Integração de veículos aéreos não tripulados e
redes de sensores sem fio para aplicações
agrícolas

Fausto Guzzo da Costa

SERVIÇO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO ICMC-USP

Data de Depósito:

Assinatura: _____

Integração de veículos aéreos não tripulados e redes de sensores sem fio para aplicações agrícolas

Fausto Guzzo da Costa

Orientador: Prof. Dr. Jó Ueyama

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - ICMC-USP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências - Ciências de Computação e Matemática Computacional. *VERSÃO REVISADA*

USP – São Carlos
Março de 2013

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Achille Bassi
e Seção Técnica de Informática, ICMC/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

GC837i Guzzo da Costa, Fausto
Integração entre veículos aéreos não tripulados e
redes de sensores sem fio para aplicações agrícolas /
Fausto Guzzo da Costa; orientador Jó Ueyama. -- São
Carlos, 2013.
65 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Ciências de Computação e Matemática Computacional) --
Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação,
Universidade de São Paulo, 2013.

1. REDES DE SENSORES SEM FIO. 2. VEÍCULOS AÉREOS
NÃO TRIPULADOS. 3. AGRICULTURA DE PRECISÃO. I.
Ueyama, Jó, orient. II. Título.

*“Maior sou e para maiores coisas nasci
do que para ser escravo da minha carne.”*

Seneca (século I)

Dedico à minha família.

Agradecimentos

Inicialmente, agradeço à minha família pela força que me deram em quase todas as minhas decisões, e principalmente por terem me ajudado a tomar as decisões em que eu precisava de um conselho.

Agradeço à minha namorada e amiga Aninha, pelo amor e pela paciência.

Agradeço ao meu orientador Jó pelo conhecimento da área acadêmica provido a mim e pelas oportunidades que me foram criadas desde quando comecei o mestrado.

Agradeço ao professor Torsten Braun pela disponibilização de ideias para realização do trabalho.

Agradeço aos vários amigos, que estão cada vez mais espalhados pelo mundo, pela confiança e pelos momentos de descontração.

Agradeço ao Brasil por prover estudos gratuitos; à Universidade de São Paulo pela alta qualidade de ensino; ao CNPq pela bolsa de estudos; e ao INCT-SEC pela ajuda financeira para a participação dos eventos.

Resumo

A aplicação de defensivos químicos em áreas agrícolas é de primordial importância para o rendimento de lavouras. O uso de aeronaves é cada vez mais comum em tal tarefa, principalmente pelo fato de aumentar a agilidade na operação. Entretanto, características climáticas, como intensidade e orientação do vento, podem causar prejuízo aos produtores (*e.g.* aplicação sobreposta dos defensivos e multas por aplicação de defensivos na borda exterior da lavoura). Essa lacuna motivou este trabalho de mestrado, que tem por objetivo avaliar um sistema integrado de veículos aéreos não tripulados (VANTS) e redes de sensores sem fio (RSSFs) para aumentar a eficiência da aplicação de defensivos químicos em campos agrícolas. Um VANT é utilizado para percorrer o campo enquanto aplica defensivos químicos. Uma RSSF com nós capazes de sensoriar a concentração de defensivos químicos é instalada no solo do campo. Os nós da RSSF e o VANT são equipados com módulos de rádio, possibilitando a troca de informação entre eles. Desse modo, o VANT consegue obter a distribuição de defensivos químicos aplicados no campo, podendo então tomar decisões para aumentar a eficiência da aplicação. Para análise desse sistema, dois experimentos foram realizados utilizando o simulador OMNeT++ e o *framework* MiXiM. Em um primeiro experimento é comparada a eficiência do sistema proposto com o sistema tradicional de pulverização agrícola, mostrando que é possível aumentar, em média, 16% a quantidade de defensivos químicos aplicados dentro do campo agrícola. E, em alguns casos, é possível obter um aumento de até 118,25%. No segundo experimento são analisados cinco diferentes protocolos de comunicação, mostrando que é possível otimizar o uso da bateria nos nós sensores sem fio em até 10 vezes, sem diminuir a eficiência do sistema.

Abstract

The use of chemical defensives in crop fields is important for the agricultural production. Often airplanes are used for spraying these products, because it adds agility in such task. But climatic characteristics, such as wind speed, may cause loss to farmers (*e.g.* superimposed application and fines for environment contamination). This text details an integrated system of unmanned aerial vehicle (UAV) and wireless sensor network (WSN) with the purpose of letting the aerial spraying process more precise. An UAV is used to spray chemicals in the crop field. A WSN composed of sensor nodes capable of sensing quantities of chemical defensives is installed in the crop. Both UAV and sensor nodes are equipped with radio modules, this way they can communicate each other. Thus, the UAV may obtain the information of where the chemicals are being applied, then the UAV may take some action to performs a better spraying. This system were developed in the simulator OMNET++ using the framework MiXiM and two experiments were executed. In the first experiment the objective is to compare the efficiency of this system with the tradicional system, without the WSN. Results shown that the proposed system can improve the spraying process in 16% on average, and 118.25% on some cases. In the second experiment, five different WSN protocols were evaluated in means of battery usage of the sensor nodes. Results shown that it's possible to reduce the battery usage in 10 times without intervene in the system efficiency.

Sumário

Resumo	i
Abstract	iii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Organização do Texto	3
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Considerações Iniciais	5
2.2 Redes de Sensores Sem Fio	5
2.2.1 Aplicações	7
2.2.2 Camada de Enlace	8
2.2.3 Camada de Rede	12
2.2.4 IEEE 802.15.4	15
2.3 Veículos Aéreos Não Tripulados	16
2.3.1 História do Primeiro VANT	17
2.3.2 Situação Atual dos VANTs	18
2.3.3 VANTs na Agricultura	19
2.4 Agricultura de Precisão	19
2.5 Modelos de Dispersão	21
2.6 Trabalhos Relacionados	22
2.7 Considerações Finais	24
3 Descrição do Trabalho	27
3.1 Considerações Iniciais	27
3.2 Detalhes do Projeto	27
3.2.1 Pulverização	28
3.2.2 Comunicação	31
3.3 Objetivos e Contribuições Esperadas	32
3.4 Metodologia	33
3.5 Desenvolvimento	35
3.5.1 Módulo do Campo	36
3.5.2 VANT	37

3.5.3	Nó Sensor Sem Fio	38
3.5.4	Interação dos módulos	39
3.5.5	Protocolos de Comunicação	40
3.6	Considerações Finais	43
4	Experimentos e Resultados	45
4.1	Considerações Iniciais	45
4.2	Experimento 1	45
4.2.1	Planejamento do Experimento	46
4.2.2	Análise dos Resultados	47
4.2.3	Considerações Finais	50
4.3	Experimento 2	50
4.3.1	Planejamento do Experimento	50
4.3.2	Análise dos Resultados	52
4.3.3	Considerações Finais	54
4.4	Contribuições Científicas	55
4.5	Considerações Finais	57
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	59
5.1	Conclusões	59
5.2	Trabalhos Futuros	60

Lista de Figuras

2.1	Arquitetura de uma RSSF	6
2.2	Mecanismo de CSMA (adaptado de (Akyildiz e Vuran, 2010)).	10
2.3	<i>Frame</i> do protocolo SMAC (adaptado de (Akyildiz e Vuran, 2010)).	11
2.4	<i>Superframe</i> do mecanismo de TDMA (adaptado de (Akyildiz e Vuran, 2010)).	12
2.5	<i>Teleautomaton</i> – o primeiro veículo autônomo. (Newcome, 2004)	17
2.6	O primeiro dispositivo de estabilização automática em aeronaves.	18
2.7	Fluxo da AP	21
3.1	Cenário da proposta do trabalho	28
3.2	Diagrama do equipamento de pulverização em uma aeronave	29
3.3	Maneira utilizada pelos aviões pulverizadores de defensivos químicos para percorrer uma lavoura.	30
3.4	Comunicação entre o VANT e os nós sensores.	31
3.5	IDE Eclipse do OMNeT++	34
3.6	Hierarquia de módulos do OMNeT++	34
3.7	Nó base disponibilizado pelo <i>framework</i> MiXiM.	36
3.8	Interação do módulo do campo com o VANT e os nós sensores.	36
3.9	Classe <i>WirelessNode</i> do MiXiM utilizado para implementar o nó VANT.	37
3.10	Classe <i>WirelessNodeBattery</i> do MiXiM utilizado para implementar os nós instalados no campo.	38
3.11	Diagrama de comunicação entre os componentes do sistema.	39
3.12	Funcionamento das mensagens de requisição do VANT utilizando <i>queries</i>	40
3.13	Máquina de estado finito que representa o funcionamento do protocolo P_1	41
3.14	Máquina de estado finito que representa o funcionamento do protocolo P_2	41
3.15	Máquina de estado finito que representa o funcionamento do protocolo P_3	42
3.16	Máquina de estado finito que representa o funcionamento do protocolo P_4	42
3.17	Máquina de estado finito que representa o funcionamento do protocolo P_5	43
3.18	Comportamento do módulo de rádio nos nós sensores sem fio utilizando diferentes protocolos de comunicação.	43
4.1	Cenário do primeiro experimento	46
4.2	Resultados do primeiro experimento.	48
4.3	Representações gráficas da distribuição de defensivos químicos ao fim das simulações.	49
4.4	Gráfico de taxa de mensagens respondidas.	53

4.5	Quantidade de <i>backoffs</i> nos experimentos com 128 nós.	54
4.6	Gráfico do uso de bateria por nó sensor sem fio.	55

Lista de Tabelas

2.1	Classificação dos VANTs em uso atualmente (adaptado de Dempsey (2010)). . . .	19
3.1	Especificações do módulo de rádio CC2420, fabricado pela Texas Instruments (Texas Instruments, 2012).	31
4.1	Parâmetros utilizados no primeiro experimento.	47
4.2	Tabela de simulações e seus parâmetros utilizados no primeiro experimento. . . .	47
4.3	Resultados do terceiro experimento.	49
4.4	Fatores e níveis secundários utilizados no planejamento de experimentos.	51
4.5	Fatores e níveis primários utilizados no planejamento de experimentos.	51
4.6	Propriedades dos protocolos desenvolvidos.	51

AP	<i>Agricultura de Precisão</i>
BAN	<i>Body Area Network</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
LR-WPAN	<i>Low-Rate Wireless Personal Area Network</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicles</i>
VANT	<i>Veículo Aéreo Não Tripulado</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RSSF	<i>Redes de Sensores Sem Fio</i>
SSM	<i>Site-Specific Management</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

Introdução

1.1 Contextualização

Defensivos químicos¹ são frequentemente utilizados na produção agrícola. Esses produtos oferecem diversos benefícios, que podem ser divididos em primários e secundários (Cooper e Dobson, 2007). Os benefícios primários se dão pelas consequências diretas do seu uso, como exemplo, o extermínio de pragas, o aumento da produção agrícola por hectare, a melhora na qualidade dos produtos, a disponibilidade de produtos por todo o ano, etc; os benefícios secundários não são tão óbvios, e normalmente acontecem em longo prazo, como exemplo, o desenvolvimento social de uma região quando essa tem abundância de comida, crescimento da expectativa de vida, etc.

Porém, os defensivos químicos causam uma série de problemas, tanto na saúde humana, como no desenvolvimento de resistência aos defensivos químicos pelas pragas, na contaminação de águas, entre outros (Pimentel et al., 1992). Um dos problemas mais impactantes é a grande quantidade de pessoas envenenadas por ano. Em sua maioria, são os trabalhadores que têm contato direto com esses produtos, que podem desenvolver doenças pulmonares, neurológicas e cânceres (Weisenburger, 1993).

Devido a essa série de problemas, vários países têm regulamentos para o uso e manejo dos defensivos químicos. No Brasil, os empregadores agrícolas devem estar de acordo com a Norma Regulamentadora de Segurança e Saúde no Trabalho na Agricultura (NR3, 2005) para usarem

¹ “Produtos e agentes de processos físicos, químicos ou biológicos, destinados ao uso nos setores de produção, no armazenamento e beneficiamento de produtos agrícolas, nas pastagens, na proteção de florestas, nativas ou implantadas, e de outros ecossistemas e também de ambientes urbanos, hídricos e industriais, cuja finalidade seja alterar a composição da flora ou da fauna, a fim de preservá-las da ação danosa de seres vivos considerados nocivos.” (Lei, 1989)

os defensivos químicos. De acordo com essa norma, os trabalhadores que serão expostos aos defensivos químicos devem receber instruções suficientes para a manipulação dos mesmos. Além do treinamento, é obrigatório o fornecimento de equipamentos de proteção individual, e que esses estejam sempre em perfeito estado de funcionamento. Caso essas normas sejam desrespeitadas, a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, dispõe de penas para essas atividades. Por exemplo, no artigo 54, caso defensivos químicos causem poluição danosa à saúde humana, provoquem a morte de animais ou destruam a flora, deve ser aplicada uma multa de até mil salários mínimos e detenção do responsável por até 4 anos (Lei, 1998).

Em contexto mundial muito é feito para evitar os danos causados pelos defensivos químicos. No Reino Unido, por exemplo, os empregadores que usam defensivos químicos precisam pagar altos impostos e, na Dinamarca e na Alemanha, os agricultores seguem leis ambientais restritas para o uso desses produtos. Além disso, até 2020, a FAO, Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, pretende minimizar significativamente os efeitos dos defensivos químicos na saúde humana e no meio ambiente por meio de estratégias definidas no seu plano global de ações (FAO, 2006).

A pulverização de defensivos químicos em grandes campos agrícolas é realizada por meio de aviões desde a década de 1950. A técnica tradicional era dividir o terreno em várias faixas adjacentes, que então eram percorridas pelos aviões. No entanto, os aviões deviam ser guiados corretamente para que as faixas não fossem sobrepostas e para que não houvesse uma lacuna muito grande entre elas. Para isso, empregados ficavam nos extremos dos campos agrícolas com bandeiras a fim de sinalizar o final de cada faixa e o começo da próxima aos pilotos (Teach, 1994).

Na década de 1990, essa técnica foi aperfeiçoada com a instalação de um dispositivo na aeronave capaz de obter o seu posicionamento global, por meio do GPS (*Global Positioning System*) (Teach, 1994). Com esse dispositivo, o piloto conseguia ter maior controle sobre a faixa que estava pulverizando. Durante essa década, a Yamaha, planejou uma maneira de pulverizar campos agrícolas de modo autônomo, desenvolvendo um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), ou seja, uma aeronave operada sem um piloto a bordo, podendo ser pilotada por controle remoto ou ser pré-programada para executar missões. Esse VANT era capaz de carregar até 20 kg de defensivos químicos e pulverizá-los num campo agrícola de forma autônoma. No entanto, fatores externos, como o vento, podiam acarretar em uma dispersão não desejada dos defensivos químicos, levando-os a serem aplicados em locais não permitidos, como rios, florestas e terrenos adjacentes à da lavoura (Stafford, 2000).

Com os avanços tecnológicos nas áreas de micro-eletrônica e comunicação sem fio no final da década de 1990, a tecnologia de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) tornou-se mais eficiente e menos custosa, sendo aplicada em diversas áreas, inclusive nos campos agrícolas (Akyildiz e Vuran, 2010). RSSFs são compostas por uma grande quantidade de nós sensores sem fio, que são pequenos sistemas embarcados capazes de sensorear o ambiente em que estão instalados, podendo, por exemplo, capturar dados do solo e do clima visando aumentar a produção agrícola (Valente et al., 2011). Esses nós sensores comunicam-se por meio de rádios, capacitando-os de transmitir as

informações adquiridas até uma base de comando. Assim, não é necessário que o ambiente em que a RSSF for instalada tenha uma infra-estrutura, como é o caso de campos agrícolas.

A proposta deste trabalho de mestrado é utilizar um VANT para pulverizar um campo agrícola. No entanto, para que a aeronave tenha mais conhecimento do que está acontecendo com os defensivos químicos, é proposta a instalação de nós sensores sem fio no solo do campo. Esses nós sensores sem fio serão equipados (i) com sensores capazes de detectar concentrações de defensivos químicos e (ii) um módulo de rádio para que se comuniquem com o VANT, formando assim uma RSSF. Dessa maneira, o VANT poderá obter informações sobre a aplicação dos defensivos químicos, podendo tomar decisões a fim de realizar a pulverização de maneira mais precisa e autônoma.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo minimizar a quantidade de defensivos químicos aplicados em áreas não permitidas quando a pulverização aérea é realizada. Para isso, é proposto um sistema que utiliza a cooperação de um VANT e uma RSSF para pulverização de defensivos químicos em um campo agrícola.

Para o desenvolvimento do trabalho, primeiramente foram buscados trabalhos relacionados com o propósito de enriquecer a base teórica. Com base nesses trabalhos, foi proposto um mecanismo para minimizar o problema de contaminação por defensivos químicos quando esses são aplicados por aeronaves. O sistema, então, foi desenvolvido em um simulador e avaliado em diferentes cenários por meio de experimentos.

1.3 Organização do Texto

O texto está organizado em cinco Capítulos, como se segue:

- No Capítulo 2 são descritos os conceitos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho e são apresentados os trabalhos relacionados. Os seguintes temas são abordados: redes de sensores sem fio, veículos aéreos não tripulados, agricultura de precisão e modelos de dispersão de poluentes;
- No Capítulo 3, este trabalho de mestrado é detalhado, assim como cada elemento do sistema proposto. Além disso, são traçados os objetivos e contribuições esperadas. Por fim, são dados detalhes da implementação do trabalho, descrevendo como os módulos foram programados no simulador;
- No Capítulo 4 são descritos os experimentos realizados e seus resultados são discutidos;

- O Capítulo 5 encerra o documento. São apresentadas as conclusões deste mestrado, além de serem propostos trabalhos futuros.

Revisão Bibliográfica

2.1 Considerações Iniciais

Nesse Capítulo serão explicados os conceitos de redes de sensores sem fio, veículos aéreos não tripulados, agricultura de precisão e modelos de dispersão de poluentes, que foram utilizados para o desenvolvimento do trabalho. Em seguida, serão apresentados os trabalhos relacionados e, por fim, é explicado o motivo desse projeto de mestrado.

2.2 Redes de Sensores Sem Fio

Segundo Akyildiz e Vuran (2010), Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) são compostas por uma grande quantidade de nós sensores, densamente instalados próximo ou dentro de fenômenos (loais que o ser humano tem interesse de monitorar), com o objetivo de obter informações confiáveis e detalhadas desse local, a fim de serem tomadas as ações corretas.

Desde o começo do século 21, avanços tecnológicos nas áreas de sistemas micro-eleto-mecânicos, comunicação sem fio e eletrônica digital possibilitaram o desenvolvimento de nós sensores menores, com menor custo, que consomem menos energia, e que comunicam-se, normalmente, em curta distância sem a utilização de fios (Akyildiz et al., 2002; Warneke et al., 2001).

Segundo Akyildiz e Vuran (2010), um nó sensor é composto de três componentes:

1. Módulo sem fio ou *mote*, são os componentes principais dos nós sensores, por possuírem as capacidades de processamento e comunicação, e serem programáveis. Tradicionalmente,

um *mote* consiste de um micro-controlador, um rádio para comunicação, fonte de energia, unidade de memória e, em alguns *notes*, um conjunto de sensores (*e.g.* sensores de temperatura, umidade, luminosidade);

2. Conjunto de sensores, são sensores capazes de capturar dados do ambiente em que estão, e podem ser acoplados aos *notes*;
3. Placa de dados, *interfaces* como Ethernet, USB ou portas seriais, são utilizadas para conectar os *notes* a computadores e, então, serem programados ou terem seus dados coletados. Alguns modelos de nós sensores permitem essa programação por meio da comunicação sem fio.

Cada nó sensor deve executar as tarefas de (i) capturar dados do ambiente, processá-los, podendo detectar eventos, (ii) comunicar esses eventos com os seus vizinhos por meio de um rádio e (iii) ajudar a propagar informações dos seus vizinhos, para que o evento seja entregue ao ponto final.

A instalação dos nós sensores pode ser feita de maneira aleatória e podem ser, até mesmo, instalados a partir de veículos aéreos que sobrevoam o local, como é demonstrado no trabalho de Erman et al. (2008).

A arquitetura de RSSF mais utilizada na literatura é apresentada na Figura 2.1. Existem dois tipos de nós sensores utilizados, os que ficam distribuídos próximo ao fenômeno, normalmente em grandes quantidades, com o objetivo de capturar informações do ambiente, chamados de *sensor nodes*. O outro tipo é chamado de *sink*, um nó sensor com maior potência computacional, que é utilizado para conectar a RSSF ao mundo exterior, ou seja, até ao usuário. Para isso, um nó *sink* utiliza duas interfaces de rede, uma para comunicar-se com a RSSF e outra com o mundo exterior.

Figura 2.1: Arquitetura de uma RSSF (adaptado de (Akyildiz e Vuran, 2010))

A principal limitação dos nós sensores sem fio é a utilização de fontes de energia limitadas, normalmente utilizando pequenas baterias. Apesar da possibilidade da troca de bateria, esses nós sensores podem estar instalados próximo a fenômenos, em locais inacessíveis aos seres humanos, como próximo a um vulcão, tornando essa atividade muito arriscada. Para diminuir essa limitação, alguns nós sensores capturam energia do ambiente em que estão, utilizando, por exemplo, painéis solares. Por causa dessa limitação, o foco dos nós sensores é conservar a energia disponível, visando prolongar o tempo de vida da rede (Akyildiz et al., 2002).

O componente que mais consome energia de um nó sensor sem fio é o rádio (Niculescu, 2005). Segundo análise de consumo de energia realizado por Niculescu (2005), foi constatado que para a transmissão de 100 bits de dados por 100 metros é gasto $10 \mu\text{J}$, enquanto que para cada executar uma instrução de 32 bits são necessários $0.06 \eta\text{J}$. Uma razão de 100.000. Por isso, os nós sensores, para conservar energia, normalmente utilizam rádios de baixa potência, além de usarem as técnicas de compressão e agregação de dados antes de transmiti-los.

Com esses rádios de baixa potência, surge o problema que os nós sensores transmitem dados por curta distância, e, muitas vezes, não conseguem transmitir seus dados até o nó *sink* diretamente. Entretanto, como as RSSFs tem a característica de terem alta densidade de nós sensores, é utilizada a técnica *multi-hop* para envio de dados à longas distâncias. Nessa técnica, as mensagens trocadas entre dois nós podem envolver o uso de nós intermediários, como é mostrado na Figura 2.1, em que o nó A está trocando informações com o nó *sink* por meio de vários nós intermediários.

Outra modificação ocasionada pela restrição de energia dos nós é a redução do ciclo de trabalho. Para realizar um baixo consumo de energia, os nós periodicamente ligam e desligam vários componentes, como os seus sensores e, principalmente, o rádio. No entanto, esse comportamento causa indisponibilidade temporária no acesso aos nós. Assim, os algoritmos e protocolos de rede de uma RSSF precisam tratar esse tipo de comportamento. No trabalho de Halkes et al. (2005) é demonstrado como o protocolo IEEE 802.11 pode causar desperdício de energia no contexto de uma RSSF, em que um nó sensor transmite uma mensagem por segundo. Considerando uma mensagem pequena que será roteada por meio de um nó, e demore 5 milissegundos para ser transmitida, ou seja, serão gastos 5 ms para recebê-la, e mais 5 ms para transmiti-la. O resto do tempo, 990 ms, o rádio do nó ficará ligado ouvindo o canal, porém desnecessariamente, causando um desperdício de 99% de energia.

Em Akyildiz e Vuran (2010), a contextualização de RSSF, aplicações de RSSF e cada camada de rede são separadas por diferentes Capítulos. Neste trabalho essa divisão também será utilizada, e algumas camadas de rede (camada física, de transporte e de aplicação) não serão detalhadas por não estarem no escopo do trabalho. A seguir são apresentadas diferentes aplicações de RSSFs.

2.2.1 Aplicações

Com a grande quantidade de sensores disponíveis, como sensores de temperatura, umidade, pressão, velocidade e outros, é possível desenvolver uma grande quantidade de aplicações dife-

rentes para RSSFs. Em Akyildiz e Vuran (2010), as aplicações de RSSFs são categorizadas em: militar, ambiental, médica, civil e industrial.

As aplicações de RSSFs surgiram no meio militar, devido a fácil instalação dos nós sensores, sua auto-organização na rede e a tolerância a falhas (caso alguns sensores sejam destruídos por inimigos) (Akyildiz e Vuran, 2010). Existem artigos sobre monitoração e reconhecimento de forças inimigas, detecção de ataques nucleares, biológicos e químicos, etc. No trabalho de Warneke et al. (2001) é construído um nó sensor barato e descartável de 100 milímetros cúbicos, com o objetivo de serem instalados, por meio de VANTs, nas forças inimigas.

No meio ambiental, a principal vantagem das RSSFs é de não necessitarem da instalação de fios para o funcionamento. As principais aplicações são de monitoração do movimento dos animais (Juang et al., 2002); detecção de eventos como incêndios (Erman et al., 2008), enchentes (Basha et al., 2008) e ativação de vulcões (Werner-Allen et al., 2006); monitoração das condições ambientais que influenciem campos agrícolas (Beckwith et al., 2004), entre outros.

Um problema relacionado com aplicações de RSSFs é como validá-las. Existem duas maneiras principais: *testbeds* e simulação (Colesanti et al., 2007). A abordagem de *testbed* é realizada por meio de testes em versões reduzidas do projeto, normalmente dividindo-o em módulos e testando-os separadamente. Essa abordagem tem diversas limitações, principalmente pelo fato de que as aplicações são usualmente designadas para mensurar dados de fenômenos em regiões críticas, ocasionando o difícil acesso aos seres humanos. Além disso, RSSF enfrentam problemas que outros tipos de redes não sofrem: como a energia é fornecida por baterias, para fazer testes é necessário frequentemente a troca delas, o que é um processo demorado e que gera gastos financeiros. Com essa limitação de energia, a abordagem tradicional de transmissão ou armazenamento de mensagens de *debug* no sensor fica mais complicada pois a transmissão de pacotes sem fio gerará mais tráfego e consumo de energia, já o armazenamento das mensagens é limitado pelo espaço disponível no nó sensor (Colesanti et al., 2007). Devido a esses problemas com *testbeds*, a comunidade de RSSF vem realizando validação de projetos com a abordagem de simulação (Erman et al., 2008; Colesanti et al., 2007).

Nas próximas Seções serão apresentadas as camadas de enlace e de rede de RSSFs. Primeiramente serão mostrados os desafios de desenvolvimento de cada camada, e após serão apresentados os principais paradigmas utilizados para o seu desenvolvimento.

2.2.2 Camada de Enlace

A camada de enlace tem o importante objetivo de controlar o acesso ao meio. Esse controle é ainda mais importante em redes sem fio, pois essas tem natureza de serem *broadcast*, ou seja, a transmissão de um nó influencia todos os nós ao seu redor. Apesar de existirem vários protocolos de acesso ao meio (*Medium Access Control* – MAC) para redes sem fio, esses não atendem as principais necessidades de uma RSSF. Os principais desafios para o desenvolvimento de protocolos

de MAC para RSSFs serão descritos brevemente. Essa seção foi baseada no livro de Akyildiz e Vuran (2010).

Desafios

Como foi explicado na Seção 2.2, as RSSFs tem como principal limitação o consumo de energia. Essa limitação deve ser tratada em todas as camadas de rede e, principalmente, na camada de enlace. Isso se deve pelo fato da camada de enlace ser responsável pelo gerenciamento do módulo de rádio dos nós sensores, o módulo que mais utiliza energia (Niculescu, 2005). Para tratar essa limitação, são consideradas quatro características no desenvolvimento de um protocolo de MAC para RSSFs, sendo esses: minimizar o tempo em que o nó escuta o canal desnecessariamente (ou seja, o nó ouve o canal porém nenhum pacote que está trafegando é para ser recebido por ele); evitar colisão de pacotes (pois, assim, menos pacotes terão que ser retransmitidos); minimizar o *overhead* do protocolo; considerar a diferença de energia gasta para transmitir e receber pacotes. A principal técnica utilizada para reduzir a quantidade de energia usada por um nó é o desligamento do módulo de rádio do mesmo. Porém, dessa maneira os nós sensores ficam indisponíveis temporariamente. Então, é necessário algum protocolo para gerenciar o ligamento e desligamento dos módulos de rádio dos nós, fazendo com que esses liguem ou desliguem os seus módulos de rádio apenas quando necessário. E, como RSSFs tem a característica de serem distribuídas, esse protocolo deve fazer isso sem um controlador mestre, dificultando ainda mais esse papel do protocolo de MAC.

Além desse desafio, protocolos MAC precisam também se preocupar com outros três desafios: dinamicidade da arquitetura de uma RSSF; tipos de aplicações; correlação de dados. O primeiro desses desafios, dinamicidade da arquitetura de uma RSSF, ocorre porque, além de uma arquitetura diferir da outra, uma RSSF pode sofrer alterações com relação ao número de nós com o tempo. Em outras palavras, uma RSSF pode, com o tempo, ter nós sensores removidos, por falta de energia ou falhas físicas, ou adicionados, caso seja necessária uma leitura mais aprofundada do fenômeno. Além disso, o comportamento de aplicações de diferentes RSSF são muito diferentes, podendo essas serem baseadas em eventos, causando alta taxa de pacotes durante os eventos, ou baseada em monitoração, com carga constante. O último desafio a ser superado pelos protocolos de MAC é a correlação de dados. Como RSSFs são redes com alta densidade de nós, nós muito próximos podem detectar a mesma informação, então é interessante que o protocolo de MAC seja capaz de detectar essa correlação de informação e transmitir apenas as informações relevantes.

Sabendo os desafios para o desenvolvimento dos protocolos de MAC, serão mostradas as três classes de protocolos de MAC para RSSF: baseados em contenção, baseados em reserva do meio e híbridos. Como essas classes são fundamentadas nos mecanismos de acesso múltiplo ao canal – CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) e TDMA (*Time Division Multiple Access*) –, esses serão descritos também.

Mecanismo de CSMA/CA

O mecanismo de CSMA é, basicamente, um mecanismo que escuta o canal antes de transmitir nele. O funcionamento do mesmo é mostrado na Figura 2.2 e será explicado sucintamente. Um nó, quando deseja transmitir um pacote, primeiramente escuta o canal por um tempo determinado, chamado *IFS*. Se o canal estiver ocioso, esse transmite o pacote imediatamente. Caso contrário, o nó continua ouvindo o canal até esse tornar-se ocioso. Quando o canal torna-se ocioso, o mecanismo de *backoff* do CSMA é acionado. Esse mecanismo tem o objetivo de evitar que esses nós, que estavam esperando pelo canal tornar-se ocioso, enviem pacotes ao mesmo tempo. Para isso, esses nós esperam por mais um tempo *IFS* adicionado de um tempo aleatório, escolhido dentro de uma faixa, chamada de janela de contenção. Caso dois ou mais nós aleatoriamente determinem o mesmo tempo de espera para a transmissão de pacotes, e, conseqüentemente, seus pacotes colidam, as suas janelas de contenção são duplicadas. Esse processo é chamado de *backoff* exponencial binário, e ocorre com maior frequência em redes de alta densidade. Caso um nó com janela de contenção duplicada consiga transmitir o seu pacote, a sua janela de contenção é reiniciada para o valor padrão. Para confirmar a transmissão de pacotes sem erro aos nós transmissores, o mecanismo de CSMA pode contar com pacotes de *acknowledgement* (ACK). Para isso, um nó, ao receber um pacote corretamente, espera um tempo *SIFS* ($SIFS < IFS$) e envia o pacote de ACK. A falta do pacote de ACK sinaliza erro na transmissão.

Figura 2.2: Mecanismo de CSMA (adaptado de (Akyildiz e Vuran, 2010)).

O mecanismo de CSMA, como explicado acima, não previne contra colisões de nós escondidos. Para isso, pode ser utilizado o mecanismo de CSMA/CA, onde CA significa *collision avoidance*. Nesse mecanismo, dois novos pacotes são utilizados, *RTS* (*request to send*) e *CTS* (*clear to send*). O pacote *RTS* é utilizado pelo transmissor para pedir a reserva do canal, e o pacote *CTS* é respondido pelo destinatário, confirmando a reserva do canal. Dessa maneira, todos os nós que escutarem o *CTS* não irão transmitir enquanto não receberem um ACK do mesmo nó, sinalizando que os dados foram transmitidos a ele, e o canal está livre novamente. Nota-se que esse mecanismo é distribuído, ou seja, não é necessário nenhum gerente para acessar o meio.

Protocolos baseados em contenção

Os protocolos de comunicação de RSSF *baseados em contenção* utilizam como base o mecanismo de CSMA/CA. Por isso, os nós não precisam de um coordenador para gerenciar o uso da rede. Desse modo, redes que utilizarem esses tipos de protocolo tem vantagens relacionadas à escalabilidade e à robustez na comunicação. Apesar disso, protocolos de CSMA/CA desperdiçam muita energia, pois os nós precisam ficar grande parte do tempo ouvindo o canal, mesmo que esses não vão utilizá-lo. Por isso, muitos protocolos foram adaptados para uso em RSSF, como serão detalhados a seguir.

Um dos primeiros protocolos baseados em contenção desenvolvidos para RSSF foi o S-MAC. Esse protocolo introduziu o conceito de ciclo de trabalho, onde os nós compartilham um tempo de dormência, visando a diminuição de consumo de energia. O funcionamento dos nós é organizado por parcelas de tempo chamadas de *frame*, mostrado na Figura 2.3. Esse *frame* é dividido em dois intervalos, de escuta e de dormência. O primeiro intervalo, por sua vez, é dividido em duas partes: *sync* e *data*. Esse *frame* tem o objetivo de coordenar o tempo de liga e desliga de cada nó.

Figura 2.3: *Frame* do protocolo SMAC (adaptado de (Akyildiz e Vuran, 2010)).

Durante o período de *sync*, os nós se organizam em *clusters*. Caso um nó não receba nenhuma mensagem nesse período, esse torna-se o cabeça de *cluster*, e divulga os tempos de cada parcela do *frame*. Dentro de um *cluster*, o tempo dos nós é sincronizado, ou seja, o tempo do *frame* é seguido por todos os nós. Com isso, todos os nós entram em estado de dormência no mesmo instante. Durante o período de *data* os nós trocam dados por meio do protocolo CSMA/CA. Quando um nó recebe um *RTS* e não é o destinatário, esse já entra em estado de dormência.

Outro protocolo de MAC que trouxe inovações para a área de RSSF foi o B-MAC, desenvolvido na Universidade de Berkley. Esse protocolo permite a reconfiguração de seus parâmetros por camadas mais altas, ou seja, a camada de aplicação consegue mudar o comportamento do protocolo de MAC. Além dessa inovação, foram utilizadas as técnicas de *low-power listening* (LPL) e *clear channel assessment* (CCA) nas camadas de enlace e física para melhorar a eficiência energética e a utilização do canal. Essas técnicas estão disponíveis no trabalho de Polastre et al. (2004).

Protocolos baseados em reserva do meio

Outro paradigma de protocolos de MAC para RSSF é o baseado em reserva do meio. Esse paradigma é baseado no mecanismo de divisão do tempo para acesso ao canal, o TDMA. Dessa maneira, o tempo é dividido em *superframes*, como mostrado na Figura 2.4. A estrutura do *superframe* é dividida em dois períodos: de reserva e de dados. O período de reserva é utilizado para que

os nós aloquem *slots* do período de dados para transmissão de pacotes. Os protocolos baseados em reserva do meio diferem na maneira que que alocam *slots* de dados, tamanho dos *frame*, gerenciam desligamento dos módulos de rádio, etc.

Figura 2.4: *Superframe* do mecanismo de TDMA (adaptado de (Akyildiz e Vuran, 2010)).

Protocolos híbridos

O último paradigma de protocolos de MAC para RSSF é o híbrido, onde é visado aproveitar as vantagens de cada protocolo descrito acima, combinando técnicas de acesso randômico ao meio com técnicas de reserva do canal. O protocolo Zebra-MAC é um deles, e está descrito no trabalho Rhee et al. (2008).

2.2.3 Camada de Rede

A camada de rede é responsável principalmente por rotear pacotes. Em RSSFs, os protocolos de rede confrontam vários desafios, como por exemplo, o comportamento de liga e desliga dos nós sensores. Na próxima Subseção, serão apresentados os principais desafios no desenvolvimento de um protocolo de rede para RSSFs. Em seguida, os quatro paradigmas de protocolos da camada de rede – centrado em dados, hierárquicos, geográficos e baseados em QoS – serão explicados sucintamente. Essa seção foi baseada no livro de Akyildiz e Vuran (2010).

Desafios

O primeiro desafio no desenvolvimento de um protocolo de rede para RSSFs é a energia limitada dos nós sensores. Por isso, os protocolos de rede devem rotear dados de uma maneira eficiente em questão energética. Desse modo, muitos protocolos de rede tradicional não podem ser utilizados, já que esses tem como principal preocupação o *throughput* da rede. Os principais problemas encontrados nesse quesito são: identificação dos vizinhos e uso energético para comunicação. A identificação de vizinhos é importante para definir qual deles é o melhor candidato para enviar o pacote que deve ser roteado. Porém, essa tarefa pode causar um *overhead* no protocolo, fazendo com que o roteamento de pacotes torne-se lento demais. Por isso, a troca de informações desse tipo deve ser minimizada. Já o uso energético para comunicação pode ser minimizado usando mais a computação dos nós. Duas técnicas são muito utilizadas para esse fim: compressão e agregação de dados. Na primeira, os nós primeiramente comprimem os dados antes de enviá-los. Na se-

gunda, os nós podem agregar seus dados nos pacotes que estão roteando, diminuindo a quantidade de pacotes na rede.

Outros desafios no desenvolvimento de um protocolo de rede para RSSFs são:

- Escalabilidade: muitos protocolos de rede tradicionais necessitam que cada nó guarde muitas informações de seus vizinhos. Como RSSFs são escaláveis, ou seja, podem existir RSSFs com alta densidade de nós, é inviável que cada nó tenha informação de toda a rede. Por isso, normalmente os protocolos de rede para RSSFs funcionam apenas com informação local e limitada;
- Endereçamento: em protocolos de rede tradicionais, muitas vezes é necessário o endereçamento único de cada nó. Porém, esses endereços são grandes, causando *overhead* nos protocolos. Por esse motivo, RSSFs muitas vezes utiliza métodos de endereçamento diferentes, sem que cada nó tenha um endereço único. Portanto, protocolos de rede para RSSFs precisam lidar com esse tipo de endereçamento;
- Robustez: os nós sensores são compostos por módulos de baixo custo, então esses podem falhar a qualquer momento. Com isso, pode acontecer que um nó falhe enquanto está roteando um pacote. Por isso, é necessário que os protocolos roteiem pacotes por diferentes caminhos, utilizando diferentes nós;
- Topologia: em uma RSSF é constante a falha de nós, ou a adição de novos nós na rede, modificando a topologia da rede. Desse modo, é necessário atualizar as informações de roteamento dos nós;
- Aplicação: a aplicação da RSSF pode influenciar muito o desenvolvimento de um protocolo de rede. Caso a aplicação seja baseada em eventos críticos, por exemplo, é necessário que a informação seja roteada o mais rápido possível do nó que detectou o fenômeno até o nó *sink*.

Protocolos Centrado nos Dados

Os protocolos de rede centrado em dados são utilizados para situações em que os usuários das RSSFs estão mais interessados em realizar *queries* na RSSF, como mostrado no Algoritmo 2.1, do que obter informações de um nó específico. Nesses protocolos, não é necessário que os nomes dos nós sejam únicos na rede, já que apenas os dados são buscados na rede, e não os nós. Dessa maneira, os protocolos evitam *overhead* com o endereçamento único. Além disso, as rotas são criadas a cada requisição do usuário, ou seja, os nós que precisam responder à requisição formam a rota. Dessa maneira, é economizada energia dos nós que não precisam responder. Porém, esses protocolos de rede não se adaptam bem a RSSFs com alta densidade de nós, pois as regiões próximas aos nós de *sink* ficam congestionadas, e conseqüentemente, esgotam suas reservas de energia.

Listing 2.1: Exemplo de *query* efetuada em uma RSSF.

```
SELECT S.position , S.temperature
FROM sensor S
WHERE S.temperature > 30;
```

O protocolo de roteamento mais simples desse paradigma é o *Flooding*. Por meio dele, o usuário envia a requisição pra rede pelo nó de *sink*, que faz uma mensagem *broadcast* na rede. Todos os nós que receberem a requisição, fazem novo *broadcast* até que todos os nós da rede recebam a requisição. Então, os nós que tiverem algum dado que atenda a requisição do usuário, fazem *broadcast* de seus dados, até que esses cheguem no nó de *sink*. Como pode ser notado, esse protocolo pode desencadear o congestionamento da rede, principalmente em redes de alta densidade. Além disso, não existe nenhuma inteligência para onde os nós devem enviar os seus dados.

A partir desse simples protocolo, muitos outros foram desenvolvidos. Os projetos COUGAR (Madden et al., 2005) e o TinyDB (Yao e Gehrke, 2002) são trabalhos de referência nesse paradigma.

Protocolos Hierárquicos

Os protocolos hierárquicos utilizam a paradigma de *clustering* em seu desenvolvimento. Para isso, a RSSF é dividida em vários *clusters*, sendo que cada um deles tem um nó que é o nó cabeça de *cluster*. Esse nó tem como objetivo agregar dados dos nós sensores dentro do seu *cluster* e roteá-los, além de ser responsável por organizar o acesso ao meio. Devido ao grande custo de energia pelos nós cabeças de *cluster*, normalmente esses protocolos alteram os *clusters* periodicamente a cada *round* e, conseqüentemente, os nós cabeças de *cluster*. Dessa maneira, o gasto energético dos nós, após vários *rounds*, é igualmente distribuído.

Os protocolos hierárquicos variam em como os *clusters* são determinados, como os nós cabeça de *cluster* são selecionados, como é dividido o acesso ao meio, etc. As vantagens no uso desses protocolos são: (i) a possibilidade de haver RSSFs com alta densidade de nós, (ii) a escalabilidade da rede, (iii) além de economizar energia. As desvantagens são: quantidade de mensagens para criação de *clusters*; técnicas para detectar falhas em nós cabeça de *cluster*; uso energético: *tradeoff* entre quantidade de tempo que um nó é cabeça de *cluster* *versus overhead* para criar novos *clusters*.

Protocolos Geográficos

Como as aplicações de RSSFs são muitas vezes supervisionar um fenômeno local, os nós sensores muitas vezes tem informações de sua localização. Os protocolos de roteamento geográficos utilizam esse tipo de informação para rotar as mensagens. Para isso, cada nó sensor precisa ter a sua localização em sua memória ou ter um módulo GPS. Assim, quando uma requisição é feita

na rede, os nós sensores, sabendo a posição de onde veio a mensagem, conseguem rotear a mensagem baseado na sua localização. Esses protocolos tendem a ter baixa complexidade, porém podem apresentar problemas com o módulo de GPS. Caso a sua posição GPS esteja errada ou o módulo de GPS não retorne sua posição, o roteamento de mensagens nesse nó estará comprometida. Além disso, os módulos de GPS ainda são caros.

Apesar de simples, esses protocolos utilizam várias métricas para otimizar o gasto energético para o roteamento de mensagens. Inicialmente os nós sensores fazem uma busca pelos seus vizinhos, criando uma tabela com a posição e a distância de cada um deles. Assim, quando uma mensagem precisa ser roteada, o *melhor* vizinho deve ser escolhido. No entanto, essa escolha não é simples, dado que a energia gasta para enviar uma mensagem entre dois nós aumenta em uma potência n a distância d , onde $n \geq 2$. Além dessa métrica, alguns protocolos usam a métrica de taxa de pacotes recebidos (*packet reception rate* – PPR), pois alguns vizinhos, apesar de estarem mais próximos, podem ter algum tipo de ruído no ambiente próximo a eles, atrapalhando na transmissão das mensagens.

Protocolos Baseados em QoS

Os protocolos descritos até o momento tem como principal objetivo rotear as mensagens utilizando a menor quantidade de energia possível. No entanto, diferentes aplicações de RSSFs podem ter diferentes necessidades. Os protocolos baseados em QoS (*Quality of Service*) visam atender outras métricas, como *throughput*, *delay* e *jitter*. Essas necessidades podem acontecer, por exemplo, em RSSFs que transmitem um fluxo contínuo de dados, como *streaming* de áudio ou vídeo. A principal desvantagem desse paradigma é que o tempo de vida da rede pode diminuir, devido à falta de atenção com essa métrica durante o roteamento.

Um dos primeiros protocolos a permitir QoS foi o SAR (*Sequential Assignment Routing*) (Sohrabi et al., 2000). Esse protocolo cria várias rotas de um nó até o nó de *sink*, sendo que cada rota provê um tipo de QoS diferente. Por exemplo, uma rota pode ser a mais rápida, necessitando de menos nós para rotear a mensagem, porém esses nós devem gastar mais energia para transmitir a mensagem do que por outra rota, com mais nós.

2.2.4 IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 define um protocolo de comunicação que tem como objetivos: (i) ter baixa complexidade, (ii) consumir pouca energia, (iii) ter baixa taxa de transferência de dados sem fio (IEEE, 2003). Esse protocolo tem o propósito de ser utilizado em dispositivos fixos ou móveis, com baterias limitadas, tipicamente operando a 10 metros um do outro. Porém, dependendo da aplicação, é possível diminuir a taxa de transferência a fim de aumentar a distância de transmissão.

Esse padrão baseia-se em redes LR-WPAN (*low-rate wireless personal area network*), que tem como principais objetivos: (i) facilidade de instalação da rede; (ii) transferência de dados confiável;

(iii) operação de baixo alcance; (iv) baixo custo; (v) baixo consumo de bateria; e (vi) protocolo simples e flexível. Algumas das características dessas redes são:

- Taxa de transmissão de dados a 250 kb/s, 40 kb/s e 20 kb/s;
- Topologias: estrela ou *peer-to-peer*;
- Endereçamento de 16 ou 64 bits;
- Acesso ao meio por CSMA/CA;
- Protocolo confiável pelo uso de ACKs;

O primeiro passo do protocolo é organizar a rede, utilizando a topologia estrela ou *peer-to-peer*. Durante esse passo, são determinados os coordenadores da rede. Em seguida, a rede começa a funcionar de um dos dois modos possíveis: com ou sem o uso de mensagens de *beacon*. A seguir é apresentado o funcionamento do protocolo com *beacons*.

As mensagens de *beacon* são transmitidas pelos coordenadores, que tem como objetivo sincronizar os dispositivos que estão sobre sua responsabilidade. Essas mensagens são transmitidas periodicamente para que os dispositivos sejam avisados que um novo *frame* começou. Esse *frame* é dividido em 16 *slots*, os quais os dispositivos, quando quiserem transmitir dados, devem utilizar. A alocação desses *slots* ocorre por meio do mecanismo CSMA/CA, no qual os dispositivos ouvem o canal antes de transmitir, e utilizam o mecanismo de *backoff* caso não esteja, como foi descrito na Seção 2.2.2.

Já no funcionamento sem *beacons*, os dispositivos, quando querem transmitir dados, simplesmente utilizam o mecanismo de CSMA/CA.

2.3 Veículos Aéreos Não Tripulados

Pela definição do Dicionário do Departamento de Defesa Norte-Americano (Gortney, 2010), *Unmanned Aircraft* (Veículos Aéreos Não Tripulados – VANTs) significa:

An aircraft or balloon that does not carry a human operator and is capable of flight under remote control or autonomous programming.

Nessa seção primeiramente será apresentada a história do desenvolvimento dos primeiros VANTs, baseado no livro de Newcome (2004), após o estado atual dos VANTs, finalizando com o uso de VANTs na agricultura.

2.3.1 História do Primeiro VANT

A ideia de uso de VANTs foi primeiramente publicada por Nikola Tesla, em 1898, quando esse patenteou a sua invenção chamada *teleautomaton* (Figura 2.5), um veículo naval que podia ser controlado remotamente sem fio, como é mostrado no texto extraído da patente (Tesla, 1898):

Be it known that I, NIKOLA TESLA, a citizen of the United States residing at New York, in the county and State of New York, have invented certain new and useful improvements in methods of and apparatus for controlling from a distance the operation of the propelling engines (...)

Figura 2.5: Em 1898, Nikola Tesla desenvolveu o primeiro veículo autônomo, o *teleautomaton* (Newcome, 2004).

Essa invenção de Tesla iniciou o desenvolvimento de veículos autônomos ou remotamente controlados. Porém, ainda durante a Primeira Guerra Mundial não existia tecnologia suficiente para desenvolver um VANT, principalmente pela falta de i) estabilização automática, ii) controle remoto e iii) navegação autônoma.

Nessa época, Elmes Ambrose Sperry estava trabalhando com Peter Hewitt no aprimoramento de giroscópios para uso marítimo. Em 1909, Sperry portou esse dispositivo para uso aéreo, com o intuito de prover segurança ao piloto caso houvesse desorientação mecânica da aeronave, informando ao piloto a real posição dela. Com isso, Sperry inconscientemente resolveu o problema de estabilização automática para o uso em VANTs.

Em 1911, Glenn Hammond Curtiss, um pioneiro na aviação, encontrou no dispositivo de Sperry a resposta para a estabilização das aeronaves. Com o uso de giroscópios instalados nos eixos de *pitch*, *roll* e *yaw*, ligados com servomotores no controle do avião era possível controlar a aeronave sem um piloto. Curtiss tentou vender essa ideia ao Exército dos Estados Unidos, mas devido a testes mal sucedidos, a ideia não foi adotada.

Sperry, então, em 18 de Junho de 1914, participou de uma competição próximo à Paris, a Competição Francesa de Segurança de Aeronaves. Na competição, seu filho, Lawrence, pilotou um

avião construído com os dispositivos descritos acima. Lawrence, durante sua apresentação, passou por cima do público, inicialmente com as mãos suspensas, mostrando que não estava pilotando o avião. Na segunda vez que passou próximo ao público, seu mecânico, Emile Cachin, subiu em uma das asas da aeronave enquanto Lawrence permanecia com as mãos suspensas, demonstrando a estabilização automática da aeronave (Figura 2.6). Com isso, Sperry conseguiu a comprovação e divulgação de seu trabalho.

Figura 2.6: Em 1914, Sperry demonstrou o potencial do seu dispositivo de estabilização automática em aeronaves (Newcome, 2004).

Em 1915, Hewitt reconheceu o potencial dos dispositivos de Sperry e sugeriu a construção da bomba voadora proposta por Tesla. Em poucos meses, o Exército Norte-Americano entrou com apoio no projeto e, em Novembro desse ano, o torpedo aéreo, chamada de *Hewitt-Sperry Automatic Airplane*, voou 50 quilômetros e atingiu o alvo, com uma resolução de 3km.

2.3.2 Situação Atual dos VANTs

Do desenvolvimento do primeiro VANT até hoje, os VANTs tem sido utilizados principalmente na área militar, onde foram realizados os maiores ganhos na tecnologia. O uso extensivo de VANTs pelo Exército Norte-Americano, principalmente nas operações *Operation Enduring Freedom* e *Operation Iraqi Freedom*, mostrou que os VANTs são capazes de reduzir o risco de seus soldados, pois os VANTs podem prover informações dos inimigos, e até mesmo, mirar e destruí-los (Dempsey, 2010).

Nesse mesmo documento, de Dempsey (2010), os VANTs são divididos em cinco grupos, como é mostrado na Tabela 2.1.

2.3.3 VANTs na Agricultura

Na área agrícola, dados aéreos podem ser utilizados de várias maneiras para agilizar e maximizar a produção agrícola, podendo ser utilizados para, por exemplo, classificar e mapear plantações, prever condições ambientais, prever a produção agrícola, avaliar as condições atuais do campo, detectar pestes, detectar falta de nutrientes, etc (Berni et al., 2009). Obter esses dados a partir de satélites é demorado e custoso.

Já em 1977, Jackson et al. (1977) previa o uso de *scanners* aéreos capazes de captar dados termais em campos irrigados, que seriam utilizados para agendar a irrigação do campo por meio de um sistema de suporte a decisão. Porém, ainda 30 anos após essa previsão, essa aplicação era inviável pelos altos custos e complexidade envolvidos.

Em 2002, algumas aplicações agrícolas começaram a surgir com o uso de VANTs, a maioria deles com fundos provenientes da NASA, como mostra Herwitz et al. (2002). Nesse artigo, o VANT Pathfinder-Plus da NASA, alimentado por energia solar, foi utilizado para mapear 1500 hectares de terra no Hawaii. O VANT utilizava câmeras de alta resolução e multi-espectrais e era capaz de tirar fotos e enviá-las a uma central de controle por meio de um dispositivo de rádio.

Com a miniaturização e redução de custos de sensores, dispositivos GPS e de sistemas embarcados, novos modelos de VANTs começaram a ser comercializados, aumentando o seu uso em aplicações civis (Berni et al., 2009). VANTs do tipo helicóptero, apesar do sistema de controle de voo ser complexo e o tempo de voo ser reduzido, também começaram a ser comercializados com baixo custo (Berni et al., 2009). Aplicações com esses modelos se mostraram eficientes (Sugiura et al., 2005).

2.4 Agricultura de Precisão

Na última década a agricultura está passando por um processo de evolução, passando da era industrial, com uso intensivo de máquinas, para a era da informação, que implica em utilizar informações dos campos agrícolas em pequena escala para otimizar lucro dos mesmos (Ge et al., 2011). Essas informações extraídas do campo (*e.g* variabilidade do solo) são utilizadas no processo de SSM (*Site-specific management*), que é definido em fazer a coisa certa, no local certo e na hora

Tabela 2.1: Classificação dos VANTs em uso atualmente (adaptado de Dempsey (2010)).

Categoria	Carga máxima	Altitude operação	Velocidade	Exemplar em operação
Grupo 1	9 kg	< 365 m	< 185 km/h	RQ-11B Raven
Grupo 2	9-23 kg	< 1066 m	< 463 km/h	Nenhum
Grupo 3	< 600 kg	< 5486 m	< 463 km/h	RQ-7B Shadow
Grupo 4	> 600 kg	> 5486 m	qualquer	MQ-5B, MQ-1C
Grupo 5	> 600 kg	> 5486 m	qualquer	Nenhum

certa (Bongiovanni e Lowenberg-DeBoer, 2004), criando o conceito de agricultura de precisão (AP).

Os estudos no tópico de AP tem crescido na última década, decorrente da necessidade de produtores agrícolas e de consumidores. Produtores agrícolas, visando o lucro de seus campos, estão diminuindo a quantidade de defensivos químicos aplicados, já que esses são responsáveis por 47% a 92% nos custos de produção agrícola (Miller, 2003). Além disso, as leis ambientais estão se tornando cada vez mais restritas quanto ao uso desses produtos, pois poluem o meio ambiente e, conseqüentemente, afetam a saúde humana. Já os consumidores estão cada vez mais interessados na informação histórica dos produtos agrícolas, além de se importarem com as práticas agrícolas que estão sendo utilizadas. Pesquisas na AP tem aumentado também porque a solução de produzir alimentos geneticamente modificados gera uma aversão pública (Stafford, 2000).

Devido a esses fatores, a AP é vista como a maneira correta de cultivo no novo milênio, porque as técnicas de produção agrícola providas são voltadas para a (i) redução de custos, (ii) minimização no impacto ambiental e (iii) por prover informações dos produtos aos consumidores (Stafford, 2000).

Apesar de parecer um conceito novo, desde 1984 a AP já era idealizada, como mostra o seguinte trecho do trabalho de Johnson et al. (1984):

“Future machinery used in production agriculture will be automatically controlled to prescribe cultural practices, based on soil, crop and climate. Some soil and crop information may be sensed on-the-go and stored in a computer on board the prime mover or field machine. This computer, in turn, could be programmed to make real-time decisions based on this information to control cultural practices such as fertilizer, herbicide and pesticide application. Important to this concept is a general spatial position-sensing system that can pinpoint the position of the machine in the field at any time”.

Mas, provavelmente, apenas em 1988 foi realizada a primeira aplicação real da AP, por Fairchild (1988), que desenvolveu uma máquina capaz de aplicar fertilizante de maneira variável no solo de um campo agrícola. O mapa de variabilidade utilizado pela máquina foi construído por meio de fotos aéreas previamente tratadas. No entanto, devido a data da pesquisa, essa máquina utilizava um sistema de posicionamento muito grosseiro.

Com o advento do GPS pelos Estados Unidos na década de 90, foi possível determinar a posição de uma máquina no campo agrícola com um erro de aproximadamente 5 metros. Porém, como a constelação de satélites estava incompleta, os dispositivos recebiam o sinal de poucos satélites, e quando estavam próximo a árvores, ficavam com a precisão mais baixa. Com a constante melhora do sistema, em 2000, a constelação do GPS já estava completa e os dispositivos receptores eram acessíveis aos civis. A partir dessa data as pesquisas em AP aumentou significativamente (Stafford, 2000).

Porém, segundo Stafford (2000), ainda existem três barreiras para a aplicação das técnicas de AP. A primeira barreira é a grande quantidade de informações que devem ser utilizadas para executar uma técnica e obter bom resultado. Essas informações podem ser obtidas dentro do campo agrícola, como variabilidade do solo, dados das plantações e topografia, ou fora dele, como dados meteorológicos e de mercado. A segunda barreira é relacionada às informações obtidas dentro do campo agrícola, que usam técnicas normalmente caras e que necessitam de muito tempo para serem processadas, muitas vezes realizadas em laboratórios. A terceira barreira é a falta de processos e estratégias de AP documentadas e avaliadas.

Figura 2.7: Fluxo da AP (adaptado de (Stafford, 2000))

O tópico de agricultura de precisão é multidisciplinar, por necessitar de conhecimento de várias áreas, de agricultores, especialistas na área para prover informações sobre técnicas e métodos de produção agrícola, de engenheiros agrícola para prover novas máquinas para aumentar a produção, de cientistas da computação para processar tanta informação, etc.

2.5 Modelos de Dispersão

O objetivo principal no estudo de modelos de dispersão de poluentes é a proteção da qualidade do ar. Nas últimas décadas esses estudos foram intensificados pelo fato das emissões de poluentes terem crescido nas áreas urbanas e industriais. Como a dispersão tem influência de fatores como relevo, tipo de solo e ocupação, é necessário que existam modelos capazes de simular a dispersão de poluentes em cada região. Hoje em dia, para a instalação de uma fonte poluidora é necessário estudos para que não haja um impacto no ecossistema local (de Moraes e Maliska, 2001).

Segundo de Moraes e Maliska (2001), para o cálculo da dispersão de poluentes são utilizados diversos fatores, entre eles, condições meteorológicas, características das fontes poluidoras e dos gases emitidos, dados da atmosfera, direção do vento, relevo, entre outros. A dispersão, portanto, é um processo complexo. Os modelos de transporte e dispersão de poluentes devem ser capazes de simular os efeitos naturais para obter previsões confiáveis de contaminantes. Esses modelos variam

em grau de complexidade e podem ser classificados em duas principais classes, os Lagrangeanos e os Eulerianos.

Nos modelos Lagrangeanos, o gás é representado por partículas discretas (não representando necessariamente cada partícula real do gás, mas cada pequena parcela dele) (Stohl et al., 2005; Nijdam et al., 2006). A cada momento, a trajetória de cada partícula é calculada a partir dos atributos do ambiente, como velocidade do vento. A concentração de gás em um local e instante pode ser obtido por meio da contagem das partículas nesse momento. Já nos modelos Eulerianos, o gás é tratado como métodos numéricos, que são processados rapidamente (Nielinger et al., 2004). No entanto, esses modelos são rejeitados por terem comportamento artificial. Apesar dos modelos Eulerianos serem mais atrativos computacionalmente, por serem facilmente processados paralelamente (Nijdam et al., 2006), os Lagrangeanos, em princípio, obtêm um resultado com resolução infinitesimalmente melhor (Stohl et al., 2005).

Além desses modelos, existem os modelos Gaussianos, considerado como uma sub-classe dos Eulerianos e Langreanos, que são bem mais simples, porém são extremamente limitados. Esses devem ser utilizados apenas em ambientes que tenham vento constante (de Moraes e Maliska, 2001).

2.6 Trabalhos Relacionados

No trabalho de Co. (2002) é detalhada a história do primeiro VANT que foi desenvolvido e utilizado para aplicação de defensivos químicos em um campo agrícola. O VANT, do tipo helicóptero, começou a ser pesquisado depois de um contrato entre a Yamaha e a Associação de Aviação Agrícola do Japão. Em 1987 o modelo R-50 foi finalizado, capaz de carregar 20 kg de carga.

Segundo Huang et al. (2008), os métodos atuais mais utilizados para aplicação de defensivos químicos são por meio de maquinário no solo, tratores ou pessoas, ou por meio de quimigação, onde são utilizados os meios de irrigação para aplicar os defensivos químicos. Existem também os métodos aéreos, que conseguem aplicar em grandes áreas retilíneas. Para áreas críticas e obstruídas é proposto, no trabalho, o uso de VANTs, pois podem ser uma solução barata, que necessite de menos capital inicial e mais precisa para aplicação de defensivos químicos. Porém, até 2008 nenhuma aplicação dessa área tinha sido publicada. Nesse trabalho é desenvolvido um sistema de *spray* de defensivos químicos para ser instalado em um VANT com o objetivo de aplicá-los precisamente em áreas agrícolas. O VANT utilizado é um helicóptero com diâmetro do rotor de 3 metros, com motor a gasolina, podendo carregar até 22,7 kg de carga. O helicóptero, em coordenadas GPS pré-programadas, envia informações ao sistema de *spray* por meio de uma interface eletrônica, que aplica os defensivos químicos. Com 3,85 kg de defensivos químicos, de densidade 0,87 kg/L e uma distribuição de 0,3 litros por hectare, o helicóptero conseguiu aplicar em 14 hectares de terra, desempenhando um bom resultado quanto a precisão da aplicação.

No trabalho de Erman et al. (2008) é desenvolvido um sistema baseado na plataforma AWARE (Ollero et al., 2007), uma pesquisa europeia que propõe uma plataforma utilizando nós sensores sem fio heterogêneos. No trabalho são utilizados nós sensores sem fio, VANTs e BANs (*Body Area Network*) trabalhando em conjunto para a definição de resposta a desastres. O estudo de caso realizado é referente a detecção de incêndio. São utilizados dois tipos de nós sensores, estáticos, que são distribuídos próximo e dentro de um prédio, com sensores de umidade e temperatura; e nós sensores que atuam como nó de *sink*, capazes de capturar dados dos nós sensores. Os nós *sink* são: VANTs, caminhões de incêndio e BANs (nós sensores acoplados à roupa dos bombeiros). O VANT desempenha também a função de distribuir nós sensores em locais que hajam buracos de comunicação. Esses nós foram adaptados com uma *bean bag*, que faz com que o sensor caia com velocidade reduzida e sempre seja instalado na mesma posição (com a antena para cima). Esses sensores, por sua vez, conseguem fazer com que a RSSF consiga se comunicar, e pode também obter mais informações. Toda informação do sistema é enviada para uma central de controle, que é conectada ao sistema dos bombeiros. O sistema descrito é simulado na ferramenta OMNeT++, e também fisicamente, avaliando além do sistema, protocolos de comunicação visando a menor perda de pacotes possível. Por fim, é desenvolvido um protocolo de roteamento de pacotes para RSSF que visa nós em movimento.

Valente et al. (2011), em seu trabalho, desenvolve um sistema para capturar dados do solo, do clima e do estado de vinhedos em um campo. Os vinhedos, tradicionalmente, são cultivados em pedaços de terra separados por até centenas de metros. Com isso, a instalação de nós sensores cabeados é inviável, também pelo fato de existirem obstáculos naturais, como rios e estradas. A solução encontrada no trabalho foi a instalação de nós sensores sem fio. Porém, como os vinhedos são distantes uns dos outros, as várias RSSFs criadas dinamicamente não tem comunicação uma com as outras, além de também não conseguirem comunicar-se com a base de controle. A utilização de rádios com maior potência foi descartada pelo fato de causarem a diminuição do tempo de vida da bateria. Então, é utilizado um VANT do tipo quadróptero para capturar os dados de cada RSSF quando requisitado pelo agricultor. O VANT dirige-se ao vinhedo escolhido, e assim que consegue comunicação com um dos nós sensores da RSSF, obtém os dados de todos os nós da rede graças a natureza dos nós sensores rotar dados de seus vizinhos. O VANT, então, informa a base de controle com os dados obtidos por meio de uma comunicação GPRS (*General Packet Radio Service*). A base de controle, por sua vez, analisa e gerencia os dados recebidos, disponibilizando-os para o agricultor as informações dos vinhedos por meio de um sistema GUI (*Graphical User Interface*). Os testes foram realizados com três vinhedos, que tinham a área de 0,5 a 4 hectares de terra, separados de 70 a 100 metros de distância.

No contexto de comunicação de nós sensores estáticos e nós móveis, o trabalho de Shah et al. (2003) introduz o conceito de *data mule*. Esse conceito é dado à nós móveis que tem como objetivo percorrer uma RSSF e obter toda a informação desejada da mesma. Para isso, o *data mule* precisa, em algum momento, se comunicar com todos os nós da rede. O trabalho de Sugihara e Gupta (2010) divide esse problema em três subproblemas: seleção de trajetória, controle de velocidade e

agendamento de trabalho. O primeiro subproblema é a seleção de trajetória, que é importante para minimizar o caminho percorrido pelo *data mule*. Porém, esse pode ter restrições, como ângulo máximo de rotação. Após isso, o subproblema de controle de velocidade deve ser solucionado. Esse é utilizado para controlar a velocidade do *data mule*, para que esse fique próximo de cada nó sensor estático o tempo necessário para capturar os seus dados. Finalmente, o problema de agendamento de trabalho tem como objetivo determinar o trabalho de cada nó sensor para que esse use o canal de comunicação sozinho.

No trabalho de Bird et al. (2002) são realizados experimentos em laboratório para analisar a precisão do *software* AgDISP¹, que tem como objetivo simular a dispersão química da aplicação aérea de defensivos químicos. Foram efetuados 161 experimentos com diferentes atributos, como informações da aeronave, do bocal do *spray*, dados meteorológicos e condições do ambiente. Foi constatado que o *software* modelou com grande precisão a dispersão dos defensivos químicos.

2.7 Considerações Finais

Nesse Capítulo foram abordados os conceitos que serão importantes para o desenvolvimento do trabalho proposto nesse documento. Na seção de RSSF foram apresentadas as suas características, limitações, aplicações e principais paradigmas de protocolos de comunicação nas camadas de rede e enlace. Na seção de VANTs foram abordados as aplicações na área agrícola e sua classificação pelo meio militar. Na seção sobre AP foram apresentados os seus objetivos, os ganhos com o uso desse conceito e as barreiras atuais. O último conceito apresentado foi modelagem de dispersão de poluentes, onde são apresentados os modelos mais comuns, suas características e dificuldades. O Capítulo foi finalizado com os trabalhos relacionados.

Por meio dos trabalhos relacionados, pode-se concluir que:

- A adaptação de VANTs para a aplicação de defensivos químicos é realizável;
- Existem aplicações reais que integram RSSFs e VANTs;
- A comunicação entre nós sensores móveis e estáticos pode ocorrer utilizando protocolos de comunicação de RSSF já desenvolvidos para esse propósito;
- A simulação de RSSF com nós móveis e estáticos é possível com boa precisão nos resultados;
- A simulação da aplicação aérea de defensivos químicos é factível por meio de modelos existentes.

No entanto, não foi encontrado nenhum trabalho que realize a integração de VANTs e RSSFs para a aplicação de defensivos químicos. A proposta desse trabalho é utilizar informações obtidas

¹<http://www.continuum-dynamics.com/pr-agdisp.html>

por nós sensores, que estarão instalados no solo de um campo agrícola, a fim de melhorar a pulverização de defensivos químicos pelo VANT. O sistema será descrito com detalhes no próximo Capítulo.

Descrição do Trabalho

3.1 Considerações Iniciais

Este trabalho de mestrado propõe a integração de um VANT e uma RSSF para efetuar a pulverização agrícola em um campo. Primeiramente, nós sensores sem fio são instalados por todo o terreno do campo agrícola que será pulverizado. Um VANT capaz de carregar e pulverizar defensivos químicos é utilizado para percorrer o campo agrícola enquanto o pulveriza. Os nós sensores sem fio são equipados com sensores capazes de detectar a concentração de defensivos químicos e, por meio de seus rádios, enviam essa informação ao VANT. Dessa maneira, o VANT tem conhecimento de como os defensivos químicos estão sendo aplicados, mesmo com influência do vento, podendo assim tomar decisões com o objetivo de melhorar a eficiência da pulverização. A Figura 3.1 ilustra um cenário desse trabalho.

As próximas seções abordam desde os detalhes do trabalho até o seu desenvolvimento, passando pelos objetivos e pela metodologia utilizada.

3.2 Detalhes do Projeto

O sistema proposto foi dividido em duas partes: *pulverização*, com o objetivo de detalhar o papel dos elementos do sistema com relação à pulverização de defensivos químicos; e *comunicação*, com o objetivo de explicar como foi desenvolvida a comunicação dos elementos do sistema no trabalho. Dessa maneira, os problemas do sistema são divididos em: i) efetuar a pulverização uniforme dos defensivos químicos no campo agrícola; e ii) realizar a comunicação sem fio entre o VANT e os nós sensores. Cada parte do trabalho será detalhado em uma seção.

Figura 3.1: Cenário da proposta do trabalho: cooperação de um VANT e uma RSSF para aumentar a precisão de defensivos químicos em um campo agrícola.

3.2.1 Pulverização

Nessa seção serão explicados os papéis do VANT, dos nós sensores e do campo agrícola com relação à pulverização agrícola.

O VANT tem como objetivo pulverizar defensivos químicos no campo agrícola enquanto o percorre. Para isso ele deve ser capaz de carregar grandes quantidades de defensivos químicos além de conseguir pulverizá-los. Para propor um modelo de VANT com esses requisitos, foram buscadas as principais aeronaves agrícolas utilizadas atualmente no Brasil, a fim de obter suas características. Segundo Neiva (2012), em 2012, 75% das aeronaves agrícolas utilizadas para pulverização no Brasil é do modelo Ipanema, fabricada pela Neiva e Embraer. Essa aeronave tem capacidade para 950 litros de defensivos químicos, tem envergadura de 11,07 metros e velocidade mínima de voo de 198 km/h. Com base nessas informações, foi buscado um VANT com características similares. Por meio da Tabela de grupos de VANTs, disponibilizada pelo Dempsey (2010) e apresentada na Seção 2.3.2, foi identificado que os VANTs do grupo 4 são os que mais se assemelham à essa aeronave tradicional. Desse grupo, o VANT MQ-5B disponibiliza suas especificações na literatura (Northrop Grumman, 2006): velocidade mínima de voo 111 km/h; envergadura das asas de 10,44 m; carga máxima de 226,80 kg; tempo máximo de voo de 21 horas.

O VANT, para poder pulverizar os defensivos químicos, deverá ser adaptado com um equipamento de pulverização agrícola. Para melhor entendimento do equipamento, será apresentado o modelo utilizado em aeronaves tradicionais. Cinco elementos fazem parte desse equipamento (Antuniassi e Boller, 2011): o tanque de defensivos químicos, a alavanca de acionamento, a bomba de pulverização, uma barra de pulverização e diversas pontas de pulverização, como é mostrado na Figura 3.2. A bomba fica abaixo do bico da aeronave, e tem como objetivo bombear os defensivos químicos do tanque para a barra de pulverização de maneira uniforme, criando uma vazão constante. A barra de pulverização é instalada abaixo da aeronave, de uma asa à outra. Essa barra tem vários furos em diferentes posições, onde são instaladas as pontas de pulverização. Essas pontas são fabricadas por diferentes empresas e tem diferentes formatos e objetivos. Elas determinam a vazão que o defensivo químico será pulverizado, assim como o tamanho da gota e ângulo de injeção (Antuniassi e Boller, 2011). O equipamento libera defensivos químicos apenas quando a alavanca está acionada.

Figura 3.2: Diagrama do equipamento de pulverização em uma aeronave (adaptado de ANDEF (2010)).

Devido à turbulência gerada próxima às extremidades da asa, a barra de pulverização ocupa, no máximo, 80% da envergadura da aeronave. Além disso, as pontas de pulverização não são instaladas no centro da barra, pois a hélice da aeronave gera um vórtice que atrapalha a aplicação dos defensivos químicos (Antuniassi e Boller, 2011).

Por meio do manual do inseticida Danitol, fabricado pela Valent (Valent U.S.A. Corporation, 2000), foram obtidas informações quanto às restrições e recomendações para a aplicação de defensivos químicos. É recomendada que a pulverização aérea seja executada quando a velocidade do

vento estiver entre 0,85 m/s e 4,5 m/s, e deve ser cancelada se a velocidade do vento for maior que 6,7 m/s. Além disso, a aeronave não deve ultrapassar os 3 metros de altura durante a pulverização.

Para que o VANT percorra todo o campo agrícola, será utilizada a técnica tradicional, na qual os pilotos efetuam a pulverização por faixas. Inicialmente é determinada a largura de uma faixa, baseada na envergadura da aeronave e pela cultura do campo agrícola. Em seguida, a área do campo agrícola é dividida em faixas adjacentes. O ponto GPS inicial e final de cada faixa é programado em um dispositivo da aeronave, que tem como objetivo indicar ao piloto uma linha reta que ele deve seguir a fim de pulverizar toda a faixa atual. Ao finalizar a faixa, o piloto deve realizar uma manobra para que a próxima faixa comece a ser pulverizada, como é ilustrado na Figura 3.3. O objetivo principal dessa técnica é efetuar a pulverização uniforme do campo agrícola. No entanto, condições atmosféricas podem fazer com que os defensivos químicos sejam sobrepostos ou sejam pouco aplicados em certas regiões (Antuniassi e Boller, 2011).

Figura 3.3: Maneira utilizada pelos aviões pulverizadores de defensivos químicos para percorrer uma lavoura (adaptado de (Teach, 1994))

Para reduzir esses problemas, é proposta a instalação de nós sensores sem fio no solo do campo agrícola, com o objetivo de sensoriar a quantidade de defensivos químicos aplicados em seu local, e enviar essas informações ao VANT constantemente. Com isso, o VANT terá informações da situação da pulverização no campo agrícola. Dessa maneira, ele poderá efetuar mecanismos para tornar a pulverização mais eficiente e segura. No entanto, as técnicas atuais para detectar concentração de defensivos químicos no campo agrícola é um processo lento e caro, realizado por meio de amostragem do campo e processado em laboratórios. Porém, o trabalho de Laguarda-Miro et al. (2012) demonstra o uso de um dispositivo eletrônico para sensoriamento de defensivos químicos "in situ" (no local). Esse dispositivo obtém informações elétricas de uma solução pelos seus sensores e, por meio do processamento de uma Rede Neural Artificial, é viabilizada a concentração de defensivos químicos.

Na próxima seção será explicado como o VANT e os nós sensores se comunicam, a fim do VANT obter informações do campo agrícola.

3.2.2 Comunicação

Para que o VANT obtenha as informações de concentração de defensivos químicos dos nós sensores, ambos deverão utilizar rádios compatíveis. Além disso, devido às restrições energéticas dos nós sensores sem fio, é proposto o uso de um rádio com protocolos de comunicação baseados no padrão IEEE 802.15.4. Após buscas na literatura por um módulo de rádio que respeite essas limitações, o modelo CC2420 da Texas Instruments (Texas Instruments, 2012) foi encontrado. Os parâmetros desse rádio estão detalhados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Especificações do módulo de rádio CC2420, fabricado pela Texas Instruments (Texas Instruments, 2012).

Frequência	2.4 GHz
Consumo RX	18.8 mA
Consumo TX	17.4 mA
Taxa de TX	250 kbps

O fluxo de comunicação entre o VANT e os nós sensores é ilustrado na Figura 3.4. Periodicamente, o VANT envia uma mensagem *broadcast* aos nós sensores. Devido à atenuação do sinal, somente os nós sensores mais próximos ao VANT receberão a mensagem. Cada nó sensor que recebeu a mensagem, irá enviar ao VANT uma mensagem contendo a sua posição GPS e a quantidade de defensivos químicos sensorizados no local. O VANT, ao receber essas mensagens, armazena-as em sua memória na forma de um mapa de concentração. Esse mapa é utilizado para que o VANT tome decisões visando melhorar a pulverização dos defensivos químicos.

Figura 3.4: Comunicação entre o VANT e os nós sensores.

O mecanismo proposto para melhorar a eficiência da pulverização agrícola é um algoritmo para mudar a rota do VANT, mostrado no Algoritmo 1. Esse mecanismo faz com que o VANT mude de direção por algum tempo, e então volte à direção que estava seguindo, ajustando assim a sua rota. O algoritmo desenvolvido tem a limitação de funcionar apenas em cenários que os nós sensores estão distribuídos matricialmente. Inicialmente, assim que o VANT recebe as informações de concentração de defensivos químicos dos nós sensores, ele seleciona os valores de dois nós

sensores, os dois mais próximos que ele já passou, sendo que um deve estar à sua esquerda e o outro à sua direita. Esses valores são atribuídos nas variáveis *sensorLeft* e *sensorRight* respectivamente (linha 1 do algoritmo). A diferença dessas variáveis é atribuída à variável *diff*. Caso o valor absoluto da variável *diff* seja maior que um valor de *threshold* (linha 2), o VANT decide mudar de direção. Com isso, é calculado o tempo em que o VANT ficará nessa nova direção, e atribuído à variável *duration* (linha 3). Note que quanto maior a diferença de concentração de defensivos químicos aplicados (*diff*), maior será a duração de tempo que o VANT ficará na nova direção. Em seguida, o valor atual da direção do VANT é armazenado na variável *oldAngle* (linha 4) e então o ângulo do VANT é modificado, adicionando ou subtraindo θ ao ângulo atual, de acordo com o valor de *diff* (linhas 5 à 8). Por fim, é agendado o retorno ao ângulo antigo *oldAngle* após *duration* segundos (linha 9).

Algoritmo 1: Algoritmo de mudança de rota

```

1 diff = sensorLeft - sensorRight ;           // Diferença entre concentrações
2 if (abs(diff) > threshold) then
3     duration = abs(diff) / durationFactor ;   // Duração da mudança de rota
4     oldAngle = angle ;                       // Armazena ângulo atual
5     if (diff < 0) then
6         | setAngle(angle +  $\theta$ )
7     else
8         | setAngle(angle -  $\theta$ )
9     scheduleChangeRoute(oldAngle, duration) ; // Volta ao ângulo antigo
  
```

3.3 Objetivos e Contribuições Esperadas

Nessa seção são apresentados os objetivos e contribuições esperadas do trabalho. Como principais objetivos, tem-se:

1. Analisar se o sistema proposto melhora a eficiência da pulverização agrícola comparado com as técnicas tradicionais;
2. Avaliar diferentes protocolos de comunicação, visando maximizar o tempo de bateria dos nós sensores do sistema.

Como consequências desses objetivos, espera-se:

- Ajudar na preservação da fauna e a flora presentes nos terrenos adjacentes aos campos agrícolas;

- Diminuir o contato dos empregados com os defensivos químicos;
- Diminuir a quantidade de acidentes de trabalho no campo agrícola decorrentes de queda de aviões;
- Diminuir multas para os donos de campos agrícolas;
- Automatizar a tarefa de aplicação de defensivos químicos no campo agrícola;
- Obter um mapa de distribuição de defensivos químicos no campo agrícola, tendo assim um histórico detalhado dos terrenos.

As contribuições esperadas do trabalho são:

- Disponibilizar informações quanto à eficiência do sistema proposto;
- Disponibilizar detalhes do sistema, como informações do VANT e dos nós sensores.

3.4 Metodologia

Essa seção apresenta a metodologia que foi utilizada para o desenvolvimento do trabalho.

Devido aos problemas relacionados com validação de RSSF por *testbeds* apresentados na Seção 2.2, o sistema proposto nesse trabalho será validado pelo método de simulação. Existem vários simuladores para validar redes de computadores, como o ns2¹, o JavaSim², e o SSFNet³. Porém, segundo Mallandra et al. (2005), estes simuladores foram desenvolvidos para simulação de redes específicas, sendo a extensão para o uso em RSSF complicada.

Durante pesquisas sobre simuladores que poderiam ser utilizados para simulação de RSSF, foram encontrados muitos artigos citando o uso do OMNeT++⁴, como mostram os artigos de Erman et al. (2008); Colesanti et al. (2007). Por isso, esse simulador foi estudado para saber se pode ser uma escolha para a validação do trabalho proposto nesse documento.

O OMNeT++⁴ é um simulador de evento discreto baseado em C++ para modelar redes de comunicação, multiprocessadores e outros sistemas paralelos e distribuídos. Esse simulador é *open-source* e não foi projetado para ser um simulador específico, assim, ele tem sido utilizado em muitos domínios diferentes, de simulação de redes com filas à redes sem fio (Varga, 2010).

O projeto OMNeT++ utiliza como ambiente de trabalho o IDE (*Integrated Development Environment*) do Eclipse⁵, possibilitando a edição textual e gráfica dos módulos utilizados no projeto. Essa interface também ajuda no desenvolvimento dos códigos em C++, pois as classes utilizadas

¹<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

²<http://javasim.codehaus.org/>

³<http://www.ssfnet.org/>

⁴<http://www.omnetpp.org/>

⁵<http://www.eclipse.org/>

por todo o projeto são indexadas. Além disso, é possível configurar todo o projeto graficamente, não necessitando do uso da linha de comando. Um exemplo de projeto sendo editado no IDE disponibilizado pelo OMNeT++ é mostrado na Figura 3.5.

Figura 3.5: Projeto sendo desenvolvido no OMNeT++ através do IDE do Eclipse (Varga, 2010).

A modelagem no OMNeT++ utiliza uma coleção de módulos hierarquicamente organizados como é mostrado na Figura 3.6. Os módulos são distinguidos entre simples e compostos. Módulos simples formam o nível mais baixo da hierarquia, e estes são sempre associados a arquivos C++, onde o seu comportamento é descrito. Módulos compostos são módulos simples agregados, e podem não ser associados a arquivos C++. Esses módulos comunicam-se através de mensagens, que podem ser trocadas entre os módulos simples ou através de conexões.

Figura 3.6: Hierarquia de módulos utilizado no OMNeT++ (adaptado de Varga (2011)).

A linguagem de programação utilizada pelo OMNeT++ é o C++, uma linguagem orientada a objetos. Essa característica é fundamental para o desenvolvimento rápido do projeto, pois diferente de outros simuladores, o OMNeT++ utiliza uma linguagem de programação difundida, não necessitando que o usuário aprenda uma linguagem específica para a simulação. Além disso, por ser orientada a objetos, facilita a criação de novos módulos, pois é possível estender módulos já existentes, modificando apenas as funções necessárias. Com essa técnica, a velocidade de desenvolvimento e a robustez do sistema aumentam, pois muito código é reutilizado, código este que foi testado previamente.

Cada parâmetro dos módulos usados no projeto pode ser configurado por meio de um arquivo de configuração chamado *omnetpp.ini*. Esse arquivo contém os atributos de cada parâmetro, como por exemplo, a posição de cada nó, a potência do rádio que está sendo utilizada, etc. Uma vez que esse arquivo é lido em tempo de execução, não é necessário que o projeto seja recompilado quando as suas configurações são mudadas, agilizando o processo de simulação. Além disso, cada parâmetro do arquivo pode ser configurado com uma lista de atributos. Dessa maneira, o OMNeT++ faz o planejamento de experimentos fatorial completo, realizando todas as combinações possíveis desses atributos.

Após o desenvolvimento do projeto, este pode ser simulado graficamente, geralmente utilizado para *debug*, ou simulado em modo *batch*, em que a velocidade da simulação é acelerada, uma vez que não é mostrada graficamente.

Como o OMNeT++ é um simulador genérico, existem vários *frameworks* para adaptá-lo às necessidades da simulação. Como exemplo, o *framework* MiXiM⁶ possui vários algoritmos e protocolos de redes sem fio, ajudando na confiabilidade e na velocidade de desenvolvimento. Esse *framework* disponibiliza ao desenvolvedor um nó base, ilustrado na Figura 3.7. Esse nó tem vários submódulos, como as camadas de rede OSI, mostradas pelos submódulos *appl*, *net* e *nic*. Já o submódulo *mobility* é utilizado para movimentar o nó, o *arp* para resolver endereços e o *utility* para prover comunicação entre esses submódulos.

Por essas qualidades, e pela quantidade de artigos de projetos de RSSF simulados no OMNeT++ em conjunto com o MiXiM, essas ferramentas são utilizadas para a validação do projeto descrito neste documento.

3.5 Desenvolvimento

Nessa seção é detalhado o desenvolvimento dos elementos do trabalho no simulador OMNeT++. Primeiramente são detalhados os módulo do campo agrícola, o VANT e os nós sensores. Em seguida, é apresentada a forma que esses elementos interagem. Por fim, são detalhados cinco protocolos de comunicação.

⁶<http://mixim.sourceforge.net/>

Figura 3.7: Nó base disponibilizado pelo *framework* MiXiM. Do lado esquerdo os submódulos de rede, e do lado direito os submódulos de mobilidade, *arp* e *utility*.

3.5.1 Módulo do Campo

O *módulo do campo* é responsável por simular os defensivos químicos sendo aplicados no campo agrícola. Para isso, é utilizado um modelo de dispersão de poluentes simplificado, que considera apenas o vetor de velocidade inicial da partícula quando esta é pulverizada, o vetor de velocidade do vento e a força da gravidade. As partículas pulverizadas pelo VANT são simuladas a cada espaço de tempo, sendo iteradas até o momento que colidem com o solo do campo agrícola. Nesse momento, a quantidade de defensivos químicos que está presente na partícula é somada à quantidade de defensivos químicos já aplicados nessa região do campo, formando um mapa de concentração. Além disso, o módulo do campo também tem a função de fornecer as informações do mapa de concentração aos nós sensores quando esses sensoriarem o campo agrícola. A interação desses módulos é ilustrada na Figura 3.8.

O módulo campo foi desenvolvido a partir da classe *BaseModule* do MiXiM. Sumarizando, esse módulo é responsável por (i) simular as partículas de defensivos químicos aplicados pelo VANT influenciadas pelo vento, (ii) armazenar as concentrações e posições geográficas dos defensivos químicos aplicados no campo e (iii) prover essas informações aos nós sensores assim que esses lerem seus sensores.

Figura 3.8: Interação do módulo do campo com o VANT e os nós sensores. Na função (a), o módulo do campo é pulverizado por partículas de defensivos químicos. Na função (b), os nós sensores sensoriam o campo agrícola.

A seguir é apresentado o desenvolvimento do VANT.

3.5.2 VANT

Para o desenvolvimento do VANT foi utilizado como base a classe *WirelessNode* do MiXiM, mostrada na Figura 3.9. Essa classe utiliza como submódulos: *appl*, *netwl*, *nic*, *mobility* e *arp*. O submódulo *appl* simula a camada de aplicação, sendo esta conectada ao submódulo *netwl*, que simula a camada de rede. Esse submódulo está conectado ao submódulo *nic*, classe que simula a interface de rede, sendo responsável pelas camadas de enlace e física. O submódulo *mobility*, por sua vez, é responsável pela movimentação do nó e o submódulo *arp* pela resolução de endereços. Alguns desses módulos foram modificados para que o VANT desempenhasse os seguintes objetivos: i) pulverizar defensivos químicos no campo agrícola; ii) requisitar informações sobre concentração de defensivos químicos aos nós sensores; e iii) processar as informações obtidas para verificar se é necessário mudar sua rota.

Figura 3.9: Classe *WirelessNode* do MiXiM utilizado para implementar o nó VANT.

Para cumprir o objetivo de pulverizar defensivos químicos no campo agrícola, o submódulo *mobility* foi modificado para que o VANT fosse capaz de percorrer o campo agrícola por completo. Para isso, inicialmente a fazenda é dividida em faixas de L metros de largura. O VANT, então, percorre cada faixa em linha reta até o seu fim. Nesse instante, o VANT é movido para o começo da próxima faixa, se houver. A cada momento que o VANT se desloca, ele efetua a pulverização de n partículas pelos seus bicos de pulverização, que são dispostos por 80% da envergadura da aeronave. A pulverização é efetuada por meio da criação de partículas no módulo do campo, utilizando como parâmetros a posição de cada bico e a velocidade vetorial do VANT.

Para cumprir o segundo objetivo, ou seja, obter informações dos nós sensores, a camada de aplicação do VANT (submódulo *appl*) foi estendida para que ele enviasse mensagens *broadcast*

requisitando informações dos nós sensores instalados no campo agrícola. Os nós sensores, então, respondem uma mensagem contendo a sua posição GPS e concentração de defensivos químicos em seu local. Com essas informações, o VANT produz um mapa de concentrações de todo o campo.

Processando as informações desse mapa, o VANT realiza o seu terceiro objetivo, decidindo se deve ou não mudar de rota. Para isso, a camada de aplicação do VANT foi desenvolvida para utilizar o Algoritmo 1 mostrado na Seção 3.2.2.

Na próxima seção é detalhado o desenvolvimento do nó sensor sem fio.

3.5.3 Nó Sensor Sem Fio

Os nós sensores sem fio foram desenvolvidos a partir da classe *WirelessNodeBattery*, provido pelo *framework* MiXiM. Essa classe pode ser visualizada na Figura 3.10. A diferença entre essa classe e a classe *WirelessNode*, utilizada para desenvolver o VANT, são apenas os submódulos *battery* e *batteryStats*. Esses submódulos são responsáveis por simular o comportamento da bateria do nó e prover informações da mesma, respectivamente. Essa classe foi utilizada, pois, como o trabalho utiliza RSSFs, é interessante mostrar resultados sobre a quantidade de energia utilizada durante cada simulação.

Figura 3.10: Classe *WirelessNodeBattery* do MiXiM utilizado para implementar os nós instalados no campo.

Os nós sensores foram desenvolvidos para atender as seguintes especificações: i) receber mensagens do VANT requisitando informações de concentração de defensivos químicos; ii) ler sensores; e iii) enviar ao VANT mensagens com as informações georreferenciadas lidas pelos sensores.

Para atender a estes objetivos, a camada de aplicação (submódulo *appl*) foi modificada. Os nós sensores, ao receberem uma mensagem do VANT, leem os sensores de concentração de defensivos químicos. Essa leitura é efetuada acessando o módulo do campo e requisitando a quantidade de defensivos químicos em sua posição GPS. Em seguida, o nó sensor envia uma mensagem *unicast* ao VANT com as informações dos seus sensores e a sua posição GPS.

A seção a seguir detalha a interação dos elementos descritos até então.

3.5.4 Interação dos módulos

A interação entre os elementos sistema é mostrada no diagrama da Figura 3.11. O VANT, enquanto se movimenta pelo campo agrícola, pode aplicar defensivos químicos no campo, utilizando a função *aplicaDefensivo(.)*. Essa função envia informações ao módulo do campo para que crie novas partículas com os parâmetros de posição e velocidade vetorial do VANT. Assim, o módulo do campo irá simular essas novas partículas iterativamente.

Figura 3.11: Diagrama de comunicação entre os componentes do sistema.

Para obter as informações dos nós sensores, o VANT periodicamente transmite uma mensagem *broadcast* (com a função *requisitaConcentração(.)*). Nesse momento, diversos nós sensores podem receber essa mensagem. Esses nós, então, fazem a leitura dos seus sensores (com a função *sensoriamento(x, y, z)*) no módulo do campo, que responde a concentração de defensivos químicos para a posição de cada nó. Nesse momento, cada nó sensor cria uma mensagem com suas posições GPS e informações $\langle x, y, z, C \rangle$ e as envia ao VANT. O VANT, finalmente, recebe essas informações e guarda-as em memória, até que a função *mudaRota(.)* seja executada. Essa função tem como objetivo tratar as informações dos nós sensores e tomar a decisão de mudar ou não de rota.

Na próxima seção são detalhados cinco protocolos de comunicação. Esses serão utilizados para que VANT e os nós sensores se comuniquem.

3.5.5 Protocolos de Comunicação

Foram desenvolvidos cinco protocolos de comunicação baseados na literatura. Esses protocolos foram desenvolvidos a partir das camadas de enlace e física do padrão IEEE 802.15.4. Eles foram nomeados de P_1 a P_5 , e os detalhes de funcionamento de cada um deles será explicado nessa seção.

Os protocolos P_1 e P_2 são protocolos de comunicação que não fazem gerenciamento de energia dos nós sensores, deixando os seus rádios sempre ligados. A diferença entre eles é que o P_2 é baseado em *queries*. Essa *query* funciona da seguinte maneira: o VANT informa na mensagem de requisição de defensivos químicos a sua posição atual e a distância máxima que deseja respostas. Os nós sensores que receberem essa mensagem irão calcular a sua distância para o VANT utilizando a sua posição GPS. Caso essa distância seja menor que distância máxima informada na mensagem, responderão ao VANT, como é mostrado na Figura 3.12. Com isso, é esperado um menor congestionamento do canal sem que ocorra perda da informação obtida pelos nós sensores, já que a informação mais interessante da concentração de defensivos químicos está nas regiões mais próximas ao VANT. Os protocolos P_1 e P_2 são representados em máquina de estados finitos nas Figuras 3.13 e 3.14 respectivamente.

Figura 3.12: Funcionamento das mensagens de requisição do VANT utilizando *queries*. Apesar do nó sensor C ter recebido a mensagem, ele está a uma distância maior que a distância máxima, então não responde à requisição.

Os protocolos P_3 e P_4 são protocolos de comunicação que ligam e desligam o rádio periodicamente. Inicialmente, os nós sensores sem fio precisam sincronizar com o VANT o tempo que ficarão com os rádios ligados e desligados. Esse é um processo importante, pois o VANT precisa enviar a mensagem de requisição de concentração aos nós sensores sem fio apenas quando esses estiverem com os rádios ligados. Por isso, esses protocolos são divididos em dois estágios, sendo o primeiro para a sincronização da rede, e o segundo para monitoração do campo. Durante o estágio de sincronização, os nós sensores sem fio recebem uma mensagem do VANT com as seguintes informações: fatia do tempo que devem deixar os rádios ligados; fatia do tempo que devem deixar os

Figura 3.13: Máquina de estado finito que representa o funcionamento do protocolo P_1 . O estado inicial é o *listen*, que representa o nó ouvindo o canal. Quando um pacote é recebido, o protocolo vai para o estado *recv* pela transição *t1*. O nó, então, compõe uma mensagem de resposta ao VANT com os dados obtidos pelos seus sensores, e vai para o estado de *send*, pela transição *t2*. O protocolo envia a mensagem e volta ao estado inicial, pela transição *t3*.

Figura 3.14: Máquina de estado finito que representa o funcionamento do protocolo P_2 . A diferença desse protocolo para o P_1 é que durante o estado de *recv*, o nó faz a checagem da *query* que o VANT o enviou, e caso seja falsa, volta ao estado inicial pela transição *t4*.

rádios desligados; e o horário em que devem começar a ligar e desligar os rádios. Como o campo pode ter tamanhos diferentes e o VANT pode não ter um rádio de alto alcance, os nós sensores sem fio são responsáveis por propagar essa informação por todo o campo, fazendo isso pela técnica de *flooding*, explicada na Seção 2.2.3. No segundo estágio, os nós sensores sem fio, enquanto ligam e desligam os seus rádios de modo sincronizado, respondem às requisições do VANT. A diferença entre os protocolos P_3 e P_4 é que o protocolo P_4 é baseado em *queries*, como o protocolo P_2 . Assim sendo, o nó sensor sem fio que receber uma mensagem do VANT vai calcular a sua distância para o VANT, e só responderá caso seja menor que a distância máxima. No entanto, os nós sensores sem fio que utilizarem o protocolo P_4 , diferentemente do protocolo P_2 , desligam o rádio ao calcular que a distância entre ele e o VANT é maior que a distância máxima, e espera a próxima fatia de tempo para ligar o rádio. Os protocolos P_3 e P_4 são representados em máquina de estados finitos nas Figuras 3.15 e 3.16 respectivamente.

O último protocolo, P_5 , também é dividido em dois estágios, sincronização e monitoração do campo. O estágio de sincronização funciona da mesma maneira que nos protocolos P_3 e P_4 , com o algoritmo de *flooding*, porém as informações que são propagadas são diferentes. Nesse caso, são transmitidas as informações: horário que começará a pulverização; posição esperada do

Figura 3.15: Máquina de estado finito que representa o funcionamento do protocolo P_3 . Diferente dos protocolos já apresentados, esse protocolo tem o estado de *sleep*, que simboliza o desligamento do rádio do nó. Esse estado e o estado de *listen* são chaveados por meio de temporizadores. No caso, a transição t5 simboliza que o temporizador para ligar o rádio foi disparado; e a transição t6 simboliza que o temporizador para desligar o rádio foi disparado.

Figura 3.16: Máquina de estado finito que representa o funcionamento do protocolo P_4 . Esse protocolo lida com temporizadores e com *queries*. Ou seja, os estados *listen* e *sleep* são chaveado por temporizadores; e quando o nó recebe uma mensagem com *query* falsa pelo VANT, já desliga o rádio (transição t4).

VANT nesse momento; velocidade e direção do VANT; fatia do tempo que devem deixar os rádios ligados; fatia do tempo que devem deixar os rádios desligados; e distância máxima para responder às requisições. Com essas informações, cada nó sensor sem fio consegue prever quando o VANT estará próximo ($d < d_{max}$), alternando o estado de rádio de ligado para desligado apenas nesse período. Durante o resto do tempo, os nós ficam com seus rádios desligados. Como pode ser notado, esse protocolo é sensível às informações providas pelo VANT, ou seja, caso alguma delas seja imprecisa ou não seja constante, como a velocidade do VANT, o protocolo pode falhar. O protocolo P_5 é representado em máquina de estados finitos na Figura 3.17.

Na Figura 3.18 são mostrados os comportamentos do módulo de rádio dos nós sensores sem fio quando utilizam diferentes protocolos de comunicação. A linha preta de cada protocolo é o estado do rádio, ligado ou desligado. A faixa cinza é o tempo de sincronização, portanto apenas os protocolos P_3 , P_4 e P_5 as utilizam. A faixa amarela sinaliza que o VANT está a uma distância menor que d_{max} do nó sensor sem fio. E, a seta mostrada no protocolo P_4 sinaliza que o nó sensor

Figura 3.17: Máquina de estado finito que representa o funcionamento do protocolo P_5 . Apesar desse protocolo ter o mesmo fluxo que o protocolo P_3 , os temporizadores funcionam de maneira diferente. O estado *listen* só será acionado no momento em que o nó souber que o VANT estará próximo dele. Essa previsão ocorre baseado nas informações providas do VANT aos nós sensores no estágio de sincronização da rede.

sem fio recebeu a requisição do VANT, porém desligou seu rádio, pois a distância para ele era maior que d_{max} .

Figura 3.18: Comportamento do módulo de rádio nos nós sensores sem fio utilizando diferentes protocolos de comunicação.

3.6 Considerações Finais

Nesse Capítulo o trabalho foi detalhado, mostrando o papel de cada elemento no sistema. Além disso foram definidos os objetivos e a metodologia pelo qual o sistema será avaliado. Por fim foram mostrados detalhes do desenvolvimento do sistema no simulador OMNeT++.

Experimentos e Resultados

4.1 Considerações Iniciais

Esse Capítulo tem como objetivo detalhar dois experimentos que foram realizados a fim de atingir os objetivos deste trabalho. O primeiro experimento avalia se é possível melhorar a pulverização agrícola a partir do sistema proposto. Já o segundo experimento tem como objetivo analisar diferentes protocolos de comunicação utilizados pelo VANT e pelos nós sensores sem fio. Nas próximas seções os experimentos serão apresentados junto aos seus objetivos, então o seu planejamento será detalhado e, por fim, serão discutidos os resultados obtidos. Após os experimentos, a Seção de Contribuições Científicas lista os trabalhos submetidos e aceitos pelo aluno durante o mestrado.

4.2 Experimento 1

Nessa seção é detalhado o experimento que avalia a eficiência do sistema proposto neste trabalho de mestrado. Para isso, foi definido o seguinte cenário de simulação: um VANT pulveriza defensivos químicos em um campo agrícola de 1 hectare, que tem 16 nós sensores sem fio instalados. Esse cenário foi simulado com diversas condições de velocidade e direção do vento, e ao final de cada simulação foi medida a porcentagem de defensivos químicos que foram aplicados dentro do campo agrícola. Dessa maneira, foi obtida a eficiência do sistema. A Figura 4.1 ilustra o cenário desse experimento, em que o VANT está utilizando o algoritmo de mudança de rota.

Esse experimento também tem o objetivo de comparar a eficiência do sistema proposto com a eficiência do sistema tradicional de pulverização agrícola. Para isso, o mesmo cenário foi avaliado

Figura 4.1: Cenário utilizado no primeiro experimento: um VANT pulveriza defensivos químicos em um campo agrícola de 1 hectare, que tem 16 nós sensores sem fio instalados.

com as mesmas condições de velocidade e direção do vento, porém sem utilizar o algoritmo de mudança de rota do VANT, ou seja, o VANT percorrerá apenas uma rota retilínea.

A fim de obter resultados realísticos, as simulações utilizaram os detalhes mostrados no Capítulo 3, como velocidade do VANT, especificações dos rádios dos nós sensores sem fio, etc.

Sintetizando, os objetivos desse experimento são: (i) analisar a eficiência da pulverização de defensivos químicos pelo sistema proposto e pelo sistema tradicional para diversas condições climáticas e (ii) comparar essas eficiências.

A próxima seção detalha o planejamento do experimento.

4.2.1 Planejamento do Experimento

O cenário utilizado nesse experimento é um campo agrícola de 500 metros de comprimento por 20 metros de largura (10000 m^2 , ou seja, 1 hectare). Nesse campo são instalados 16 nós sensores de modo matricial, sendo que esses ficam nas bordas do campo, separados por uma distância uniforme entre um e outro, como ilustrado na Figura 4.1. O VANT percorre o campo aplicando os defensivos químicos e requisitando informações dos nós sensores a cada 1 segundo. Este VANT tem uma envergadura de 14 metros, onde são instalados 14 bicos injetores, e voa a 5 metros de altura numa velocidade de 30m/s. Essas e outras informações relacionadas aos parâmetros fixos do experimento encontram-se na Tabela 4.1.

São utilizados três parâmetros dinâmicos nesse cenário: velocidade do vento, direção do vento, e uso do algoritmo de mudança de rota do VANT. A velocidade do vento é escolhida por uma distribuição uniforme entre 0 e 6,7 m/s. Esse limite máximo foi determinado por ser a velocidade máxima do vento aconselhada para aplicação de defensivos químicos (Valent U.S.A. Corporation, 2000). A direção do vento é gerada por uma distribuição uniforme entre 0 e 360 graus. O algoritmo de mudança de rota do VANT é utilizado em metade das simulações e na outra metade não. Esse último parâmetro é utilizado para obter a eficiência do sistema proposto e do sistema tradicional de pulverização agrícola.

Devido ao grande número de combinações possíveis entre os parâmetros de direção e velocidade do vento, foi escolhido um grande número de simulações. São realizadas 1000 simulações utilizando o algoritmo de mudança de rota do VANT e outras 1000 simulações sem ele. E, para obter resultados condizentes, as propriedades do vento são replicados nessas 1000 simulações. Ou

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados no primeiro experimento.

Campo agrícola	
Tamanho	500m x 20m (1 hectare)
Número de nós sensores sem fio instalados	16
VANT	
Altura de voo	5m
Velocidade	30m/s
Aceleração	$0m/s^2$
Envergadura	14m
Frequência de mensagem de requisição	1s
Nós sensores sem fio	
Tempo médio para leitura dos sensores	1s
Módulo de rádio	
Frequência	2,4GHz
Camada MAC / física	Padrão IEEE 802.15.4 (CSMA)

seja, as simulações de número 1 e 1001 terão as mesmas propriedades do vento, porém com o parâmetro do algoritmo de mudança de rota do VANT diferente. Na Tabela 4.2 são mostrados exemplos de simulações e seus parâmetros.

Tabela 4.2: Tabela de simulações e seus parâmetros utilizados no primeiro experimento. Os parâmetros velocidade e direção do vento são gerados aleatoriamente, e são testados com e sem o uso do algoritmo de mudança de rota do VANT.

Experimento	Velocidade do vento	Direção do vento	Algoritmo de mudança de rota
E_1	v_1	a_1	Não
E_2	v_2	a_2	Não
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
E_{1000}	v_{1000}	a_{1000}	Não
E_{1001}	v_1	a_1	Sim
E_{1002}	v_2	a_2	Sim
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
E_{2000}	v_{1000}	a_{1000}	Sim

Ao final de cada simulação, é analisada a porcentagem de defensivos químicos que foi aplicada dentro do campo agrícola.

4.2.2 Análise dos Resultados

Após a realização dos 2000 experimentos, os resultados foram extraídos de arquivos de *log* por *scripts* desenvolvidos pelo aluno em linguagem Bash¹, Perl² e R³. Esses resultados foram

¹<http://www.gnu.org/software/bash/>

²<http://www.perl.org/>

³<http://www.r-project.org/>

agrupados e são mostrados no gráfico da Figura 4.2, onde o eixo x é a porcentagem de defensivos químicos que foram aplicadas dentro do campo agrícola, ou seja, quanto maior esse valor, melhor. O gráfico foi gerado pela técnica *boxplot* pois, com ela é possível visualizar diversas informações, como mediana e dispersão dos resultados.

Para melhor entendimento dos resultados, o gráfico do *boxplot* será rapidamente explicado: os resultados são distribuídos em diferentes partes, sendo que 50% deles fica dentro da caixa, 25% na reta à esquerda da caixa e outros 25% na reta à direita da caixa. A barra interna da caixa sinaliza a mediana. Os pontos são os *outliers*, ou seja, pontos que se distanciam demais dos outros.

Figura 4.2: Gráfico de *boxplot* com os resultados de porcentagem de defensivos químicos aplicados dentro do campo agrícola obtidos com o sistema proposto e com o sistema tradicional.

Analisando o gráfico, é possível identificar que os resultados do sistema proposto (que utiliza o algoritmo de mudança de rota do VANT) teve menor dispersão comparado com o sistema tradicional. Isso mostra que o sistema proposto gera resultados mais estáveis. Além disso, os seus resultados também são melhores, pois a mediana obtida foi 90,54%, contra 78,47% do sistema tradicional.

Para comparar os resultados dos dois sistemas, os resultados foram avaliados estatisticamente. Primeiramente foi utilizado o teste *Shapiro-Wilk* para verificar se as distribuições dos resultados respeitavam a distribuição normal. Como é mostrado na Tabela 4.3, o valor obtido para esse teste foi $p = 0,00 < 0,05$, ou seja, as distribuições dos resultados não são normais. Em seguida, foi realizado um teste para verificar se os resultados dos dois sistemas diferem estatisticamente. Como as distribuições dos resultados não são normais, foi utilizado o teste *Mann-Whitney-Wilcoxon*. O resultado desse teste foi $p = 0,00 < 0,05$, ou seja, foi comprovado que os resultados realmente diferem.

Para exemplificar o ganho na eficiência da pulverização agrícola ao utilizar o sistema proposto, foi escolhido o pior resultado das simulações desse experimento e, então, foi gerado um gráfico da distribuição de defensivos químicos no final da simulação. Esse resultado é mostrado na Figura 4.3(a), onde as cores variam de branco ao azul, sendo a cor azul escuro a maior concentração de defensivos químicos distribuídos no campo agrícola, este simbolizado por um retângulo com borda preta. Essa simulação usou como parâmetros de velocidade e direção do vento 6,65 m/s e 72° respectivamente, não utilizava o algoritmo de mudança de rota do VANT, e obteve apenas 35,66% dos defensivos químicos aplicados dentro do campo agrícola. O mesmo cenário foi executado utilizando o algoritmo de mudança de rota do VANT, resultando em 77,83% de defensivos químicos aplicados dentro do campo agrícola, mostrado na Figura 4.3(b). Nesse caso, houve um ganho de 118,25%.

Figura 4.3: Representações gráficas da distribuição de defensivos químicos ao fim das simulações, utilizando velocidade e direção do vento 6,65 m/s e 72° respectivamente. A área simbolizada com uma borda preta é o campo agrícola que devia ser pulverizado. No primeiro caso não foi utilizado o algoritmo para mudança de rota, e apenas 35,66% dos defensivos químicos foram aplicados corretamente. Já no segundo caso, usando o algoritmo de mudança de rota, foram aplicados 77,83% de defensivos químicos dentro do campo agrícola, um ganho de 118,25%.

Tabela 4.3: Resultados do terceiro experimento. A mediana dos resultados com o algoritmo de mudança de rota do VANT é 16,22% maior que a mediana da aplicação sem o uso do algoritmo. E, como o resultado do *shapiro.test* foi menor que 0,05, as distribuições não são normais.

Sistema	Mediana	Média	<i>shapiro.test</i>
Tradicional	78,47%	75,96%	0,00
Proposto	90,50%	90,42%	0,00

4.2.3 Considerações Finais

A partir dos resultados obtidos nesse experimento, foi verificado que utilizando o sistema proposto por este trabalho de mestrado são obtidos resultados mais estáveis e melhores que pelo sistema tradicional de pulverização agrícola. A eficiência do sistema proposto obtida nesse experimento foi 90,42%, em média, contra 75,96% do sistema tradicional.

4.3 Experimento 2

Nessa seção é detalhado o segundo experimento, que tem como propósito avaliar o desempenho de diferentes protocolos de comunicação utilizados pelo VANT e pelos nós sensores sem fio. Essa avaliação é importante pois os nós sensores sem fio tem reservas de energia limitada, e sabe-se que o componente que mais utiliza energia é o rádio. Portanto, para aumentar o tempo de vida da RSSF, a melhor prática é utilizar um protocolo de comunicação eficiente.

Simulações foram executadas em um cenário de um campo agrícola de 1 hectare com número variável de nós sensores sem fio (de 2 a 128 nós). O VANT percorrerá o campo, pulverizando defensivos químicos, e efetuando mensagens *broadcast* periódicas aos nós sensores. As métricas utilizadas para avaliar os protocolos de comunicação são (i) utilização de energia por nó sensor e (ii) taxa de mensagens transmitidas corretamente. Com isso, espera-se identificar protocolos de comunicação que utilizem pouca energia e consiga altas taxas de entrega, mesmo para grandes densidades de nós sensores sem fio por hectare.

Na próxima seção é detalhado o planejamento do experimento.

4.3.1 Planejamento do Experimento

O cenário utilizado nesse experimento é o mesmo que do experimento anterior: um campo agrícola de 1 hectare, com diversos nós sensores sem fio instalados no solo, que é percorrido e pulverizado por um VANT. Os parâmetros fixos desse cenário são detalhados na Tabela 4.4. Esses parâmetros foram adquiridos por meio de pesquisas, mostradas no Capítulo 3.

Os fatores que foram modificados durante o experimento, mostrados na Tabela 4.5, são três: protocolos de comunicação, do protocolo P_1 ao P_5 (descritos na Seção 3.5.5, e sumarizados na Tabela 4.6); número de nós sensores sem fio no campo, de 2 a 128 nós; e como estes são instalados, aleatoriamente ou de forma matricial. O número de nós foi limitado a 128 nós por questões de testes prévios, onde foi possível determinar que acima desse número, os resultados de taxa de mensagens recebidas não eram satisfatórios.

O planejamento de experimento realizado foi o fatorial completo, com 30 repetições por experimento, mudando a semente do PRNG em cada um deles. Com isso, foi obtido um total de 2100 experimentos. Os resultados desses experimentos foram tratados por meio de *scripts* desen-

Tabela 4.4: Fatores e níveis secundários utilizados no planejamento de experimentos.

Campo agrícola	
Tamanho	500m x 20m (1 hectare)
Número de nós sensores sem fio instalados	16
VANT	
Altura de voo	5m
Velocidade	30m/s
Aceleração	$0m/s^2$
Envergadura	14m
Frequência de mensagem de requisição	1s
Distância máxima do VANT aos nós (<i>query</i>)	50m
Nós sensores sem fio	
Tempo médio para leitura dos sensores	1s
Módulo de rádio	
Frequência	2,4GHz
Camada MAC	IEEE 802.15.4 (CSMA/CA)
Potência elétrica	3,3V
Corrente elétrica em modo <i>sleep</i>	0,000021mA
Corrente elétrica em modo de transmissão	18,8mA
Corrente elétrica em modo de recepção	17,4mA
Tamanho do cabeçalho (físico)	48bit

Tabela 4.5: Fatores e níveis primários utilizados no planejamento de experimentos.

Fator	Níveis
A – Protocolo de comunicação	P_1, P_2, P_3, P_4, P_5
B – Número de nós	2, 4, 8, 16, 32, 64, 128
C – Disposição dos nós	Aleatória, Matricial

volvidos com as linguagens Bash⁴, Perl⁵ e R⁶. A análise dos resultados são discutidos na próxima seção.

⁴<http://www.gnu.org/software/bash/>

⁵<http://www.perl.org/>

⁶<http://www.r-project.org/>

Tabela 4.6: Propriedades dos protocolos desenvolvidos.

Protocolo	Número de estágios	Utiliza <i>query</i>	Escalonamento
P_1	1	Não	Nenhum
P_2	1	Sim	Nenhum
P_3	2	Não	Rádio ligado/desligado
P_4	2	Sim	Rádio ligado/desligado
P_5	2	Não	Agendamento de trabalho

4.3.2 Análise dos Resultados

O primeiro resultado, taxa de mensagens transmitidas com sucesso, é mostrado no gráfico da Figura 4.4. O eixo x é a quantidade de nós sensores sem fio (distribuídos aleatoriamente pelo campo agrícola), que varia de 2 a 128; o eixo y é a taxa de mensagens respondidas com sucesso; e as retas são os protocolos P_1 ao P_5 . Até 8 nós, todos os protocolos tem uma taxa de mensagens transmitidas superior a 90%, porém conforme o número de nós aumenta, alguns protocolos tendem a ter seu desempenho drasticamente reduzido, como os protocolos P_1 e P_3 . Os protocolos P_2 e P_4 , que são respectivamente as implementações de P_1 e P_3 com *queries*, obtiveram melhores resultados. Esses protocolos limitam a distância máxima entre o VANT e os nós sensores em suas *queries*, fazendo com que menos nós sensores respondam à requisição do VANT, consequentemente aumentam o número de mensagens respondidas com sucesso. O último protocolo, P_5 , obteve um ótimo resultado, porém muito parecido ao protocolo P_4 .

Uma observação interessante é relacionado à baixa taxa de mensagens respondidas dos protocolos P_3 ao P_5 com poucos nós sensores (até 8 nós). Isso ocorreu porque o primeiro estágio desses protocolos é a sincronização dos nós para que o segundo estágio funcione corretamente. Com poucos nós a rede fica desconexa, proibindo que as informações de sincronização sejam distribuídas por toda a rede. Por isso, muitos dos gráficos que serão apresentados nessa seção tem resultados ruins dos protocolos P_3 ao P_5 com baixo número de nós.

Comparando os resultados dos protocolos P_1 e P_2 na situação em que existem 128 nós na rede, o protocolo P_1 obteve um resultado aproximado de 20% de mensagens respondidas com sucesso, enquanto que com o protocolo P_2 obteve um resultado de aproximadamente 70%. Como a diferença dos resultados foi muito grande, foi necessário estudar o que causou essa baixa taxa de mensagens respondidas com sucesso. Notou-se que o número de mensagens colididas foi bem mais alta utilizando P_1 que P_2 . E, pelo funcionamento do CSMA, quando há colisões, o mecanismo de *backoff* exponencial binário entra em ação. Como foi explicado na seção 2.2.2, essa técnica faz com que os nós esperem por um tempo aleatório, baseado nos valores de uma janela de contenção, antes de transmitir. No entanto, se as mensagens dos nós continuarem a colidir sequencialmente, a janela de contenção aumentará exponencialmente, ou seja, o tempo de *backoff* pode ficar muito alto (na média), até o momento que as mensagens são descartadas (ou no caso da aplicação, o VANT, por estar constantemente se movimentando, pode ficar indisponível para o nó). No gráfico da Figura 4.5 é possível visualizar a quantidade de ocorrências de *backoffs* nas simulações utilizando pelos diferentes protocolos. Os protocolos P_1 e P_3 tiveram altos índices de *backoff*, seguido pelos protocolos P_2 , P_4 e P_5 .

Foi realizado um estudo da correlação existente do número de ocorrências de *backoffs* com a taxa de mensagens corretamente entregues por protocolo. O valor obtido desse estudo foi de aproximadamente -0,95, indicando que esses dados tem alto grau de anti-correlação. Inclusive, essa relação pode ser visualizada nos gráficos das Figuras 4.4 e 4.5, quanto maior o número de *backoff*, menor a taxa de mensagens transmitas com sucesso.

Figura 4.4: Gráfico da taxa de mensagens respondidas com sucesso, utilizando os protocolos P_1 ao P_5 com 2 a 128 nós instalados aleatoriamente pelo campo agrícola.

O segundo resultado, uso de energia por nó sensor sem fio, é mostrado na Figura 4.6. O eixo x é a quantidade de nós (distribuídos aleatoriamente pelo campo agrícola), que varia de 2 a 128; o eixo y é o uso de energia por nó; e as retas são os protocolos P_1 ao P_5 . Os protocolos P_1 e P_2 tiveram o maior gasto energético, já que não fazem o controle do uso dos rádios nos nós sensores. Seguido deles, o protocolo P_3 usa aproximadamente 4,68 vezes menos bateria que o protocolo P_1 . O protocolo P_4 , que é a implementação do P_3 com *queries*, utilizou aproximadamente 2,14 vezes menos bateria que o P_3 e aproximadamente 10 vezes menos bateria que o P_1 . Isso ocorreu porque os nós sensores sem fio que utilizaram o protocolo P_4 , ao receberem a requisição do VANT, calculam sua distância para ele, e caso seja maior que distância máxima, desligam seu rádio, como é mostrado no esquema da Figura 3.18. O último protocolo, P_5 , foi o protocolo que menos utilizou

Figura 4.5: Quantidade de *backoffs* nos experimentos com 128 nós. O protocolo P_2 , que é a implementação do P_1 com uso de *queries*, obteve aproximadamente cinco vezes menos *backoffs*. Assim como o protocolo P_4 , implementação do protocolo P_3 com uso de *queries*, obteve um resultado 6,5 vezes menor.

bateria, utilizando aproximadamente metade da energia utilizada pelo segundo melhor protocolo, o P_4 , e consumiu até 20 vezes menos que o protocolo P_1 .

Os resultados que se referem à taxa de mensagens transmitidas com sucesso e uso de bateria por nó em redes distribuídas matricialmente não serão apresentados, pois tiveram o mesmo comportamento que os resultados já mostrados.

4.3.3 Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos do experimento 2, os protocolos P_4 e P_5 foram os melhores protocolos, pois fizeram com que os nós sensores sem fio utilizassem pouca energia, e tiveram altas taxas de mensagens transmitidas com sucesso. Esses resultados se afirmaram até mesmo com altas densidades de nós sensores sem fio por hectare. Porém, ambos são sensíveis a redes desconexas, ou seja, eles não funcionam corretamente caso todos os nós da rede não estejam conectados.

Embora o protocolo P_5 tenha conseguido os melhores resultados dentre os protocolos avaliados, ele é muito sensível às informações de sincronização. Conforme foi explicado na Seção 3.5.5, para a sincronização da rede, são disponibilizadas informações como velocidade e posição do VANT. Essas informações carecem de precisão, pois a velocidade e posição do VANT são adquiridas por meio de um módulo de GPS, que podem ter erros de acurácia de vários metros. Como as simulações não consideraram esse erro, o protocolo funcionou corretamente.

Em síntese, os protocolos P_4 e P_5 obtiveram os melhores resultados, mas, devido aos defeitos que podem ocorrer com o protocolo P_5 , o protocolo P_4 é o mais adequado ao projeto.

Figura 4.6: Gráfico do uso de bateria por nó sensor sem fio, utilizando os protocolos P_1 ao P_5 com 2 a 128 nós instalados aleatoriamente pelo campo agrícola.

4.4 Contribuições Científicas

Nessa seção serão listadas as contribuições científicas realizadas pelo aluno durante o mestrado.

Os seguintes artigos foram publicados:

- Costa, F.; Braun, T.; Ueyama, J.; Pessin, G.; Osório, F.; Vargas, P. The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor network in agricultural applications. *32nd IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2012)*, p. 5045-5048, 2012.

- Pessin, G.; Osório, F.; Souza, J.; Costa, F.; Ueyama, J.; Wolf, D.; Braun, T.; Vargas, P. Evolving an indoor robotic localization system based on wireless networks. *13th International Conference on Engineering Applications of Neural Networks*, p. 1-10, 2012.
- Costa, F.; Braun, T.; Ueyama, J.; Pessin, G.; Osório, F. Arquitetura baseada em veículos aéreos não tripulados e redes de sensores sem fio para aplicações agrícolas. *VIII Congresso Brasileiro de Agroinformática (SBIAgro 2011)*, p. 1-5, 2011.

O seguinte artigo foi submetido, porém ainda não foi obtida resposta:

- Santos, I.; Costa, F.; Cugnasca, C.; Ueyama, J.; Pesticide drift control using wireless sensor networks. *Precision Agriculture – An International Journal on Advances in Precision Agriculture*, 2012.

O aluno participou dos seguintes eventos:

- *32nd IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2012)*, São Carlos – SP, 2012.
- *II Brazilian Conference on Critical Embedded Systems (CBSec 2012)*, Campinas – SP, 2012.
- *VIII Congresso Brasileiro de Agroinformática (SBIAgro 2011)*, Bento Gonçalves – RS, 2011.

Foram realizadas as seguintes apresentações de trabalho:

- Costa, F. Uso de VANTs e RSSF para aplicações agrícolas. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – Brasil, 2012.
- Costa, F. The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor networks in agricultural applications. University of Bern, Berne – Suíça, 2012.
- Costa, F.; Ueyama, J.; Braun, T.; Pessin, G.; Osorio, F.; Vargas, P. The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor networks in agricultural applications. IEEE IGARSS, Munique – Alemanha, 2012.
- Costa, F.; Braun, T.; Ueyama, J.; Pessin, G.; Osório, F. Arquitetura baseada em veículos aéreos não tripulados e redes de sensores sem fio para aplicações agrícolas. SBIAgro 2011, Bento Gonçalves – Brasil, 2011.
- Costa, F. Uso de VANTs e RSSF para Aplicações Agrícolas. Universidade de São Paulo, São Carlos – Brasil, 2011.

Publicações nos meios de comunicação:

- Pesquisadores da USP testam veículos aéreos não tripulados na agricultura. *Globo Rural*, 5 de outubro de 2012.

- Aplicação de Vant na agricultura será apresentada em evento internacional. CNPq, 22 de junho de 2012.
- Artigo do INCT-SEC sobre aplicação de VANT na agricultura será apresentado em evento internacional. USP, 20 de junho de 2012.
- INCT-SEC's article on the application of UAVs in agriculture will be presented at an international event. INCT-SEC, junho de 2012.

4.5 Considerações Finais

Nesse Capítulo foram apresentados os experimentos realizados, descrevendo o planejamento de cada um e seus objetivos. Por meio da análise dos resultados obtidos no primeiro experimento, é possível concluir que o sistema proposto neste projeto de mestrado consegue aumentar, em média, 16% a quantidade de defensivos químicos aplicados dentro do campo agrícola. Além disso, utilizando o algoritmo de mudança de rota do VANT é possível obter resultados mais estáveis.

No contexto de protocolos de comunicação de RSSF, foram testados cinco diferentes protocolos avaliando a taxa de mensagens transmitidas corretamente e a quantidade de energia utilizada por nó sensor sem fio. O protocolo mais adequado para o projeto conseguiu reduzir em mais de 10 vezes a quantidade de energia utilizada para que o VANT e os nós sensores se comunicassem. E ainda, esse protocolo de comunicação consegue obter altas taxas de transmissão de mensagens com sucesso, mesmo com altas densidades de nós sensores sem fio por hectare.

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Este documento descreveu um trabalho de mestrado que propõe a integração de um VANT com uma RSSF, com vista a prover um modelo eficiente e seguro para aplicação de defensivos químicos em campos agrícolas. O VANT é responsável por pulverizar defensivos químicos no campo. Os nós sensores sem fio são instalados por todo o território do campo, e são equipados com sensores capazes de detectar a concentração de defensivos químicos. Periodicamente, o VANT envia uma mensagem de requisição de informações aos nós sensores sem fio, que transmitem a informação de concentração defensivos químicos lido pelos seus sensores e suas posições GPS. Com isso, o VANT consegue mapear a aplicação de defensivos químicos mesmo com a influência do vento. Caso o VANT detecte que os defensivos químicos estejam sendo aplicados fora da área delimitada, sua rota é modificada, diminuindo assim a contaminação de áreas vizinhas do campo agrícola.

O sistema proposto foi desenvolvido no simulador OMNeT++ utilizando o *framework* MiXiM. Dois experimentos foram realizados, sendo o primeiro com o objetivo de verificar a eficiência do sistema proposto, comparando seus resultados com o sistema tradicional de pulverização agrícola; e o segundo experimento com o objetivo de avaliar diferentes protocolos de comunicação desenvolvidos com base no padrão IEEE 802.15.4 a fim de obter um protocolo com baixo uso de energia e, mesmo assim, provendo altas taxas de mensagens corretamente entregues.

Por meio da análise dos resultados do primeiro experimento foi obtido maior controle na pulverização agrícola com o sistema proposto, aumentando a eficiência desse processo em 16,22%, em média. Em casos extremos de velocidade e direção do vento, foi possível corrigir a pulverização

agrícola, conseguindo aplicar até 118,25% mais defensivos químicos no campo agrícola que pelo sistema tradicional.

Os resultados obtidos no segundo experimento mostram o uso de energia média pelos nós sensores sem fio e a taxa de mensagens corretamente entregues ao VANT. Pela análise desses resultados, foi encontrado um protocolo de comunicação que atende aos requisitos do sistema.

Durante o desenvolvimento do trabalho, o aluno teve três artigos aceitos em eventos, sendo dois em eventos internacionais. O aluno esteve presente em três eventos, sendo que apresentou seu trabalho em dois deles, no SBIAgro 2011, em Bento Gonçalves – RS, e no IGARSS 2012, Munique – Alemanha. Além disso, o aluno fez a apresentação do trabalho em diferentes universidades, inclusive na Universidade de Berne, Berne – Suíça.

Sumarizando, por meio desse trabalho de mestrado foram geradas as seguintes contribuições: i) especificação do VANT e dos nós sensores sem fio para a realização do sistema; ii) especificação do protocolo de comunicação utilizado; iii) algoritmo de mudança de rota desenvolvido para o VANT; iv) resultados obtidos em diferentes cenários; v) divulgação do trabalho no meio científico.

Visto que durante o processo de desenvolvimento do trabalho várias ideias foram discutidas, porém muitas delas não foram realizadas por falta de tempo ou por saírem do escopo do trabalho, a próxima seção tem como objetivo apresentar os trabalhos futuros.

5.2 Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas ideias para a continuação do trabalho:

- Desenvolver um algoritmo de mudança de rota para o VANT que possibilite o uso de RSSF organizadas de modo aleatório, pois o algoritmo atual funciona apenas se os nós sensores estiverem organizados matricialmente;
- Avaliar a realidade do modelo de dispersão desenvolvido pelo aluno de iniciação científica Fernando Candiani. Se este modelo se mostrar melhor que o modelo balístico, desenvolvê-lo no módulo do campo agrícola para gerar resultados mais realísticos dos experimentos;
- Realizar *testbed* do sistema com um pequeno VANT e nós sensores sem fio;
- Utilizar protocolos de comunicação que utilizem a técnica de *cluster heads*, visando diminuir ainda mais a quantidade de energia utilizada na RSSF;
- Por meio do modelo de dispersão desenvolvido, este poderia ser utilizado como um modelo de previsão de partículas no VANT. O VANT, obtendo informações de umidade, temperatura e principalmente velocidade e direção do vento pelos nós sensores sem fio, poderia utilizar o modelo de dispersão para calcular onde as partículas irão ser depositadas. Com isso, o VANT poderia efetuar a mudança de rota para evitar que essas partículas sejam aplicadas em locais indevidos, deixando a aplicação de defensivos químicos mais segura.

Referências

Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989. 1989.

Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7802.htm

Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. 1998.

Disponível em: www.ibama.gov.br/fauna/legislacao/lei_9605_98.pdf

Norma regulamentadora de segurança e saúde no trabalho na agricultura, pecuária silvicultura, exploração florestal e aquicultura. 2005.

Disponível em: <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr31.htm>

Strategic approach to international chemicals management. 2006.

Disponível em: <http://www.fao.org/ag/agp/agpp/pesticid/Code/Download/SAICMdeclaration.pdf>

AKYILDIZ, I. F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, v. 38, n. 4, p. 393 – 422, 2002.

AKYILDIZ, I. F.; VURAN, M. C. *Wireless sensor networks*. Wiley, 2010.

ANDEF Manual de tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários. 2010.

Disponível em: http://www.undef.com.br/manuais/arquivos/Manual_Tecnologia.pdf

ANTUNIASSI, U. R.; BOLLER, W. *Tecnologia de aplicação para culturas anuais*. 2011.

BASHA, E.; RAVELA, S.; RUS, D. Model-based monitoring for early warning flood detection. In: *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*, ACM, 2008, p. 295–308.

- BECKWITH, R.; TEIBEL, D.; BOWEN, P. Report from the field: results from an agricultural wireless sensor network. In: *Local Computer Networks, 2004. 29th Annual IEEE International Conference on*, IEEE, 2004, p. 471–478.
- BERNI, J.; ZARCO-TEJADA, P.; SUÁREZ, L.; FERERES, E. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, v. 47, n. 3, p. 722–738, 2009.
- BIRD, S.; PERRY, S.; RAY, S.; TESKE, M. Evaluation of the agdisp aerial spray algorithms in the agdrift model. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 21, n. 3, p. 672–681, 2002.
- BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture*, v. 5, n. 4, p. 359–387, 2004.
- Co., Y. M. Yamaha autonomous-flight unmanned helicopter deployed for observation illegal dumping around mt. fuji. 2002.
Disponível em: <http://www.yamaha-motor.co.jp/global/news/2002/02/06/sky.html>
- COLESANTI, U. M.; CROCIANI, C.; VITALETTI, A. On the accuracy of omnet++ in the wireless sensornetworks domain: simulation vs. testbed. In: *Proceedings of the 4th ACM workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, 2007.
- COOPER, J.; DOBSON, H. The benefits of pesticides to mankind and the environment. *Crop Protection*, v. 26, n. 9, p. 1337 – 1348, 2007.
- DEMPSEY, M. Us army unmanned aircraft systems roadmap 2010–2035. *Federation Of American Scientists*, 2010.
- ERMAN, A.; HOESEL, L.; HAVINGA, P.; WU, J. Enabling mobility in heterogeneous wireless sensor networks cooperating with uavs for mission-critical management. *Wireless Communications, IEEE*, v. 15, n. 6, p. 38 –46, 2008.
- FAIRCHILD, D. Soil information system for farming by kind of soil. In: *Proceedings of an International Interactive Workshop on Soil Resources: Their Inventory and Interpretation for Use in the 1990's. March*, 1988, p. 24.
- GE, Y.; THOMASSON, J.; SUI, R. Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. *Frontiers of Earth Science*, p. 1–10, 2011.
- GORTNEY, W. E. Us department of defense dictionary of military and associated terms. *Federation Of American Scientists*, 2010.
- HALKES, G. P.; DAM, T.; LANGENDOEN, K. G. Comparing energy-saving mac protocols for wireless sensor networks. *Mob. Netw. Appl.*, v. 10, p. 783–791, 2005.

- HERWITZ, S.; LEUNG, J.; HIGGINS, R.; DUNAGAN, S. Remote command-and-control of imaging payloads using commercial off-the-shelf technology. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS'02. 2002 IEEE International*, IEEE, 2002, p. 2726–2728.
- HUANG, Y.; HOFFMANN, W. C.; LAN, Y.; WU, W.; FRITZ, B. K. *Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform*. Relatório Técnico, DTIC Document, 2008.
- IEEE *IEEE standard 802.15.4*. 2003.
- JACKSON, R.; REGINATO, R.; IDSO, S. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, v. 13, n. 3, p. 651–656, 1977.
- JOHNSON, C.; SCHAFER, R.; YOUNG, S. Controlling agricultural machinery intelligently. 1984.
- JUANG, P.; OKI, H.; WANG, Y.; MARTONOSI, M.; PEH, L.; RUBENSTEIN, D. Energy-efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with zebrantet. In: *ACM Sigplan Notices*, ACM, 2002, p. 96–107.
- LAGUARDA-MIRO, N.; FERREIRA, F.; GARCÍA-BREIJO, E.; IBÁÑEZ-CIVERA, J.; GIL-SÁNCHEZ, L.; GARRIGUES-BAIXAULI, J. Glyphosate detection by voltammetric techniques. a comparison between statistical methods and an artificial neural network. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012.
- MADDEN, S.; FRANKLIN, M.; HELLERSTEIN, J.; HONG, W. Tinydb: an acquisitional query processing system for sensor networks. *ACM Transactions on Database Systems (TODS)*, v. 30, n. 1, p. 122–173, 2005.
- MALLANDRA, C.; SURI, A.; KUNCHAKARRA, V.; IYENGAR, S.; KANNA, R.; DURRESI, A. *Simulating wireless sensor networks with omnet++*. Relatório Técnico, Sensor Network Research Group, Department of Computer Science, Louisiana State University, Baton Rouge, LA, 2005.
- MILLER, P. Patch spraying: future role of electronics in limiting pesticide use. *Pest management science*, v. 59, n. 5, p. 566–574, 2003.
- MORAES, M. R.; MALISKA, C. R. *Implementação de um sistema de modelos para a qualidade do ar*. Relatório Técnico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- NEIVA Neiva institucional. 2012.
Disponível em: <http://www.aeroneiva.com.br/>
- NEWCOME, L. R. *Unmanned aviation: a brief history of unmanned aerial vehicles*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.

- NICULESCU, D. Communication paradigms for sensor networks. *Communications Magazine, IEEE*, v. 43, n. 3, p. 116 – 122, 2005.
- NIELINGER, J.; HANS-CHRISTIAN HÖFL, R. R.; KOST, W.-J. Lagrange versus eulerian dispersion modeling comparison for investigations concerning air pollution caused by traffic. *Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, 2004.
- NIJDAM, J. J.; GUO, B.; FLETCHER, D. F.; LANGRISH, T. A. *Lagrangian and eulerian models for simulating turbulent dispersion and coalescence of droplets within a spray*. Relatório Técnico, Department of Chemical Engineering, University of Sydney, Australia, 2006.
- NORTHROP GRUMMAN Mq-5b hunter – next generation tactical unmanned aerial system. 2006.
- OLLERO, A.; BERNARD, M.; LA CIVITA, M.; HOESEL, L.; MARRON, P.; LEPLEY, J.; ANDRES, E. Aware: Platform for autonomous self-deploying and operation of wireless sensor-actuator networks cooperating with unmanned aerial vehicles. In: *Safety, Security and Rescue Robotics, 2007. SSR 2007. IEEE International Workshop on*, IEEE, 2007, p. 1–6.
- PIMENTEL, D.; ACQUAY, H.; BILTONEN, M.; RICE, P.; SILVA, M.; NELSON, J.; LIPNER, V.; GIORDANO, S.; HOROWITZ, A.; D'AMORE, M. Environmental and economic costs of pesticide use. *BioScience*, v. 42, n. 10, p. 750–760, 1992.
- POLASTRE, J.; HILL, J.; CULLER, D. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, ACM, 2004, p. 95–107.
- RHEE, I.; WARRIER, A.; AIA, M.; MIN, J.; SICHITIU, M. Z-mac: a hybrid mac for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, v. 16, n. 3, p. 511–524, 2008.
- SHAH, R. C.; ROY, S.; JAIN, S.; BRUNETTE, W. Data mules: Modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks. *Ad Hoc Networks*, v. 1, n. 2, p. 215–233, 2003.
- SOHRABI, K.; GAO, J.; AILAWADHI, V.; POTTIE, G. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *Personal Communications, IEEE*, v. 7, n. 5, p. 16–27, 2000.
- STAFFORD, J. Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 76, n. 3, p. 267–275, 2000.
- STOHL, A.; FORSTER, C.; FRANK, A.; SEIBERT, P.; ; WOTAWA, G. Technical note: The lagrangian particle dispersion model flexpart version 6.2. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005.
- SUGIHARA, R.; GUPTA, R. Optimal speed control of mobile node for data collection in sensor networks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, v. 9, n. 1, p. 127–139, 2010.

- SUGIURA, R.; NOGUCHI, N.; ISHII, K. Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter. *Biosystems engineering*, v. 90, n. 4, p. 369–379, 2005.
- TEACH, T. L. Agricultural aircraft control system using the global positioning system. 1994. Disponível em: <http://www.google.com.br/patents/US5334987.pdf>
- TESLA, N. Method of and apparatus for controlling mechanism of moving vessels or vehicles. US Patent 613,809, 1898.
- TEXAS INSTRUMENTS CC2420 Data Sheet. 2012. Disponível em: www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf
- VALENT U.S.A. CORPORATION DANITOL 2.4 EC Spray Specifications. 2000.
- VALENTE, J.; SANZ, D.; BARRIENTOS, A.; CERRO, J.; RIBEIRO, Á.; ROSSI, C. An air-ground wireless sensor network for crop monitoring. *Sensors*, v. 11, n. 6, p. 6088–6108, 2011.
- VARGA, A. Omnet++. In: WEHRLE, K.; GÜNES, M.; GROSS, J., eds. *Modeling and Tools for Network Simulation*, Springer Berlin Heidelberg, p. 35–59, 2010.
- VARGA, A. *Omnet++: User manual version 4.2*. 2011. Disponível em: www.omnetpp.org/doc/omnetpp/Manual.pdf
- WARNEKE, B.; LAST, M.; LIEBOWITZ, B.; PISTER, K. Smart dust: communicating with a cubic-millimeter computer. *Computer*, v. 34, n. 1, p. 44–51, 2001.
- WEISENBURGER, D. D. Human health effects of agrichemical use. *Human Pathology*, v. 24, n. 6, p. 571–576, 1993.
- WERNER-ALLEN, G.; LORINCZ, K.; RUIZ, M.; MARCILLO, O.; JOHNSON, J.; LEES, J.; WELSH, M. Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *Internet Computing, IEEE*, v. 10, n. 2, p. 18–25, 2006.
- YAO, Y.; GEHRKE, J. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks. *SIGMOD record*, v. 31, n. 3, p. 9–18, 2002.