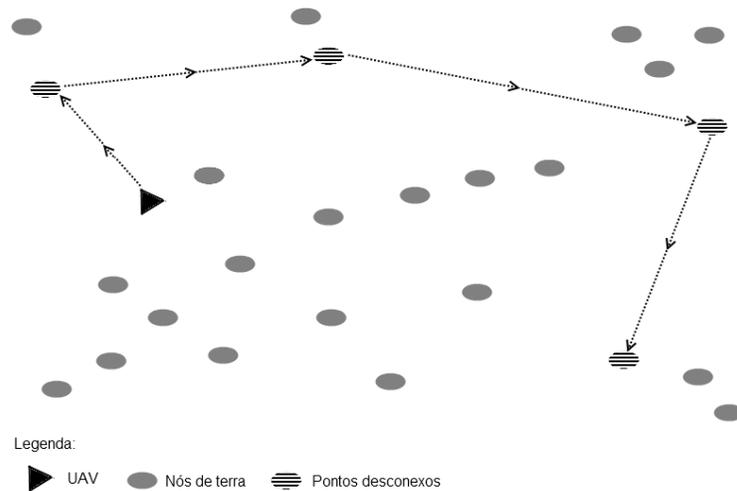


#### 4.4.2 Mais Próximo Primeiro

O modelo mais próximo primeiro visita os locais de acordo com sua proximidade. Isto significa que, o UAV visita o local mais próximo primeiro, e em seguida, os mais distantes de acordo com a ordem definida pelas distâncias desses locais.

Este modelo de planejamento de movimento requer um cálculo de posições para definição da ordem em que elas serão visitadas. A vantagem deste método é que ele otimiza a trajetória percorrida pelo UAV.

A Figura 14 mostra um UAV percorrendo as posições de sua lista utilizando o modelo ordem de chegada.



**Figura 14:** Modelo de trajetória mais próximo primeiro.

#### **4.5 Tamanho do *Buffer* Utilizado**

Neste trabalho o tamanho do *buffer* utilizado em cada nó é muito influente nos resultados da simulação. Quanto maior o *buffer* do nó, menor o número de mensagens perdidas, e conseqüentemente mais satisfatórios serão os resultados. A utilização de um *buffer* maior, permite ao nó aguardar por mais tempo a visita de um UAV sem realizar o descarte de mensagens.

#### **4.6 Realização do *Round***

O UAV pode se encontrar em dois estados. No estado denominado busca, o UAV está buscando novos pontos de desconexão. Assim, sua trajetória seguirá um modelo de movimento referente a um dos métodos de descoberta descritos acima.

No estado de *round*, os diferentes pontos onde desconexões são conhecidas serão visitados um a um, de acordo com uma das políticas também descritas anteriormente. As políticas aqui utilizadas foram ordem de chegada e mais próximo primeiro.

O próximo capítulo apresenta os resultados dos experimentos realizados com os algoritmos apresentados neste capítulo.

## **5 Resultados e Discussões**

Este capítulo apresenta discussões acerca dos resultados obtidos nos experimentos do algoritmo desenvolvido neste trabalho, abordando os resultados das simulações envolvendo o processo de planejamento de trajetória para UAVs, para restauração da conectividade em uma RSSF.

### **5.1 Construção da Trajetória**

Os experimentos realizados para avaliar o desempenho dos algoritmos desenvolvidos no trabalho foram baseados na comparação dos algoritmos entre si e entre estes e um cenário sem nós móveis. As métricas avaliadas nesta comparação foram:

- Percentagem de pacotes perdidos;
- Tempo médio gasto pelo UAV para realizar o “round”;
- Tempo médio gasto pelo pacote para chegar ao seu destino;

### **5.2 Configurações da Simulação**

Foram realizadas 40 simulações em cada algoritmo implementado. Os experimentos foram realizados com o intuito de avaliar o comportamento da rede de forma isolada no acontecimento de um evento de interesse. Portanto, optou-se por simular um cenário contendo apenas um UAV com a ocorrência de vários eventos de interesse, de modo que se consiga visualizar o comportamento específico na utilização de UAVs no encaminhamento de pacotes, quando ocorrer falta de conectividade em um ponto da rede sem a interferência de muitos eventos.

Neste cenário, quando um UAV não está percorrendo uma trajetória para tentar restaurar a conectividade na rede, ele realiza sua rota padrão buscando encontrar mais pontos desconexos. Na corrente simulação, o algoritmo de movimento *random walk* foi utilizado para o monitoramento.

São distribuídos 300 nós sensores terrestres (com raio de comunicação de 20 metros) dispostos aleatoriamente em uma área de 300m x 250m, obtendo-se vários pontos de desconexão na rede.

A Tabela 2 resume os parâmetros utilizados para as simulações.

Parâmetro	Valor
Campo(Área)	300 m x 250 m
Raio de comunicação dos nós	20 metros
Número de nós terrestres	300
Tamanho do buffer de cada nó	3 mensagens
Número de nós móveis(UAVs)	1
Velocidade do nó móvel	10Km/h
Número de fluxos	2 a 5
Número de pacotes por fluxo	200
Duração de cada simulação	2000 segundos

**Tabela 2:** Parâmetros para a simulação da Restauração da Conectividade de RSSFs Utilizando Nós Móveis

### 5.3 Resultados

A seguir temos as tabelas comparativas entre os métodos implementados e também a comparação entre os métodos e o cenário sem a utilização de nós móveis.

Nessas tabelas temos o método Ordem de chegada representado pela sigla “FCFS” do inglês *First Come First Served*, e o método Mais próximo primeiro representado pela sigla “SF” do inglês *Shortest First*.

A Tabela 3 está relacionada às perdas de pacotes mostrando a percentagem destas perdas em relação ao total de pacotes.

Algoritmo	Dois Fluxos	Três Fluxos	Quatro Fluxos	Cinco Fluxos
SEM UAV	62,85	69,43	70,68	72,54
FCFS	56,00	63,67	66,03	71,00
SF	50,35	60,20	62,25	70,78

**Tabela 3:** Comparação: Percentagem de pacotes perdidos.

A Tabela 4 representa uma simulação onde o UAV têm uma Visão Global de toda a rede. Deste modo, todo ponto de desconexão da rede é reconhecido pelo UAV e consequentemente colocado em sua lista, assim que verificada essa desconexão, e o UAV por sua vez percorre todas essas posições.

Algoritmo	Dois Fluxos	Três Fluxos	Quatro Fluxos	Cinco Fluxos
SEM UAV	62,85	69,43	70,68	72,54
FCFS	54,15	59,60	65,13	67,56
SF	46,93	59,28	59,75	67,02

**Tabela 4:** Comparação: Percentagem de pacotes perdidos(Visão Global).

As Tabelas 5 e 6 por sua vez mostram a comparação entre os métodos implementados no que diz respeito ao tempo de *round* dos UAVs, e ao tempo gasto para que o pacote chegue até o seu destino, respectivamente.

Algoritmo	Dois Fluxos	Três Fluxos	Quatro Fluxos	Cinco Fluxos
FCFS	90,16	130,31	143,09	164,08
SF	77,77	128,02	134,88	158,74

**Tabela 5:** Comparação: Tempo médio de “round” do UAV.

A seguir temos os gráficos correspondentes às tabelas mostradas anteriormente.

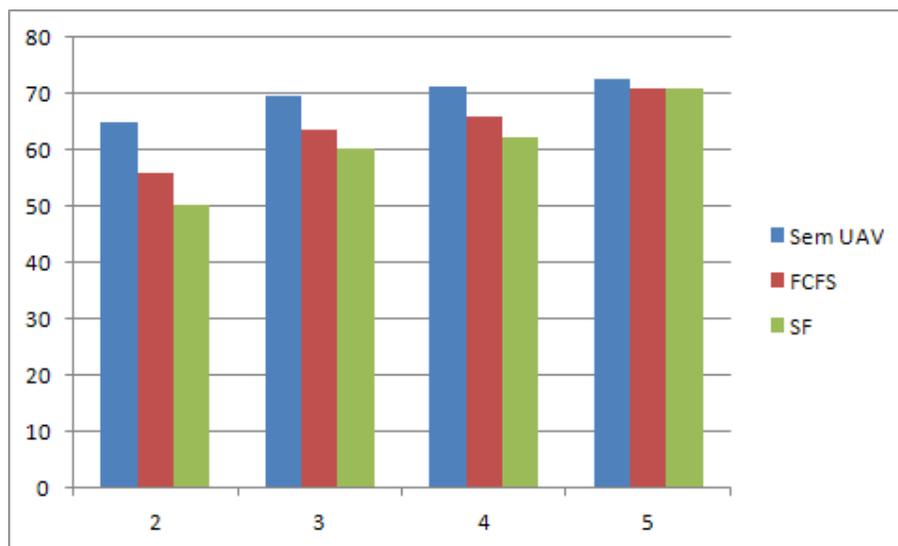
Algoritmo	Dois Fluxos	Três Fluxos	Quatro Fluxos	Cinco Fluxos
FCFS	11,32	63,13	73,78	117,61
SF	8,48	58,28	44,718	68,15

**Tabela 6:** Comparação: Tempo médio gasto pelo pacote para chegar ao destino.

No gráfico da Figura 15 podemos ver a percentagem de pacotes perdidos.

Essa vantagem do algoritmo **SF** se deu pois ele realiza o *round* de forma otimizada visitando sempre o nó com problema de comunicação mais próximo, ao contrário do algoritmo **FCFS**, que visita os nós de acordo com a ordem em que foram inseridos na lista.

Essa vantagem da utilização do algoritmo **FCFS** em relação a simulação da comunicação sem a utilização do nó móvel, e a vantagem do algoritmo **SF** sobre



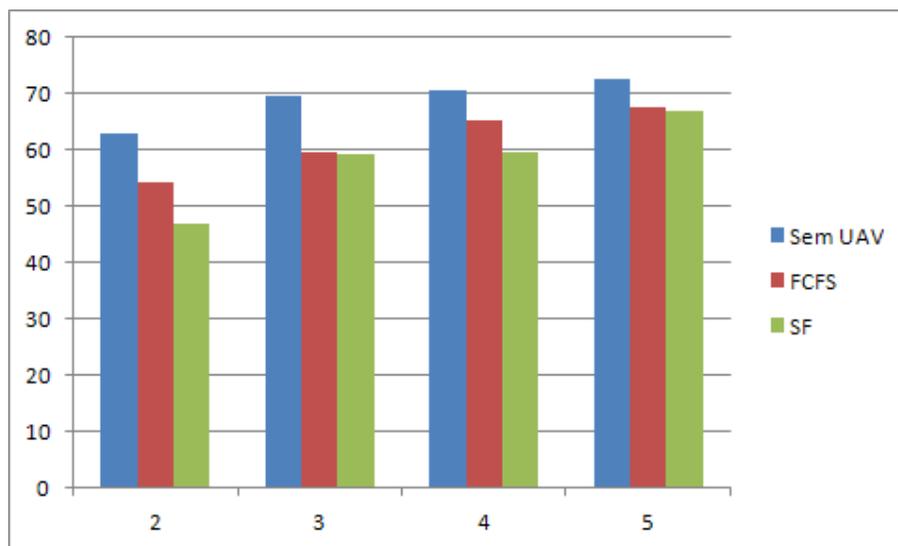
**Figura 15:** Gráfico: Percentagem de pacotes perdidos.

as outras duas pode ser verificada também nas simulações com três, quatro e cinco fluxos.

Este gráfico baseia-se nas informações mostradas na Tabela 15, pois também podemos perceber a vantagem do algoritmo **FCFS** em relação a simulação da comunicação sem a utilização do nó móvel, e a vantagem do algoritmo **SF** sobre os dois.

No gráfico mostrado na Figura 16 podemos ver o número de pacotes perdidos, quando o método Visão Global está ativado.

Este gráfico está relacionado a Tabela 4.

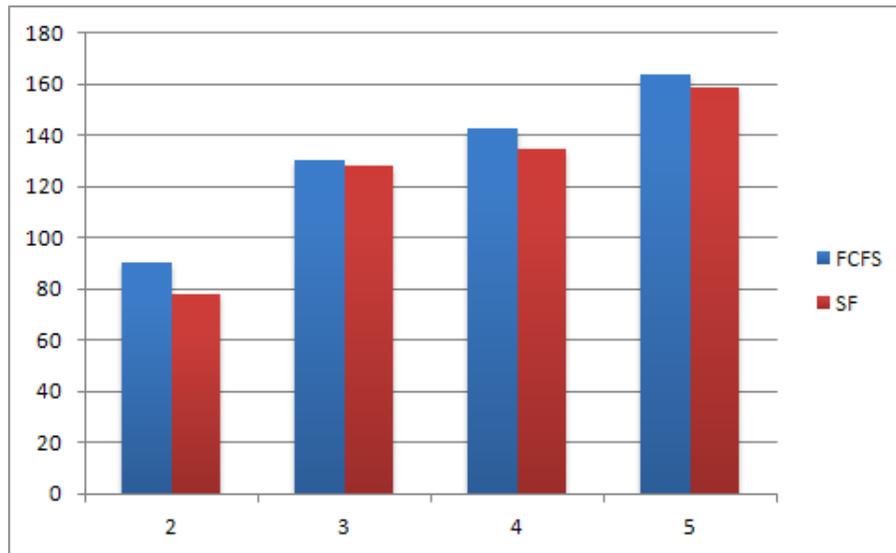


**Figura 16:** Gráfico: Percentagem de pacotes perdidos(Visão Global).

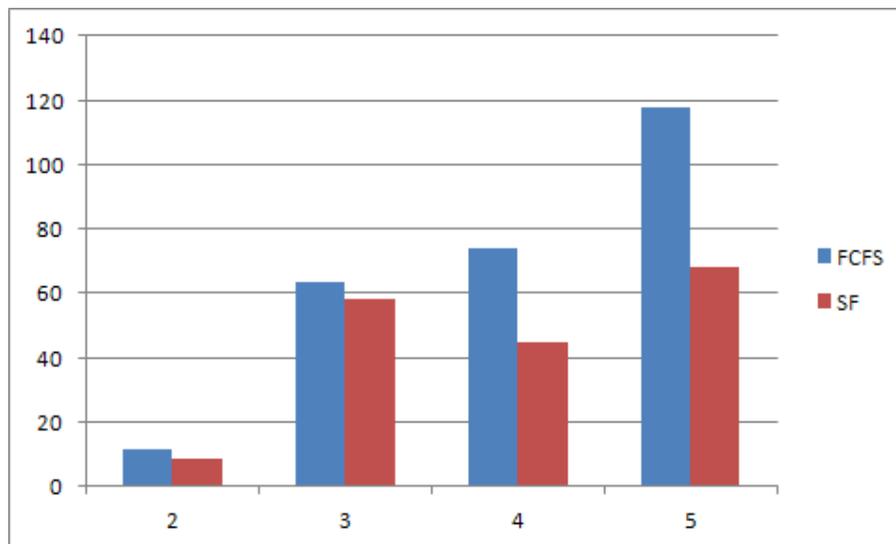
Na Figura 17, temos a comparação entre os dois algoritmos desenvolvidos neste trabalho, no que diz respeito ao tempo gasto para realizar o *round*. Novamente podemos perceber a vantagem do algoritmo **SF** sobre o algoritmo **FCFS**, pois como foi dito anteriormente, no algoritmo **SF** o UAV sempre visita o nó mais próximo de sua posição atual, otimizando assim a trajetória percorrida.

Na Figura 18 temos novamente a comparação entre os dois algoritmos, porém analisando o tempo gasto para que um pacote chegue ao seu destino. Nesta métrica também pode-se perceber a vantagem da utilização do algoritmo **SF** sobre o algoritmo **FCFS**.

Isso se deve exatamente pela otimização realizada pelo algoritmo **SF** na escolha da posição da lista a ser visitada pelo UAV. Como este algoritmo sempre visita o



**Figura 17:** Gráfico: Tempo necessário para realização de um *round*.



**Figura 18:** Gráfico: Tempo necessário para que um pacote chegue a seu destino.

nó mais próximo, os pacotes a serem enviados não ficam na lista de espera por muito tempo.

Após a análise das tabelas e dos gráficos, pode-se concluir que a utilização de nós móveis para restabelecer a conectividade em RSSFs é um método que obteve sucesso, visto que o número de pacotes perdidos diminuiu. O fato da pequena vantagem obtida, se deu pela utilização de um *buffer* de tamanho reduzido. Em testes preliminares feitos nas simulações, a utilização de um *buffer* de tamanho maior trouxe melhores resultados.

Como visto em todas as simulações, a utilização de nós móveis juntamente com um dos algoritmos de planejamento de trajetória (**SF** ou **FCFS**) pode ser considerada parte de uma solução para o problema de desconexão em RSSFs.

O próximo capítulo apresenta as conclusões e trabalhos futuros relacionados a este trabalho.

## 6 Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho desenvolveu e avaliou o uso de um algoritmo para a o planejamento de trajetória de UAVs a fim de restaurar a conectividade de uma rede de sensores sem fio. Foram realizados experimentos computacionais para comprovar a eficiência e eficácia da técnica desenvolvida.

Os resultados dos experimentos comprovaram a eficiência do uso do algoritmo para a resolução do problema de desconectividade, visto que houve uma melhora na conexão reduzindo em 19,89% a perda de mensagens para dois fluxos. Para três fluxos houve uma melhora de 13,3%. Para quatro fluxos uma melhora de 11,92%. E por fim, uma melhora de 2,43% para cinco fluxos, no caso do algoritmo “SF” que obteve melhor desempenho.

O trabalho reafirma as vantagens da utilização de nós móveis (UAVs) para aumentar a eficiência e conectividade de uma rede de sensores sem fio.

Como trabalhos futuros, podem ainda ser considerados algoritmos para:

**Introdução de Eventos na área em questão:** além de servir de “ponte” nas áreas desconexas do mapa, o UAV poderia também cobrir eventos que ocorrem nesta área. Nessa situação os nós sensores iriam procurar o UAV mais próximo assim que um evento fosse detectado.

**Utilização de feromônio:** os UAVs poderiam deixar rastros de feromônio, para que fossem mais facilmente encontrados. Nesta situação, quando um nó

nao conseguisse enviar o pacote para um vizinho mais próximo, ele buscaria o rastro do UAV para que este pudesse vir ate esta posição e suprir as necessidades de comunicação.

**Introdução da terceira dimensão na simulação:** além das dimensão “x” e “y”, poderia ser introduzido uma terceira dimensão “z”. Deste modo poderiam ser simuladas situações mais próximas da realidade, onde as altitudes dos nós terrestres e dos UAVs influenciariam diretamente na comunicação dos mesmos, e conseqüentemente nos resultados da simulação.

## Referências

- [1] ABOELAZE, M., AND ALOUL, F. Current and future trends in sensor networks: A survey, 2005.
- [2] BASU, P., AND REDI, J. Coordinated flocking of uavs for improved connectivity of mobile ground nodes. *Military Communications Conference. MILCOM 2004. IEEE Vol. 3* (2004), 1628–1634.
- [3] BONE, E., AND BOLKCOM, C. Unmanned aerial vehicles: Background and issues for congress. Tech. rep., Congressional Research Service - The Library of Congress, 2003.
- [4] CHEE-YEE, AND KUMAR, S. P. Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges. *Proceeding of the IEEE Vol.91 No.08* (Jan. 2003).
- [5] CORREA, U., CODAS, A., AND MONTEZ, C. Redes locais sem fio: Conceito e aplicacoes.
- [6] CULLER, D., ESTRIN, D., AND SRIVASTAVA, M. Introduction: Overview of sensor networks. *IEEE Computer Vol. 37, No. 8* (2004).
- [7] DE A. BARRETO, G., ARAUJO, A. F. R., AND DE O. ROSA, M. Algoritmo de busca heuristica usando redes neurais competitivas para planejamento otimo de trajetoria de um robo movel.
- [8] DE MELLO, B. A. Modelagem e simulacao de sistemas.
- [9] DESENVOLVEDORES. *Manual do Simulador GrubiX*, 2011.

- [10] DREW, J. G., ET AL. Unmanned aerial vehicle end-to-end support considerations. Tech. rep., RAND CORP SANTA MONICA CA, 2005.
- [11] ERMAN, A., HOESEL, L., AND HAVINGA. Enabling mobility in heterogeneous wireless sensor networks cooperating with uavs for mission-critical management. *Wireless Communications, IEEE 15*, 6 (december 2008), 38–46.
- [12] FODOR, K., AND VIDACS, A. Efficient routing to mobile sinks in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 3rd international conference on Wireless internet (ICST, Brussels, Belgium, Belgium, 2007)*, WICON '07, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), pp. 32:1–32:7.
- [13] GARCIA-HERNANDEZ, C. F., ET AL. Wireless sensor networks and applications: a survey. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security Vol.7 No.3* (2007), 264–273.
- [14] HEIMFARTH, T., AND FREITAS, E. P. Experimental analysis of a wireless sensor network setup strategy provided by an agent-oriented middleware.
- [15] HEINEN, F. J. Sistemas de controle hibrido para robos moveis autonomos. Master's thesis, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS Centro de Ciencias Exatas e Tecnologicas Mestrado em Computacao Aplicada - PIPCA, 2002.
- [16] KARP, B., AND KUNG, H. T. Gpsr:greedy perimeter stateless routing for wireless networks. *MobCom* (2000).

- [17] LANGER, R. A. Estudo e implementacao de metodos para planejamento de trajetorias e controle de robos moveis nao holonomicos. Master's thesis, Pontificia Universidade Catolica do Parana - PUCPR, 2007.
- [18] LESSMANN, J., HEIMFARTH, T., AND JANACIK, P. Shox: An easy to use simulation platform for wireless networks. *UKSIM '08: Proceedings of the Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation* (2008), p. 410–415.
- [19] LINDGREN, A. The quest for a killer app for opportunistic and delay tolerant networks (invited paper), 2009.
- [20] LOUREIRO, A., NOGUEIRA, J. M., AND RUIZ., L. B. Redes de sensores sem fio. *Tutoriais do Simposio Brasileiro de Redes de Computadores*. (2003).
- [21] MHATRE, V. P., ET AL. A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 4 (January 2005), 4–15.
- [22] NETO, A. A. Geracao de trajetorias para veiculos aereos autonomos nao-tripulados, 2008.
- [23] NETO, R. F. T., AND DOS SANTOS COELHO, L. Planejamento de rotas para robôs de inspeção usando uma nova abordagem swarm intelligence.
- [24] PERKINS, C. E. *Ad hoc networking*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 2001.
- [25] PINHEIRO, P. G., ET AL. A representacao do tempo em simulacoes computacionais.

- [26] RICHARDS, A., ET AL. Co-ordination and control of multiple uavs.
- [27] SITE:. [http://aeroescolinha.blogspot.com/2011\\_05\\_01\\_archive.html](http://aeroescolinha.blogspot.com/2011_05_01_archive.html).
- [28] SITE:. <http://newswakid.blogspot.com/2011/05/budget-constraints-will-limit.html>.
- [29] SITE:. <http://pplware.sapo.pt/windows/software/redes/rede-de-sensores-sem-fios-conhece-esta-tecnologia/>.
- [30] SITE:. <http://www.spyflight.co.uk/uav.htm>.
- [31] SOD. Uas roadmap 2005. Tech. rep., Office of The Secretary of Defense, 2005.
- [32] STEERE, D. C., ET AL. Research challenges in environmental observation and forecasting systems. In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00)* (2000), pp. 292–299.
- [33] TAHERKORDI, A., AND TALEGHAN, M. Dependability considerations in wireless sensor networks applications. *Journal of Networks Vol. 1*, 6 (2006).
- [34] WOLF, D. F., ET AL. Robotica movel inteligente: Da simulacao as applicoes no mundo real. 2008.
- [35] ZAMBALDE, A. L., ET AL. O documento científico em ciência da computação e sistemas de informação.