IVAIRTON MONTEIRO SANTOS

**Protocolo de roteamento de dados para redes de sensores sem fio
com nó coletor móvel para controle da deriva em
pulverização agrícola**

São Paulo

2013

IVAIRTON MONTEIRO SANTOS

**Protocolo de roteamento de dados para redes de sensores sem fio com nó
coletor móvel para controle da deriva em pulverização agrícola**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Cugnasca

São Paulo

2013

IVAIRTON MONTEIRO SANTOS

**Protocolo de roteamento de dados para redes de sensores sem fio com nó
coletor móvel para controle da deriva em pulverização agrícola**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Engenharia de
Computação

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Cugnasca

São Paulo

2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Ivairton Monteiro

Protocolo de roteamento de dados para redes de sensores sem fio com nó coletor móvel para controle da deriva em pulverização agrícola / I.M. Santos. -- São Paulo, 2013. 147 p.

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

1. Protocolos de comunicação 2. Computação móvel 3. Redes de computadores 4. Wireless 5. Agricultura de precisão I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II. t.

Este trabalho é dedicado aos meus pais Ivani M^a. de C. Monteiro (*in memoriam*), José Airton dos Santos e à minha amada esposa Fernanda Dalla Costa Silva.

AGRADECIMENTOS

O espaço para os agradecimentos certamente é um dos mais especiais neste trabalho, não somente pela licença poética, mas por expor que nenhum trabalho se faz sozinho e que muitas pessoas participam direta ou indiretamente dele.

Inicialmente, gostaria de agradecer a uma força oculta na natureza, a maioria se refere a ela como Deus (eu também). Acredito que de alguma forma inexplicável existe essa ‘energia’, que é capaz de inserir indeterminismos no nosso determinismo de todo dia, capaz de gerar mudanças misteriosas, sejam elas genéticas ou simplesmente na direção do vento. Mesmo não conseguindo explicá-la, pessoalmente entendo que ocorreu um conjunto de eventos que não são exclusivamente consequência de uma ação original, que permitiram eu chegar até aqui. Portanto, o meu obrigado.

Agradeço às organizações Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), que permitiu meu afastamento das atividades pedagógicas pelo período de dois anos e meio, para dedicar-me aos estudos. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) que por meio do financiamento de projeto de pesquisa e apoio ao programa DINTER, custeou algumas das viagens a São Paulo. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) que também apoiou o DINTER e proporcionou bolsas de estudo para o período que estive estudando em São Paulo. Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Sistemas Embarcados (INCT-Sec) que me acolheu e incentivou a participação em seus eventos, à Coordenação do DINTER e ao Colegiado do curso de Bacharelado em Ciência da Computação do Campus Universitário do Araguaia/UFMT, que sempre me apoiou na realização deste doutorado.

Vou aqui correr o risco de esquecer algum nome, mas não posso deixar de agradecer as pessoas que participaram desse longo processo de estudos, pesquisa, angústias e realizações.

Início por aqueles que representam o pilar fundamental de tudo. Aos meus pais, Ivani M. de C. Monteiro (*in memoriam*) e José Airton dos Santos, meu eterno e mais puro muito obrigado! Sem a dedicação e sacrifício por parte deles, provavelmente não teria chegado perto de realizar uma fração de tudo isso. À minha esposa e companheira de “guerra” Fernanda Dalla, parceira para toda e qualquer situação, meu muito obrigado pela paciência e entendimento. Obrigado pelo seu sacrifício e por dar a mim o seu amor, que é aquilo que me vale mais e me faz melhor. Meu obrigado também aos meus familiares que sempre estiveram na torcida pelo meu sucesso.

Ao meu orientador professor Doutor Carlos Eduardo Cugnasca, meu muito obrigado pelos ensinamentos, por suas orientações e amizade. O período em que trabalhamos juntos foi um período rico em aprendizado para mim.

Meu obrigado aos professores Dr. Antônio Saraiva, Dr. André Hirakawa, Dr. João Neto, Dr. Ricardo Rocha e professora Cristina Borba, a amizade e ensinamentos de vocês inspiraram e contribuíram de maneira ímpar durante toda essa jornada, tenham certeza que atitudes sem relevância para vocês, fizeram a diferença para mim em algum momento.

Aos técnicos do Laboratório de Automação Agrícola, Sra. Lourdes Keiko, Sr. Edson Souza e Sr. Souza Bitencourt, obrigado pelo carinho e disposição sempre latente.

Aos amigos do Laboratório de Automação Agrícola, Allan Kock, Wilian França, Luiz Lamardo, Marcelo Barros e Leonardo Campos, obrigado pela amizade, pela parceria (leia-se bagunça) na Sala do Café, ou no Rei das Batidas, e até por tentarem me levar para o “mau caminho”. Quem pensa que ‘conversa fora’ e piadas não ajudam no desenvolvimento de uma Tese está redondamente enganado.

Agradeço também aos colegas e amigos do DINTER, em especial aos sempre presentes Juliana Saragiotto, Mara Dota e Raul Teruel.

Finalmente, meu obrigado aos amigos e colegas no curso de Bacharelado em Ciência da Computação na UFMT, em especial os professores Linder Cândido, Livia Lopes, Maxwell Carmo e Ronaldo Alonso, que sempre estiveram atentos ao desenvolvimento do trabalho e na torcida pelo sucesso. Faço aqui um agradecimento em especial ao professor Dr. Linder Cândido, que foi um verdadeiro parceiro no desenvolvimento deste trabalho, com críticas e sugestões que sempre fizeram o trabalho dar um passo à frente.

A aqueles que não mencionei o nome, deixo meu sincero agradecimento, as letras no papel não são capazes de demonstrar o real sentimento de agradecimento que levo comigo, isso é o mais relevante.

Meu muito obrigado a todos!

Aprendi o silêncio com os faladores, a tolerância com os intolerantes, a bondade com os maldosos; e por estranho que pareça, sou grato a esses professores.

(Khalil Gibran)

RESUMO

A aplicação eficiente de agrotóxicos é um desafio na produção agrícola, mesmo considerando os avanços com a agricultura de precisão. O efeito deriva é o principal responsável pela ineficiência no controle das pragas ou doenças, pelo desperdício de recursos e pela contaminação ambiental. Para minimizar a deriva é essencial conhecer as condições ambientais como vento, temperatura e umidade. Esta pesquisa propõe o uso das redes de sensores sem fio como sistema de monitoramento ambiental e de suporte ao processo de pulverização agrícola, especialmente a pulverização executada por aeronave. São propostas três funcionalidades para o sistema: avaliação das condições ambientais, verificando se as condições estão apropriadas para a pulverização, buscando minimizar a ocorrência da deriva; suporte na definição e manutenção da rota do veículo pulverizador por meio dos dados do vento, de modo a efetuar ajustes na rota de pulverização e manter a aplicação do defensivo agrícola na área alvo; e a avaliação da eficácia da pulverização por meio dos dados da deposição do produto pulverizado coletados pela rede de sensores. Para viabilizar a utilização das redes de sensores sem fio no controle da deriva é proposto um protocolo de roteamento de dados que visa garantir a coleta dos dados pelos nós e a entrega para o veículo pulverizador, mesmo sendo ele um avião e se deslocando em alta velocidade. Para demonstrar a viabilidade do sistema proposto, foi desenvolvido um sistema de simulação computacional que considera os aspectos das redes de sensores sem fio e as características do protocolo de roteamento proposto. Os resultados demonstraram sua viabilidade, demonstrando que as redes de sensores sem fio podem ser utilizadas como suporte em um sistema de controle da deriva, incrementando a qualidade da pulverização, reduzindo custos e a contaminação ambiental.

Palavras-chave: Redes de sensores sem fio. Protocolo de roteamento de dados. Sistema embarcado. Simulação computacional. Pulverização agrícola. Deriva.

ABSTRACT

The efficient application of low cost pesticides is a challenge for agricultural production. Pesticide drift is the major cause of money loss, inefficiency in crop disease control, and environmental contamination in the crop spraying process. At the time of application, it is essential to know the environmental conditions, such as wind, temperature and humidity to minimize contamination by pesticide drift. This study proposes the use of wireless sensor networks in a support and control system for crop spraying, especially in aircraft application methods. Three system functionalities are proposed: In the first case, the sensor network evaluates environmental data at the time of application to notify the user if the environmental conditions are suitable for continuing with the application. The second case evaluates the wind speed and its direction to suggest corrections in the path of a spray vehicle. Due to this alteration in the vehicle path, the pesticide will be applied only in the appropriate area. The final case involves collecting data samples and analyzing the quality of the spraying operation by evaluating the deposition of pesticide over the crop. This work proposes a new routing data protocol to make possible the use of wireless sensor networks in aerial crop spraying. It ensures that the sensor node data will be delivered to the sink node. Through computer simulations, wireless sensor networks are shown to be useful in crop spraying to minimize and to control pesticide drift, to improve the quality of application, to reduce environmental contamination and to reduce costs and the duration of the application operation.

Keywords: Wireless sensor networks. Routing data protocol. Embedded system. Computational simulation. Crop spraying. Pesticide drift.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração dos tipos de deriva em um processo de pulverização agrícola.	19
Figura 2 - Forma das pontas nos bicos pulverizadores de jato “de impacto” e “leque” e padrão de deposição resultante.	22
Figura 3 - Exemplo de estrutura, <i>spray</i> resultante e padrão de deposição de uma ponta de jato cônico.	23
Figura 4 - Exemplo de pulverizador de barra autopropelido.	24
Figura 5 - Exemplo de turbo pulverizador axial.	25
Figura 6 - Foto de uma pulverização executada por aeronave.	28
Figura 7 - Arquitetura típica de um nó de uma RSSF.	35
Figura 8 - Roteamento de dados colaborativo por meio de uma infraestrutura com múltiplos sensores e um sorvedouro.	41
Figura 9 - Estrutura lógica do protocolo de roteamento TTDD.	47
Figura 10 - Organização hierárquica estabelecida pelo protocolo de roteamento LEACH.	48
Figura 11 - Organização da RSSF com o protocolo de roteamento de Fordor e Vidács e níveis de comunicação entre os nós.	50
Figura 12 - Estratégias de interceptação empregadas pelo algoritmo WHISPER. (a) Whisper Follow; (b) Whisper Inercept; (c) Whisper Shortest.	52
Figura 13 - Fluxograma do sistema de avaliação das condições ambientais.	55
Figura 14 - Exemplo de ajuste na rota de uma aeronave pulverizadora durante a aplicação de agrotóxico com base no monitoramento das condições ambientais executada pela RSSF.	56
Figura 15 - Organização em camadas do SSPA.	57
Figura 16 - Principais elementos da RSSF no contexto da pulverização agrícola.	58
Figura 17 - Organização e integração dos componentes computacionais do SSPA.	59

Figura 18 - Representação da rota do sorvedouro móvel na rede de sensores e seleção dos nós de referência.	63
Figura 19 - Associação dos nós aos nós CC e organização dos nós em <i>clusters</i>	64
Figura 20 - Roteamento de dados baseado na estratégia de interceptação.	66
Figura 21 - Ajuste na rota do sorvedouro móvel durante sua passagem e consequente reorganização da RSSF. (a) Representação da rota do sorvedouro e organização dos nós em <i>clusters</i> . (b) Ajuste na rota do sorvedouro e reorganização dos <i>clusters</i> subsequentes, com a possível redefinição do nó que irá entregar os dados ao sorvedouro.	67
Figura 22 - Exemplo de seleção de nó CC com base no critério do intervalo de tempo de comunicação com o sorvedouro. (a) O nó A CC selecionado pelo critério da distância informa seus vizinhos do seu intervalo. (b) O nó B tem intervalo melhor que A, então se auto elege nó CC e avisa seus vizinhos do valor do seu intervalo.	71
Figura 23 - Processo de definição dos nós CC. (a) Definição da coordenada P_{C1} e envio da mensagem de descoberta do nó CC para o nó vizinho mais próximo da coordenada P_{C1} . (b) Seleção do nó CC_1 , definição da coordenada para o próximo nó CC (P_{C2}) e envio da mensagem de descoberta do nó CC para o nó vizinho de CC_1 mais próximo da nova coordenada. (c) Configuração final, com os nós CC selecionados e a rota estabelecida do <i>gateway</i> até o último CC.	72
Figura 24 - Diagrama de sequência do processo de descoberta dos nós CC.	74
Figura 25 - Exemplo de formação de <i>clusters</i> . (a) O nó CC_1 recebe a mensagem de busca e propaga para seus vizinhos. (b) A mensagem de CC_1 está no segundo nível de propagação, enquanto que o nó CC_2 recebe e inicia a propagação da mensagem de busca para seus vizinhos. (c) A mensagem de CC_1 está no terceiro nível de propagação, enquanto que a mensagem de CC_2 está no segundo nível. Há a disputa pelos nós no limite dos <i>clusters</i> . (d) Configuração final dos <i>clusters</i>	77
Figura 26 - Diagrama de sequência da propagação da busca ampla e local.	78
Figura 27 - Envio da mensagem de aviso da chegada do sorvedouro móvel para a RSSF e cálculo do atraso acumulado no encaminhamento da mensagem.	82

Figura 28 - Descoberta dos pontos de intersecção entre a rota do sorvedouro móvel e o alcance de comunicação do nó CC.	82
Figura 29 - Diagrama de sequência do envio dos dados dos nós para os nós CC.....	85
Figura 30 - Mudança na rota do sorvedouro móvel e processamento na RSSF. Em (a) o sorvedouro segue sua rota prevista. Em (b) , ao receber os dados do nó CC1 o sorvedouro altera sua rota. Essa informação é enviada para o nó CC1 que encaminha para o nó CC2. O nó CC2 avalia a mudança de rota do sorvedouro e eleger um nó em melhor posição para entrega dos dados do <i>cluster</i>	87
Figura 31 - Diagrama de sequência dos processos de ajuste na rota do sorvedouro.	89
Figura 32 - Diagrama de estado dos nós.....	90
Figura 33 - Composição do módulo composto AirplaneNode.	96
Figura 34 - Composição do módulo composto GroundNode.	97
Figura 35 - Módulos do sistema de simulação e sua composição.	97
Figura 36 - Diagrama lógico de relacionamento entre os módulos desenvolvidos e suas ações no processo de simulação.	98
Figura 37 - Tela do simulador OMNet++ com a representação da área simulada, componentes, nós e sorvedouro móvel.	103
Figura 38 - Área simulada e corredor imaginário alvo da pulverização.	111

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Deslocamento das gotas para diferentes ângulos de incidência e velocidade do vento.	107
Gráfico 2 - <i>Fitting</i> do deslocamento das gotas com variação do ângulo de incidência do vento.	107
Gráfico 3 - Deslocamento das partículas variando os parâmetros de diâmetro da gota e o ângulo de incidência do vento.	108
Gráfico 4 - <i>Fitting</i> do deslocamento das partículas variando o diâmetro das gotas e ângulo de incidência do vento.	109
Gráfico 5 - Deslocamento das partículas variando a velocidade do vento e com perturbação na velocidade terminal de queda das partículas (eixo z).....	110
Gráfico 6 - Deslocamento das partículas em relação à área alvo com gotas de diâmetro de 200 μm e vento de 1 m/s. Em (a) tem-se a representação matricial da área com a concentração das partículas nas respectivas coordenadas onde atingiram o solo. Em (b) tem-se o histograma da queda das partículas normalizado, no qual o deslocamento com valor zero corresponde ao eixo central da área alvo da pulverização.	112
Gráfico 7 - Deslocamento das partículas em relação à área alvo com gotas de diâmetro de 200 μm e vento de 3 m/s. Em (a) tem-se a representação matricial da área com a concentração das partículas nas respectivas coordenadas onde atingiram o solo. Em (b) tem-se o histograma da queda das partículas normalizado.....	113
Gráfico 8 - Deslocamento das partículas em relação à área alvo com gotas de diâmetro de 200 μm e vento de 5 m/s. Em (a) tem-se a representação matricial da área com a concentração das partículas nas respectivas coordenadas onde atingiram o solo. Em (b) tem-se o histograma da queda das partículas normalizado.....	113
Gráfico 9 - Deslocamento das partículas em relação à área alvo com gotas de diâmetro de 100 μm e vento de 1 m/s. Em (a) tem-se a representação matricial da área com a concentração das partículas nas respectivas coordenadas onde atingiram o solo. Em (b) tem-se o histograma da queda das partículas normalizado.....	114

Gráfico 10 - Deslocamento das partículas em relação à área alvo com gotas de diâmetro de 100 µm e vento de 3 m/s. Em (a) tem-se a representação matricial da área com a concentração das partículas nas respectivas coordenadas onde atingiram o solo. Em (b) tem-se o histograma da queda das partículas normalizado.	115
Gráfico 11 - Deslocamento das partículas em relação à área alvo com gotas de diâmetro de 100 µm e vento de 5 m/s. Em (a) tem-se a representação matricial da área com a concentração das partículas nas respectivas coordenadas onde atingiram o solo. Em (b) tem-se o histograma da queda das partículas normalizado.	115
Gráfico 12 - Taxa de pulverização no corredor alvo para diferentes velocidades do vento e diâmetros de gota.	116
Gráfico 13 - Comparativo entre os protocolos de roteamento ProRDPuv e Flooding.	118
Gráfico 14 - Alcance de comunicação entre nós. Taxa de perda de pacotes com distância superior a 50 m.	119
Gráfico 15 – Interferência na comunicação entre dois nós.	119
Gráfico 16 - Taxa de sucesso na entrega de pacotes de dados com um conjunto de nós causando interferência e se aproximando gradativamente do sorvedouro.	120
Gráfico 17 - Taxa de sucesso na entrega de dados dos nós para os nós CC variando a quantidade de nós da rede (mesma densidade).	121
Gráfico 18 - Taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós para os nós CC variando a densidade da RSSF.	123
Gráfico 19 - Taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós para os nós CC variando o número de <i>clusters</i> da rede.	125
Gráfico 20 - Taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós para os nós CC variando o tamanho do pacote de dados.	126
Gráfico 21 - Taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós CC para o sorvedouro móvel, para redes com diferentes quantidades de nós CC.	127

Gráfico 22 - Taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós CC para o sorvedouro móvel no protocolo ProRDPuv e protocolo baseado em <i>flooding</i> variando a velocidade do sorvedouro.....	128
Gráfico 23 - Taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós CC para o sorvedouro móvel variando a altitude do sorvedouro.	130

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Classificação das nuvens de gotas de acordo com o diâmetro médio.....	17
Quadro 2 - Relação do tamanho ideal das gotas e o tipo de alvo da pulverização.....	17
Quadro 3 - Tempo de vida e distância de queda das gotas em relação ao seu diâmetro, sem ação do vento, e em diferentes condições de temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR).....	18
Quadro 4 - Relação do diâmetro das gotas e a distância da deriva, para uma altura de lançamento de 3 m e vento de 1,34 m/s.....	20
Tabela 1 - Relação entre a condição do vento e a recomendação para pulverização.	30

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 - Função de descoberta dos nós CC na camada de rede. Algoritmo invocado pela camada de aplicação.....	74
Algoritmo 2 - Função de descoberta dos nós CC na camada de rede. Algoritmo invocado pela camada física.	75
Algoritmo 3 - Propagação da busca ampla para os nós CC.....	79
Algoritmo 4 - Encaminhamento da busca local.....	79
Algoritmo 5 - Encaminhamento da mensagem de aviso da chegada do sorvedouro móvel. ...	83

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AP	Agricultura de Precisão
CAD	Conversor Analógico Digital
CC	Cabeça do <i>Cluster</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CPTECC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IP	<i>Internet Protocol</i>
LEACH	<i>Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
M-LEACH	<i>Mobile Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
ProRDPuv	Protocolo de Roteamento de Dados para Suporte à Pulverização Agrícola
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
SSPA	Sistema de Suporte à Pulverização Agrícola
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet protocol</i>
TTDD	<i>Two-Tier Data Dissemination</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
WHISPER	<i>Wireless High Speed Routing</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1 OBJETIVO	9
1.2 MOTIVAÇÃO	10
1.3 JUSTIFICATIVAS	10
1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE	12
2. PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA E O CONTROLE DA DERIVA.....	14
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA	15
2.2 EQUIPAMENTOS DE PULVERIZAÇÃO	20
2.2.1 Bico pulverizador	21
2.2.2 Pulverizador tratorizado de barras	23
2.2.3 Turbo pulverizador	24
2.2.4 Pulverização por aeronave	26
2.3 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS.....	28
2.4 DERIVA E SUAS CONSEQUÊNCIAS	30
2.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	32
3. FUNDAMENTOS DAS REDES DE SENSORES SEM FIO	33
3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS RSSF.....	34
3.2 APLICAÇÕES	37
3.3 DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO DAS RSSF.....	38
3.4 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO DE DADOS EM REDES DE SENSORES	40
3.5 MOBILIDADE EM RSSF	44
3.5.1 Protocolo de roteamento Two-Tier Data Dissemination.....	46
3.5.2 Protocolo de roteamento Mobile Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy.....	47
3.5.3 Protocolo de roteamento de Fordor e Vidács.....	49
3.5.4 Protocolo de roteamento WHISPER.....	51
3.6 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	52
4. REDES DE SENSORES SEM FIO EM SISTEMAS DE PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA: ARQUITETURA E PROTOCOLO DE ROTEAMENTO.....	54

4.1	FUNCIONALIDADES DO SISTEMA	54
4.1.1	<i>Funcionalidade da avaliação das condições ambientais.....</i>	54
4.1.2	<i>Funcionalidade do ajuste da rota de pulverização.....</i>	55
4.1.3	<i>Funcionalidade da avaliação da eficácia da pulverização .....</i>	56
4.2	ORGANIZAÇÃO DO SISTEMA	57
4.2.1	<i>Componente Aplicação Gateway .....</i>	59
4.2.2	<i>Componente Aplicação Sorvedouro Móvel.....</i>	60
4.2.3	<i>Componente Serviços Web.....</i>	61
4.3	CARACTERÍSTICAS DO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO DE DADOS COM SORVEDOURO MÓVEL PARA SUPORTE A SISTEMAS DE PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA	62
4.3.1	<i>Representação da rota do sorvedouro móvel na RSSF.....</i>	62
4.3.2	<i>Organização dos nós em clusters.....</i>	64
4.3.3	<i>Roteamento dos dados baseado na interceptação do sorvedouro móvel .....</i>	65
4.4	DESCRIÇÃO DO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO DE DADOS	68
4.4.1	<i>Preparação da RSSF.....</i>	69
4.4.1.1	<i>Redes com nós heterogêneos .....</i>	70
4.4.1.2	<i>Definição dos nós Cabeça de Cluster.....</i>	71
4.4.2	<i>Procedimento de busca de dados e formação dos clusters.....</i>	75
4.4.3	<i>Coleta de dados pelo sorvedouro.....</i>	80
4.4.3.1	<i>Entrada do sorvedouro móvel na área monitorada.....</i>	80
4.4.3.2	<i>Envio dos dados dos nós para os nós CC.....</i>	84
4.4.3.3	<i>Mudança na rota do sorvedouro móvel.....</i>	85
4.4.4	<i>Considerações gerais do protocolo de roteamento .....</i>	89
4.5	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	90
5.	METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	92
5.1	SIMULADOR OMNET++ E FRAMEWORK MiXiM.....	93
5.2	MODELAGEM DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO.....	94
5.2.1	<i>Simulação do vento .....</i>	98
5.2.2	<i>Simulação da dispersão das partículas.....</i>	99
5.3	CONTEXTO E PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO	100
5.4	INTERFACE DE SIMULAÇÃO	103
5.5	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	103

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	105
6.1 VALIDAÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO	106
6.2 EFICÁCIA NA PULVERIZAÇÃO	110
6.3 COMPARAÇÃO ENTRE O PROTOCOLO ProRDPuv E UM PROTOCOLO BASEADO EM FLOODING.....	117
6.4 ALCANCE DE COMUNICAÇÃO E INTERFERÊNCIA ENTRE OS NÓS	118
6.5 AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ESCALABILIDADE DA REDE	121
6.6 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO PROTOCOLO COM REDES DE DIFERENTES DENSIDADES	122
6.7 AVALIAÇÃO DO NÚMERO DE NÓS CABEÇA DE CLUSTER	124
6.8 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO TAMANHO DO PACOTE DE DADOS NA ENTREGA DOS DADOS.....	125
6.9 AVALIAÇÃO DA ENTREGA DE DADOS DOS NÓS CC PARA O SORVEDOURO COM DIFERENTES NÚMEROS DE CLUSTERS.	126
6.10 AVALIAÇÃO DA ENTREGA DE DADOS DOS NÓS CC PARA O SORVEDOURO VARIANDO SUA VELOCIDADE	127
6.11 AVALIAÇÃO DA ENTREGA DE DADOS DOS NÓS CC PARA O SORVEDOURO VARIANDO SUA ALTITUDE	129
6.12 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	130
7. CONCLUSÃO.....	134
7.1 CONTRIBUIÇÃO DA TESE	134
7.2 DESAFIOS FUTUROS	135
7.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	138
REFERÊNCIAS	139
APÊNDICE A – DOCUMENTAÇÃO DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO	147

1. INTRODUÇÃO

O uso indiscriminado dos recursos naturais tem causado contaminação ambiental e degradado a capacidade produtiva de culturas agrícolas. Entre os diversos avanços na agricultura, a Agricultura de Precisão (AP) é atualmente o principal conceito de gerenciamento de produção agrícola, que proporciona produtividade e uso racional dos recursos naturais para os diversos tipos de culturas. A AP tem como objetivo ampliar a produtividade reduzindo o uso de insumos agrícolas, tratando as regiões da cultura de maneira especializada. Dessa forma, espera-se reduzir o custo de produção e o risco de contaminação ambiental (ADIAN, NORWOOD e MASK, 2005).

Diversas tecnologias têm sido desenvolvidas para a AP, que tem aprimorado diferentes tarefas no processo agrícola, especialmente no plantio, na correção do solo, na irrigação e na colheita. Entretanto algumas tarefas, como a pulverização agrícola, tem recebido atenção mais modesta. A aplicação eficiente de agrotóxicos, a baixo custo e com baixa contaminação do ambiente é um dos principais desafios na produção de culturas intensivas. Na pulverização agrícola, a deriva (efeito de deslocamento horizontal do produto pulverizado) é a principal fonte de contaminação ambiental, de falha no controle das pragas ou doenças e de desperdício de recursos. Ela deve ser evitada ao máximo possível, especialmente na pulverização executada por aeronave, na qual a deriva tende a ocorrer mais intensamente (CHAIM, 2004).

As condições ambientais correspondem a um dos principais aspectos a serem levados em consideração no processo de pulverização agrícola, pois a pulverização em condições ambientais inadequadas gera deriva. Para minimizar a ocorrência da deriva, além da correta preparação e configuração do equipamento de pulverização, é igualmente importante a avaliação e aplicação do defensivo agrícola em condições ambientais adequadas de vento, umidade e temperatura. Poucas tecnologias tem apoiado esse processo, especialmente no contexto mais desafiador no processo de pulverização agrícola, a pulverização aérea (CHAIM, 2009).

Entre as diferentes tecnologias que estão sendo utilizadas com propósito agrícola, surge o monitoramento ambiental e da cultura agrícola por meio das Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) (CAMILLI, CUGNASCA, *et al.*, 2007). RSSF é um tipo especial de rede *ad hoc*, composta por sensores, com capacidades de coletar e processar dados de maneira autônoma

(AKYILDIZ e VURAN, 2010). Esse tipo de rede é empregado em um amplo conjunto de aplicações, especialmente em monitoramento ambiental, sistemas militares, logística e outros.

A utilização das RSSF na AP consiste em monitorar continuamente a área da cultura, com objetivo de avaliar as variações do ambiente, propriedades físicas ou químicas do solo, do ar, ou mesmo da planta. A área da cultura pode ser monitorada mais eficientemente quando se integra diferentes tecnologias, como as RSSF e uma rede embarcada no veículo agrícola (BARROS, 2010). Nesse caso, o veículo irá funcionar como um nó da RSSF, com a função específica de coletar os dados dos nós. Esses dados podem ser utilizados pelo veículo agrícola de modo a subsidiar a execução do seu propósito.

Nesse sentido, pode-se imaginar uma pulverização agrícola na qual o veículo pulverizador recebe dados da RSSF a respeito das condições ambientais, especialmente do vento. Então, utiliza-se desses dados para subsidiar uma decisão de suspender o processo de pulverização (em um contexto desfavorável), ou um possível ajuste em sua rota, na qual sabendo-se a direção e velocidade do vento, estima-se a ocorrência da deriva e estabelece-se um deslocamento na rota, de modo que o produto pulverizado atinja a área alvo da aplicação.

Dessa forma, sabendo-se da importância em se conhecer as condições ambientais no momento da pulverização agrícola, de modo a evitar contextos favoráveis à ocorrência da deriva; da capacidade das RSSF em monitorar as condições ambientais relevantes ao processo de pulverização; e da possibilidade de equipar os aparelhos de pulverização com equipamentos que permitam a comunicação e coleta de dados da rede de sensores, em especial as aeronaves; este trabalho propõe o emprego das RSSF como Sistema de Suporte à Pulverização Agrícola (SSPA).

O uso das RSSF na pulverização agrícola pode melhorar a eficácia da aplicação, melhorando a qualidade do controle da praga ou doença, e por consequência, aumentando a produtividade da cultura, além de reduzir a contaminação ambiental. Este trabalho de pesquisa analisa os aspectos inerentes ao processo de pulverização agrícola e propõe um modelo de utilização das RSSF neste contexto. São propostas três funcionalidades, que consistem na verificação das condições ambientais, na avaliação da pulverização executada e do ajuste dinâmico na rota do veículo pulverizador durante sua passagem sobre a área monitorada, considerando em especial o contexto da pulverização aérea.

No aspecto da integração das RSSF e o veículo pulverizador, um dos principais desafios é garantir a comunicação entre os nós que compõem a RSSF e o veículo em movimento, ainda mais se o seu movimento ocorre em velocidades elevadas (como no caso de um avião). O principal componente responsável por garantir a coleta dos dados de interesse da aplicação e encaminhar esses dados para o nó coletor móvel é o protocolo de roteamento de dados.

Diferentes protocolos de roteamento são utilizados, cujas características e técnicas empregadas por eles são levadas em consideração para sua seleção, de modo que estratégias específicas são utilizadas para suprir demandas específicas das aplicações (AKYILDIZ e VURAN, 2010; BOUKERCHE, 2008; KARL e WILLING, 2007). Dessa forma, surgem diferentes protocolos de roteamento de dados, adequados para categorias específicas de problemas, proporcionando espaço para novas proposições para aqueles contextos de aplicação que ainda não foram contemplados, ou contemplados parcialmente.

Para o contexto da pulverização agrícola, observou-se que os protocolos de roteamento disponíveis na literatura (BOUKERCHE, 2008; KARL e WILLING, 2007) não apresentaram características suficientes ou plenamente adequadas para serem utilizados. Dessa forma, será proposto um protocolo de roteamento de dados que utiliza de técnicas computacionais para representar a rota do veículo pulverizador, organizar os nós em grupos (*clusters*) e proporcionar o envio dos dados coletados pela RSSF para o veículo pulverizador de maneira a interceptá-lo durante sua passagem.

Este trabalho irá discutir a viabilidade em se empregar RSSF na pulverização agrícola e se sua utilização pode proporcionar redução do efeito deriva. Será avaliado também se o protocolo de roteamento a ser proposto consegue garantir a entrega dos dados da RSSF para a aeronave pulverizadora, mesmo ela se movendo na sua velocidade típica de operação. E ainda, será verificado o impacto das técnicas computacionais empregadas no protocolo, avaliando o quanto elas contribuíram para o seu funcionamento.

1.1 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho foi propor um protocolo de roteamento de dados para RSSF que proporcione a comunicação entre os nós fixos e a aeronave de pulverização agrícola que atua como sorvedouro.

Os objetivos secundários consistiram na definição e organização do SSPA para o agricultor, da definição do sistema de suporte ao ajuste das rotas de pulverização e no desenvolvimento de um simulador computacional capaz de representar o contexto da pulverização agrícola e RSSF.

1.2 MOTIVAÇÃO

Uma aplicação de defensivo agrícola mal sucedida traz prejuízos não somente ao produtor agrícola, mas também à sociedade, por conta da redução na produção de bens alimentícios, do impacto no custo desses bens causado por esta redução e da contaminação ambiental causada pela aplicação ineficiente.

Este trabalho tem como motivação suprir a demanda da área de pulverização agrícola por melhor controle da deriva, especialmente no contexto da pulverização aérea. Para isso se propõe o desenvolvimento de tecnologia computacional que proporcione o monitoramento das condições ambientais, para subsidiar a decisão do melhor contexto ambiental de pulverização, para avaliar a qualidade da pulverização realizada, ou permitir o ajuste dinâmico da rota de pulverização.

O uso das RSSF, integradas com o veículo pulverizador, deve incrementar a eficiência do processo de pulverização, reduzir a ocorrência do efeito deriva e consequentemente reduzir o desperdício de recursos e a contaminação ambiental.

De maneira a proporcionar a comunicação entre a RSSF e o veículo pulverizador, é necessário propor um protocolo de roteamento que garanta a coleta dos dados de interesse sobre a área monitorada e a entrega destes dados para o veículo pulverizador. Este trabalho propõe o Protocolo de Roteamento de Dados para Suporte à Pulverização Agrícola (ProRDPuv), que tem este propósito.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Os agricultores defendem a utilização dos agrotóxicos para garantir alta taxa de produtividade das suas culturas e a qualidade do produto final. No entanto, sua utilização

exige responsabilidade e a utilização de técnicas adequadas, que atendam às normas de segurança.

O mercado de agrotóxicos move bilhões de dólares em todo o mundo. Em 2008 esse mercado no Brasil ultrapassou os EUA, com um crescimento de 190%, assumindo o posto de maior mercado mundial. Em 2010 o mercado brasileiro movimentou cerca de US\$ 7,2 bilhões, o que representou 19% do mercado global de agrotóxicos (PELAEZ, 2012).

Os defensivos agrícolas são empregados em diferentes tipos de culturas no Brasil, sendo os principais exemplos as culturas de soja, milho, algodão, laranja, cana de açúcar e arroz. Devido às culturas de larga escala no Brasil, o principal método utilizado para pulverização agrícola é a pulverização por meio de aeronaves. Nesse método, há a cobertura de uma grande área em tempo menor, com redução de custos e evitando o “amassamento” da cultura. A frota de aeronaves de pulverização agrícola no Brasil tem crescido a taxa de aproximadamente 6% ao ano. Em 2012 o Brasil possuía a segunda maior frota do mundo, com aproximadamente 1800 aeronaves, ficando atrás apenas dos EUA (RAB, 2013).

No Brasil, a pulverização aérea possui leis e regulamentações específicas que normatizam sua atividade, inclusive com objetivo de proteção ambiental. São leis federais que regulamentam esta atividade: o Decreto Lei Nº 917, de outubro de 1969; o Decreto Nº 86.765, de dezembro de 1981; a Instrução Normativa do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Nº 2, de janeiro de 2008 (Normas Técnicas) e o Regulamento Brasileiro de Aviação Civil da Agência Nacional de Aviação Civil Nº 137, de julho de 2012.

Entretanto, mesmo atendendo às normas e aos critérios técnicos de segurança, a utilização de agrotóxicos sofre críticas de diversas entidades organizadas, especialmente o método de pulverização aérea.

Diversos países proíbem a pulverização aérea de agrotóxicos, em especial a União Europeia, que possui legislação específica para os países membros (EUROPEAN, 2009). No Brasil, encontra-se em tramitação na Comissão do Meio Ambiente do Senado o Projeto de Lei Nº 681/2011 de autoria da Senadora Ana Rita Esgario (PT/ES), que pretende proibir alguns princípios ativos de agrotóxicos e a pulverização aérea para qualquer finalidade.

A discussão da proibição da pulverização aérea não está associada apenas à ocorrência da deriva, mas também a falhas no processo de pulverização que acabam por ocasionar

acidentes ambientais. Nesses casos, ocorre a pulverização sobre áreas sensíveis, ou a contaminação de cidades e pessoas (HEWITT, 2000; NASCIMENTO e ZAGO, 2013; PIGNATI, MACHADO e CABRAL, 2007).

Apesar dessa discussão, o fato é que países relevantes no cenário mundial de produção agrícola, entre eles o Brasil e os EUA, utilizam amplamente a pulverização aérea de agrotóxicos. Nota-se a ausência de uma tecnologia robusta na área de pulverização agrícola, especialmente para o controle da deriva.

Nesse sentido, considerando a capacidade de monitoramento ambiental das RSSF, elas se apresentam como uma tecnologia promissora para ser empregada nos sistemas de pulverização agrícola, aspecto ainda inexplorado.

Em razão do contexto da pulverização agrícola, alguns aspectos como a mobilidade do nó coletor em alta velocidade, e a pró-atividade da rede de sensores em entregar os dados coletados não são contemplados nos protocolos de roteamento típicos, o que estimula o desenvolvimento de um protocolo de roteamento específico ao contexto apresentado.

O controle de pragas e doenças na produção agrícola, a redução de custos, a melhor utilização dos agrotóxicos, o aprimoramento do controle da deriva, a redução da contaminação ambiental e o desenvolvimento de um novo protocolo de roteamento de dados para RSSF, são fatores que se apresentam como justificativa ao desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Este trabalho está organizado em sete capítulos. O presente capítulo contém introdução, motivações e justificativas para o seu desenvolvimento.

O Capítulo 2 apresenta um levantamento dos aspectos inerentes ao processo de pulverização agrícola. Levantam-se as causas determinantes para a ocorrência do efeito da deriva, de modo a identificar os aspectos que podem ser abordados pelas RSSF e como ela pode contribuir para um melhor controle da deriva.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão sobre as RSSF, sua arquitetura e protocolos de roteamento de dados, favorecendo uma melhor compreensão dos desafios tecnológicos, especialmente no contexto com nós móveis. A revisão subsidia o desenvolvimento da aplicação das redes de sensores no processo de pulverização agrícola.

O Capítulo 4 apresenta uma organização de sistema que proporciona a utilização das RSSF no processo de pulverização agrícola. São descritas as funcionalidades do sistema e é proposto detalhadamente o protocolo de roteamento de dados para a RSSF no contexto da pulverização agrícola.

O Capítulo 5 apresenta a metodologia adotada para simulação do protocolo de roteamento proposto, bem como a modelagem do *software* de simulação e seus principais parâmetros.

O Capítulo 6 apresenta e discute os resultados das simulações. São validados os modelos de simulação utilizados, é avaliada a eficácia da pulverização considerando a utilização das RSSF, além de comparar o protocolo de roteamento proposto com outro protocolo de roteamento clássico. Diversos aspectos inerentes ao contexto da aplicação e das características do protocolo de roteamento proposto são avaliados.

O Capítulo 7 apresenta as considerações finais, bem como a proposição da continuidade da pesquisa, apresentando desdobramentos e variantes a serem exploradas, além de perspectivas para outros trabalhos relacionados.

E finalmente, as referências utilizadas para a elaboração deste trabalho de pesquisa e um apêndice contendo a documentação técnica do sistema de simulação computacional desenvolvido.

2. PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA E O CONTROLE DA DERIVA

A evolução da tecnologia e o aumento da demanda por alimentos têm impulsionado o desenvolvimento da AP. Essa expansão, sobretudo comercial, da aplicação dos conceitos de AP nos principais países produtores agrícolas, tem gerado muitas expectativas. Os principais objetivos com o uso da AP estão relacionados com o aumento da produção agrícola, a redução dos custos de produção e a preservação ambiental (ADIAN, NORWOOD e MASK, 2005; MCBRATNEY, WHELAN, *et al.*, 2005).

A AP está levando a informatização e automação para o campo. Esta ação tem ocorrido em diversas etapas da produção agrícola, desde a correção do solo, o plantio, a manutenção da cultura, até a colheita. Fundamentalmente, a AP consiste em coletar dados da região de plantio para uma análise, levando em consideração a variabilidade espacial. São avaliados fatores inerentes à produção agrícola, que podem corresponder às condições ambientais (por exemplo, umidade e temperatura), características do solo, ou mesmo a saúde das plantas. Então, ações para correção das deficiências são tomadas com base nas informações registradas e considerando as especificidades da área. Por exemplo, na aplicação de insumos agrícolas a aplicação de compostos químicos será feita em regiões localizadas e com dosagens precisas, conforme os dados coletados (INAMASU, NAIME, *et al.*, 2011; MCBRATNEY, WHELAN, *et al.*, 2005; STAFFORD, 2000).

Diversos sistemas em AP têm sido desenvolvidos, em especial para os processos de plantio, correção do solo, colheita e irrigação. Entretanto, a pulverização agrícola ainda é uma área em AP carente de tecnologias robustas (ADIAN, NORWOOD e MASK, 2005).

A pulverização agrícola tem como objetivo aplicar uma determinada quantidade de substância química para controle de invasores, pragas, doenças ou mesmo aplicação de nutrientes (CHAIM, 2009). Essa substância química compreende agrotóxicos, que são produtos ou agentes de processo físico, químico ou biológico, destinados aos setores de produção, armazenamento e beneficiamento dos produtos agrícolas, com finalidade de alterar a composição da flora ou da fauna, a fim de preservá-las da ação danosa de seres vivos considerados nocivos (BRASIL, 1989). Em sua maioria, os agrotóxicos são altamente tóxicos, seu uso gera polêmica por conta da contaminação do meio ambiente, dos produtos agrícolas tratados por eles e por consequência das pessoas que os consomem. Em contrapartida, é um dos principais responsáveis pela alta produtividade no campo. Dessa forma, é fundamental o

seu controle de qualquer processo de aplicação de agrotóxicos, de modo a proporcionar o uso adequado e responsável, evitando qualquer espécie de contaminação. Este trabalho não discute o uso dos agrotóxicos, mas trata sobre uma abordagem computacional para proporcionar melhor controle do processo de aplicação, que corresponde à pulverização agrícola.

A seção seguinte discute as principais características e aspectos a serem considerados no processo de pulverização agrícola.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA

A disputa pelo alimento entre outros seres vivos e o homem ocorre desde o início da agricultura. O homem por sua vez, busca utilizar sua inteligência para obter um balanço favorável nessa disputa. Historicamente, para combater pragas e aumentar a produção de alimentos, o homem utilizou de recursos como queima de enxofre, sal, soluções com arsênico, entre outros. Atualmente é comum o uso de substâncias químicas pulverizadas sobre a cultura, com o objetivo de exterminar e controlar a ocorrência de pragas, doenças e ervas daninhas (BOHMONT, 1981).

No início dos anos de 1900, com o deslocamento das pessoas para as cidades, redução da mão de obra no campo, ampliação das monoculturas e com o aumento do aparecimento de pragas e doenças, novas tecnologias foram desenvolvidas com o objetivo de aumentar a produção agrícola. Defender as culturas de pragas ou doenças passou a ser importante para garantir uma produção agrícola satisfatória. Inicialmente a aplicação das substâncias “tóxicas” se dava pela esfregação das folhas das plantas com panos ou escovas embebidos com o produto químico (AKENSSON e YATES, 1979). A principal evolução nesse sentido foi o avanço técnico na mecânica de bombas, proporcionando o desenvolvimento de sistemas pressurizados que permitissem a pulverização de substâncias líquidas e o desenvolvimento dos bicos pulverizadores (AKENSSON e YATES, 1979).

Para que o produto químico possa ser aplicado, considerando sua quantidade limitada em relação à área a ser tratada, a alternativa é aumentar a superfície do líquido por meio da sua divisão em partículas menores. Geralmente os produtos químicos para pulverização são diluídos em adjuvantes, especialmente a água. Dessa forma, obtém-se uma característica

física necessária (equivalente à água) para a aplicação utilizando os equipamentos de pulverização comerciais disponíveis.

Na pulverização agrícola o objetivo é molhar ao máximo possível a superfície das folhas, de modo que o material tóxico fique depositado nela, formando uma espécie de película de proteção. Entretanto, isso requer um grande volume de produto, o que acaba causando a perda por escorrimento, evaporação ou o transporte para fora da cultura por fatores como o vento. A consequência desse processo é uma redução na eficácia na aplicação da substância, no qual parte do produto aplicado acaba sendo desperdiçado e consequentemente reduzindo o controle da doença ou praga e causando um impacto ambiental, como a contaminação do solo, dos lençóis freáticos ou dos cursos d'água (CHAIM, 2004).

As principais estratégias para reduzir o desperdício de produto, ampliar a eficiência da pulverização e reduzir o impacto ambiental envolvem o controle do tamanho das gotas produzidas na pulverização. Isso se dá por meio da configuração adequada do equipamento de pulverização, especialmente os bicos pulverizadores, pressão do sistema e correto manuseio do equipamento.

O bico pulverizador é o principal elemento determinante do tamanho da gota, que por consequência determina o volume de aplicação do produto. Além disso, esses bicos determinam a distribuição do agrotóxico sobre a cultura alvo. A maioria dos bicos tende a formar gotas de tamanhos variados. Na maioria dos casos, as gotas de tamanho grande tendem a se chocar com as folhas mais externas das plantas e não conseguem atingir as folhas internas, que acabam escorrendo das folhas e atingindo o solo, produzindo o efeito da *endoderiva*. As gotas de tamanho pequeno tendem a penetrar na cultura de maneira mais eficiente, atingindo as folhas internas da planta, entretanto estão mais suscetíveis ao efeito da evaporação e de serem levadas pelo vento para fora da área alvo da pulverização, provocando o efeito denominado de *deriva* (ou *exoderiva*) (CHAIM, 2004). O tamanho ideal das gotas é aquele que promove o máximo de deposição do produto sobre as plantas, com o mínimo de contaminação do meio ambiente pelo efeito da deriva (HIMEL, 1969).

Durante a pulverização agrícola, os bicos de pulverização produzem uma nuvem formada por um grande número de gotas. O número de gotas possíveis para um determinado volume de líquido é inversamente proporcional ao diâmetro das gotas. Essas gotas são

classificadas de acordo com o seu tamanho, sendo que a maioria possui diâmetro menor que $500 \mu\text{m}^1$ (CHAIM, 2004). O Quadro 1 apresenta a classificação das gotas de acordo com o seu diâmetro, segundo Matthews (1982).

Quadro 1 - Classificação das nuvens de gotas de acordo com o diâmetro médio.

Diâmetro médio (μm)	Classificação
< 50	Aerossol
51 - 100	Neblina
101 - 200	Pulverização fina
201 - 400	Pulverização média
> 400	Pulverização grossa

Fonte: Matthews (1982).

As pulverizações com aerossol são empregadas principalmente no controle de insetos voadores, como mosquitos e pernilongos. Quando a evaporação ou o deslocamento das gotas pelo vento precisam ser evitados, a pulverização média ou grossa deve ser utilizada, independente do volume de produto a ser aplicado. Dessa forma, é necessário um planejamento para definir o tamanho ideal da gota para cada alvo de aplicação de agrotóxicos. Matthews (1982) sugere um quadro que relaciona o diâmetro das gotas e o alvo da aplicação, com generalizações (Quadro 2).

Quadro 2 - Relação do tamanho ideal das gotas e o tipo de alvo da pulverização.

Alvo	Diâmetro da gota (μm)
Insetos em voo	10 - 50
Insetos em folhagens	30 - 50
Folhagens	10 - 100
Solo (para reduzir o efeito deriva)	250 - 500

Fonte: Matthews (1982).

---

¹ Um milímetro (mm) corresponde a 1000 micrômetros (μm).

² Velocidade mínima para sustentação da aeronave. Acrônimo do termo em inglês *short takeoff and landing*.

³ São exemplos de organizações que reivindicam a suspensão do uso de agrotóxicos e/ou da pulverização aérea:

No processo de pulverização, as gotas estão sujeitas a dois efeitos principais, a evaporação e o transporte pelo vento. O diâmetro da gota é determinante para a influência de ambos os efeitos.

No efeito da evaporação, quanto menor o diâmetro da gota, maior o índice de evaporação. Outros dois fatores se somam nesse processo, que são a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar, de modo que quanto maior a temperatura e menor a umidade, maior a propensão à rápida evaporação do produto pulverizado. Chaim (2004) apresenta o Quadro 3 que relaciona o tempo de vida e a distância de queda das gotas de diferentes tamanhos e em diferentes condições de temperatura e umidade, desconsiderando a ação do vento.

Quadro 3 - Tempo de vida e distância de queda das gotas em relação ao seu diâmetro, sem ação do vento, e em diferentes condições de temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR).

Diâmetro da gota (µm)	T = 20 °C UR = 80 %		T = 25 °C UR = 72 %		T = 30 °C UR = 50 %	
	Tempo (s)	Distância (m)	Tempo (s)	Distância (m)	Tempo (s)	Distância (m)
30	5	0,07	3	0,04	1	0,02
50	14	0,03	8	0,29	4	0,15
70	28	2,50	15	1,13	8	0,58
100	57	8,52	31	4,69	16	2,44
150	128	43,14	70	23,73	37	12,33
200	227	136,36	125	75,00	65	38,96
300	511	690,34	281	379,69	146	197,24
400	909	2.181,81	500	1.200,00	290	623,37

Fonte: Chaim (2004).

Com o efeito do vento, há a ocorrência do principal desafio na pulverização agrícola, a exoderiva, ou simplesmente deriva. Deriva é o movimento lateral das gotas durante o processo de pulverização, geralmente causado pelas correntes de vento. As gotas pequenas, que apresentam maior relação superfície/peso, apresentam maior chance de se deslocarem por longas distâncias.

A Figura 1 sintetiza os possíveis tipos de deriva em um processo de pulverização, demonstrando a perda por evaporação, a exoderiva (deriva) causada pelo vento e a endoderiva ocasionada geralmente pelo excesso de gotas nas folhas, ou pela pulverização de gotas com diâmetro de valor elevado.

Figura 1 - Ilustração dos tipos de deriva em um processo de pulverização agrícola.

Fonte: Chaim (2009).

Um aspecto importante a ser considerado na ocorrência da deriva é a velocidade terminal de queda de uma gota. Uma gota caindo livremente no ar parado aumenta a sua velocidade de queda, em virtude da força da gravidade, até o momento em que as forças geradas pelo arrasto aerodinâmico anulam o efeito gravitacional. Isso proporciona uma velocidade de queda constante, denominada de velocidade terminal. A velocidade terminal é importante porque, quanto menor o tamanho da gota, menor é a velocidade terminal, portanto mais tempo será necessário para que ela caia sobre a cultura, ficando mais tempo sujeita à ação da evaporação e do arraste pelo vento.

Quantick (1985) apresenta o Quadro 4, que relaciona a distância da deriva com diferentes tamanhos de gotas. O experimento considerou um lançamento a uma altura constante de 3 m e vento também constante de 1,34 m/s, assumindo que não ocorre evaporação.

Quadro 4 - Relação do diâmetro das gotas e a distância da deriva, para uma altura de lançamento de 3 m e vento de 1,34 m/s.

Diâmetro da gota (μm)	Distância da deriva (m)
500	2,1
200	4,9
100	15,25
30	152,50
15	610,00

Fonte: Quantick (1985).

Entender os principais aspectos envolvidos no processo de pulverização agrícola é essencial para uma aplicação eficiente do produto químico, que promova o controle da praga ou doença a ser combatida, reduza os custos econômicos inerentes ao processo e garanta um baixo impacto ambiental. Para isso é importante conhecer os equipamentos de pulverização, as condições climáticas que interferem no processo e ter como objetivo o controle da deriva. As próximas seções discutem cada um desses aspectos.

2.2 EQUIPAMENTOS DE PULVERIZAÇÃO

A seleção de equipamentos adequados às condições da cultura, tamanho da área, espaçamento do plantio, idade da cultura, topografia, tipo de praga ou doença a ser atacada é a primeira etapa no processo de pulverização. Dessa forma, saber identificar o equipamento adequado, conhecer suas características, bem como seu manuseio são requisitos fundamentais.

Espera-se que a seleção adequada do equipamento de pulverização proporcione o máximo de rendimento e eficácia no combate à praga ou doença, ao menor custo econômico.

Esta seção discute os bicos pulverizadores e os principais equipamentos envolvidos no processo de pulverização agrícola em larga escala, desconsiderando equipamentos de pequena escala, ou utilizados em pulverizações individuais (por exemplo, pulverizador costal).

2.2.1 Bico pulverizador

Independente do veículo ou método de lançamento do agrotóxico, o principal equipamento envolvido na pulverização hidráulica é o bico pulverizador, que tem três funções no processo de formação das gotas: determinar a vazão, a distribuição e o tamanho da gota (CHAIM, 2009).

Existem diversos tipos de bicos de pulverização, classificados em função da pressão utilizada pelo equipamento, tipo de agrotóxico e meio de diluição. Cada um produz um espectro de tamanho de gotas diferente, além da largura e padrões de deposição. Dessa forma, é necessário o conhecimento do contexto da aplicação, para uma seleção adequada do tipo do bico pulverizador a ser utilizado. Há dois modelos principais: os de ponta de jato plano e os de ponta de jato cônico.

Os bicos pulverizadores com pontas de jato plano produzem um jato em um só plano, podendo ser do tipo “leque” ou “de impacto”. São mais indicados para aplicações em alvos planos, como solo, parede ou culturas com baixa estatura como a soja. Esse tipo de ponta pode produzir leques de vários tamanhos e ângulos, mas a abertura mais frequente fica entre 80° e 110°. Um ângulo maior oferece um leque maior, entretanto produz gotas de tamanho menor (CHAIM, 2009). A Figura 2 ilustra a forma das pontas de jato plano de impacto e leque e o princípio de geração do *spray*, além do padrão de deposição resultante.

Figura 2 - Forma das pontas nos bicos pulverizadores de jato “de impacto” e “leque” e padrão de deposição resultante.

Fonte: Chaim (2009).

O segundo modelo de bico pulverizador usa pontas de jato cônico. Esse tipo de ponta é composto por dois componentes principais: a ponta (ou disco) e o núcleo (difusor). O núcleo possui um ou mais orifícios em ângulo, que fazem o líquido assumir um movimento circular ou espiral ao passar por ele. Com esse movimento, o líquido se abre em um *spray* cônico ao passar pelo orifício da ponta. Uma gama de combinações de fluxo, ângulo de deposição e tamanho das gotas pode ser obtido com a variação e combinação do tamanho do orifício da ponta, número e tamanho dos orifícios do núcleo, tamanho da câmara do bico e pressão do líquido (CHAIM, 2009). A Figura 3 ilustra a forma e os componentes de uma ponta de jato cônico e o padrão de deposição.

Figura 3 - Exemplo de estrutura, *spray* resultante e padrão de deposição de uma ponta de jato cônico.

Fonte: Chaim (2009).

Geralmente os bicos pulverizadores com pontas de jatos cônicos são empregados na pulverização de alvos irregulares, porque as gotas se aproximam do alvo em diferentes ângulos, por exemplo, na cobertura das folhas de uma cultura.

Os bicos pulverizadores fazem parte de um sistema hidráulico pressurizado. Independente do tipo do bico de pulverização, quanto maior a pressão do sistema hidráulico menor é o diâmetro das gotas produzidas. De modo geral, considerando uma pressão do sistema constante e um mesmo tipo de bico de pulverização, o tamanho das gotas aumenta à medida que o diâmetro da abertura da ponta aumenta.

O sistema de pulverização é embarcado em um veículo agrícola, que irá transportar o produto a ser pulverizado e proporcionar a pulverização. As seções seguintes discutem os principais sistemas pulverizadores em larga escala.

2.2.2 Pulverizador tratorizado de barras

Os pulverizadores de barras são implementos acoplados nos tratores, com um sistema hidráulico que pulveriza o agrotóxico por meio de barras horizontais, com bicos pulverizadores instalados uniformemente ao longo da barra.

Na maioria dos equipamentos as barras são instaladas na traseira do trator. A barra pode ser fixa, podendo alcançar até 12 m de comprimento, ou ainda utilizar de sistemas pendulares com amortecimento e suportes elásticos, podendo alcançar até 17 m de comprimento.

Os pulverizadores de barras possuem um sistema de ajuste da altura de pulverização, possibilitando a regulação para diferentes estágios de desenvolvimento da cultura. Geralmente os bicos pulverizadores passam de 40 cm a 50 cm sobre o topo das plantas.

Um artifício que tem sido empregado nos pulverizadores de barras, que se assemelha aos turbo pulverizadores, é a utilização de ventiladores, que supre de ar um cone ou saco de ar montado ao longo da barra pulverizadora. Espera-se que, dessa forma, um fluxo de ar direcione as gotas em direção à cultura (ao chão) com maior energia e melhor deposição. Espera-se que a turbulência gerada pela ventilação, promova uma pulverização mais eficiente em culturas mais crescidas, permitindo a utilização de gotas menores e menor volume de agrotóxico. Entretanto, se existe pouca folhagem, o ar pode refletir no solo causando o efeito deriva por ação do vento gerado (CHAIM, 2009). A Figura 4 mostra uma foto de um pulverizador de barras.

Figura 4 - Exemplo de pulverizador de barra autopropelido.

Fonte: <http://www.deere.com.br>

2.2.3 Turbo pulverizador

Os turbo pulverizadores geram correntes de ar para transportar, direcionar e auxiliar o impacto das gotas produzidas pelos bicos pulverizadores até o alvo. São caracterizados por

possuir um ou mais ventiladores, que produzem esse fluxo de ar. O direcionamento da pulverização das gotas por meio da corrente de ar ocorre em várias direções, tanto para o solo, quanto para as laterais, e até para cima. Esse tipo de equipamento é indicado para a pulverização de culturas arbóreas, em razão das copas grandes e densas.

Nos turbo pulverizadores, o formato da barra na qual os bicos pulverizadores são instalados geralmente é em arco. O comprimento varia conforme o modelo do pulverizador, mas em todos eles a barra é posicionada na saída do difusor (ventilador).

Há dois tipos de difusores: os de fluxo axial e radial. Nos difusores de fluxo axial, o ar é movimentado paralelamente ao eixo do ventilador, e com o auxílio de defletores, ele é direcionado em forma de leque, perpendicularmente à linha de movimentação da máquina. O ar passa pela barra pulverizadora, na qual os bicos pulverizadores estão instalados, e arrasta as gotas até o alvo. Nesse tipo de ventilador há um movimento de grande volume de ar, com baixa pressão e baixa velocidade. Nos ventiladores de fluxo radial, as suas hélices impulsionam o ar diretamente em direção ao alvo, passando pela barra com os bicos pulverizadores. Este tipo de ventilador é capaz de movimentar o ar a grandes velocidades. Entretanto essas velocidades ao longo da cortina formada é desuniforme (CHAIM, 2009). A Figura 5 mostra uma foto de um turbo pulverizador axial destinado a culturas de café.

Figura 5 - Exemplo de turbo pulverizador axial.

Fonte: <http://www.adventurepulv.com.br>

2.2.4 Pulverização por aeronave

A pulverização por aeronave apresenta particularidades distintas, não somente pelo fato de a aplicação do agrotóxico ser feita por uma máquina que voa, mas pelas características dinâmicas adicionadas ao processo. A principal vantagem em relação à pulverização executada por tratores está na velocidade de aplicação do produto, podendo chegar a 100 há/h, além de evitar o amassamento da cultura e a compactação do solo, e ainda evitar o intercâmbio de doenças ou pragas entre lavouras via contaminação dos pneus dos equipamentos terrestres. Nas grandes áreas, esse tipo de pulverização apresenta melhor relação custo/benefício, representando economia para o agricultor. Entretanto há diversos aspectos que diferenciam a pulverização aérea da terrestre.

Diferente da pulverização executada por tratores, a faixa de deposição do produto pulverizado por um avião agrícola não depende somente da extensão das asas (comprimento da barra de pulverização), mas também da velocidade de voo, da altura da pulverização e da turbulência provocada pelo deslocamento da aeronave. Características específicas de cada tipo ou modelo de aeronave interferem eficácia da pulverização.

A altura de voo é um aspecto importante que determina a deposição uniforme do produto pulverizado sobre e dentro da massa foliar da cultura. Voos muito próximos do solo, além de tornar a deposição das gotas irregular, provoca maior concentração de pulverização sob a área correspondente à “barriga” do avião. Em contrapartida, voos distantes da cultura elevam o índice de evaporação do produto pulverizado e aumenta a ocorrência da deriva. A altura de voo é uma característica inerente ao tipo e modelo de cada avião e geralmente é definido entre 3 m e 5 m em relação à cultura (CHAIM, 2009).

O número de bicos pulverizadores nas barras pulverizadoras dos aviões varia com o modelo e o tipo de cada aeronave. Em geral, esse número fica em torno de 40 a 42 bicos instalados em aeronaves com envergadura de aproximadamente 12 m, podendo utilizar tanto pontas de jato plano em leque quanto jato cônico, de acordo com a indicação.

Um ajuste técnico que auxilia no controle da deriva gerada durante a pulverização aérea é o ajuste no ângulo de instalação dos bicos pulverizadores, que geralmente são configurados entre os ângulos de 90° a 180° em relação à linha de voo do avião.

Cunha (2008) destaca um conjunto de características necessárias em um avião agrícola, com destaque para:

- grande capacidade de carga, o que requer motor de grande potência, aerodinâmica e redução do peso do avião vazio;
- ser capaz de decolar, atingindo 16 metros de altura, a partir de pistas semielaboradas com até 400 m de comprimento;
- velocidade de cruzeiro em torno de 150 km/h, combinada com baixa velocidade de STOL² (de 65 km/h a 100 km/h);
- boa estabilidade e manobrabilidade, especialmente em curvas;
- sistema de comando de equipamento agrícola de simples utilização e que requer pouco esforço do piloto (evitando fadiga);
- ampla visibilidade (para frente, para trás e laterais);
- para melhor proteção em caso de acidente, é considerado essencial que o motor e o tanque de produtos possam estar colocados à frente da cabine;
- vedação da cabine, impedindo a penetração de gases e vapores do produto.

A Figura 6 apresenta uma foto de uma aeronave executando uma pulverização agrícola.

---

² Velocidade mínima para sustentação da aeronave. Acrônimo do termo em inglês *short takeoff and landing*.

Figura 6 - Foto de uma pulverização executada por aeronave.

Fonte: <http://www.embraer.com>

A pulverização por aeronave é o método que apresenta maior desafio quanto ao controle da deriva, pelo fato de a pulverização ocorrer em uma altura mais elevada em relação à cultura e pela velocidade e turbulência gerada durante o voo. Apesar disso, a pulverização aérea representa maior velocidade na cobertura de grandes áreas e menor custo. Na prática é o principal método de pulverização em grandes plantações e em diferentes tipos de culturas, como soja, milho, algodão, arroz, laranja, cana de açúcar e outros.

Outros fatores também devem ser levados em consideração na pulverização agrícola, especialmente as condições ambientais. A seção seguinte discute esse aspecto.

2.3 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

No processo de aplicação de agrotóxicos, independente do método empregado, as condições ambientais são determinantes para um ambiente favorável para pulverização. Um contexto desfavorável pode causar, além do desperdício de produto e recurso financeiro, ineficiência no controle da praga ou doença (por conta da não deposição do agrotóxico na cultura) e contaminação ambiental (ar, solo e água).

Alguns fatores climáticos podem determinar a interrupção da pulverização. A ocorrência de correntes de vento acima de um limite aceitável, altas temperaturas, ou baixa umidade são exemplos de contextos que podem ocasionar o cancelamento da aplicação.

O vento é um dos fatores mais críticos no processo de pulverização agrícola, especialmente quando executada por aeronaves. Como nenhuma gota consegue se mover contra ele, o planejamento da aplicação levando em conta a direção e velocidade do vento é vital para a correta aplicação do agrotóxico. Via de regra, o deslocamento do produto causado pelo vento é proporcional à sua velocidade. Apesar de que, mesmo sob a ação de ventos fracos e na ocorrência de um contexto desfavorável (gotas pequenas, altas temperatura, ou inversão térmica) ainda pode ocorrer perda de produto e deriva de longa distância. Trabalhar com o vento na direção favorável pode garantir a segurança de áreas sensíveis próximas, por exemplo, córregos, açudes, vilas, outras culturas, regiões de pasto, entre outras.

A temperatura afeta a pulverização de forma secundária, sendo que temperaturas elevadas tendem a promover a evaporação, fazendo com que as gotas se tornem ainda menores. Esse processo colabora para a ocorrência da deriva. Outra maneira que a temperatura afeta a pulverização agrícola é por meio do aquecimento do solo, produzindo correntes de ar ascendentes, que dificultam a deposição imediata das gotas. E finalmente, por meio do fenômeno conhecido como inversão térmica (temperaturas mais altas em alturas maiores), a temperatura pode fazer com que as gotas finas não se depositem na cultura, dissipando-se na atmosfera e podendo deslocar-se por longas distâncias.

Por razão semelhante à da temperatura, a umidade relativa do ar muito baixa pode causar evaporação reduzindo o diâmetro das gotas. Se as gotas já estiverem muito pequenas, pode ocorrer a evaporação completa, contaminando o ar e causando ineficiência no procedimento de pulverização, pois as gotas não atingem a cultura.

Chaim (2009) recomenda os seguintes contextos climáticos como condições limites para uma pulverização segura:

- umidade relativa do ar mínima de 55%;
- velocidade do vento de 3,2 m/s a 6,5 m/s;
- temperatura abaixo do 30 °C.

- pulverização no período da manhã ou final de tarde, garantindo menor temperatura do ar.

A Tabela 1 ilustra alguns contextos em relação ao vento e a recomendação quanto à pulverização.

Tabela 1 - Relação entre a condição do vento e a recomendação para pulverização.

Velocidade do ar aproximadamente na altura do bico	Descrição	Sinais visíveis	Pulverização
Menos que 2 km/h	Calmo	Fumaça sobe verticalmente.	Pulverização não recomendável
2,0 - 3,2 km/h	Quase calmo	A fumaça é inclinada.	Pulverização não recomendável
3,2 - 6,5 km/h	Brisa leve	As folhas oscilam. Sente-se o vento na face.	Ideal para pulverização
6,5 - 9,6 km/h	Vento leve	Folhas e ramos finos em constante movimento.	Evitar pulverização de herbicidas
9,6 - 14,5 km/h	Vento moderado	Movimento de galhos. Poeira e pedaços de papel são levantados.	Impróprio para pulverização

Fonte: Chaim (2009).

Em algumas regiões do Brasil, como no estado de Mato Grosso, por conta das suas características regionais e dependendo da época do ano, nem todos esses limites podem ser atendidos (como temperatura e umidade). Dessa forma, há demanda por novos métodos e recursos técnicos que auxiliem no processo de controle da deriva.

2.4 DERIVA E SUAS CONSEQUÊNCIAS

A deriva é considerada um dos maiores problemas da agricultura intensiva (SUMNER e SUMNER, 1999). O efeito de deslocamento horizontal do produto pulverizado sempre ocorre, mas se torna intolerável quando a distância percorrida pelas gotas é grande o suficiente para que elas saiam da área em tratamento (área alvo).

Existem técnicas de aplicação que utilizam a deriva para melhorar a penetração das gotas dos produtos nas culturas, ou para cobrir grandes áreas rapidamente, quando a precisão é de importância secundária. Entretanto, a deriva costuma causar perda do produto e redução no controle da praga ou doença que está sendo tratada, e se torna um sério problema quando causa danos a culturas vizinhas, ou alcança cidades e contamina pessoas, animais ou cursos d'água (HEWITT, 2000). A contaminação de propriedades vizinhas ainda pode gerar multas ambientais ou prejuízos comerciais ainda piores, como a contaminação de culturas orgânicas, que podem ter sua certificação comprometida.

A extensão do perigo da contaminação causada pela deriva depende evidentemente da toxicidade do produto aplicado. De qualquer forma, há diversos relatos de contaminações causadas pelo efeito da deriva. Brooks (1947) descreve uma contaminação por deriva nos Estados Unidos já na década de 40, na qual a alfafa contaminada com agrotóxico aplicado em uma cultura vizinha de tomate matou dezenas de animais.

Mesmo com o advento da AP e a modernização dos equipamentos agrícolas, ainda há ocorrência de acidentes envolvendo a contaminação de áreas vizinhas das culturas, em especial a contaminação de pessoas por conta de pulverização aérea mal planejada. Pignati; Machado e Cabral (2007) relatam um acidente em 2006 no qual toda a cidade de Lucas do Rio Verde (circundada por culturas de soja), no interior do estado de Mato Grosso, com aproximadamente 30 mil habitantes, foi contaminada. Pignati; Machado e Cabral descrevem a gravidade da contaminação, com a morte de plantas e intoxicação de pessoas, incluindo mães em fase de amamentação, com sinais de contaminação no leite materno pelos agrotóxicos utilizados nas pulverizações. Mais recentemente em 2013, em um acidente no sudoeste do estado de Goiás, um avião agrícola pulverizou agrotóxico sobre uma escola rural, intoxicando mais de 40 pessoas entre crianças e adultos (NASCIMENTO e ZAGO, 2013).

Por conta de acidentes como esses, há movimentos sociais e organizações que reivindicam a suspensão do uso de agrotóxicos na produção agrícola³. Além disso, pulverizações executadas por aeronaves já são proibidas em alguns países, em especial na

---

³ São exemplos de organizações que reivindicam a suspensão do uso de agrotóxicos e/ou da pulverização aérea: Contra os Agrotóxicos – <http://www.contraosagrototoxicos.org>; ABRASCO – <http://www.abrasco.org.br>; FIOCRUZ – <http://portal.fiocruz.br>; INCA – <http://www.inca.gov.br>; Donella Meadows Institute – <http://www.donellameadows.org>.

União Europeia. Em contrapartida, o uso da pulverização por meio de aeronaves tem se ampliado, com o argumento dos agricultores de uma pulverização mais barata e rápida, principalmente no contexto das grandes plantações, com milhares de hectares a serem tratados.

Estes aspectos reforçam a necessidade de desenvolver sistemas mais eficientes para o processo de pulverização agrícola, especialmente no que diz respeito ao controle da deriva.

2.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Em razão dos desafios no controle da deriva e dos avanços tecnológicos possíveis de serem empregados na AP, recursos tecnológicos devem ser empregados com o objetivo de minimizar a deriva e garantir a eficácia do processo de pulverização. Com vista nos desafios inerentes à pulverização agrícola, em especial o controle da deriva, este trabalho propõe o uso das RSSF como ferramenta de suporte ao processo de pulverização, com foco especial na pulverização executada por aeronaves.

O próximo capítulo discute os conceitos de RSSF e introduz os desafios relacionados à utilização dessa tecnologia no contexto da pulverização agrícola.

3. FUNDAMENTOS DAS REDES DE SENSORES SEM FIO

A computação ubíqua (ou computação pervasiva) apresenta um novo modelo de sistema de computação, diferente do modelo clássico, que prioriza o uso de máquinas potentes, no aspecto computacional, e de uso geral. Esse novo conceito é baseado em equipamentos pequenos, com poder computacional adequado (limitado) à sua função e com ampla conectividade. Essa conectividade não se restringe a uma rede de computadores, mas a quaisquer outros dispositivos pervasivos que possam de alguma forma colaborar coletivamente para desenvolver uma tarefa. Com a computação pervasiva as pessoas estarão constantemente conectadas a um sistema computacional “global”, por meio do qual poderão trocar informações facilmente e interagir com outros sistemas ou ambientes. Esse conceito é apresentado por Weiser (1991) e discutido por outros autores (ESTRIN, GIROD, *et al.*, 2001; ESTRIN, GOVINDAN, *et al.*, 1999; LYYTINEN e YOO, 2002; MATTERN, 2005).

As RSSF são um dos primeiros exemplos de computação pervasiva, sendo uma tecnologia emergente que promete revolucionar e ampliar o potencial de diversas aplicações como as de monitoramento, instrumentação e controle.

Uma RSSF é um tipo especial de rede *ad hoc*, formada por centenas ou milhares de sensores, densamente distribuídos, com comunicação sem fio e capazes de coletar e processar informações do ambiente em que estão distribuídos (AKYILDIZ e VURAN, 2010). Zhao e Guibas (2004) e Sohraby, Minoli e Znati (2007) classificam como sensores os dispositivos com capacidade de monitorar o ambiente, registrando grandezas físicas ou químicas de interesse do usuário (por exemplo, temperatura, umidade, presença de pessoas, som, luminosidade), processar essas informações e encaminhar/receber dados para outros dispositivos ou sensores.

Segundo Camp, Boleng e Davies (2002) uma RSSF típica possui pouca ou nenhuma infraestrutura, e consiste em um grande número de sensores que trabalham em conjunto, monitorando um ambiente ou região para obter informações. Stankovic, Abdelzaher *et al.* (2003) definem um conjunto de fatores que determinam os desafios da tecnologia de RSSF: os nós encontram-se instalados numa área geográfica e interagem com um ambiente físico; os sensores são pequenos e menos confiáveis que roteadores de redes tradicionais; os sensores geram e armazenam dados, ao contrário de roteadores de rede; e os sensores podem ser móveis.

Dada essa diversidade de fatores e desafios técnicos relacionados às RSSF, é necessário pensar em um novo conjunto de arquiteturas e sistemas de *software* que permitam o uso efetivo de tais sistemas de computação.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS RSSF

Ao contrário das redes tradicionais, as RSSF têm características e propriedades específicas, principalmente quanto aos recursos disponíveis. São características das RSSF: a limitação quanto à fonte de energia, o alcance de comunicação, a banda de transferência, o processamento e o armazenamento de dados. Uma das principais limitações dos sensores em uma RSSF é a fonte de energia. Há a necessidade de consumir o mínimo de energia possível, já que nem sempre esses sensores podem ter suas baterias substituídas facilmente.

As RSSF são geralmente comparadas com as redes *ad hoc* devido às suas características de autoconfiguração, tolerância a falhas, dinamicidade e capacidade de comunicação direta entre os nós, sem a necessidade de um ponto de acesso ou servidor de rede. Para a implementação e aplicação de RSSF é necessário o uso de técnicas de redes sem fio *ad hoc*. Entretanto, em sua maior parte, os protocolos e algoritmos propostos para estas redes não são adequados ou suficientes, ou mesmo não se aplicam às RSSF. As principais diferenças a serem destacadas são: o número de sensores em uma RSSF pode ser muito superior ao de uma rede *ad hoc*; em uma RSSF os sensores são densamente distribuídos; uma RSSF deve ser tolerante a falhas; a topologia de uma RSSF muda constantemente; uma RSSF utiliza frequentemente o paradigma de comunicação *broadcast*⁴, enquanto que redes *ad hoc* se baseiam em comunicação ponto-a-ponto (AKYILDIZ e VURAN, 2010).

Um desafio relacionado às RSSF é o desenvolvimento de algoritmos que proporcionem baixo consumo energético, com a menor ocorrência de falhas possível e que forneça informações atualizadas e corretas do fenômeno observado.

Segundo Tilak, Abu-Ghazaleh e Heinzelman (2002), as RSSF possuem três atores principais em sua arquitetura de comunicação: o observador, o fenômeno e o sensor. O

---

⁴ *Broadcast* é o processo pelo qual se transmite ou difunde determinado dado na rede, no qual cada nó envia a mensagem para todos os nós ao seu alcance.

observador é o usuário final interessado em obter as informações geradas pela RSSF. O *fenômeno* é a entidade que está sendo monitorada e cuja informação potencialmente será registrada e processada pela RSSF. O *nó sensor* é o dispositivo que implementa o monitoramento físico de um fenômeno e coleta os dados. Numa RSSF típica os sensores individualmente registram amostras discretas do fenômeno observado e disseminam essa informação para outros nós e para o observador. Neste trabalho, o nó sensor será tratado simplesmente por nó.

Segundo Akyildiz e Vuran (2010), um nó consiste tipicamente em seis componentes: fonte de energia (bateria), dispositivo de *hardware* sensível ao fenômeno (sensor), conversor analógico para digital (CAD), processador, memória e módulo transmissor-receptor de dados (rádio). A Figura 7 ilustra a arquitetura típica de um nó de uma RSSF e a relação entre seus componentes. A *bateria* é responsável por prover energia a todos os componentes do nó. O *sensor* é responsável por detectar e medir o fenômeno de interesse. O dado analógico produzido pelo sensor é então convertido para um padrão digital pelo *CAD*. Então, os dados são encaminhados ao *processador* que manipula esses registros, utilizando a sua *memória* e o *transmissor/receptor* para envio ou recebimento de dados com outros nós da RSSF.

Um nó possui um pequeno sistema operacional, com regras que determinam o modelo de comunicação e algoritmos específicos para processar os dados e definir ações a serem tomadas. Opcionalmente pode ser utilizado um sistema de localização, que permite determinar a coordenada geográfica de um nó, ou a sua posição relativa a outros nós da rede (por exemplo, um receptor GPS), e/ou também um sistema de navegação, para nós com capacidade de se movimentar no ambiente.

Figura 7 - Arquitetura típica de um nó de uma RSSF.

Fonte: Adaptado de Akyildiz e Vuran (2010).

O projeto e o desenvolvimento de sistemas para uma RSSF é influenciado por vários fatores, entre eles pode-se destacar:

- a *tolerância a falhas*, que consiste na habilidade de manter a funcionalidade da RSSF mesmo com a interrupção de um ou vários nós;
- a *escalabilidade*, que corresponde à garantia do funcionamento da rede mesmo com elevado número de nós (SHIH, CHO, *et al.*, 2001; CERPA, ELSON, *et al.*, 2001);
- o *custo de produção*, pois alguns sensores podem apresentar altos custos (RABAEY, AMMER, *et al.*, 2000);
- o *ambiente de operação*, pois os sensores podem ser submetidos a condições severas, portanto a resistência física é um aspecto a ser levado em consideração nesses contextos;
- a *transmissão/comunicação*, os nós se conectam por meio de ondas de rádio, infravermelho ou meio ótico e estão sujeitos às interferências e deficiências que as tecnologias de comunicação apresentam. A utilização de um meio de transmissão adequado é importante para evitar o gasto excessivo de energia e a perda de qualidade da rede (AKYILDIZ e VURAN, 2010; POTTIE e KAISER, 2000; KAHN, KATZ e PISTER, 1999);
- a *mobilidade dos nós*, essa característica tende a proporcionar melhor cobertura da área monitorada e a economia de energia. Entretanto, gera maior complexidade para o protocolo de roteamento de dados (CAMP, BOLENG e DAVIES, 2002; FODOR e VIDÁCS, 2007; LAMBROU e PANAYIOTOU, 2009; LIU, TOWSLEY e DOUSSE, 2005);
- o *consumo de energia*, pois determina o tempo de funcionamento da RSSF, em determinadas aplicações pode ser um ponto crítico, principalmente se não for possível a reposição da fonte de energia (AKYILDIZ e VURAN, 2010).

Esses fatores são importantes, pois servem de referência no desenvolvimento dos sistemas para RSSF, especialmente no desenvolvimento de algoritmos e protocolos de roteamento.

3.2 APLICAÇÕES

As RSSF apresentam um grande potencial de aplicação em diversos contextos, seja aprimorando sistemas existentes, ou desenvolvendo novos modelos, especialmente em sistemas de monitoramento e automação.

As RSSF têm sido aplicadas em diversas áreas e em diferentes tipos de sistemas, como sistemas militares, monitoramento ambiental, em agropecuária, em monitoramento médico, sistemas de suporte pessoal, de suporte à mobilidade, de segurança, controle logístico, entre outros (AKYILDIZ e VURAN, 2010; YICK, MUKHERJEE e GHOSAL, 2008; ZHAO e GUIBAS, 2004; SOHRABY, MINOLI e ZNATI, 2007; SIKKA, CORKE e OVERS, 2004; SIKKA, CORKE, *et al.*, 2006; SANTOS, DOTA e CUGNASCA, 2010).

As aplicações das RSSF podem ser classificadas segundo o contexto de aplicação ou tipo de sistemas que nelas se baseiam, como:

- *sistemas militares*: uma RSSF pode integrar sistemas de comando, controle, comunicação, inteligência, sobrevivência, resgate, reconhecimento e ataque, de maneira a auxiliar os militares nessas tarefas. A distribuição rápida dos sensores sobre uma área, a auto-organização e a tolerância a falhas são características prioritárias nesse tipo de aplicação (YICK, MUKHERJEE e GHOSAL, 2008; AKYILDIZ e VURAN, 2010).
- *sistemas de monitoramento ambiental*: as RSSF permitem o monitoramento das condições ambientais que podem afetar certo tipo de bioma, ou monitorar o comportamento de grupos de animais, o solo, o ar e a água. Também são exemplos de aplicações os sistemas para detecção de fogo em florestas, o mapeamento biológico, o levantamento de poluição, a detecção de enchentes e os desastres nucleares (YICK, MUKHERJEE e GHOSAL, 2008; AKYILDIZ e VURAN, 2010).
- *sistemas de agricultura de precisão*: com o uso das RSSF é possível acompanhar a área de plantio com maior eficiência, obtendo dados das condições do solo, identificando regiões que estão sofrendo com deficiência de água, de nutrientes ou sendo atacada por pragas ou doenças, além de dar suporte a diferentes procedimentos como irrigação, plantio e colheita. Há diferentes tipos de sensores capazes de mensurar grandezas físicas e químicas, que permitem monitorar

aspectos da água, do solo e do ar (CAMILLI, CUGNASCA, *et al.*, 2007; AKYILDIZ e VURAN, 2010; SANTOS, DOTA e CUGNASCA, 2010).

- *sistemas de monitoramento médico*: as RSSF possibilitam o desenvolvimento de sistemas que agregam o monitoramento do paciente, registro de informações médicas, diagnóstico e administração de medicamentos. Em uma visão futurista, acredita-se que microsensores inseridos no corpo das pessoas atuarão como sentinelas, monitorando, diagnosticando problemas de saúde e até atuando no combate à enfermidade (YICK, MUKHERJEE e GHOSAL, 2008; SOHRABY, MINOLI e ZNATI, 2007; LIOLIOS, DOUKAS, *et al.*, 2010).
- *sistemas de monitoramento animal*: o processo de manejo de rebanhos pode ser aprimorado com a utilização de sensores fixados (ou inseridos) nos animais. Dessa forma é possível o manejo remoto, monitorar o posicionamento e o comportamento do rebanho, além de monitorar parâmetros da saúde dos animais, como a temperatura (SIKKA, CORKE e OVERS, 2004; SIKKA, CORKE, *et al.*, 2006).
- *sistemas de monitoramento de carga e controle logístico*: as RSSF têm aplicação no controle logístico das empresas, otimizando sistemas de gestão, de estoque e no monitoramento do transporte de cargas. É uma ferramenta importante no rastreamento, histórico e monitoramento da qualidade e/ou validade dos produtos (AKYILDIZ e VURAN, 2010).

O contexto da aplicação é determinante para a seleção de componentes da RSSF, a escolha da tecnologia, padrões de comunicação, algoritmos e protocolos de roteamento. Não há uma combinação de componentes ótima, que sirva para qualquer aplicação. Cada recurso tem sua característica cuja eficiência é dependente do contexto do problema atacado.

3.3 DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO DAS RSSF

Existem numerosos desafios de projeto em RSSF. Lidar com todas as restrições de recursos já apresentadas e proporcionar uma solução eficaz é o principal desafio no desenvolvimento de um sistema que emprega RSSF.

Apesar da diversidade de aspectos a serem considerados na implantação de uma RSSF, como robustez do equipamento, tamanho dos componentes, antena de comunicação, acesso remoto, acoplamento, acurácia de sensores, interconexão entre diferentes sistemas, padrões de comunicação, entre outros; este trabalho prioriza a discussão de quatro desafios, por estarem relacionados com a elaboração de um protocolo de roteamento de dados: economia de energia, autonomia dos sensores, organização da comunicação dos nós e a eficácia na coleta e entrega dos dados.

Todo o funcionamento da rede, desde a organização lógica dos nós, a troca de informações e o processamento, devem levar em consideração a necessidade de proporcionar o máximo de economia de energia. Nesse aspecto, o processo que demanda maior consumo é o envio e recebimento de dados via rádio. Mesmo com a possibilidade do emprego de fontes de alimentação auxiliares, como placas solares, nem sempre esse recurso é suficiente ou viável (dependendo do contexto da aplicação). Segundo o modelo de Dimokas, Katsaros e Manolopoulos (2010), o processamento computacional para a fusão de um conjunto de dados consome o equivalente a 5 nJ/bit, enquanto que para o processo de envio ou recebimento de dados são necessários 50 nJ/bit, representando um consumo de energia 10 vezes superior. Dessa forma, qualquer processo que envolva o uso do módulo transmissor deve ser planejado e otimizado para minimizar o número de transmissões de dados.

Nas RSSF os nós são autônomos, que implica na inexistência de um “computador servidor” que centraliza o controle e a administração dos serviços da rede. Não há, por exemplo, uma tabela de roteamento de dados centralizada. Os nós devem utilizar de estratégias colaborativas, de modo a serem capazes de estabelecer comunicação, registrar dados, rotear os pacotes de dados, permitir a adição de novos nós na rede, bem como superar falhas, sempre de maneira autônoma.

A comunicação entre os nós mais frequentemente utilizada é por meio de ondas de rádio, cuja frequência depende do padrão utilizado. Os padrões de comunicação mais populares nas aplicações de RSSF, como o ZigBee⁵ ou Bluetooth⁶, operam

---

⁵ ZigBee é o conjunto de especificações para comunicação sem fio entre dispositivos eletrônicos, priorizando o baixo consumo de energia e baixa taxa de transmissão. O ZigBee baseia-se na camada física e controle de acesso ao meio (MAC) definido pelo padrão IEEE 802.15.4.

⁶ Bluetooth é um protocolo de comunicação primariamente projetado para interligar diferentes tipos de dispositivos, com baixo consumo de energia e alcance e alta taxa de transmissão.

predominantemente em altas frequências, como 2,4 GHz, em busca de melhores taxas de transmissão de dados. Nessa frequência, o sinal está sujeito à interferência de diferentes fontes, como prédios, obstáculos naturais e especialmente a água, seja ela quando presente no corpo de animais, em plantas, ou mesmo na umidade do ar. No trabalho de Barros, Silva *et al.* (2012) é descrito o quanto pode haver de perda de comunicação entre os nós e consequente redução no alcance de comunicação, com a interferência causada pela água presente na copa de uma cultura agrícola.

Outro desafio a ser enfrentando é promover a eficácia na entrega dos dados. Esse aspecto está relacionado à demanda da aplicação, que pode, entre outros requisitos, exigir uma entrega contínua de dados, ou o envio de dados por vários nós simultaneamente (sinais concorrentes causam saturação no ambiente e interferem na recepção dos dados), ou ainda, os nós podem estar em movimento e a entrega dos dados pode ser prejudicada nesse contexto. O número de nós e a densidade da RSSF interferem nesse aspecto. Uma rede com nós espaçados (baixa densidade) possui poucas opções de rotas alternativas, o que tende a causar o isolamento de nós ou grupos de nós, entretanto há menos interferência de sinal entre os nós. Enquanto que redes densas têm mais opções de estabelecer rotas para entrega dos dados, mas enfrentam maior índice de perda de pacotes por interferência de sinal e saturação do componente transmissor do nó (colisão de pacotes de dados).

Esses e outros aspectos são tratados pelo protocolo de roteamento de dados. Um protocolo de roteamento dificilmente será eficiente em um amplo conjunto de contextos. Dessa forma, é importante conhecer as demandas da aplicação, os requisitos do sistema, as características técnicas dos nós para que se possa desenvolver um protocolo de roteamento eficiente em um contexto de referência.

3.4 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO DE DADOS EM REDES DE SENSORES

O protocolo de roteamento de dados em uma RSSF é um conjunto de regras que são responsáveis por estruturar logicamente a comunicação, seja ela entre os nós, ou entre os nós e o observador. Protocolos de roteamento das redes convencionais apresentam sérias limitações quando utilizados em RSSF, uma vez que no modelo clássico essencialmente cada nó da rede recebe um dado e retransmite para todos os nós vizinhos, ou há um computador servidor que conhece todas a rota entre os nós da rede. Em RSSF esse comportamento

causaria um grande volume de transmissão de pacotes e, principalmente, consumo excessivo de energia dos nós, além do fato de não ser possível estabelecer um esquema global de endereçamento, já que os nós não possuem uma identificação global na rede (como um número IP⁷).

Dessa forma, o desempenho do protocolo de roteamento é influenciado pelo dinamismo da topologia das RSSF, assim como pelo modelo de troca de dados. Por isso, é necessário escolher ou desenvolver protocolos de roteamento eficazes, levando em consideração diferentes contextos, com base nos objetivos de roteamento e na demanda da aplicação.

Em uma RSSF, cada nó tem a capacidade de coletar dados e transmiti-los a um *nó sorvedouro* (*sink*), que por sua vez os encaminha ao observador. Esse encaminhamento não ocorre obrigatoriamente por meio de uma conexão ponto-a-ponto. Quando um nó está distante do sorvedouro, pode ser necessário estabelecer uma estrutura que envolva múltiplos nós, de modo que cada nó repassa a informação até que o sorvedouro seja alcançado. A Figura 8 exemplifica esse comportamento, nela o nó A envia seus dados para o sorvedouro por meio do repasse dos nós B, C e D. O protocolo de roteamento é importante para que essa tarefa seja efetuada com sucesso e de maneira eficiente, promovendo esforço cooperativo entre os nós.

Figura 8 - Roteamento de dados colaborativo por meio de uma infraestrutura com múltiplos sensores e um sorvedouro.

Fonte: Adaptado de Akyildiz e Vuran (2010).

⁷ Número IP é um endereço (número) que identifica um equipamento em uma rede no padrão IP.

O desenvolvimento de protocolos de roteamento de dados para RSSF deve ter como objetivo gerenciar a comunicação entre os nós e propagar os dados para o sorvedouro. Yick, Mukherjee e Ghosal (2008) afirmam que o protocolo de roteamento deve encontrar meios de gerenciar com eficiência os recursos restritos de uma RSSF, como a energia, banda de comunicação, memória e poder computacional, visando prolongar o seu tempo de atividade, garantindo os aspectos de eficácia na entrega dos dados, tolerância a falhas, escalabilidade e segurança.

Boukerche (2008) discute diferentes estratégias que podem ser adotadas para definir um protocolo de roteamento. Por exemplo, pode-se priorizar rotas que utilizam nós com maior disponibilidade de energia, ou simplesmente definir rotas que utilizam menor número de nós. Um protocolo de roteamento deve considerar aspectos inerentes aos nós, como disponibilidade de energia, capacidade de processamento, volume de troca de pacotes (dados), tamanho da rota, entre outros (BOUKERCHE, 2008; ZHANG e LI, 2009; YICK, MUKHERJEE e GHOSAL, 2008). Karl e Willing (2007) afirmam que dificilmente se consegue agregar todos esses aspectos em um único protocolo de roteamento. A prioridade de um aspecto em relação ao outro e a demanda da aplicação é que caracterizam um protocolo de roteamento.

Há um conjunto de desafios que influenciam diretamente o desenvolvimento de um protocolo de roteamento de dados, pois degradam o seu desempenho. Além da natureza da aplicação, outros aspectos devem ser levados em consideração, como:

- *distribuição dos nós*: os nós podem ser distribuídos na área a ser monitorada de maneira planejada ou aleatória. Com planejamento, eles são instalados em locais pré-determinados, enquanto que no modo aleatório, são distribuídos na área monitorada de maneira livre. A organização dos nós interfere no funcionamento da RSSF, sendo que a distribuição planejada geralmente é um contexto mais simples de ser tratado pelo protocolo de roteamento.
- *meio de comunicação*: o funcionamento da RSSF é afetado pelos problemas tradicionais que ocorrem em comunicação via rádio. Saber a respeito do ambiente no qual a RSSF será instalada, os possíveis obstáculos e fontes de interferência é importante para o planejamento do protocolo de roteamento.
- *conectividade*: geralmente são estabelecidas várias conexões entre os nós (um nó tem vários vizinhos), de acordo com a densidade de nós na área monitorada. Esse

aspecto é importante no processo de manutenção da topologia da rede e na recuperação de falhas, além da interferência causada pelos próprios nós, comum em uma rede com alta densidade. A conectividade depende da distribuição dos nós.

- *cobertura*: o nó tem uma percepção do ambiente no qual foi instalado, que se limita a alguns metros de alcance, seja na capacidade de medição ou na confiabilidade do dado coletado. Dessa forma, a disposição dos nós e sua própria concepção têm importância no parâmetro de cobertura.
- *tolerância a falhas*: há diversas razões para algum nó deixar de funcionar. Uma RSSF deve ser capaz de se recuperar de um evento de falha (um ou mais nós deixam de funcionar), mantendo seu funcionamento com o mesmo desempenho, ou com o mínimo de degradação. Esse aspecto é diretamente dependente do protocolo de roteamento.
- *escalabilidade*: a implantação de nós na área monitorada varia com a natureza e demanda da aplicação. O número de nós pode alcançar centenas ou milhares de unidades. O protocolo de roteamento deve ter a capacidade de lidar com um grande número de nós e de se adaptar à adição de novos nós.
- *fusão de dados*: um volume relevante de dados é controlado e transmitido pelos nós da rede. A fusão de dados é o mecanismo usado para combinar (por meio de diferentes estratégias) dados similares, de diferentes nós, buscando aumentar a eficiência energética da rede e otimizar o desempenho na transmissão de dados.

Há diversas propostas de protocolos de roteamento de dados para RSSF, que utilizam de diferentes estratégias e priorizam diferentes aspectos (BOUKERCHE, 2008; KARL e WILLING, 2007; SOHRABY, MINOLI e ZNATI, 2007; SINGH, VYAS e TIWARI, 2008; ZHANG e LI, 2008; NIEZEN, HANCKE, *et al.*, 2007; TANG, 2006). Este trabalho irá priorizar a discussão dos protocolos de roteamento em um contexto com nós móveis, apresentado na próxima seção.

3.5 MOBILIDADE EM RSSF

Ao longo da evolução das RSSF surgiu a demanda por um novo conceito de posicionamento dos nós. Passou-se a considerar a possibilidade da movimentação dos nós da rede, seja do sorvedouro ou qualquer outro nó. Apesar de a maioria dos cenários em que as RSSF são estudadas considerarem sensores estáticos, segundo Liu, Towsley e Dousse (2005) a tendência nas pesquisas leva em consideração a movimentação de pelo menos alguns nós, seja ela orientada ou aleatória (exploratória). Essa tendência vem em busca da ampliação da cobertura da área monitorada, do atendimento à novas demandas, ou da economia de energia dos nós (MUNIR, REN, *et al.*, 2007; CAMP, BOLENG e DAVIES, 2002; WANG, SRINIVASAN e CHUA, 2005).

Stevanovic e Vljajic (2008) demonstram em seus estudos que a mobilidade dos nós tem ampliado o tempo de vida útil das RSSF, como também sua capacidade de coleta de dados. Entretanto, os próprios autores alertam que a mobilidade pode ocasionar atrasos, problemas de roteamento, elevação da latência⁸, ou perda de informações (VLAJIC e STEVANOVIC, 2009).

Novas aplicações de RSSF com nós móveis podem ser consideradas, como o monitoramento de vazamento de contaminantes físicos, químicos ou radioativos (no mar, em rios, no solo ou no ar), sistemas de suporte a desastres naturais (enchentes, terremotos, furacões), sistemas de suporte a motoristas (informação automática sobre o trânsito ou condições da estrada), monitoramento de rebanhos (no reconhecimento de comportamento e habitat de espécies), orientação de pessoas (descrevendo localização, pontos de interesse, locais de risco), sistema de suporte a soldados em campo de batalha (informando sobre a presença e movimentação do inimigo, ou orientando a movimentação de tropas), na AP (com sensores acoplados em máquinas e implementos agrícolas), entre outros (YE, LUO, *et al.*, 2002; MUNIR, REN, *et al.*, 2007; STEVANOVIC e VLAJIC, 2008; OLIVEIRA, BARRETO, *et al.*, 2010; RABAEY, AMMER, *et al.*, 2000; SIKKA, CORKE e OVERS, 2004; SANTOS, DOTA e CUGNASCA, 2010; BARROS, 2010).

---

⁸ Latência é o intervalo de tempo entre o início de um evento e o momento em que seus efeitos tornam-se perceptíveis ao usuário.

A maioria das características das RSSF com nós estáticos são equivalentes às com nós móveis. No entanto, segundo Munir, Ren, *et al.* (2007) algumas diferenças devem ser destacadas:

- a topologia de uma rede com nós móveis apresenta um novo aspecto dinâmico, pelo fato de que pelo menos um nó da rede irá movimentar-se. Essa dinâmica interfere diretamente no protocolo de roteamento e também no desenvolvimento do *hardware*.
- por estar acoplado em algum tipo de automóvel, pressupõe-se que na maioria das vezes há maior disponibilidade de recursos para o nó embarcado, especialmente energia. Entretanto, em alguns casos é razoável assumir que também o nó móvel possui disponibilidade limitada de recursos, como fonte de energia, armazenamento de dados e processamento.
- a mobilidade impõe restrições aos protocolos de roteamento já propostos para RSSF com nós estáticos. A maioria dos protocolos eficientes para RSSF com nós estáticos apresenta baixo desempenho quando comparados as RSSF com nós móveis, devido à nova dinâmica da topologia.
- a comunicação entre os nós pode se tornar indisponível. Esse aspecto é um desafio, especialmente em ambientes hostis ou áreas remotas em que a comunicação deve ser constante ou a coleta de dados deve ser garantida.
- a estimativa da sua localização é necessária e uma constante preocupação.

A mobilidade em RSSF pode ocorrer com o movimento de todos os nós da rede, de alguns nós, ou somente do sorvedouro. Segundo Vljajic e Stevanovic (2009) a mobilidade dos nós pode ser categorizada segundo dois aspectos: o encaminhamento dos dados dos nós ao sorvedouro e o padrão de mobilidade dos nós.

O encaminhamento dos dados dos nós ao sorvedouro é categorizado como *um-para-um*, *muitos-para-um*, ou *muitos-para-um limitado*. No repasse de dados *um-para-um* o nó aguarda a passagem do sorvedouro. Essa estratégia promove economia de energia, mas pode causar um grande retardo na difusão dos dados, além de exigir mais memória nos nós. No repasse de dados *muitos-para-um*, os nós encaminham os dados para o sorvedouro em movimento, mesmo ele estando distante da origem do dado. Nesse caso, há uma entrega rápida do dado,

mas o gasto de energia é elevado. O repasse de dados *muitos-para-um limitado* consiste em definir grupos de sensores (*clusters*), de modo que um nó é selecionado como representante do *cluster* (nó Cabeça de *Cluster* - CC) e todos os nós do grupo irão encaminhar seus dados para ele, que por sua vez, os encaminha ao sorvedouro. Essa estratégia proporciona um balanço entre a economia de energia e a difusão dos dados. Entretanto, demanda outras ações, como a rotatividade entre os nós na função de CC, seleção adequada dos nós CC e roteamento dos dados do nó CC para o sorvedouro.

O padrão de mobilidade dos nós pode ser: *aleatório*, quando o nó modifica sua direção e velocidade de maneira arbitrária; de *caminho aleatório*, no qual o nó define um ponto destino aleatório, move-se até ele e após um intervalo determinado, sorteia o próximo ponto; *pré-fixado*, no qual o nó segue uma rota pré estabelecida; ou *controlado*, quando o nó ajusta sua direção e velocidade em função da demanda da aplicação ou das informações fornecidas pela RSSF (AKYILDIZ e VURAN, 2010; WANG e AKYILDIZ, 2010).

Apesar de em menor número, existem diversos protocolos de roteamento disponíveis para RSSF com nós móveis, que buscam promover o roteamento de dados, economizando energia e atendendo às demandas específicas de aplicações. As próximas subseções discutem alguns protocolos de roteamento de dados que representam as principais estratégias de roteamento em RSSF com nós móveis.

3.5.1 Protocolo de roteamento Two-Tier Data Dissemination

A primeira proposta de protocolo de roteamento de dados em RSSF com nós móveis foi apresentada por YE, LUO, *et al.* (2002), o Two-Tier Data Dissemination (TTDD). O trabalho considera um contexto com nós estáticos e um sorvedouro móvel, com encaminhamento de dados um-para-um. Cada nó tem conhecimento da sua posição (coordenada), enquanto que o sorvedouro não precisa saber da sua posição na área monitorada.

Quando um evento ocorre, os nós com sensibilidade para coletar dados do evento executam um procedimento em conjunto, elegendo um nó para agregar e armazenar o conjunto de dados (nó agregador). O TTDD adota como estratégia a definição lógica de uma grade, alocando os nós nas células dessa estrutura. Ao receber uma consulta do sorvedouro móvel, a rede a dissemina e o nó agregador inicia o envio dos dados por meio da estrutura em

grade. Inicialmente o nó agregador assume a posição de uma extremidade de uma célula e encaminha os dados registrados para os outros quatro nós de extremidade adjacentes a ele. Esse processo se repete até que toda a grade seja estruturada, com a definição de todos os nós de extremidade. A rota é construída durante o encaminhamento das informações do nó agregador, na qual cada nó armazena a fonte da mensagem que receberam. A Figura 9 ilustra a organização da rede em grade, construída pelo TTDD. Os nós de extremidades estão em destaque. A fonte do evento ocorreu no nó nomeado como A e o sorvedouro é o ponto S em destaque, ao alcance de comunicação somente do nó de extremidade nomeado como B.

Figura 9 - Estrutura lógica do protocolo de roteamento TTDD.

Fonte: Ye, Luo, *et al.* (2002).

Os resultados de Ye, Luo, *et al.* (2002) demonstram especialmente que à medida que a velocidade do sorvedouro aumenta, há maior gasto de energia e maior atraso na comunicação.

3.5.2 Protocolo de roteamento Mobile Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

Esse protocolo (M-LEACH) (ASLAM, JAVAID, *et al.*, 2012) corresponde a uma adaptação do protocolo de roteamento LEACH (HEINZELMAN, CHANDRAKASAN e BALAKRISHNAN, 2000), usado em RSSF com nós estáticos.

O LEACH usa uma abordagem de roteamento hierárquico. A hierarquia é baseada na segmentação dos nós da rede, formando grupos (*clusters*), com o objetivo de minimizar o gasto de energia (VLAJIC e XIA, 2006). Cada *cluster* tem um dos seus nós eleito como CC, que tem a função de receber as mensagens dos demais nós do *cluster*, agrupar os dados e enviá-los ao sorvedouro. Essa estratégia busca reduzir o volume de dados transmitidos na rede. Entretanto, devido às funções extras realizadas pelo nó CC, o consumo de energia neste nó será maior do que nos outros nós do *cluster*. Dessa forma, após um intervalo de tempo determinado, o protocolo de roteamento seleciona outro nó do *cluster* para assumir a função de CC, em busca de um balanceamento no consumo de energia dos nós que compõe a rede. A Figura 10 ilustra um esquema geral da organização de uma RSSF baseada no protocolo de roteamento LEACH.

Figura 10 - Organização hierárquica estabelecida pelo protocolo de roteamento LEACH.

Fonte: Adaptado de Aslam, Javaid, *et al.* (2012).

Como ocorre no LEACH, o M-LEACH também se baseia na organização hierárquica, baseada em *clusters*, dessa forma, corresponde a um protocolo com encaminhamento de dados muitos-para-um limitado. O protocolo permite a mobilidade dos nós e dos CC durante a fase de configuração e execução da rede, e baseia-se em janelas de tempo, nas quais cada nó CC possui um intervalo de tempo para receber os dados dos nós do seu *cluster*.

O M-LEACH considera que todos os nós são homogêneos quanto à capacidade de processamento, consumo de energia e comunicação. Conhecem sua coordenada por meio de um GPS e o sorvedouro é considerado fixo.

No M-LEACH, a fase de configuração da rede é diferente em relação à versão original do LEACH, com o objetivo de permitir a seleção de bons CC, conforme critérios prioritários no contexto com mobilidade. A descoberta dos CC é baseada na atenuação da carga de energia dos nós. São priorizados aqueles nós com maior disponibilidade de energia. Outro critério utilizado na seleção dos CC é a mobilidade dos nós. Dessa forma, o M-LEACH seleciona como CC prioritariamente aqueles nós com baixa mobilidade e com melhor disponibilidade de energia.

Após a escolha dos CC, cada nó CC selecionado envia uma mensagem em *broadcast* para rede, informando a sua condição. Os demais nós da RSSF avaliam os CC candidatos ao seu alcance e se vinculam, respectivamente, àquele com maior disponibilidade de energia e a um certo alcance de comunicação.

Na fase de execução do protocolo de roteamento, se um nó se afasta do alcance do seu nó CC, ou se o nó CC se afasta dos seus nós, então outro nó CC é selecionado. Esse processo pode gerar uma formação de um *cluster* ineficiente. Para lidar com este problema, a seleção do novo nó CC deve buscar atender os nós vinculados àquele *cluster*. O M-LEACH possui um mecanismo para executar a troca do nó CC, baseado no envio de uma mensagem de desvinculação dos nós para o nó CC, seleção do novo nó CC e então seleção do novo nó CC. Após a reestruturação, o novo nó CC reinicia o processo de recebimento dos dados dos demais nós.

3.5.3 Protocolo de roteamento de Fordor e Vidács

Fordor e Vidács (2007) propõem um protocolo de roteamento baseado na técnica de *flooding*⁹ controlado. Este protocolo permite a todos os nós da rede encontrar o sorvedouro móvel, num encaminhamento de dados do tipo muitos-para-um.

O protocolo assume que os sorvedouros são móveis e os demais nós são estáticos. Os sorvedouros se movem constantemente e em direções aleatórias. Os nós não são organizados

---

⁹ *Flooding* (inundação) é um processo de difusão de mensagens (dados) no qual o nó sensor encaminha a mensagem para todos os seus vizinhos, que por sua vez farão a mesma ação, de modo que a mensagem será propagada por toda a rede de sensores.

em *clusters*. Não há processo de fusão de dados, cada evento monitorado pela rede será entregue individualmente para o sorvedouro. Além disso, são considerados dois níveis hierárquicos de comunicação, no primeiro nível ocorre a comunicação entre os sorvedouros, e entre os sorvedouros e o *gateway*. No segundo nível ocorre a comunicação entre os nós, e entre os nós e os sorvedouros. A Figura 11 ilustra a organização da RSSF e os níveis de comunicação entre os componentes.

Figura 11 - Organização da RSSF com o protocolo de roteamento de Fordor e Vidács e níveis de comunicação entre os nós.

Fonte: Adaptado de Fordor e Vidács (2007).

O algoritmo considera que cada nó mantém uma tabela de roteamento para a entrega dos dados ao sorvedouro. Esta tabela é mantida por meio do envio de uma mensagem de manutenção do sorvedouro, que é propagada pela rede. Para evitar o gasto energético acentuado por conta dessa estratégia e consequente esgotamento prematuro da energia dos nós, o protocolo atualiza somente os ramos da árvore de roteamento que estão com uma configuração ruim em termos de roteamento e balanço de carga. O princípio básico é determinar um custo para a atualização entre o sorvedouro e cada nó e atualizar somente as rotas nas quais o custo da mudança está acima de um limite estabelecido.

O algoritmo tenta encontrar uma solução razoável, produzindo boas rotas, enquanto minimiza o número de mensagens necessárias para atualizá-las. Entretanto, nem sempre o dado encaminhado alcança o sorvedouro, sendo necessário reconstruir a tabela de roteamento

dos dados, causando maior consumo de energia. Este protocolo é indicado para aplicações em que existe um conjunto de sorvedouros movendo-se lentamente.

3.5.4 Protocolo de roteamento WHISPER

Oliveira, Barreto, *et al.* (2010) propõem o protocolo de roteamento Wireless High Speed Routing (WHISPER) que tem como ideia principal construir uma tabela de roteamento de dados dos nós estáticos para o sorvedouro móvel, que se move em alta velocidade. Consiste em um protocolo de roteamento com encaminhamento de dados do tipo muitos-para-um.

Durante sua passagem, o sorvedouro envia uma consulta à RSSF, que processa a consulta, coleta os dados e os entrega ao sorvedouro interceptando-o mais à frente. Esse processo consiste no seguinte procedimento: a consulta enviada pelo sorvedouro móvel é propagada pela RSSF por meio de *flooding*, até encontrar o nó com o dado consultado ou a área de interesse. Durante o encaminhamento da consulta os nós determinam a direção do sorvedouro e então, por meio de uma estratégia de interceptação, encaminham o dado da fonte até o sorvedouro, na posição calculada.

Oliveira, Barreto, *et al.* (2010) propõem três estratégias para a interceptação do sorvedouro móvel: 1) na *Whisper Follow*, ao receber a consulta, o nó verifica a coordenada atual do sorvedouro e encaminha para aquela coordenada. O nó seguinte atualiza a coordenada do sorvedouro e executa o mesmo procedimento, o que resulta em uma espécie de perseguição ao sorvedouro móvel. A Figura 12(a) ilustra esse contexto; 2) na estratégia *Whisper Intercept*, ao invés de encaminhar o dado com base no cálculo que considera a coordenada atual do sorvedouro, o algoritmo calcula um ponto de interceptação entre a trajetória do sorvedouro e o nó com a fonte do dado, encaminhando o dado imediatamente. O cálculo do ponto de interceptação leva em consideração a velocidade do sorvedouro e o atraso de comunicação na propagação do pacote na RSSF. A Figura 12(b) ilustra esta estratégia; 3) por sua vez, a estratégia *Whisper Shortest* calcula o ponto de interceptação mais próximo entre a fonte de dados e a rota do sorvedouro. Nesse caso o pacote de dados não é encaminhado imediatamente, devendo aguardar um intervalo de tempo calculado, para a correta interceptação do sorvedouro quando este estiver mais próximo da fonte de dados. A Figura 12(c) ilustra o contexto desta estratégia.

Figura 12 - Estratégias de interceptação empregadas pelo algoritmo WHISPER. (a) Whisper Follow; (b) Whisper Intercept; (c) Whisper Shortest.

Fonte: Adaptado de Oliveira, Barreto, *et al.* (2010).

Nota-se que o protocolo WHISPER é baseado em consultas, dessa forma a RSSF depende da solicitação do sorvedouro para enviar os dados. Uma consulta de dados é destinada a um nó ou a um ponto na área monitorada. O protocolo apresenta deficiência no roteamento de dados quando ocorre uma consulta no perímetro da área monitorada e depende de uma rota linear do sorvedouro móvel, impossibilitando ajustes na rota após o envio da consulta.

3.6 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

As RSSF são uma tecnologia emergente que possui potencial de aplicação em um grande conjunto de problemas. O uso das RSSF como componente na AP potencializa os sistemas nessa área. Sua utilização tem papel importante em atividades como monitoramento climático, ambiental, detecção de pragas/doenças, irrigação, análise do solo, geração de mapas de produtividade e pode ser aplicada no contexto da pulverização agrícola.

O monitoramento da deriva por meio das RSSF traz desafios computacionais relacionados à mobilidade, comunicação e em especial no desenvolvimento do protocolo de roteamento de dados. Diferentes estratégias de roteamento de dados presentes na literatura apresentam aspectos positivos e negativos, não existindo uma solução ideal de ampla aplicação na demanda do problema da pulverização agrícola. Esse contexto é interessante porque dá oportunidade ao desenvolvimento de novos protocolos, que explorem novas estratégias ou combine diferentes técnicas.

Inspirando-se nas soluções de roteamento de dados apresentadas neste capítulo e analisando os desafios e problemas inerentes ao contexto da utilização das RSSF para o controle da deriva na pulverização agrícola aérea, especialmente a perda de pacotes, este trabalho propõe uma solução de roteamento de dados denominada Protocolo de Roteamento de Dados para Suporte à Pulverização Agrícola (ProRDPuv) a ser proposta no Capítulo 4.

4. REDES DE SENSORES SEM FIO EM SISTEMAS DE PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA: ARQUITETURA E PROTOCOLO DE ROTEAMENTO

Considerando as características das RSSF e os desafios inerentes ao contexto da pulverização agrícola, este capítulo propõe uma organização de sistema de *software*, especificando seus componentes e funcionalidades, e o protocolo de roteamento de dados.

O protocolo de roteamento de dados proposto, ProRDPuv, tem como objetivo proporcionar a comunicação entre a RSSF e o sorvedouro móvel em alta velocidade, com baixo consumo de energia e com taxa de entrega de pacotes adequada. Para delimitar o desenvolvimento e fundamentar os requisitos do protocolo, foi adotado o contexto da pulverização agrícola, com foco no controle da deriva.

Nesse contexto de um sistema em AP para suporte ao processo de pulverização agrícola baseado em RSSF, propõem-se três funcionalidades distintas: 1) a avaliação das condições ambientais para pulverização; 2) o ajuste na rota do veículo pulverizador durante a pulverização, com objetivo de minimizar a deriva; e 3) a avaliação da eficácia da pulverização após a aplicação. A segunda funcionalidade é o foco principal deste trabalho de pesquisa, por conta dos desafios inerentes a esta função.

4.1 FUNCIONALIDADES DO SISTEMA

4.1.1 Funcionalidade da avaliação das condições ambientais

O monitoramento das condições ambientais (umidade, temperatura, vento) é um processo executado pela RSSF constantemente, seja antes, durante ou após o procedimento de pulverização. Dessa forma, os nós da RSSF coletam os dados de interesse e encaminha-os ao SSPA, que avalia se as condições ambientais estão de acordo com os padrões necessários para pulverização. Por exemplo, se houver uma temperatura acima dos limites estabelecidos pelos especialistas, o sistema deve alertar o agricultor, desaconselhando a aplicação. Ou ainda, durante a pulverização, se ocorrer uma mudança abrupta nas condições do vento (rajadas de vento), o sistema deve emitir um alerta recomendando suspender a aplicação.

O fluxograma apresentado na Figura 13 mostra a lógica do sistema de suporte ao agricultor com base no monitoramento das condições ambientais. Considerando os dados

fornecidos pela RSSF, o sistema avalia se o contexto ambiental está ou não adequado para uma pulverização e recomenda uma ação.

Figura 13 - Fluxograma do sistema de avaliação das condições ambientais.

Fonte: Autor.

4.1.2 Funcionalidade do ajuste da rota de pulverização

Especialmente na pulverização agrícola executada por aeronaves, o sistema baseado em RSSF pode ser um importante aliado com recomendações de ajustes na rota de pulverização, por meio do monitoramento das condições do vento no instante da aplicação.

Há dois contextos possíveis, no caso de uma aeronave controlada por um piloto, o sistema de recomendação pode interagir com o sistema de GPS do avião, sugerindo ajustes na rota de referência de pulverização. Outra possibilidade é no uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), nesse caso a RSSF envia dados para os VANTs de modo que o sistema de navegação dos aparelhos utilizam os dados registrados pelos nós para decidir sobre o ajuste nas suas rotas.

A Figura 14 ilustra o contexto de um ajuste na rota de uma aeronave durante a pulverização agrícola. No exemplo, a RSSF monitora as condições ambientais na área da pulverização, possibilitando que mudanças na direção ou intensidade do vento sejam identificadas. Nesse caso, a RSSF envia os dados coletados (continuamente) para o sistema embarcado na aeronave, que os utiliza para subsidiar o ajuste na rota, caso seja necessário.

Figura 14 - Exemplo de ajuste na rota de uma aeronave pulverizadora durante a aplicação de agrotóxico com base no monitoramento das condições ambientais executada pela RSSF.

Fonte: Autor.

4.1.3 Funcionalidade da avaliação da eficácia da pulverização

Com o uso de sensores adequados, por exemplo, o de molhamento foliar¹⁰, é possível avaliar a eficácia da pulverização. Esse tipo de sensor é capaz de determinar a umidade depositada sobre as folhagens, o que permite inferir, após a aplicação, se o produto pulverizado atingiu a área alvo.

Dessa forma, além de identificar a coordenada onde o produto foi depositado e determinar a eficácia da cobertura da aplicação, avalia-se também a qualidade das decisões tomadas nas funcionalidades de avaliação das condições ambientais e do ajuste na rota de pulverização. A correlação desse conjunto de análises pode ser utilizada em algoritmos de otimização ou de inteligência artificial para aprimorar as decisões do sistema, com o objetivo de proporcionar soluções melhores em diferentes contextos ambientais.

O uso das RSSF em sistemas de suporte à pulverização agrícola e no controle da deriva proporciona benefícios e novas estratégias para a AP. Entretanto, o potencial de ganho com esse sistema traz um conjunto de desafios teóricos e técnicos a ser enfrentado. As próximas seções discutem estes desafios e apresentam estratégias e métodos que permitem a utilização das RSSF no contexto da pulverização agrícola.

¹⁰ Os sensores de molhamento foliar típicos são constituídos por uma placa resistiva coberta de filamentos. A condensação da água sobre a placa resistiva provoca a diminuição da resistência elétrica, que é medida pelo sensor.

4.2 ORGANIZAÇÃO DO SISTEMA

Com o objetivo de definir os componentes do SSPA, suas propriedades externas e seus relacionamentos, esta seção propõe uma organização de sistema em camadas. A Figura 15 apresenta o diagrama que representa a organização desse sistema.

Figura 15 - Organização em camadas do SSPA.

Fonte: Autor.

A camada da RSSF obtém dados de diversas grandezas por meio dos diferentes tipos de sensores. Ela interage com a camada das Funcionalidades, que por sua vez faz uso dos dados coletados pela RSSF para executar as funções de avaliação das condições ambientais, ajuste na rota de pulverização e avaliação da eficácia da pulverização. O SSPA integra todos os componentes e auxilia o agricultor em todo o processo de pulverização.

Cada uma das duas funcionalidades corresponde a um componente distinto. O componente para ajuste na rota de pulverização interage ainda com o sistema de navegação do veículo pulverizador, de modo a prover informações para sua funcionalidade específica, baseada nas informações ambientais coletadas pela RSSF.

Ao detalhar a organização do sistema deve-se identificar os elementos que a compõem a aplicação. A Figura 16 apresenta estes elementos. A RSSF possui um **sorvedouro móvel**, que corresponde ao nó embarcado no veículo pulverizador, com capacidade de comunicação com qualquer outro nó, estando ele ao seu alcance de comunicação. Ele coleta os dados registrados pelos nós da rede. O **gateway** é um nó sensor que adicionalmente atua como uma “porta de

entrada” para a RSSF. É o ponto de partida para a execução de comandos ou requisições específicas do usuário para a rede e que ocasionalmente pode receber dados registrados pela RSSF e encaminhar ao usuário. Os **nós CC**, escolhidos pelo protocolo de roteamento de dados, têm a função de receber os dados dos nós e encaminhá-los ao sorvedouro durante sua passagem. Os demais **nós** coletam os dados ambientais de interesse da aplicação e envia-os aos seus respectivos nós CC.

Figura 16 - Principais elementos da RSSF no contexto da pulverização agrícola.

Fonte: Autor.

Considerando os elementos e a organização em camada do sistema, são propostos três componentes computacionais provedores de serviço: 1) Aplicação Gateway; 2) Aplicação Sorvedouro Móvel; 3) Serviços Web. A Figura 17 apresenta a composição e a relação entre esses componentes. Com esta organização, é possível empregar diferentes padrões de infraestrutura, sensores e protocolos de roteamento de dados.

Figura 17 - Organização e integração dos componentes computacionais do SSPA.

Fonte: Autor.

Na figura é possível observar que dois componentes estão inseridos na RSSF (Aplicação Gateway e Aplicação Sorvedouro Móvel), enquanto que o componente Serviço Web é externo à RSSF. As subseções seguintes detalham os aspectos de cada componente.

4.2.1 Componente Aplicação Gateway

O componente Aplicação Gateway é responsável por preparar a RSSF para sua utilização, enviar parâmetros de configuração, executar consultas e assegurar o funcionamento do protocolo de roteamento de dados. Na organização proposta, este componente atua como um fornecedor de serviços para o ambiente externo e executa o papel de interface entre as aplicações e a RSSF, servindo como porta de entrada para solicitação dos serviços disponíveis.

O subcomponente *TrataRequisições* identifica o tipo de requisição e delega a um Manipulador a correta execução daquele serviço. Cada Manipulador está associado a um serviço que interage com a pilha de protocolos da RSSF, por meio do subcomponente *Binding*. Este subcomponente cria mensagens no protocolo adotado pela rede de sensores, o que permite a independência de protocolo ou de tipos de nós.

Os principais serviços fornecidos pela rede são:

- *preparação da rede*: consiste no envio de um conjunto de parâmetros para os nós (por exemplo, a rota prevista do sorvedouro móvel), para que estes se organizem dada a regra definida pelo protocolo de roteamento de dados;
- *consulta localizada*: é um serviço que possibilita ao usuário executar uma consulta de dados em uma região específica. Dessa forma, este serviço encaminha à RSSF uma consulta com seus respectivos parâmetros, como por exemplo, a coordenada de interesse, o raio de alcance e quais dados devem ser registrados.

4.2.2 Componente Aplicação Sorvedouro Móvel

O componente Aplicação Sorvedouro Móvel contém subcomponentes para obter os dados coletados pela RSSF, processá-los, verificá-los com os parâmetros ambientais definidos para a aplicação, armazenar tais dados e recomendar ajustes na rota da aeronave pulverizadora. Ele faz uso de um Repositório para registro temporário dos dados entregues pelos nós da RSSF. Em um momento posterior, tais dados são processados e armazenados em definitivo em uma base de dados. Dessa forma, outros serviços poderão acessar e utilizar essas informações em suas aplicações.

Existem três subcomponentes principais na Aplicação Sorvedouro Móvel:

- *ColetaDadosAmbientais*: coleta os dados dos nós da RSSF por meio de estruturas do tipo *Listen*, registra os dados no Repositório e encaminha para o subcomponente *AnalisaDadosAmbientais*;

- **AnalisaDadosAmbientais:** é responsável por monitorar as condições ambientais e disparar eventos (*Triggers*) nos casos em que os dados configuram uma condição desfavorável à aplicação aérea;
- **CorrigeRota:** utiliza os dados ambientais coletados pela RSSF, podendo sugerir correções na rota de pulverização. Este subcomponente irá interagir com o sistema de navegação do veículo pulverizador (por exemplo, uma aeronave ou um VANT).

Os dados ambientais armazenados no Repositório e o histórico de correções de rotas são posteriormente persistidos no banco de dados do sistema e poderão ser utilizados por algoritmos de aprendizagem de máquina, por exemplo.

4.2.3 Componente Serviços Web

O componente Serviços Web é responsável por fornecer os possíveis serviços deste sistema por intermédio das tecnologias da Internet. Os serviços utilizam das informações persistidas no banco de dados, ou ainda, tais serviços podem acessar diretamente dados da RSSF, por meio da Aplicação Gateway, requisitando a execução de uma busca localizada de dados ambientais. Desta forma, as funcionalidades da RSSF podem ser acessadas por qualquer aplicação, em ambiente *web*, independente de tecnologia ou linguagem de programação.

Dessa forma, algumas aplicações podem ser desenvolvidas como, histórico de ajustes de rotas executadas pelo sorvedouro móvel; histórico de condições ambientais; e registro e análise da eficácia do processo de pulverização. É neste último componente que serviços de análise e processamento de informação serão implementados.

A organização do sistema proposto se baseia em serviços, e permite aplicações usuárias interagirem com a RSSF como uma unidade provedora de serviços, independentemente da infraestrutura ou protocolos da rede. Além disso, é possível definir uma configuração de RSSF com mais de um perfil de sorvedouro ou *gateway*, e em qualquer número necessário.

4.3 CARACTERÍSTICAS DO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO DE DADOS COM SORVEDOURO MÓVEL PARA SUPORTE A SISTEMAS DE PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA

Esta seção apresenta as características do protocolo de roteamento proposto, de modo a atender a funcionalidade do ajuste na rota do veículo pulverizador, descrita na Seção 4.1.2.

Se o veículo se move lentamente, como no caso de um trator, o problema é simplificado, pois os nós terão um tempo amplo para a transferência dos dados para o sorvedouro. Entretanto, se o veículo se move rapidamente, como no caso de uma aeronave, o tempo disponível para a o envio desses dados é mais curto, o que torna a entrega dos dados e os ajustes na rede por conta de uma modificação na rota mais difícil.

Este trabalho propõe o uso de três estratégias para abordar os desafios inerentes à interação entre a RSSF e a aeronave de pulverização (sorvedouro móvel):

- 1) estabelecer uma **representação da rota** do sorvedouro móvel na RSSF;
- 2) adotar uma **organização hierárquica** dos nós, usando o conceito de *cluster*; e
- 3) rotear os dados dos nós para o sorvedouro móvel empregando uma **estratégia de interceptação**.

As duas primeiras estratégias consistem em preparar a RSSF previamente à passagem do sorvedouro móvel, enquanto que a terceira será empregada durante sua passagem. As seções seguintes discutem cada uma das estratégias propostas.

4.3.1 Representação da rota do sorvedouro móvel na RSSF

Em razão das dificuldades inerentes à rápida passagem do sorvedouro móvel, da demanda por uma RSSF proativa e da intenção de interceptar o sorvedouro durante sua passagem, é imperativo que os nós conheçam a rota prevista da pulverização. Dessa forma, é possível tirar proveito dessa informação para otimizar a entrega dos dados. O objetivo é utilizar alguns nós que estejam posicionados nas proximidades da rota do sorvedouro, utilizando-os como referência no processo de entrega dos dados, de maneira a utilizar o tempo de comunicação disponível de forma eficaz.

Um pré-processamento à passagem do sorvedouro será necessário para que permita a representação da rota de pulverização na RSSF. O propósito deste pré-processamento é discretizar a rota de passagem do sorvedouro móvel sobre a área monitorada e enviar esta informação para a rede de sensores. Essa informação possui as coordenadas de entrada e saída do sorvedouro móvel na área monitorada.

Com base na informação da rota do sorvedouro, alguns nós serão selecionados como *nós de referência*, priorizando aqueles que atendem a uma distribuição uniforme ao longo da rota, que estejam mais próximos da linha de passagem do sorvedouro e que tenham maior alcance de comunicação, resultando em um intervalo maior de comunicação para entrega de dados. Assume-se que cada nó (incluído o sorvedouro móvel) tem conhecimento da sua coordenada por meio de um dispositivo de posicionamento (por exemplo, GPS).

Os nós de referência serão os responsáveis por entregar os dados coletados pela RSSF para o sorvedouro móvel. Dessa forma, os demais nós não irão se comunicar diretamente com o sorvedouro móvel, mas irão enviar seus dados para um nó de referência, para que ele encaminhe os dados.

A Figura 18 ilustra uma representação da rota do sorvedouro móvel na RSSF. A linha tracejada corresponde à rota prevista do sorvedouro. Com base nessa linha ocorre a seleção dos nós de referência, conforme os critérios de posicionamento e alcance de comunicação do sensor.

Figura 18 - Representação da rota do sorvedouro móvel na rede de sensores e seleção dos nós de referência.

Fonte: Autor.

Após a seleção dos nós de referência, os demais nós irão se organizar em grupos, estabelecendo *clusters*. A próxima seção discute esse processo.

4.3.2 Organização dos nós em *clusters*

A estratégia de agrupar os nós em *clusters* organiza os nós hierarquicamente, dá suporte ao processo de roteamento de dados e proporciona economia de energia dos nós por meio do balanceamento de carga (GUPTA e YOUNIS, 2003; JIN e LI, 2009; IQBAL, GONDAL e DOOLEY, 2006; VLAJIC e XIA, 2006).

Os *clusters* serão definidos com base nos nós de referência selecionados na etapa de representação da rota do sorvedouro na RSSF. Esses nós se tornam nós CC e os demais nós irão se associar a um nó CC com base no parâmetro da distância, que é determinada pelo número de saltos (*hops*) que uma mensagem enviada pelo nó deve executar até alcançar o nó CC. O ideal é que a comunicação entre os nós e o nó CC seja direta (um único salto), mas é provável que vários nós terão suas mensagens entregues executando múltiplos saltos (*multihop*).

A Figura 19 ilustra um exemplo no qual cada nós sensor está associado a um nó CC. Nota-se que os nós mais distantes de um nó CC precisam se associar a outros nós intermediários de modo a alcançar o nó CC, caracterizando um processo colaborativo, típico em RSSF. A figura ilustra também os *clusters* definidos por meio dos polígonos.

Figura 19 - Associação dos nós aos nós CC e organização dos nós em *clusters*.

Fonte: Autor.

Em cada *cluster*, os nós sensores irão encaminhar seus dados para os respectivos nós CC. Os nós CC por sua vez agregam os dados e devem estar preparados para a passagem do sorvedouro, de modo a garantir a entrega dos dados com a menor perda possível de pacotes.

4.3.3 Roteamento dos dados baseado na interceptação do sorvedouro móvel

Os dados coletados pelos nós devem ser entregues ao sorvedouro móvel durante sua passagem. Considerando seu movimento em alta velocidade, a chance de ocorrer uma falha no envio dos pacotes de dados e um conjunto de dados não ser entregue ou ser entregue parcialmente aumenta.

Selecionar nós próximos da rota do sorvedouro móvel pode não ser suficiente para uma entrega eficaz dos dados. Adicionalmente, é empregada uma organização dos nós em *clusters* e o roteamento dos dados baseado em uma estratégia de interceptação, que consiste em monitorar ou prever o movimento do sorvedouro, de modo que os nós calculam o momento adequado para entrega dos dados. Nesta proposta, os nós encaminham seus dados para os seus respectivos nós CC e estes por sua vez determinam o instante para entrega dos dados, interceptando o sorvedouro móvel, ou seja, não ocorre requisição ou negociação entre o nó CC e o sorvedouro, o nó CC simplesmente envia os dados (com a expectativa que o sorvedouro receba).

A Figura 20 ilustra um exemplo do roteamento de dados baseado na estratégia de interceptação. Na passagem do sorvedouro móvel, em um determinado tempo t_1 , a RSSF detecta sua chegada. Os nós verificam a velocidade do sorvedouro e enviam esta informação para o nó CC correspondente, por meio da rota estabelecida no processo de formação dos *clusters*. O nó CC usa as informações recebidas pelos nós do seu *cluster* para calcular o intervalo de tempo para a chegada do sorvedouro e aguarda o tempo necessário para envio dos dados no tempo t_2 . O nó CC envia os dados e intercepta o sorvedouro em sua passagem próxima ao nó CC.

Figura 20 - Roteamento de dados baseado na estratégia de interceptação.

Fonte: Adaptado de Oliveira, Barreto, *et al.* (2010).

O uso das três estratégias propostas deve proporcionar melhor taxa de entrega dos dados registrados pela RSSF para o sorvedouro móvel. Caso contrário, se todos os nós estivessem aguardando a passagem do sorvedouro para então estabelecer a comunicação, receber a requisição de dados e enviar o pacote com os dados, com o rápido movimento do sorvedouro, a taxa de perda de pacotes pode ser elevada ou intolerável (LAMBROU e PANAYIOTOU, 2009; OLIVEIRA, BARRETO, *et al.*, 2010).

A RSSF deve ser capaz de se adaptar aos possíveis ajustes na rota do sorvedouro durante sua passagem. Dependendo da mudança na rota, será necessário selecionar outro nó melhor posicionado em relação à nova rota para entregar os dados.

A rota do sorvedouro móvel é discretizada em cada *cluster*. Cada *cluster* registra as coordenadas de entrada e saída do sorvedouro. Com esses dois pontos é determinada uma reta, que é utilizada como base para determinar a proximidade dos nós com a rota do sorvedouro. Durante o processo de ajuste da rota do sorvedouro, as coordenadas dos pontos de entrada e saída são atualizadas e uma nova avaliação da proximidade dos nós do *cluster* em relação à nova rota é executada. Se for adequado, um novo nó é escolhido para entrega dos dados.

A Figura 21(a) ilustra um exemplo de RSSF preparada para a passagem do sorvedouro móvel, com a representação da rota do sorvedouro, os nós CC selecionados e os *clusters* definidos. Na Figura 21(b), em um determinado instante (após a passagem pelo segundo *cluster*), com base nos dados fornecidos pela RSSF, o sorvedouro executa um ajuste na sua rota. A decisão do sorvedouro em modificar sua rota deve ser encaminhada para os nós CC seguintes. Cada nó CC irá avaliar se há outro nó no seu *cluster* em melhor condição para

entrega dos dados (mais próximo da rota e com maior intervalo de comunicação). Se houver, então o nó CC irá determiná-lo para tal função.

Figura 21 - Ajuste na rota do sorvedouro móvel durante sua passagem e consequente reorganização da RSSF. **(a)** Representação da rota do sorvedouro e organização dos nós em *clusters*. **(b)** Ajuste na rota do sorvedouro e reorganização dos *clusters* subsequentes, com a possível redefinição do nó que irá entregar os dados ao sorvedouro.

Fonte: Autor.

Porém, as estratégias propostas também apresentam alguns desafios. O primeiro deles é determinar o número adequado de nós CC a serem estabelecidos ao longo da rota do sorvedouro móvel. Se for utilizado um número baixo de nós CC ocorre uma sobrecarga, devido ao grande número de dados roteados para os poucos nós CC, o que aumenta a chance de falha na entrega dos pacotes de dados dos nós para os nós CC, por conta das colisões de pacotes, além do aumento substancial no consumo de energia dos nós CC. Em contrapartida, um número elevado de nós CC não garante um bom funcionamento do sistema, pois pode causar um excesso de comunicação no roteamento, dificultando a entrega dos pacotes de dados ao nó CC por conta da alta densidade dos nós. Nesse caso também há o aumento no consumo de energia de toda a RSSF, pois ocorre maior número de transmissão de pacotes para encaminhamento dos dados. Vale notar que um número elevado de nós CC tende a anular a funcionalidade do *cluster*. Dessa forma, fica evidente que a seleção do número adequado de nós CC é importante para balancear o consumo de energia e reduzir o número de transmissão de dados.

O segundo desafio está associado à seleção dos nós CC. Em diferentes momentos, durante o funcionamento da RSSF, diferentes nós podem assumir a função de CC. A mudança do nó CC é necessária para promover um balanço no consumo de energia, em contra partida o processo de seleção de um novo nó CC e os ajustes necessários demandam um gasto de

energia adicional (com muitas trocas de mensagens). Assim, a mudança deve ocorrer, mas o menor número de vezes possível. Decidir quando executar este processo é um desafio para o protocolo de roteamento.

As seções seguintes detalham os processos, técnicas computacionais empregadas, algoritmos e os detalhes do protocolo de roteamento de dados proposto.

4.4 DESCRIÇÃO DO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO DE DADOS

O protocolo de roteamento de dados no contexto de uma RSSF com nós móveis deve garantir a entrega dos dados coletados pela rede, mesmo com a dinâmica adicional da mobilidade, por meio da manutenção das rotas de entrega dos pacotes de dados entre os nós. O encaminhamento do protocolo pode ser classificado com muito-para-um limitado, enquanto que o padrão de mobilidade é um misto entre pré-fixado e controlado.

O protocolo de roteamento de dados proposto considera que os nós são homogêneos, estão fixos e somente o sorvedouro é móvel. O protocolo assume que a rota do sorvedouro móvel é conhecida pela RSSF previamente à sua passagem e que cada nó conhece sua coordenada e dos seus vizinhos. O sorvedouro móvel tem conhecimento somente da sua coordenada.

O protocolo de roteamento prepara a RSSF para a passagem do sorvedouro móvel, coleta o conjunto de dados desejados e encaminha os dados dos nós para o sorvedouro durante a sua passagem. Para tanto ele inclui três etapas fundamentais:

- 1) **preparação (configuração) da RSSF**: consiste em determinar os nós CC, com base na rota do sorvedouro móvel e associar cada nó a um nó CC (definição dos *clusters*);
- 2) **busca por dados (requisição/consulta)**: corresponde ao processo de coleta de dados pelos nós, com base em parâmetros como região de interesse, raio de alcance, frequência de amostragem, entre outros;
- 3) **coleta de dados pelo sorvedouro**: é a passagem do sorvedouro móvel sobre a área monitorada pela RSSF e a coleta dos dados disponíveis nos nós CC.

Cada uma dessas etapas envolve vários serviços e trocas de mensagens na camada de rede do protocolo de roteamento. As próximas seções detalham os aspectos técnicos e de implementação inerentes a cada uma das etapas.

4.4.1 Preparação da RSSF

O primeiro serviço consiste em configurar a RSSF, definindo os nós CC e a formação dos *clusters*.

A seleção dos nós CC considera dois parâmetros de entrada, as coordenadas dos pontos de entrada e saída do sorvedouro móvel ($P_0(X_0, Y_0)$, $P_1(X_1, Y_1)$) e o número (n) de *clusters*. Essas informações são encaminhadas para a RSSF por meio do *gateway*, que ao receber os dados dos parâmetros executa uma chamada de serviço da camada de rede.

O processo de seleção dos nós CC utiliza a mensagem definida como:

$$\text{MsgDescobertaCC} = [P_0(X_0, Y_0), P_1(X_1, Y_1), n, C_i, P_{Ci}]$$

Na mensagem, o parâmetro C_i é utilizado para controle da sequência do nó CC a ser descoberto e P_{Ci} corresponde à coordenada de referência para escolha do nó CC.

Na camada de rede, o processo de descoberta dos nós CC consiste em identificar os nós mais próximos das coordenadas calculadas. O cálculo da coordenada ideal (P_{Ci}) de cada nó CC é dada pela Equação (1). P_{Ci} corresponde à coordenada do i -ésimo nó CC.

$$P_{Ci} = \frac{(2i-1)|P_1-P_0|}{2n} \quad (1)$$

A partir do nó *gateway*, cada nó identifica o seu nó vizinho mais próximo da coordenada P_{Ci} correspondente. A distância é dada pela Equação (2), na qual a coordenada v_i corresponde ao i -ésimo vizinho. A mensagem de descoberta do nó CC será encaminhada ao nó vizinho com menor $d_{v_i P_{Ci}}$.

$$d_{v_i P_{Ci}} = \sqrt{(x_{P_{Ci}} - x_{v_i})^2 + (y_{P_{Ci}} - y_{v_i})^2} \quad (2)$$

O processo se repete até que a mensagem de descoberta do nó CC alcança um nó que não possui um nó vizinho mais próximo da coordenada P_{Ci} do que ele próprio. Nesse

momento, o nó se autoelege como nó CC_i , calcula a coordenada $P_{C(i+1)}$, atualiza o atributo C_i e P_{C_i} na mensagem de descoberta do CC e reinicia o processo encaminhando a mensagem para o seu nó vizinho mais próximo da nova coordenada ($P_{C(i+1)}$). Esse processo se repete até que todos os n nós CC sejam determinados.

4.4.1.1 Redes com nós heterogêneos

Para o caso específico de uma RSSF com nós heterogêneos com diferentes alcances de comunicação, a seleção dos nós CC baseada exclusivamente na distância pode resultar em escolhas ruins, pois um nó com maior alcance de comunicação pode ter mais tempo de acesso ao sorvedouro móvel, mesmo estando mais distante da rota que outro nó. Para evitar essa situação, propõe-se o uso de um critério adicional que é o alcance de comunicação, em busca de garantir o maior tempo de acesso entre o nó CC e o sorvedouro móvel.

Após a determinação do nó CC por meio do critério da distância, é calculado o seu tempo de acesso ao sorvedouro móvel. Este tempo é proporcional ao espaço percorrido pelo sorvedouro móvel dentro do alcance do nó CC, a ser detalhado na Seção 4.5.3.1.

Com o intervalo de tempo de comunicação determinado, o nó CC encaminha essa informação para os seus nós vizinhos por meio de *broadcast*. Cada vizinho verifica se alcança o sorvedouro com base nas informações da rota e avalia o seu intervalo de tempo de acesso. Caso seu tempo seja pior (mais curto), então a mensagem é descartada, mas se for melhor, então ele assume a função de CC e avisa por meio de *broadcast* aos seus nós vizinhos da sua nova situação (incluindo o CC antigo). O processo se repete até convergir para a escolha de um sensor próximo à coordenada P_{C_i} e com maior intervalo de comunicação com o sorvedouro móvel.

A Figura 22 ilustra um exemplo de seleção do nó CC baseado no critério do intervalo de tempo de comunicação. Na Figura 22(a) o nó A CC_i foi selecionado com base unicamente no critério da distância em relação à P_{C_i} . Uma mensagem é então enviada aos seus vizinhos informando do valor do seu intervalo de tempo de comunicação (k) com o sorvedouro. Na Figura 22(b) é possível notar que o nó C tem intervalo menor ($k-m$) e o nó D não alcança a rota do sorvedouro, portanto ambos descartam a mensagem. Já o nó B possui intervalo de

tempo de comunicação melhor que o nó A ($k+l$), então assume a função de nó CC e informa os seus nós vizinhos dessa decisão.

Figura 22 - Exemplo de seleção de nó CC com base no critério do intervalo de tempo de comunicação com o sorvedouro. **(a)** O nó A CC selecionado pelo critério da distância informa seus vizinhos do seu intervalo. **(b)** O nó B tem intervalo melhor que A, então se auto elege nó CC e avisa seus vizinhos do valor do seu intervalo.

Fonte: Autor.

4.4.1.2 Definição dos nós Cabeça de Cluster

Durante o processo de seleção dos nós CC a rota utilizada por cada nó para encaminhar a mensagem de descoberta dos nós CC será armazenada em uma tabela de roteamento local (no nó). A rota do *gateway* até o último nó CC está distribuída nas tabelas de roteamento dos nós que compõem a rede.

A Figura 23 ilustra o processo de definição dos nós CC. No exemplo, as coordenadas dos pontos de entrada (P_0) e saída (P_1) do sorvedouro móvel estão representados na figura e o número de *clusters* (n) é igual a dois. Na Figura 23(a) o *gateway* calculou a coordena ideal para o primeiro nó CC (P_{C1}), montou a mensagem para descoberta do CC, avaliou qual dos seus vizinhos está mais próximo da coordenada P_{C1} (no exemplo é o vizinho v_2) e encaminhou a mensagem para ele, registrando a rota em sua tabela de roteamento. Na sequência, a Figura 23(b) ilustra o resultado do encaminhamento da mensagem de descoberta do nó CC, até

encontrar o nó mais próximo da coordenada P_{C1} , que se autoelege como nó CC_1 . Então, o nó CC_1 reinicia o processo de descoberta para o próximo nó CC, calculando a próxima coordenada (P_{C2}), atualizando os atributos da mensagem de descoberta do CC e encaminhando a mensagem para o seu nó vizinho mais próximo da nova coordenada (no exemplo, o vizinho v_4), registrando a rota em sua tabela de roteamento. A Figura 23(c) ilustra a configuração final da rede, com os nós CC descobertos e a rota estabelecida do *gateway* até o último nó CC.

Figura 23 - Processo de definição dos nós CC. **(a)** Definição da coordenada P_{C1} e envio da mensagem de descoberta do nó CC para o nó vizinho mais próximo da coordenada P_{C1} . **(b)** Seleção do nó CC_1 , definição da coordenada para o próximo nó CC (P_{C2}) e envio da mensagem de descoberta do nó CC para o nó vizinho de CC_1 mais próximo da nova coordenada. **(c)** Configuração final, com os nós CC selecionados e a rota estabelecida do *gateway* até o último CC.

Fonte: Autor.

O processo inicia na camada de aplicação do nó *gateway*. Na ocasião, a camada de aplicação executa uma chamada de função da camada de rede com os parâmetros iniciais (P_0 , P_1 , n , CC_i) para o processo de definição dos nós CC. Por sua vez, a camada de rede recebe os parâmetros, monta a mensagem e envia para o nó vizinho mais próximo da coordenada do CC correspondente.

Quando um nó recebe a mensagem de descoberta dos nós CC da camada inferior, o protocolo verifica se o próprio nó é o nó mais próximo da coordenada P_{C_i} . Caso seja, ele se auto elege como nó CC, atualiza os dados da mensagem *MsgDescobertaCC*, como por exemplo a coordenada $P_{C(i+1)}$ do próximo CC, e encaminha a mensagem atualizada para o nó vizinho mais próximo de $P_{C(i+1)}$. A Figura 24 apresenta o diagrama de sequência da UML do processo de descoberta dos nós CC.

Figura 24 - Diagrama de sequência do processo de descoberta dos nós CC.

Fonte: Autor.

O Algoritmo 1 detalha em pseudocódigo a função de descoberta dos nós CC, invocada pela camada de aplicação.

Algoritmo 1 - Função de descoberta dos nós CC na camada de rede. Algoritmo invocado pela camada de aplicação.

Parâmetros:

P0 {Coordenadas de entrada}
 P1 {Coordenadas de saída}
 n {número de CC}
 CCi {CC a ser descoberto}

Variáveis:

listaDeVizinhos ← todos os nós ao alcance do nó
 PCi ← (0,0)
 vizinhoMaisPróximo ← o próprio nó
 menorDistância ← ∞
 flagSouCC ← 0

Ação:

PCi ← Calcula coordenada do CC(P0, P1, n, CCi)
 Cria mensagem: MsgDescobertaCC(P0, P1, n, CCi, PCi)

```

para (cada  $i$  em listaDeVizinhos) faça
  se ( Calcula distância( $i$ , PCi) < menorDistância ) então
    vizinhoMaisPróximo  $\leftarrow i$ ;
    menorDistância  $\leftarrow$  Calcula distância( $i$ , PCi)
  fim se
fim para
Cria entrada na tabela de roteamento para (vizinhoMaisPróximo)
Envia pacote (vizinhoMaisPróximo, MsgDescobertaCC)

```

O Algoritmo 2 descreve a lógica do procedimento de descoberta dos nós CC processando os eventos oriundos da camada inferior (física).

Algoritmo 2 - Função de descoberta dos nós CC na camada de rede. Algoritmo invocado pela camada física.

```

Parâmetros:
MsgDescobertaCC                                     {Mensagem com os parâmetros (P0, P1,  $n$ , CCi, PCi)}

Variáveis:
listaDeVizinhos  $\leftarrow$  todos os nós ao alcance do nó
vizinhoMaisPróximo  $\leftarrow$  o próprio nó
menorDistância  $\leftarrow$  Calcula distância(o próprio nó, PCi)
flagSouCC  $\leftarrow$  0

Ação:
para (cada  $i$  em listaDeVizinhos) faça
  se ( Calcula distância( $i$ , MsgDescobertaCC.PCi) < menorDistância ) então
    vizinhoMaisPróximo  $\leftarrow i$ ;
    menorDistância  $\leftarrow$  Calcula distância( $i$ , MsgDescobertaCC.PCi)
  fim se
fim para
se (vizinhoMaisPróximo  $\neq$  o próprio nó) então {Se o nó em processamento não é CC}
  Cria entrada na tabela de roteamento para (vizinhoMaisPróximo)
  Envia pacote (vizinhoMaisPróximo, MsgDescobertaCC)
senão {Senão, se o nó em processamento é CC}
  flagSouCC  $\leftarrow$  MsgDescobertaCC.CCi {Registra a condição de CC e a ordem ( $i$ )}
  se ( MsgDescobertaCC.CCi  $\leq$  MsgDescobertaCC. $n$  ) então {Verifica se há outros CC a descobrir}
    MsgDescobertaCC.CCi  $\leftarrow$  MsgDescobertaCC.CCi + 1
    MsgDescoberta.PCi  $\leftarrow$  Calcula coordenada do CC (MsgDescobertaCC)
    menorDistância  $\leftarrow \infty$ 

    para (cada  $i$  em listaDeVizinhos) faça
      se ( Calcula distância( $i$ , MsgDescobertaCC.PCi) < menorDistância ) então
        vizinhoMaisPróximo  $\leftarrow i$ ;
        menorDistância  $\leftarrow$  Calcula distância( $i$ , MsgDescobertaCC.PCi)
      fim se
    fim para
    Cria entrada na tabela de roteamento para (vizinhoMaisPróximo)
    Envia pacote (vizinhoMaisPróximo, MsgDescobertaCC)
  fim se
fim se

```

4.4.2 Procedimento de busca de dados e formação dos *clusters*

O serviço de busca consiste fundamentalmente em propagar na RSSF a consulta de quais dados devem ser coletados pelos nós, frequência, período de coleta e possivelmente a delimitação da região de interesse.

Há dois tipos de buscas previstas no protocolo de roteamento, a *busca ampla*, que usa os nós CC como referência para coleta dos dados; e a *busca localizada*, que consiste em coletar os dados de uma região especificada pelo usuário.

Na *busca ampla* a mensagem com os dados da busca é propagada pela RSSF, de modo que aqueles nós que atendem aos critérios da busca irão encaminhar os dados coletados para o seu respectivo nó CC. A mensagem utilizada no processo de *busca ampla* é definida como:

$$\text{MsgBuscaAmpla} = [\text{Dados da busca}, \text{CC}_i, n]$$

O parâmetro da mensagem “Dados da busca” será utilizado pela camada de aplicação e consiste nas informações do tipo de dado a ser coletado pelos sensores, o intervalo de coleta, frequência e raio de alcance. CC_i descreve o nó CC a quem a mensagem se destina (inicializado em 1) e n o número total de *clusters*.

A mensagem de busca é encaminhada a partir do *gateway* para cada nó CC estabelecido, conforme rota construída durante o processo de descoberta dos nós CC. Por sua vez, cada nó CC irá encaminhar a consulta, por meio de *broadcast*, aos seus nós vizinhos. Nessa etapa é construída uma nova mensagem para a busca local, que permite adicionalmente determinar a formação do *cluster*. Na mensagem utilizada na busca local, os campos CC_i e ContadorDeHops têm a função de identificar o nó CC no qual a mensagem se originou, e dão suporte ao algoritmo de formação do *cluster*. A métrica da distância, baseada no conceito de número de saltos, pode ser substituída pela distância Euclidiana entre os nós, sem perda de generalidade ou eficiência do algoritmo. A mensagem de busca local de dados é definida como:

$$\text{MsgBuscaLocal} = [\text{Dados da busca}, \text{CC}_i, \text{ContadorDeHops}]$$

Ao receber uma mensagem de busca local o nó encaminha os dados da busca para a camada de aplicação. A mensagem de busca local sempre é reencaminhada em *broadcast* para os nós vizinhos.

Um nó pode receber uma mensagem de busca local de diferentes nós CC. Os nós irão atualizar suas tabelas de roteamento de modo a se associar ao nó CC mais próximo a ele, com base no número de saltos. A Figura 25 ilustra um exemplo de formação de dois *clusters*. Na Figura 25(a) o nó CC_1 recebe a mensagem de busca ampla e inicia a propagação da mensagem de busca local para os seus nós vizinhos. No instante seguinte (Figura 25(b)), a

mensagem de busca local originada no nó CC_1 já se propaga para o segundo nível de vizinhos, enquanto que o nó CC_2 recebe a mensagem de busca ampla e inicia a propagação da mensagem de busca local para os seus vizinhos. Na Figura 25(c), a mensagem de busca local originada no nó CC_1 está no terceiro nível de propagação, enquanto que a mensagem de busca local do nó CC_2 está no segundo nível. Nesse momento há a disputa pelos nós localizados no limite dos *clusters*, que deverão optar pelo roteamento para o nó CC mais próximo (no exemplo, o nó CC_2 com saltos=2). Para o caso do nó já ter se associado ao primeiro *cluster*, ao receber a mensagem do segundo nó CC e avaliar que ele está mais próximo deste nó, o nó atualiza seu vínculo para o segundo *cluster*. A Figura 25(d) ilustra a configuração final dos *clusters*. Nessa situação os nós já podem enviar seus dados para os nós CC correspondente.

Figura 25 - Exemplo de formação de *clusters*. **(a)** O nó CC_1 recebe a mensagem de busca e propaga para seus vizinhos. **(b)** A mensagem de CC_1 está no segundo nível de propagação, enquanto que o nó CC_2 recebe e inicia a propagação da mensagem de busca para seus vizinhos. **(c)** A mensagem de CC_1 está no terceiro nível de propagação, enquanto que a mensagem de CC_2 está no segundo nível. Há a disputa pelos nós no limite dos *clusters*. **(d)** Configuração final dos *clusters*.

Fonte: Autor.

No processo de envio dos dados coletados, a camada de aplicação executa uma chamada de serviço da camada de rede, informando os dados coletados. Na camada de rede, o pacote

contendo os dados é encaminhado para o nó CC associado ao nó, conforme rota construída durante o processo de difusão da busca local.

A Figura 26 apresenta o diagrama de sequência do processo de propagação da busca ampla e local.

Figura 26 - Diagrama de sequência da propagação da busca ampla e local.

Fonte: Autor.

O Algoritmo 3 descreve a lógica do processo do encaminhamento da *busca ampla* para os nós CC na camada de rede, quando recebe a mensagem MsgBuscaAmpla da camada inferior.

Algoritmo 3 - Propagação da busca ampla para os nós CC.

```

Parâmetros:
MsgBuscaAmpla                {Mensagem com os parâmetros (Dados da busca, CCi, n)}

Variáveis:
nóDestino ← ∅
MsgBuscaLocal ← ∅

Ação:
se (flagSouCC = 0) então {Caso o nó não seja um CC}
    nóDestino ← busca na tabela de roteamento a rota para ( MsgBuscaAmpla.CCi )
    Envia pacote (nóDestino, MsgBuscaAmpla)
senão {Caso o nó seja um CC}
    MsgBuscaLocal ← Monta mensagem para busca local(MsgBuscaAmpla, ContadorDeHops=0)
    Envia pacote em broadcast ( MsgBuscaLocal )
    se (CCi < n) então {Caso exista um CC seguinte}
        nóDestino ← busca na tabela de roteamento a rota para ( CC(i+1) )
        MsgBuscaAmpla.CCi ← MsgBuscaAmpla.CCi + 1
        Envia pacote (nóDestino, MsgBuscaAmpla)
    fim se
fim se

```

O Algoritmo 4 sintetiza o processamento da busca local no *cluster*, no nível da camada de rede.

Algoritmo 4 - Encaminhamento da busca local.

```

Parâmetros:
MsgBuscaLocal                {Mensagem com os parâmetros (Dados da busca, CCi, ContadorDeHops)}

Variáveis:
listaDeVizinhos ← todos os nós ao alcance do nó
meuCC ← ∅
meuContadorDeHops ← ∞

Ação:
se ( flagSouCC = 0 ) então {Caso o nó não seja um CC}
    se ( meuCC = ∅ ou MsgBuscaLocal.ContadorDeHops < meuContadorDeHops ) então
        meuCC ← MsgBuscaLocal.CCi
        meuContadorDeHops ← MsgBuscaLocal.ContadorDeHops
        Cria entrada na tabela de roteamento para a fonte de MsgBuscaLocal
        Envia para a camada de aplicação (MsgBuscaLocal)
        MsgBuscaLocal.ContadorDeHops ← MsgBuscaLocal.ContadorDeHops + 1
        Envia em broadcast(MsgBuscaLocal)
    fim se
fim se

```

A execução da *busca localizada* consiste em um caso específico da *busca ampla*, sendo um processo mais simples. Com a informação do local onde se deseja coletar os dados, a rede

busca pelo nó mais próximo da coordenada determinada (uma espécie de CC temporário), que então recebe o pacote com os dados da busca. Na sequência, executa o registro dos dados dos nós daquela região, obedecendo aos parâmetros especificados (especialmente de raio), e encaminha a resposta de volta ao *gateway*.

4.4.3 Coleta de dados pelo sorvedouro

Com a RSSF preparada, com os nós CC definidos, com os demais nós organizados em *clusters* e com o conhecimento do tipo de dados a ser entregue ao sorvedouro móvel, o sorvedouro pode iniciar sua passagem e coletar os dados coletados pela rede de sensores.

A coleta de dados pelo sorvedouro é subdividida em subprocessos que tratam aspectos específicos, a começar pelo aviso (envio de mensagem) do início da operação por parte do sorvedouro móvel, a entrega dos dados e ajuste na rota.

4.4.3.1 Entrada do sorvedouro móvel na área monitorada

O início da operação do sorvedouro móvel consiste em enviar informação do sorvedouro sobre sua coordenada e mobilidade ao primeiro nó da RSSF que estiver ao seu alcance. O sorvedouro envia essa mensagem em *broadcast* para todos os nós ao seu alcance. Dessa forma, essa mensagem pode alcançar um ou mais nós da rede (dependendo da densidade), sendo certamente aqueles localizados na periferia da área monitorada, os mais próximos do ponto de entrada (P_0) do sorvedouro móvel. Esse aspecto proporciona uma característica positiva, que é a redundância de rotas, que minimiza a chance de ocorrer falha no encaminhamento da mensagem.

O processo inicia na camada de aplicação do sorvedouro móvel, que executa uma chamada de serviço da camada de rede com os parâmetros da coordenada tridimensional ($P_{\text{Sorvedouro}}(x,y,z)$) do sorvedouro e o vetor $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ que descreve seu movimento, além da hora de envio da mensagem.

Ao receber a mensagem do sorvedouro móvel, os nós encaminham a mensagem de aviso da chegada do sorvedouro ponto-a-ponto até o nó CC, para que ele possa determinar o

instante da entrega dos dados, ou seja, o momento que o sorvedouro estará ao seu alcance. Dessa forma, a mensagem contém a informação da hora do seu envio e um acumulador que irá registrar o atraso acumulado no encaminhamento do pacote na rede. Esse processo demanda a sincronização dos relógios de todos os nós que compõe a RSSF, incluindo o sorvedouro móvel (SUNDARARAMAN, BUY e KSHEMKALYANI, 2005; KIM, LEE, *et al.*, 2011; SICHITIU e VEERARITTIPHAN, 2003). A mensagem utilizada para descrever a chegada do sorvedouro é definida como:

$$\text{MsgChegadaSorvedouro} = [P_{\text{Sorvedouro}}, \vec{v}, \text{Hora}, \text{Atraso}]$$

No nó, ao receber a mensagem de aviso da chegada do sorvedouro móvel, calcula-se o atraso no encaminhamento do pacote, por meio da diferença dos relógios, somando essa informação ao acumulador. O pacote é então reencaminhando ao nó CC. Ao receber a mensagem, o nó CC calcula o atraso total no encaminhamento do pacote. Com essa informação e os dados disponíveis na mensagem é possível determina o instante (hora) que o sorvedouro entrará no seu raio de comunicação e então agendar a entrega dos dados ao sorvedouro móvel de modo a interceptá-lo.

A Figura 27 ilustra a de entrada do sorvedouro móvel e o encaminhamento da mensagem de aviso da sua chegada até o primeiro nó CC. Inicialmente a mensagem é enviada pelo sorvedouro para os nós mais próximos do ponto de entrada, que estão ao seu alcance de comunicação. Na sequência os nós encaminham a mensagem para o nó CC, contabilizando o atraso acumulado no roteamento da mensagem. O nó CC₁ determina o atraso total, programa a entrega do pacote de dados para o sorvedouro móvel e encaminha a mensagem para o próximo nó CC.

Figura 27 - Envio da mensagem de aviso da chegada do sorvedouro móvel para a RSSF e cálculo do atraso acumulado no encaminhamento da mensagem.

Fonte: Autor.

Em razão do raio de alcance de comunicação dos nós, é possível determinar um intervalo de tempo de comunicação entre o nó CC e o sorvedouro. É desejável que a transmissão dos dados inicie logo que o sorvedouro esteja ao alcance de comunicação do nó CC, de modo a maximizar a troca de mensagens, consequentemente possibilitar o envio de maior volume de dados. Dessa forma, o objetivo é determinar a intersecção entre a reta que descreve a rota do sorvedouro móvel e a semiesfera correspondente ao alcance de comunicação do nó CC. A Figura 28 ilustra um exemplo que relaciona a rota do sorvedouro móvel e o alcance de comunicação do nó CC. Espera-se determinar os pontos de intersecção s' e s'' , para obter a janela de tempo de comunicação.

Figura 28 - Descoberta dos pontos de intersecção entre a rota do sorvedouro móvel e o alcance de comunicação do nó CC.

Fonte: Autor.

Para determinar a intersecção pode-se resolver a equação da esfera para os pontos da reta. O objetivo é determinar a distância entre P_0 (coordenada de entrada do sorvedouro) e os pontos de intersecção da esfera. Um ponto P em uma reta pode ser obtido pela Equação (3), na qual $\vec{u}$ é um vetor unitário dado pela Equação (4).

$$P = P_0 + s\vec{u} \quad (3)$$

$$\vec{u} = \frac{P_1 - P_0}{|P_1 - P_0|} \quad (4)$$

Um ponto qualquer i na borda da esfera é dado pela Equação (5). Substituindo P pela Equação (3) tem-se a Equação (6).

$$|P_i - P|^2 - r^2 = 0 \quad (5)$$

$$|P_i - (P_0 + s\vec{u})|^2 - r^2 = 0 \quad (6)$$

Definindo um $\Delta P = P_i - P_0$ e expandindo o produto interno, tem-se a Equação (7).

$$s^2 - 2 \cdot s\vec{u} \cdot \Delta P + |\Delta P|^2 - r^2 = 0 \quad (7)$$

A Equação (7) é quadrática em s . Dessa forma, pode-se aplicar a fórmula de Bhaskara, de modo que aplicando s na Equação (3) são encontrados os pontos de intersecção da linha com a esfera. É importante lembrar que se não houver raiz, não há intersecção entre a reta e a esfera; se há uma única solução para a raiz, então a linha tangencia a esfera; e com duas soluções para a raiz, têm-se os dois pontos de intersecção entre a reta e a esfera.

O Algoritmo 5 corresponde à lógica do roteamento da mensagem de aviso da chegada do sorvedouro móvel para os nós CC e a preparação dos nós CC com o cálculo do intervalo de tempo a ser aguardado para a entrega dos dados para o sorvedouro.

Algoritmo 5 - Encaminhamento da mensagem de aviso da chegada do sorvedouro móvel.

Parâmetros:

MsgChegadaSorvedouro

{Mensagem com os parâmetros ($P_{\text{Sorvedouro}}$, $\vec{v}$, Hora, Atraso)}

Variáveis:

$\Delta t \leftarrow 0$

$\Delta d \leftarrow 0$

$P_{\text{SorvedouroAtual}} \leftarrow 0$

distânciaDoSorvedouro $\leftarrow 0$

horaDaEntrega $\leftarrow 0$

{Registra o intervalo de deslocamento do sorvedouro}

{Registra a coordenada atualizada do sorvedouro}

Ação:

$\Delta t \leftarrow (\text{HoraAtual}() - \text{MsgChegadaSorvedouro.Hora})$

$\text{MsgChegadaSorvedouro.Atraso} \leftarrow \text{MsgChegadaSorvedouro.Atraso} + \Delta t$

se (flagSouCC = 0) **então**

{Se o nó não é um CC}

nóDestino $\leftarrow$ busca na tabela de roteamento a rota para o CC

Envia pacote (nóDestino, MsgChegadaSorvedouro)

senão

{se o nó é um CC}

```

 $\Delta d \leftarrow ( \text{MsgChegadaSorvedouro}.\|\vec{v}\| \times \text{MsgChegadaSorvedouro}.\text{Atraso} )$ 
 $P_{\text{SorvedouroAtual}} \leftarrow P_0 + \Delta d$ 
 $s' \leftarrow \text{Calcula primeira coordenada de intersecção } (P_0, P_1, P_{\text{CCi}}, \text{raio de alcance})$ 
 $\text{distânciaDoSorvedouro} \leftarrow \sqrt{(x'_s - x_{P_{\text{SorvedouroAtual}}})^2 + (y'_s - y_{P_{\text{SorvedouroAtual}}})^2}$ 
 $\text{horaDaEntrega} \leftarrow \frac{(\text{distânciaDoSink} - \Delta d)}{\|\vec{v}\|} - \text{MsgChegadaSorvedouro}.\text{Atraso}$ 
Agenda entrega do pacote de dados ( horaDaEntrega +  $\delta$  ) { $\delta$  é uma constante para adicionar
um pequeno atraso e evitar que a
comunicação inicie no limite do
alcance da comunicação}

se (CCi < n) então
    nóDestino  $\leftarrow$  busca na tabela de roteamento a rota para o CC(i+1)
    Envia pacote (nóDestino, MsgChegadaSorvedouro)
fim se
fim se

```

4.4.3.2 Envio dos dados dos nós para os nós CC

Considerando o processo de busca descrito na Seção 4.5.2 e que os dados foram enviados pelos nós para os seus respectivos nós CC, os nós CC devem então encaminhar o conjunto de dados para o sorvedouro móvel no momento da sua passagem.

Os nós CC armazenam os dados recebidos pelos nós enquanto aguarda o momento adequado de envio para o sorvedouro. Por concentrar os dados, o nó CC é o melhor candidato a executar fusão de dados. Apesar disso, após se associar a um *cluster*, cada nó passa a encaminhar uma mensagem de resposta contendo o pacote de dados, com uma informação adicional que consiste em um marcador (*flag*) indicando se algum procedimento de tratamento dos dados deve ser executado. Dessa forma, durante o encaminhando da mensagem de resposta os dados podem, por exemplo, passar por um processo de fusão de dados. Esse marcador é o mecanismo que permite indicar, para a camada de rede, se a mensagem de resposta deve ou não ser encaminhada para a camada de aplicação para processamento. A mensagem de resposta da busca com os dados é definida como:

$$\text{MsgRespostaDados} = [\text{Dados}, \text{FlagFusãoDados}]$$

A Figura 29 apresenta o diagrama de sequência do processo de envio dos dados dos nós para os respectivos nós CC.

Figura 29 - Diagrama de sequência do envio dos dados dos nós para os nós CC.

powered by Astah

Fonte: Autor.

4.4.3.3 Mudança na rota do sorvedouro móvel

No caso do sorvedouro executar ajustes na sua rota, essa ação deve ser informada à RSSF. A mensagem do sorvedouro móvel destina-se aos nós CC e deve conter todos os dados necessários para o conhecimento da nova rota do sorvedouro.

A mudança na rota do sorvedouro pode fazer com que ele passe distante dos nós CC estabelecidos. Dessa forma, esse processo implica numa possível redefinição de alguns dos nós CC, de modo a garantir a entrega dos dados.

Ao receber a mensagem do ajuste na rota do sorvedouro móvel, o nó CC deve encaminhar a informação para os nós CC subsequentes, para que eles decidam se é necessário selecionar outro nó CC, e iniciem a descoberta pelos novos nós CC.

A Figura 30 ilustra um exemplo do procedimento de ajuste na rota do sorvedouro móvel e o processamento na RSSF. Na Figura 30(a) o sorvedouro segue sua rota planejada, a RSSF está configurada e aguardando pela sua passagem. Ao chegar ao primeiro nó CC, o sorvedouro recebe dados que o levam a alterar sua rota, conforme Figura 30(b). Nesse caso, o sorvedouro informa sua decisão ao nó CC1, que por sua vez encaminha a informação do ajuste na rota do sorvedouro para o próximo nó CC. O nó CC2 avalia se há outro nó do *cluster* em melhor posição para entrega dos dados do *cluster* em relação à nova rota. Se houver, ele encaminha os dados e determina que o nó entregue os dados do *cluster* no instante adequado. O nó CC ainda propaga os dados da mudança da rota do sorvedouro móvel para o nó CC seguinte.

Figura 30 - Mudança na rota do sorvedouro móvel e processamento na RSSF. Em (a) o sorvedouro segue sua rota prevista. Em (b), ao receber os dados do nó CC1 o sorvedouro altera sua rota. Essa informação é enviada para o nó CC1 que encaminha para o nó CC2. O nó CC2 avalia a mudança de rota do sorvedouro e elege um nó em melhor posição para entrega dos dados do *cluster*.

Fonte: Autor.

O ajuste na rota do sorvedouro é uma decisão tomada na camada de aplicação, com base nos dados coletados pelos sensores e que depende do contexto da aplicação. O ajuste consiste em um deslocamento lateral (para a direita ou esquerda) em relação à rota prevista originalmente. A mensagem enviada pelo sorvedouro para a RSSF, informando do ajuste na rota, é definida como:

$$\text{MsgAjusteRota} = [\text{Deslocamento}]$$

O atributo “Deslocamento” da mensagem consiste em uma medida de distância (positiva ou negativa), que descreve quanto a rota será deslocada lateralmente (para um lado ou para o outro).

O diagrama de sequência da Figura 31 descreve o processamento na camada de rede dos nós da RSSF com o ajuste na rota do sorvedouro. Ao receber a mensagem de ajuste na rota os nós encaminham a mensagem para o nó CC. No nó CC é feita a análise se a mudança na rota do sorvedouro é grande o bastante para a seleção de um novo nó para entrega dos dados. Caso seja, uma nova mensagem é criada, MsgNovoCC, com a nova coordenada de PC_i , os dados que devem ser entregues ao sorvedouro e o instante de envio dos dados para a interceptação (*time*). A nova coordenada de PC_i é calculada com base no valor original de PC_i e com o valor do deslocamento na rota do sorvedouro. A mensagem MsgNovoCC é composta por:

$$\text{MsgNovoCC} = [PC_i, \text{Dados}, \text{time}]$$

O processo de definição do novo nó CC é equivalente ao descrito na Seção 4.5.1.2. Adicionalmente, ao ser definido o novo nó CC, ele envia uma mensagem por meio de *broadcast* aos demais nós do *cluster* informando da sua nova situação.

Figura 31 - Diagrama de sequência dos processos de ajuste na rota do sorvedouro.

Fonte: Autor.

4.4.4 Considerações gerais do protocolo de roteamento

O protocolo de roteamento ProRDPuv foi elaborado com base no contexto da pulverização agrícola, com foco no controle da deriva. Ele tem como principais características o suporte à mobilidade do sorvedouro em alta velocidade, a representação da rota do sorvedouro na RSSF, a organização hierárquica dos sensores em *clusters* e a entrega dos dados da rede baseada em interceptação.

A Figura 32 apresenta um diagrama de estados com as possíveis configurações dos nós da rede. Nota-se que após a configuração da rede, há dois estados distintos para os nós: nó CC ou nó “comum”. Enquanto nó comum, o nó está associado a um *cluster* e executa a ação de coleta de dados, podendo alternar seu estado para um de ‘envio de dados’. Quando o nó é um nó CC, então ele pode receber dados dos nós do *cluster*, ou aguardar pela chegada do sorvedouro móvel, nesse caso, com a entrega dos dados agendada para a interceptação do sorvedouro no momento da sua passagem.

Figura 32 - Diagrama de estado dos nós.

powered by Astah

Fonte: Autor.

4.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou três funcionalidades distintas das RSSF quando aplicadas ao contexto da pulverização agrícola. Com sua capacidade de monitorar as condições ambientais, as redes de sensores podem avaliar as condições de vento, temperatura e umidade, de modo a recomendar a pulverização ou emitir um alerta caso ocorra um contexto desfavorável. A RSSF pode ainda avaliar a eficácia da pulverização, por meio de sensores de umidade foliar que podem ser empregados com o objetivo de identificar se o produto lançado atingiu a região alvo da pulverização. Ainda, considerando a capacidade de comunicação das redes de

sensores, foi proposta uma integração entre a RSSF e o veículo pulverizador, de modo que os dados coletados pela rede possam subsidiar o funcionamento do veículo, que irá atuar como um sorvedouro móvel da rede e utilizar os dados para executar ajustes em sua rota, com o objetivo de reduzir o efeito da deriva.

Dessa forma, foi elaborada uma organização para o sistema, que separa os elementos em camadas, definindo três componentes principais: componente Aplicação Gateway, componente Aplicação Sorvedouro Móvel e o componente Serviços Web.

Para garantir a entrega dos dados coletados pelos nós para o sorvedouro móvel, foi proposto o protocolo de roteamento ProRDPuv, que utiliza de três estratégias: a representação da rota do sorvedouro móvel, a organização hierárquica dos nós da RSSF e o envio dos dados de maneira a interceptar o sorvedouro móvel durante sua passagem. O protocolo de roteamento foi proposto detalhadamente.

Essas ações buscaram estabelecer um sistema que proporcione melhor controle da deriva em um processo de pulverização aérea. O capítulo seguinte irá descrever a metodologia de simulação para avaliar a viabilidade do sistemas proposto.

5. METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional consiste na executar um modelo que utiliza técnicas matemáticas e computacionais na tentativa de reproduzir um contexto real em um ambiente virtual, que permite analisar e inferir o comportamento de problemas complexos. Geralmente, para esses problemas, o desenvolvimento de protótipos reais demanda um custo elevado de tempo e de recursos financeiros (ROY, 2005; SRIDHARA e BOHACEK, 2007).

O desenvolvimento de sistemas de simulação computacional vem sendo extensivamente estudado, aprimorado e aplicado há décadas em diversas áreas de pesquisa, inclusive na agricultura, dando suporte a sistemas de estudo do solo e água, colheita, análise de operações de processamento alimentício e sistemas de suporte a decisão em agricultura de precisão (HUANG, LAN, *et al.*, 2010).

Para demonstrar que as RSSF podem ser empregadas em um SSPA, este trabalho propõe um *software* para simular o uso e características da rede de sensores no contexto do controle da deriva, desenvolvido para o simulador de rede OMNet++¹¹, utilizando o *framework* MiXiM¹². Esse sistema provê um modelo detalhado de simulação da comunicação por ondas de rádio, estimativas de interferências, consumo energético na transmissão de rádio e protocolos de comunicação sem fio na camada MAC, tal como o ZigBee. No sistema, o transmissor de radiofrequência utilizado como referência é o CC2420 produzido pela Texas Instruments¹³, com 2,4 GHz de frequência e que atende ao padrão IEEE 802.15.4.

Um conjunto de módulos de simulação foi desenvolvido, pensando que cada um corresponde a uma funcionalidade no contexto simulado. As seções seguintes detalham o ambiente de desenvolvimento da simulação, a modelagem do sistema e as características do sistema de simulação computacional desenvolvido.

---

¹¹ OMNet++ Network Simulation Framework - <http://www.omnetpp.org/>

¹² MiXiM Project - <http://mixim.sourceforge.net/>

¹³ Texas Instruments CC2420, 2.4 GHz, IEEE 802.15.4/ZigBee-Ready RF Transceiver. *Datasheet* disponível em <http://www.ti.com/product/cc2420>.

5.1 SIMULADOR OMNET++ E FRAMEWORK MIXIM

O simulador OMNet++ e o *framework* MiXiM permitem a simulação do conjunto de aspectos essenciais ao funcionamento da RSSF, bem como o desenvolvimento de novos componentes.

O OMNet++ é um simulador computacional baseado em eventos discretos, extensível, modular, baseado em componentes C++ e *frameworks*, para construção de simulações de redes, multiprocessadores e outros sistemas paralelos (VARGA, 2010; VARGA e HORNIG, 2008). Ele possui uma arquitetura genérica que permite seu uso em problemas de diferentes domínios, por exemplo, na simulação de redes computacionais, redes neurais e sistemas de *hardware* distribuído.

O MiXiM é um *framework* de modelagem para o OMNet++, desenvolvido para simular redes sem fio com nós móveis ou fixos, por exemplo RSSF, redes corporais (LIOLIOS, DOUKAS, *et al.*, 2010), redes *ad hoc* e redes veiculares (KÖPKE, SWIGULSKI, *et al.*, 2008). O MiXiM implementa e estende modelos de protocolo de comunicação, camada de acesso ao meio (MAC), mobilidade, entre outros aspectos para simulação de RSSF com nós móveis, permitindo o desenvolvimento de novos módulos, encapsulando a complexidade dos modelos implementados por ele.

O uso do OMNet++ em conjunto com o MiXiM se justifica pela organização em módulos e componentes, o que facilita sua aprendizagem e estrutura o desenvolvimento do sistema de simulação. Além disso, o desempenho do simulador se mostra melhor que outros simuladores de rede e equivalente aos simuladores NS-2 e NS-3, principais simuladores utilizados pela comunidade acadêmica, motivando a sua escolha para o presente trabalho (WEINGARTNER, VOM LEHN e WEHRLE, 2009; VARGA e HORNIG, 2008; XIAN, SHI e HUANG, 2008). Weingartner, Vom Lehn e Wehrle (2009) afirmam que apesar do OMNet++ não ser exclusivo para simulações de redes computacionais, está entre os principais simuladores capazes de realizar simulações de redes em larga escala e de maneira eficiente.

A simulação desenvolvida no OMNet++ é baseada no tempo, o que corresponde a uma simulação que avança com o incremento fixo de um intervalo de tempo Δ , até alcançar um limite estabelecido (critério de parada). Ao final de cada iteração da simulação (incremento de tempo), são verificados e tratados os eventos que ocorreram nesse passo da simulação. É importante destacar que os eventos são tratados como se estivessem acontecidos no final

desse intervalo de tempo. Essa organização pode causar falhas no processo de simulação, como a execução paralela de eventos dependentes que podem ser processados inadequadamente por conta de um intervalo de tempo demasiadamente longo, pois serão tratados como se estivessem ocorridos no mesmo instante. Para evitar isso, o simulador deverá determinar a prioridade de execução dos eventos. Outra solução é determinar um intervalo de tempo curto o suficiente para que cada iteração da simulação contenha somente um evento. Entretanto essa abordagem pode gerar uma carga computacional considerável, podendo inviabilizar a simulação em um tempo tolerável. Em sistemas com ocorrência de eventos em momentos aleatórios, o uso de intervalos de tempo excessivamente curto é desencorajado.

O OMNet++ é portanto orientado a eventos discretos. Nesse tipo de simulação os eventos são executados em um tempo arbitrário, executando cronologicamente um evento após o outro. Inicialmente, uma lista de eventos é construída. Essa lista é processada e atualizada a cada iteração da simulação, na qual um procedimento percorre a lista e executa os eventos sequencialmente, até que eles acabem ou que um critério de parada seja alcançado. À medida que a simulação avança, os eventos em execução podem criar novos eventos, que são inseridos na lista de eventos a serem processados, seguindo a ordem cronológica de acontecimento.

As seções seguintes abordam os detalhes da modelagem do sistema de simulação desenvolvido.

5.2 MODELAGEM DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO

O desenvolvimento do sistema de simulação no OMNeT++ é baseado na construção de módulos. As entidades que compõe o sistema a ser simulado devem ser mapeadas em módulos e os módulos interagem entre si por meio da troca de mensagens.

Módulos elementares podem se associar, formando módulos compostos. No OMNet++ os módulos se conectam por meio de portas de comunicação, denominadas de *gates*. Os *gates* correspondem às interfaces de entrada e saída dos módulos, na qual mensagens são trocadas. As mensagens podem representar *frames*, pacotes de dados, ou qualquer outro tipo de entidade móvel.

O sistema pode ser desenvolvido de tal forma a manter a organização das camadas de rede, segundo modelos clássicos (OSI ou TCP/IP), e a funcionalidade das entidades representadas.

Para o desenvolvimento da simulação do protocolo ProRDPuv foram elaborados módulos elementares (sem composição) que correspondem à simulação da mobilidade do veículo pulverizador (módulo *AirplaneMobility*), das camadas de rede e de aplicação do nó embarcado no veículo pulverizador (módulo *AirplaneNodeNetwLayer* e módulo *AirplaneNodeApplLayer*, respectivamente), do simulador da física da dispersão do agrotóxico (líquido) pulverizado (módulo *DispersionManager*), do simulador da física do vento (módulo *WindManager*) e das camadas de rede e de aplicação dos nós estáticos (módulo *GroundNodeNetwLayer* e *GroundNodeApplLayer*, respectivamente).

Dois módulos compostos foram desenvolvidos, o *AirplaneNode* e o *GroundNode*. O módulo *AirplaneNode* representa o nó embarcado na aeronave pulverizadora. Nele estão presentes os módulos da camada de rede (*AirplaneNodeNetwLayer*), da camada de aplicação (*AirplaneNodeApplLayer*) e o módulo de simulação da movimentação da aeronave (*AirplaneMobility*). Além dos demais módulos oriundos do *framework* MiXiM que simulam a comunicação sem fio (módulos *arp* e *nic*) e o consumo da bateria (*battery* e *batteryStats*). A Figura 33 ilustra a composição do módulo *AirplaneNode* e evidencia os *gates* para comunicação direta entre o módulo que implementa a camada de rede (*AirplaneNodeNetwLayer*, descrito como “netwl” na figura) e a camada física (*nic*); e da camada física para o meio.

Figura 33 - Composição do módulo composto AirplaneNode.

Fonte: Autor.

O módulo composto GroundNode corresponde aos nós fixos, distribuídos na área monitorada pela RSSF. Ele é composto pelo módulo que implementa a camada de rede (GroundNodeNetwLayer), de aplicação (GroundNodeAppLayer) e os demais módulos fornecidos pelo MiXiM (semelhante ao módulo AirplaneNode, exceto pelo módulo de mobilidade). A Figura 34 apresenta a composição do módulo GroundNode.

Figura 34 - Composição do módulo composto GroundNode.

Fonte: Autor.

A Figura 35 apresenta um diagrama que ilustra os módulos desenvolvidos e a estrutura daqueles módulos compostos.

Figura 35 - Módulos do sistema de simulação e sua composição.

Fonte: Autor.

A Figura 36 apresenta um diagrama lógico que descreve a relação entre os módulos e suas principais funções no processo de simulação, abstraindo o processo de roteamento de dados (processo executado na camada de rede). O módulo WindManager provê dados a respeito da condição do vento. Essa informação será utilizada pelo módulo de simulação da dispersão do produto pulverizado (DispersionManager) e pela RSSF (conjunto de nós simulados pelo módulo GroundNode). A camada de aplicação do sorvedouro móvel (AiplaneNodeApplLayer) avalia a condição do vento por meio dos dados recebidos dos nós, para decidir se algum ajuste deve ser feito na rota de pulverização. Se uma mudança for necessária então o módulo AirplaneMobility recebe os parâmetros para o ajuste na rota. O módulo AirplaneMobility constantemente informa à camada de aplicação do sorvedouro a respeito dos dados de movimentação, que por sua vez executa a pulverização por meio do módulo DispersionManager. O módulo de simulação da dispersão simula o lançamento de novas partículas e cada partícula lançada previamente, até que cada uma atinja o solo/cultura.

Figura 36 - Diagrama lógico de relacionamento entre os módulos desenvolvidos e suas ações no processo de simulação.

Fonte: Autor.

5.2.1 Simulação do vento

O módulo que simula o comportamento do vento é desacoplado dos demais módulos. Essa organização é importante principalmente com relação ao módulo que simula a dispersão das partículas (gotas), para que ela seja independente. A simulação do vento consiste

basicamente em uma matriz de vetores com três dimensões, de modo a representar a direção e intensidade do vento em qualquer ponto da área simulada.

Para proporcionar uma simulação coerente com um contexto real, uma série histórica de dados de vento (velocidade e direção) foi extraída do CPTEC/INPE¹⁴ e utilizada como referência pela simulação. A simulação do vento considera essa série histórica como uma “linha mestra” a ser seguida, sorteando valores para os dados do vento tendenciosos aos valores da série histórica. Dessa forma, há uma variação dos dados do vento na região monitorada, mas na média os dados seguem a série histórica de referência.

5.2.2 Simulação da dispersão das partículas

A simulação da dispersão do líquido pulverizado consiste em um processo iterativo, simulando cada partícula lançada pelo avião. Para cada passo de simulação, uma partícula é lançada por cada bico pulverizador. Ao ser instanciada cada partícula tem os seguintes parâmetros: coordenada (x, y, z), velocidade (m/s), direção (a velocidade e direção inicial equivalem aos respectivos dados do avião), velocidade do lançamento (*spray*, em m/s), ângulo do lançamento (em relação ao solo) e concentração.

De acordo com Cunha (2008) a simulação da dispersão das partículas pode desconsiderar a velocidade de aceleração no lançamento pelo bico pulverizador, sem perda de precisão relevante. O aspecto mais relevante e base para a simulação da dispersão é a determinação da velocidade terminal de queda da gota. A velocidade terminal foi calculada com base na Equação 8 (CUNHA, 2008):

$$v_t = \left[\frac{(0,075^5 (\rho_G - \rho_f)^5 g^5 d_G^8)}{(\rho_f^2 \mu^3)} \right]^{\frac{1}{7}} \quad (8)$$

onde:

ρ_G é a densidade da gota;

ρ_f é a densidade do ar;

g é a gravidade;

---

¹⁴ Boletim Climanalise CPTEC: <http://www.cptec.inpe.br/>

d_G é o diâmetro da gota;

μ é a viscosidade do ar.

Dessa forma, a cada passo da simulação (Δt) cada partícula tem sua queda calculada, considerando sua velocidade terminal de queda e o vento corrente na coordenada da partícula. Esse processo ocorre até que a gota atinja o solo, quando esta informação é armazenada nos registros da simulação.

5.3 CONTEXTO E PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

Os parâmetros correspondem ao mecanismo para determinar diferentes contextos de simulação. É por meio deles que é possível avaliar o comportamento do sistema simulado para diferentes configurações da RSSF ou do ambiente monitorado.

Diversos parâmetros foram definidos para a execução da simulação, seja para o funcionamento do simulador, como também para os módulos desenvolvidos. Aspectos do sorvedouro móvel, posicionamento dos sensores, características dos sensores, comunicação e outros, são definidos ou ajustados por meio dos parâmetros. Esta seção apresenta e discute as características, unidade e valores utilizados dos principais parâmetros da simulação.

- *Parâmetros mais relevantes do simulador OMNet++:*
  - O limite máximo de tempo para a simulação foi definido em 150 s. Tempo suficiente para preparação da RSSF e passagem do sorvedouro sobre a área monitorada em todos os contextos estudados.
  - As sementes utilizadas para a geração dos números pseudoaleatórios foram definidas randomicamente (a cada execução da simulação) pelo próprio simulador (que implementa um módulo específico para geração de números pseudorrandômicos).
  - A simulação da área monitorada desconsiderou qualquer tipo de condição de contorno, de modo que as bordas da área simulada não se relacionam.
  - A simulação considerou um ambiente de três dimensões, de modo a representar o voo do sorvedouro (sua altura).
  - O passo de tempo de cada iteração da simulação foi definido em 0,01 s.

- O intervalo de registro do *log* de execução da simulação foi estabelecido em 5 s.
- *Parâmetros da área monitorada pela RSSF:*
  - A área teve diferentes valores para suas dimensões, de acordo com as simulações para exploração dos resultados. O comprimento teve valor constante em 1000 m, enquanto que a largura da área variou entre 200 m e 1450 m.
- *Posicionamento dos nós:*
  - Os nós foram dispostos sobre a área de maneira planejada, obedecendo a uma distribuição em forma de hexágono com um nó no centro.
  - Nos diferentes experimentos o número de nós variou entre 124 a 1341 unidades.
  - Em todas as simulações adotou-se um único sorvedouro móvel.
- *Parâmetros de comunicação dos nós:*
  - Os sensores implementaram como referência o rádio transmissor CC 2420 da Texas Instruments.
  - Todos os nós, incluindo o sensor embarcado no sorvedouro móvel, operaram na frequência de 2,4 GHz.
  - A potência do sinal de rádio foi definida em 1,1 mW.
  - A atenuação no sinal foi de -100 dBm.
  - O coeficiente α de perda de pacotes na rede foi definido em 3,39.
  - Os nós enviam os pacotes de dados em tempos aleatórios (assíncrono).
  - O sistema de simulação utiliza o algoritmo CSMA/CA como método para redução de colisões de pacotes.
  - As camadas física e de enlace utilizam o padrão ZigBee.
- *Parâmetros do sorvedouro móvel (aeronave):*
  - O sorvedouro móvel é um nó como os outros que compõe a RSSF, com as mesmas características técnicas de comunicação, mas com a função exclusiva de coletar os dados dos nós CC. No contexto da simulação, o sorvedouro recebe os dados da RSSF e interage com o módulo de navegação da aeronave pulverizadora. Dessa forma, em diferentes momentos, a integração entre ambos é forte o suficiente para descrevê-los como um único componente. Por isso este tópico descreve também

características que na verdade estão relacionadas com uma aeronave de pulverização.

- No início da simulação o sorvedouro móvel está parado, fora da área monitorada pela RSSF. Após um tempo constante pré-determinado ele inicia seu movimento.
- Sua altitude variou entre 3 m e 50 m.
- A envergadura da aeronave foi definida em 14 m, usando como referência dados de aeronaves reais.
- Foram considerados ao todo 15 bicos pulverizadores instalados ao longo das asas da aeronave, com uma distância entre eles de 1 m.
- A velocidade de deslocamento da aeronave variou entre 27 m/s a 250 m/s.
- A aceleração do sorvedouro móvel foi nula em qualquer das etapas da simulação.
- *Parâmetros do módulo de simulação do vento:*
  - A simulação do vento baseia-se em três parâmetros fundamentais, o ângulo de incidência do vento na área monitorada, a sua velocidade, e o intervalo médio entre as mudanças de comportamento.
  - O comportamento do vento simulado é o mesmo em toda a área simulada.
  - O ângulo de incidência variou entre 0° e 180°.
  - A velocidade variou entre 0,5 m/s e 6 m/s.
- *Parâmetros do módulo de simulação da dispersão das partículas:*
  - O intervalo de atualização das partículas foi definido em 0,1 s.
  - A densidade das gotas foi definida em 1000 kg/m³.
  - O diâmetro das gotas variou entre 50 µm e 600 µm.
  - A densidade do ar foi de 1,2 kg/m³.
  - A viscosidade do ar foi de $1,8 \times 10^{-5}$ Pa·s.
  - A aceleração da gravidade foi definida em 9,8 m/s².
  - E a porcentagem de distúrbio na velocidade terminal de queda das partículas foi definida em 10%.
- *Parâmetros do protocolo de roteamento:*
  - O tamanho dos pacotes de dados variou entre 32 bytes e 512 bytes.
  - O tempo máximo de resposta das mensagens em *broadcast* foi de 5 s.
- Disposição dos sensores na área monitorada

- Os sensores foram distribuídos em um plano Euclidiano, de maneira ordenada, obedecendo uma estrutura de grade hexagonal com nó central (ou treliça triangular).
- A distância entre os sensores é a mesma em toda a rede.
- A distância entre os sensores variou de 15 m a 70 m.

5.4 INTERFACE DE SIMULAÇÃO

O OMNet++ disponibiliza uma interface gráfica para representação dos componentes da simulação. A Figura 37 ilustra a configuração inicial do ambiente de simulação para um determinado contexto, com a representação da área de simulação, a disposição dos nós e do sorvedouro móvel (representado pelo ícone de um avião).

Figura 37 - Tela do simulador OMNet++ com a representação da área simulada, componentes, nós e sorvedouro móvel.

Fonte: Autor.

5.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Na maioria das vezes, desenvolver um protótipo real é dispendioso financeiramente e demanda muito tempo. A simulação computacional é um recurso que proporciona a avaliação

de um modelo com grau de confiabilidade razoável, a baixo custo e em tempo reduzido. Entretanto é fundamental a elaboração criteriosa do modelo de simulação e a implementação cuidadosa do sistema de simulação.

Este capítulo apresentou a avaliação e as razões da escolha pelo simulador de redes OMNet++, em conjunto com o *framework* MiXiM. Além de descrever os modelos adotados para simulação da dispersão das partículas e do comportamento do vento.

O próximo capítulo apresenta os resultados obtidos nas diferentes simulações executadas e suas respectivas discussões.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A redução do efeito deriva durante a aplicação do agrotóxico depende dos dados ambientais da região no instante da pulverização. A obtenção desses dados depende da interação adequada entre a RSSF e o SSPA, incluindo o veículo pulverizador. Considerando que as RSSF são capazes de coletar os dados ambientais necessários, o sistema deverá se preocupar em garantir a comunicação adequada entre a rede de sensores e o veículo pulverizador, especialmente no processo de ajuste da rota de pulverização.

O objetivo deste capítulo é avaliar a melhora no processo de pulverização com o ajuste na rota do veículo pulverizador considerando diferentes condições de vento e padrão de gota, e a eficácia do protocolo de roteamento de dados com diferentes contextos de parâmetros. Serão levantados alguns requisitos que devem ser satisfeitos pelas redes de sensores e serão avaliados os modelos de simulação e comunicação. O desempenho da utilização das RSSF no contexto da pulverização agrícola será avaliado por meio de um ensaio de pulverização e da avaliação do desempenho do protocolo de roteamento de dados proposto. Será comparado seu desempenho com um protocolo de roteamento clássico e serão avaliados seus principais aspectos, como capacidade de escalabilidade da rede, suporte ao aumento da densidade da rede, impacto com a variação do número de nós CC, tamanho dos pacotes de dados, velocidade e altura do sorvedouro móvel.

O comportamento da RSSF é analisado predominantemente em relação à taxa de sucesso na entrega dos pacotes, seja dos nós para os nós CC, ou dos nós CC para o *sorvedouro* móvel. Com o objetivo de avaliar os limites do protocolo de roteamento, os testes buscaram avaliar contextos esperados, com parâmetros equivalentes a situações reais de pulverização e também casos limites, que representam situações proibitivas de pulverização agrícola.

Nas seções seguintes são apresentados os testes, sua contextualização, resultados e discussões.

6.1 VALIDAÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO

O primeiro teste teve como objetivo verificar a correção da implementação dos módulos envolvidos na simulação da pulverização (dispersão) das partículas.

Nessas simulações não foram considerados nenhum tipo de perturbação na queda das partículas (considerando apenas sua velocidade terminal de queda). Seu deslocamento lateral se deu ao longo dos eixos x e y da área monitorada pela RSSF e foi determinado pelo vento simulado, com velocidade e direção constantes em toda a área. Também não foi considerada a evaporação das partículas e em todas as simulações a altura de lançamento foi de 3 m.

Para correto entendimento dos gráficos apresentados, considere um vento com ângulo em 0° correspondente à mesma direção que o *sorvedouro* se desloca, portanto o ângulo de 180° corresponde a um vento em direção contrária ao movimento do *sorvedouro*. O objetivo da simulação é avaliar o deslocamento lateral das partículas (perpendicular ao eixo do *sorvedouro*).

O Gráfico 1 apresenta os resultados da simulação quanto a distância de deslocamento lateral das partículas, considerando diferentes ângulos de incidência do vento, variando de 0° a 180° , e diferentes velocidades do vento, variando de 0,5 m/s a 6 m/s. O diâmetro da gota permaneceu constante em 200 μm . Observa-se que quanto mais lateral ocorre a incidência do vento (até o máximo de 90°) maior é o deslocamento da partícula, assim como, quanto maior a velocidade do vento, maior é a distância de deslocamento. No gráfico nota-se ainda a simetria entre os ângulos suplementares, o que corrobora com a correção da implementação do modelo de dispersão. Como esperado, não há um deslocamento lateral das partículas quando os ângulos de incidência do vento são de 0° e 180° . Nesses dois contextos há somente um deslocamento ao longo do eixo (x) de movimentação do *sorvedouro*.

Gráfico 1 - Deslocamento das gotas para diferentes ângulos de incidência e velocidade do vento.

Fonte: Autor.

O Gráfico 2 ilustra o “ajuste de curvas” (*fitting*) para a relação velocidade e ângulo do vento, descrevendo o deslocamento das partículas. Nota-se o comportamento uniforme nos diferentes contextos de simulação, o que reforça a correção do modelo de simulação da dispersão.

Gráfico 2 - *Fitting* do deslocamento das gotas com variação do ângulo de incidência do vento.

Fonte: Autor.

O Gráfico 3 descreve o deslocamento das partículas relacionando o diâmetro da gota e o ângulo de incidência lateral do vento, considerando uma velocidade do vento constante em 5 m/s. O diâmetro das gotas variou de 50 μm a 600 μm , enquanto que o ângulo de incidência do vento variou entre 0°, 22°, 45°, 67° e 90°. Observa-se que as gotas mais leves deslocaram-se por distâncias maiores. Em um contexto bastante desfavorável, com diâmetro da gota de 50 μm e com incidência lateral do vento de 90°, o deslocamento da gota foi superior a 180 m.

Gráfico 3 - Deslocamento das partículas variando os parâmetros de diâmetro da gota e o ângulo de incidência do vento.

Fonte: Autor.

O Gráfico 4 corresponde ao *fitting* dos resultados do Gráfico 3, em uma escala logarítmica. Nota-se a consistência da simulação, por conta do comportamento idêntico nas simulações com diferentes parâmetros, diferenciando somente a distância de deslocamento das partículas por conta do respectivo diâmetro das gotas.

Gráfico 4 - *Fitting* do deslocamento das partículas variando o diâmetro das gotas e ângulo de incidência do vento.

Fonte: Autor.

O Gráfico 5 demonstra o deslocamento das gotas em um contexto que há perturbação no processo de queda das partículas. Nesta simulação, o ângulo de incidência do vento foi fixado em 45°, mas sua velocidade variou de 1 m/s a 5 m/s. A perturbação na queda das partículas (eixo z) consiste em alterar o valor da velocidade terminal de queda da gota em cada iteração da simulação, variando seu valor com base em uma “porcentagem de perturbação”. Dessa forma, a cada passo da simulação da queda da partícula, sorteia-se um valor com distribuição linear entre $-i\%$ e $+i\%$, onde $i \leq 50$, é a porcentagem de perturbação no valor da velocidade terminal. Dessa forma é simulada uma espécie de “empurrão para baixo”, ou “empurrão para cima” na partícula. Os resultados apresentados no Gráfico 5 correspondem ao deslocamento médio das partículas em cada simulação.

Gráfico 5 - Deslocamento das partículas variando a velocidade do vento e com perturbação na velocidade terminal de queda das partículas (eixo z).

Fonte: Autor.

As simulações para validação do modelo de dispersão apresentaram resultados satisfatórios, especialmente por apresentarem resultados equivalentes aos experimentos de Quantick (1985).

6.2 EFICÁCIA NA PULVERIZAÇÃO

Com o objetivo de avaliar a eficácia da pulverização com o ajuste na rota do veículo pulverizador, baseado nos dados fornecidos pela RSSF, definiu-se um corredor imaginário alvo da pulverização, de modo a mensurar o quanto de produto foi pulverizado para fora da área alvo. Dessa forma, em uma área de 1000 m (eixo x) de comprimento e 200 m (eixo y) de largura foi definido um corredor “alvo” ao longo do eixo x , com largura de 14 m e centro na coordenada 100 (m) do eixo y . A Figura 38 ilustra a organização descrita.

Figura 38 - Área simulada e corredor imaginário alvo da pulverização.

Fonte: Autor.

Os nós da RSSF foram distribuídos ordenadamente na área, conforme descrito na Seção 5.3. Em todas as simulações, o avião pulverizador voou a uma velocidade de 33 m/s e a uma altura de 5 m em relação ao solo. O ângulo de incidência do vento também foi constante, definido em 90° (perpendicular) em relação ao eixo do avião. A perturbação aplicada na queda das partículas foi definida em 10% do valor da velocidade terminal de queda.

Para esta simulação foram definidos quatro *clusters*. Os nós CC estavam localizados respectivamente nas coordenadas (200,100), (400,100), (600,100), (800,100).

Os gráficos apresentados no Gráfico 6 correspondem à simulação com os diâmetro das gotas de 200 μm (gota considerada médio para pesada) e com velocidade do vento de 1 m/s. O Gráfico 6(a) ilustra a representação matricial da área simulada, com a concentração das partículas nas respectivas posições onde atingiram o solo. Nota-se que inicialmente as partículas estão atingindo o solo fora do eixo central da área alvo (coordenada 100 no eixo y). Após a passagem pela coordenada 200 no eixo x, ao receber da RSSF (primeiro nó CC) os dados da condição do vento, o avião inicia seu ajuste na rota, o que promove a correção na rota de pulverização, para que seja aplicado o produto predominantemente ao longo do corredor de pulverização.

O Gráfico 6(b) é o histograma da queda das partículas. No gráfico, o deslocamento com valor em zero corresponde ao eixo central da área alvo. Como a aeronave tem envergadura de 14 m, então o corredor consiste no eixo zero até ± 7 m de largura. Quanto maior a frequência de partículas depositadas no corredor alvo, melhor a eficácia da pulverização. Nota-se que uma parte das partículas deslocaram-se acima de 7 m do eixo central da área alvo, essas partículas correspondem aos primeiros 200 m de pulverização sem o ajuste na rota.

Nesse intervalo, a sobreposição de pulverização na região entre 100 m e 106 m na coordenada do eixo y, gerou o pico na frequência entre 0 m e 6 m.

Gráfico 6 - Deslocamento das partículas em relação à área alvo com gotas de diâmetro de 200 μm e vento de 1 m/s. Em **(a)** tem-se a representação matricial da área com a concentração das partículas nas respectivas coordenadas onde atingiram o solo. Em **(b)** tem-se o histograma da queda das partículas normalizado, no qual o deslocamento com valor zero corresponde ao eixo central da área alvo da pulverização.

Fonte: Autor.

Na simulação, registrou-se que 85,87% das partículas lançadas atingiram o corredor alvo da pulverização. Caso não ocorra o ajuste na rota do veículo pulverizador, mesmo com o vento a 1 m/s (considerado fraco), a taxa de partículas que atingiria o corredor de pulverização alvo seria de 50%.

Os gráficos do Gráfico 7 correspondem também à análise da dispersão das partículas com o ajuste na rota do veículo pulverizador. Nesta simulação o diâmetro das gotas permaneceu com valor de 200 μm , mas a velocidade do vento foi incrementada, assumindo o valor de 3 m/s.

Gráfico 7 - Deslocamento das partículas em relação à área alvo com gotas de diâmetro de 200 μm e vento de 3 m/s. Em (a) tem-se a representação matricial da área com a concentração das partículas nas respectivas coordenadas onde atingiram o solo. Em (b) tem-se o histograma da queda das partículas normalizado.

Fonte: Autor.

Nesse contexto, 75,57% das partículas atingiram o corredor de pulverização alvo. Para o caso do veículo pulverizador não ajustar sua rota, nenhuma partícula atingiria o corredor de pulverização.

Os gráficos do Gráfico 8 correspondem à simulação com diâmetro da gota em 200 μm e velocidade do vento em 5 m/s. A taxa de eficiência da pulverização no corredor alvo foi de 73,81%. Caso não ocorresse o ajuste, novamente seria registrada 100% de pulverização fora da área alvo.

Gráfico 8 - Deslocamento das partículas em relação à área alvo com gotas de diâmetro de 200 μm e vento de 5 m/s. Em (a) tem-se a representação matricial da área com a concentração das partículas nas respectivas coordenadas onde atingiram o solo. Em (b) tem-se o histograma da queda das partículas normalizado.

Fonte: Autor.

Os gráficos apresentados nos Gráfico 9, Gráfico 10 e Gráfico 11 correspondem às simulações com diâmetro de gota definido em 100 μm , variando a velocidade do vento entre 1 m/s, 3 m/s e 5 m/s, respectivamente. Com a redução do diâmetro da gota, considerada como uma gota “muito leve”, o deslocamento das partículas foi maior, especialmente no contexto com diâmetro de 100 μm e vento de 5 m/s (Gráfico 11). Nas simulações, foram registradas as taxas de pulverização no corredor de pulverização de 82,48% com vento de 1 m/s, 69,88% com vento de 3 m/s; e 64,68% com vento de 5 m/s. Vale ressaltar que, apesar de no primeiro instante parecer que uma taxa de pulverização no alvo de 64,68%, em um contexto extremo, com gota de diâmetro de 100 μm e vento de 5 m/s, não estar a contento, na ausência do ajuste na rota do veículo pulverizador não apenas 100% das partículas seriam pulverizadas fora do corredor alvo, como também seriam deslocadas a mais de 90 m de distância.

Gráfico 9 - Deslocamento das partículas em relação à área alvo com gotas de diâmetro de 100 μm e vento de 1 m/s. Em (a) tem-se a representação matricial da área com a concentração das partículas nas respectivas coordenadas onde atingiram o solo. Em (b) tem-se o histograma da queda das partículas normalizado.

Fonte: Autor.

Gráfico 10 - Deslocamento das partículas em relação à área alvo com gotas de diâmetro de 100 μm e vento de 3 m/s. Em (a) tem-se a representação matricial da área com a concentração das partículas nas respectivas coordenadas onde atingiram o solo. Em (b) tem-se o histograma da queda das partículas normalizado.

Fonte: Autor.

Gráfico 11 - Deslocamento das partículas em relação à área alvo com gotas de diâmetro de 100 μm e vento de 5 m/s. Em (a) tem-se a representação matricial da área com a concentração das partículas nas respectivas coordenadas onde atingiram o solo. Em (b) tem-se o histograma da queda das partículas normalizado.

Fonte: Autor.

Segundo recomendações de Chaim (2009) e Matthews (1982), um contexto adequado para pulverização deve ter vento entre 3,2 m/s e 6,5 m/s; e gotas com tamanho entre 100 μm e 400 μm (dependente do produto a ser aplicado, cultura, tamanho da cultura e outros aspectos). Com o objetivo de avaliar a resposta do sistema para contextos de pulverização extremos, o Gráfico 12 mostra a taxa de pulverização no corredor alvo para diferentes contextos de diâmetro da gota, variando a velocidade do vento. Foram plotados apenas as soluções em que

o veículo pulverizador ajustou sua rota em menos de 100 m. Foi executado um *fitting* linear para visualizar o comportamento de cada contexto.

Gráfico 12 - Taxa de pulverização no corredor alvo para diferentes velocidades do vento e diâmetros de gota.

Fonte: Autor.

Fica evidente a importância do diâmetro da gota e a velocidade do vento na determinação da taxa de pulverização no alvo. Vale notar que mesmo para gotas consideradas pesadas, velocidades elevadas do vento são capazes de reduzir substancialmente a taxa de pulverização na área alvo. Nota-se que, conforme recomenda a literatura, os melhores resultados foram obtidos com gotas de tamanho médio, obtendo bons resultados mesmo para ventos superiores ao limite recomendado. É importante lembrar que há um limitante superior quanto à taxa de pulverização no corredor alvo, por conta do veículo pulverizador ajustar sua rota apenas após a passagem pelo primeiro nó CC. No caso de uma rede com maior número de *clusters*, essa taxa deve ser melhorada, por conta de o veículo pulverizador ajustar sua rota mais rapidamente.

6.3 COMPARAÇÃO ENTRE O PROTOCOLO PRORDPUV E UM PROTOCOLO BASEADO EM FLOODING

Com o objetivo de verificar o desempenho do protocolo ProRDPuv, para fins de comparação (referência), foi implementado outro protocolo de roteamento de dados que não emprega as estratégias utilizadas pelo ProRDPuv (representação da rota do *sorvedouro* móvel, organização dos nós em *clusters* e interceptação do *sorvedouro*). O protocolo se baseia da técnica de *flooding*. Dessa forma, durante a passagem do *sorvedouro*, ele envia uma mensagem de consulta para a rede, os nós que a receberem propagam para os seus nós vizinhos e o processo segue até que todos os nós da rede recebam a requisição. Então, cada nó encaminha de volta seus dados por meio da rota construída na propagação da consulta.

O teste avaliou a taxa de sucesso na entrega dos pacotes de dados ao *sorvedouro* móvel, considerando todos os nós que enviaram um pacote de dados. As simulações consideram dois contextos, um que 50% dos nós enviam dados e outro que 100% dos nós que compõe a RSSF enviam resposta.

Para os dois protocolos de roteamento foram utilizados as mesmas configurações de simulação, parâmetro de comunicação dos nós, tamanho dos pacotes de dados e densidade da RSSF. O único aspecto que sofreu variação foi o número de nós e como consequência, para manter a mesma densidade, também se variou o tamanho da área monitorada. Os testes foram executados para redes com 124, 328, 512 e 698 nós. O Gráfico 13 mostra o comparativo entre os protocolos.

Gráfico 13 - Comparativo entre os protocolos de roteamento ProRDPuv e Flooding.

Fonte: Autor.

O ProRDPuv foi superior em todas as simulações. Na média o ProRDPuv foi 15% melhor que o protocolo baseado em *flooding*, tendo alcançado superioridade acima de 20% em algumas simulações.

6.4 ALCANCE DE COMUNICAÇÃO E INTERFERÊNCIA ENTRE OS NÓS

Dois experimentos foram elaborados para verificar o alcance de comunicação dos nós e a interferência gerada em um contexto com alta densidade de nós.

O primeiro teste consistiu de uma rede com somente dois nós, no qual um ‘fonte de dados’ envia um pacote de dados com 32 bytes de tamanho a cada 0,1 s para o nó sorvedouro. Gradativamente os nós foram afastados um do outro. De acordo com os ajustes feitos nos coeficientes de perda do simulador, o alcance de comunicação entre os nós ficou em 50 m. Nessa distância, a perda de pacotes é praticamente nula (aproximadamente 1% de perda). A partir dos 50 m até 60 m há um aumento gradativo na perda dos pacotes, tornando a comunicação totalmente nula a partir dos 61 m. O Gráfico 14 mostra o resultado médio das simulações, que descreve a redução gradativa na taxa de sucesso na entrega dos pacotes de dados à medida que os nós se distanciam, a partir dos 50 m.

Gráfico 14 - Alcance de comunicação entre nós. Taxa de perda de pacotes com distância superior a 50 m.

Fonte: Autor.

O segundo ensaio visa avaliar a interferência entre os nós. O nó fonte de dados tem a função exclusiva de enviar pacotes de dados em intervalo aleatório, o nó sorvedouro apenas recebe pacotes e um novo nó com a função de 'interferência', gera pacotes de dados em intervalos aleatórios que não são processados pelo sorvedouro (são descartados). Os nós fonte de dados e sorvedouro são mantidos a uma distância constante entre si de 50 m. O Gráfico 15 mostra o teste em que o nó de interferência é movimentado ao longo da área, se aproximando do nó fonte de dados (posicionado em 0 m), passando por ele e se aproximando do nó sorvedouro (posicionado em 50 m) e então se afastando pelo lado do sorvedouro.

Gráfico 15 – Interferência na comunicação entre dois nós.

Fonte: Autor.

As simulações mostraram que enquanto o nó de interferência está ao alcance apenas do nó fonte de dados houve elevação no número de *back off*¹⁵, mas não ocorreu perda significativa no recebimento dos pacotes pelo sorvedouro. No instante que o nó de interferência passa a alcançar o sorvedouro, a taxa de *back off* continua equivalente ao primeiro contexto, entretanto o sorvedouro passa a receber pacotes com interferência, além de receber (processar) maior número de pacotes. Quanto o nó de interferência, deixa de alcançar o nó fonte de dados, então há uma redução na ocorrência de *back off*, mas há um aumento acentuado no número de pacotes com interferência recebidos pelo sorvedouro, o que proporciona a queda na taxa de recebimento de pacotes pelo sorvedouro. Essa característica é explicada pela ausência do funcionamento do protocolo CSMA/CA.

Em outro teste, foram adicionados mais nós de interferência à rede. No teste, os nós de interferência foram aproximados gradativamente apenas do sorvedouro (pelo lado do sorvedouro). O Gráfico 16 mostra os resultados obtidos no ensaio.

Gráfico 16 - Taxa de sucesso na entrega de pacotes de dados com um conjunto de nós causando interferência e se aproximando gradativamente do sorvedouro.

Fonte: Autor.

¹⁵ É um algoritmo que, no caso de colisão de pacotes, faz com que cada nó espere por um tempo aleatório, aumentando esse intervalo no caso de reincidência de colisão.

Nota-se a queda gradativa na taxa de entrega dos pacotes por conta da interferência gerada, acentuada à medida que nós de interferência são adicionados à rede. Quando os nós de interferência entram no alcance de comunicação do nó fonte de dados (10 m do sorvedouro e 60 m do fonte de dados), ocorre uma melhora explicada pela atuação do CSMA/CA.

6.5 AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ESCALABILIDADE DA REDE

A escalabilidade da rede é a capacidade de manter seu funcionamento adequado mesmo com o uso de um grande número de nós. Nesta verificação foi avaliada a taxa de sucesso na entrega dos pacotes de dados dos nós para os nós CC variando apenas o tamanho da área monitorada e o número de sensores instalados. A distância entre os nós permaneceu constante (densidade constante) em 50 m. No contexto deste teste foi definido apenas um único *cluster*.

O Gráfico 17 mostra a taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós para os nós CC, variando a porcentagem de sensores que enviaram dados. Essa variação visa simular a coleta de dados por somente aqueles nós mais próximos dos nós CC.

Gráfico 17 - Taxa de sucesso na entrega de dados dos nós para os nós CC variando a quantidade de nós da rede (mesma densidade).

Fonte: Autor.

Ao avaliar o gráfico, nota-se que quanto menor o número de nós, maior é a taxa de sucesso na entrega dos dados. Apesar desse contexto proporcionar menor opção de rotas, há também menor volume de mensagens de rádio no ambiente, o que proporciona menos interferência ou choque de pacotes. Observa-se que em uma rede com mais de 120 nós, com 100% deles enviando dados, há uma taxa de sucesso superior a 75%, e mesmo em uma rede com quase seis vezes o tamanho da primeira, aproximadamente 700 nós, a taxa de sucesso esteve acima de 50%.

Quanto à escalabilidade da rede, nota-se que à medida que o número de nós aumenta, há uma tendência na aproximação das linhas do gráfico, inclusive com a sobreposição das barras de erro das redes com maior número de nós. Isso induz ao entendimento que há a tendência de convergir para um limite mínimo, o que corresponde a um bom comportamento do protocolo quanto à escalabilidade da RSSF.

6.6 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO PROTOCOLO COM REDES DE DIFERENTES DENSIDADES

Uma RSSF muito densa (nós muito próximos entre si) tende a gerar um grande volume de colisões de pacotes, podendo até ocorrer a completa inoperabilidade da rede. Por isso, é importante saber da capacidade do protocolo de roteamento em tratar um contexto com alta densidade de nós e conhecer o seu limite.

Neste ensaio, o tamanho da área monitorada permaneceu constante, variou-se apenas o número de nós. O número de nós da rede foi definido em função distância entre eles. Todos os nós foram dispostos sobre a área monitorada com distância igual entre si, variando de 50 m a 15 m. A densidade da rede foi determinada por meio da relação do número de sensores pela área, no caso, foi estabelecida a densidade como número de sensores por hectare.

O Gráfico 18 apresenta a taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós aos nós CC, variando a densidade da RSSF. A legenda no eixo x descreve a densidade da rede, o número de nós que a compõem e a distância entre eles. Nota-se que há dois contextos, um mais eficiente, com 50% dos nós enviando dados, enquanto que o segundo 100% dos nós enviam seus dados.

Gráfico 18 - Taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós para os nós CC variando a densidade da RSSF.

Fonte: Autor.

Observa-se com o gráfico que o incremento inicial na densidade da rede foi positivo, gerando um aumento na taxa de sucesso na entrega dos dados à medida que o sinal se torna mais forte entre os nós (os nós estão se aproximando uns dos outros). Esse comportamento se manteve até o contexto da RSSF com 10,48 nós/ha (distantes uns dos outros por 35 m).

Com a densidade da rede em 11,2 nós/ha (distância de 32,5 m) há uma queda na taxa de sucesso na entrega dos dados, o que se repete para a rede com densidade em 13,44 nós/ha (nós separados por 30 m). Essa queda pode ser explicada pelo aumento do número de pacotes sendo transmitidos na rede, gerando interferência e colisão de pacotes. Isso é evidenciado pelo Gráfico 16, no qual se observa que há uma queda acentuada na taxa de sucesso de comunicação entre os nós por interferência, principalmente há uma distância aproximada entre 30 m e 20 m.

Entretanto, observa uma melhora na taxa de entrega dos dados para as redes com densidade 16,08 nós/ha e 19,44 nós/ha. Essa melhora pode ser explicada pelo fato dos nós estarem alcançando o “segundo vizinho” mais próximo, pois estão distantes 55 m e 50 m respectivamente do segundo nível de vizinhos. Apesar do incremento na interferência, o

algoritmo CSMA/CA tem melhores condições de evitar colisões, pois pode monitorar o canal de comunicação de mais nós evitando o efeito de “nó escondido”.

Nas redes com maior densidade, de 30,32 nós/ha e 53,64 nós/ha há uma nova queda na taxa de sucesso na entrega dos dados. Apesar dos nós estarem tão próximos uns dos outros (20 m e 15 m), o que permite um nó comunicar-se com o 3º nível de vizinhos, nessa distância a interferência dos nós vizinhos proporciona uma piora ainda maior na comunicação entre os nós e pela alta densidade, o algoritmo CSMA/CA já não consegue evitar as colisões, além de determinar que vários nós fiquem longos períodos aguardando por liberação do canal, até cancelar o envio do pacote (*drop*).

Dessa forma, pode-se concluir que não é recomendada uma densidade superior a aproximadamente 10,5 nós/há (proximidade inferior a 35 m), por conta da redução acentuada na taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós para os nós CC em razão da interferência e colisão de pacotes causada pelo grande número de nós e a proximidade entre si.

6.7 AVALIAÇÃO DO NÚMERO DE NÓS CABEÇA DE CLUSTER

Essa avaliação visa verificar o impacto na taxa de sucesso de entrega dos dados com a variação no número de *clusters*. O tamanho da área monitorada, o número de nós e a densidade da rede permaneceram constantes. Apenas o número de nós CC variou, por consequência o número de *clusters* na RSSF.

O Gráfico 19 mostra o ganho obtido na taxa de entrega dos dados dos nós para os nós CC à medida que aumenta o número de *clusters* da RSSF. É importante observar no contexto em que 100% dos nós enviam dados, que à medida que o número de *clusters* aumenta, sua eficiência tende a se tornar equivalente ao contexto em que 50% dos nós enviam dados. Inclusive, observa-se uma sobreposição das barras de erro para os contextos com 10, 12 e 14 *clusters*. Esse comportamento é razoável, pois há um menor “afunilamento” na entrega dos pacotes de dados quando há mais nós CC disponíveis.

Gráfico 19 - Taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós para os nós CC variando o número de *clusters* da rede.

Fonte: Autor.

Apesar da tendência de crescimento e estabilização na taxa de entrega dos dados apresentada pelo gráfico, o número de *clusters* não deve aumentar indefinidamente. Um número exageradamente grande tende a gerar *clusters* com poucos nós, ou mesmo com nós solitários. Nesse contexto a estratégia se torna prejudicial, pois acaba proporcionando mais troca de pacotes, mais interferência e redução da eficácia da RSSF.

6.8 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO TAMANHO DO PACOTE DE DADOS NA ENTREGA DOS DADOS

O tamanho do pacote de dados interfere de maneira relevante no funcionamento do protocolo de roteamento. Quanto maior o pacote mais tempo será necessário para transmitir o dado e mais tempo o rádio transmissor fica ocupado para a transmissão de um conjunto de dados.

Esta avaliação consiste em variar o tamanho do pacote de dados que será enviado dos nós para os nós CC, mantendo constante todo o contexto da RSSF (número de nós, posicionamento, número de *clusters*). O tamanho dos pacotes de dados variaram de 32 bytes até o máximo permitido pelo padrão IEEE 802.15.4, que corresponde a 512 bytes.

O Gráfico 20 mostra uma queda linear na taxa de entrega dos dados à medida que o tamanho do pacote de dados aumenta.

Gráfico 20 - Taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós para os nós CC variando o tamanho do pacote de dados.

Fonte: Autor.

6.9 AVALIAÇÃO DA ENTREGA DE DADOS DOS NÓS CC PARA O SORVEDOURO COM DIFERENTES NÚMEROS DE CLUSTERS.

Com o aumento do número de *clusters*, a RSSF tem mais momentos de oportunidade para entregar os dados coletados pelos nós. Esta avaliação visa verificar o quanto o incremento no número de nós CC melhora a taxa de entrega de dados dos nós CC para o *sorvedouro* móvel.

Os ensaios utilizaram uma rede com 697 nós, distribuídos sobre uma área de 1000 m x 1450 m. A simulação do *sorvedouro* móvel considerou uma velocidade constante de 33 m/s e altura de 5 m em relação ao solo. O tamanho dos pacotes de dados foi fixado em 32 bytes. Foram executados dois contextos de simulação, um com 50% dos nós enviando seus dados e outro com 100% dos nós. O número de nós CC variou de 1 até 14 unidades. O Gráfico 21 mostra a taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós CC para o *sorvedouro* móvel com a variação na quantidade dos nós CC.

Gráfico 21 - Taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós CC para o sorvedouro móvel, para redes com diferentes quantidades de nós CC.

Fonte: Autor.

Conforme esperado, observa-se que com o incremento do número de nós CC há uma melhora na taxa de entrega dos dados para o *sorvedouro* móvel. No contexto simulado, mesmo com 100% dos nós enviando dados, com oito nós CC há uma taxa de entrega de dados ao *sorvedouro* móvel superior a 99%.

Nesse contexto também vale ressaltar que um número elevado de nós CC irá degradar a taxa de sucesso na entrega dos pacotes.

6.10 AVALIAÇÃO DA ENTREGA DE DADOS DOS NÓS CC PARA O SORVEDOURO VARIANDO SUA VELOCIDADE

Ao executar simulações variando a velocidade do *sorvedouro* móvel o principal aspecto a ser avaliado é a estratégia de interceptação do *sorvedouro* móvel pelos nós CC. Dessa forma, todos os parâmetros, exceto a velocidade do *sorvedouro* móvel, permaneceram constantes. Foi considerada a área com tamanho de 1000 m x 1450 m, com 697 nós distribuídos em um padrão hexagonal com nó central, no qual 100% dos nós enviaram dados. Foram estabelecidos quatro nós CC. Os pacotes de dados tinham tamanho de 32 bytes. O

sorvedouro percorreu a área a uma altura de 5 m em relação ao solo e sua velocidade variou de 33 m/s a 250 m/s.

A título de comparação, foi executado o mesmo teste empregando o protocolo de roteamento de dados baseado em *flooding*, o mesmo utilizado na Seção 6.3. Foram utilizados os mesmos parâmetros de simulação, área, número de sensores, padrão de comunicação e configurações do *sorvedouro* móvel. O Gráfico 22 mostra a taxa de sucesso no recebimento dos pacotes de dados dos nós CC para o *sorvedouro* móvel do protocolo ProRDPuv em relação ao aumento da velocidade do *sorvedouro* móvel e compara com o mesmo comportamento do protocolo de roteamento de dados baseado em *flooding*.

Gráfico 22 - Taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós CC para o sorvedouro móvel no protocolo ProRDPuv e protocolo baseado em *flooding* variando a velocidade do sorvedouro.

Fonte: Autor.

O protocolo ProRDPuv se comportou bem, mesmo com o aumento da velocidade do sorvedouro móvel. O comportamento observado se mostrou consistente com o observado no trabalho de Oliveira, Barreto, *et al* (2010), no qual a interceptação do sorvedouro também foi empregada. De acordo com a simulação computacional, a estratégia de interceptação se mostrou eficaz a ponto de uma aeronave de pulverização ter baixa possibilidade de não conseguir comunicação com a RSSF. Já no contexto de um protocolo de roteamento clássico, baseado em *flooding*, observa-se no gráfico que seu desempenho foi sensivelmente

prejudicado com o aumento da velocidade de movimentação do *sorvedouro*. Isso reforça a necessidade de utilizar técnicas que dão suporte à mobilidade em alta velocidade de nós em RSSF.

6.11 AVALIAÇÃO DA ENTREGA DE DADOS DOS NÓS CC PARA O SORVEDOURO VARIANDO SUA ALTITUDE

A altitude de voo do sorvedouro móvel em relação à cultura interfere não somente na ocorrência da deriva, mas também na capacidade de comunicação com a RSSF. Um voo com baixa altitude proporciona maior intensidade do sinal de radiofrequência e maior intervalo de tempo para comunicação, enquanto que um voo em altitude elevada reduz o intervalo de tempo para comunicação entre os nós, além de receber um sinal atenuado (mais fraco).

Para avaliar o impacto da altitude do sorvedouro na comunicação entre os nós CC e o sorvedouro, foram executados ensaios que mantiveram constantes os parâmetros de configuração da área monitorada e de comunicação entre os nós. O único aspecto que sofreu variação foi a altura de voo do sorvedouro móvel, variando de 3 m a 50 m em relação ao solo. A simulação utilizou uma área de 1000 m x 1450 m, com 697 nós distribuídos regularmente. A RSSF foi organizada em quatro *clusters*, na qual 100% dos nós coletaram e enviaram seus dados. Os pacotes de dados foram definidos com tamanho de 32 bytes. Em seu movimento, o sorvedouro manteve uma velocidade constante de 33 m/s.

O Gráfico 23 mostra a taxa de sucesso na entrega dos pacotes dos nós CC para o sorvedouro móvel em diferentes altitudes.

Gráfico 23 - Taxa de sucesso na entrega dos dados dos nós CC para o sorvedouro móvel variando a altitude do sorvedouro.

Fonte: Autor.

O comportamento do gráfico descreve uma queda na taxa de sucesso na entrega dos pacotes dos nós CC para o sorvedouro móvel à medida que a altura do voo aumenta e consequentemente o intervalo de tempo de comunicação. Observa-se que a partir dos 40 m de altitude há uma sensível queda na taxa de entrega dos pacotes de dados para o sorvedouro móvel. Isso se justifica pelo intervalo reduzido de tempo de comunicação entre o nó CC e o sorvedouro móvel e pela atenuação no sinal.

Apesar do contexto da pulverização considerar adequada a altura de pulverização entre 3 m e 7 m, que na simulação obteve boas taxas de entrega de pacotes de dados, em aproximadamente 80% de sucesso para 100% dos nós enviando dados, outras aplicações que vierem a utilizar o protocolo de roteamento proposto, podem avaliar a capacidade de comunicação para diferentes altitudes.

6.12 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Ao longo deste capítulo construiu-se um conhecimento empírico do funcionamento da RSSF no contexto da pulverização agrícola por meio da simulação computacional e dos conhecimentos teóricos desenvolvidos ao longo deste trabalho. Os resultados tornaram possível demonstrar a viabilidade da aplicação pretendida.

Os resultados demonstraram que o protocolo ProRDPuv é mais eficaz no processo de roteamento e entrega dos dados ao sorvedouro móvel, no contexto da pulverização agrícola, que um protocolo de roteamento clássico, baseado na estratégia de *flooding*. Em uma rede com até 200 nós, na qual todos os nós enviam dados, a taxa de sucesso na entrega dos pacotes de dados foi superior a 80%. Mesmo em uma rede com 700 nós, a taxa de sucesso ficou em aproximadamente 60%, o que corresponde a um resultado duas vezes melhor que ou outro protocolo comparado.

Na avaliação dos diferentes aspectos do protocolo de roteamento ProRDPuv, é importante observar a avaliação das estratégias adotadas visando o funcionamento do protocolo com o sorvedouro móvel. A organização dos nós em *clusters* demonstrou que, com uma boa seleção do número de nós CC, há um incremento relevante na taxa de sucesso na entrega dos pacotes de dados, seja no encaminhamento dos dados dos nós para os nós CC e principalmente dos nós CC para o sorvedouro móvel. Esta estratégia também é responsável por proporcionar boas taxas de entrega de pacotes de dados mesmo com o aumento da velocidade de deslocamento do sorvedouro.

A representação da rota do sorvedouro móvel na RSSF e a estratégia de entrega dos pacotes de dados interceptando o sorvedouro em seu movimento proporcionaram ótimas taxas de entrega dos pacotes de dados, com valores de aproximadamente 80% mesmo com o sorvedouro se movendo a velocidades de até 130 m/s. Esse aspecto é surpreendente não somente por proporcionar a comunicação da RSSF com uma aeronave, mas também pela superioridade em relação a outro protocolo de rede que utiliza um método clássico de ‘consulta e resposta’, que não apresentou taxa de sucesso superior a 30%, mesmo para as velocidades mais baixas testadas.

Entretanto é importante observar que o sorvedouro moveu-se sobre a área estando próximo dos nós (5 m de altura, na maioria das simulações) e que à medida que ele se afasta (aumenta sua altitude) há uma perda na capacidade de entrega dos pacotes de dados dos nós CC. Essa perda é mais acentuada a partir dos 20 m de altura. Certamente uma altura elevada, associada a alta velocidade de deslocamento do sorvedouro, irá proporcionar uma baixa taxa de entrega de pacote de dados.

Ainda, foi observada uma boa capacidade de escalabilidade do protocolo de roteamento. Mesmo com o aumento acentuado do número de nós da rede, observou-se uma tendência de convergência para um nível mínimo de taxa de entrega dos pacotes dos nós para os nós CC.

Entretanto, a principal limitação do protocolo foi em relação ao aumento da densidade da RSSF. Em densidades elevadas os testes demonstraram uma perda acentuada na funcionalidade do protocolo, principalmente quando os nós estão distantes entre si a menos de 30 m. Dessa forma, é preciso planejar a implantação da RSSF de modo a proporcionar um alcance de comunicação eficiente entre os nós, ao mesmo tempo deve evitar uma proximidade excessiva que degrade a eficiência do protocolo de roteamento.

Uma questão que suscita com a análise dos resultados é como determinar o número ideal de *clusters* para um determinado contexto da RSSF. Ao avaliar o Gráfico 19 que mostra os resultados da simulação que verifica a entrega dos dados dos nós para o nós CC variação do número de *clusters* e o Gráfico 17 da avaliação da escalabilidade da rede, percebe-se que a relação entre esses dois contextos pode proporcionar a determinação do número de *cluster* ótimo. Na análise da escalabilidade da RSSF, à medida que o número de nós da rede aumenta, bem como o número de nós enviando dados, a taxa de sucesso na entrega dos pacotes de dados cai. Mas se o número de nós CC aumenta, essa taxa tende a subir. Então pode-se dizer que uma relação adequada entre o número de nós, número de nós enviando dados e o número de nós CC deve proporcionar uma otimização na taxa de sucesso na entrega dos pacotes de dados, minimizando a perda de pacotes de dados enquanto mantém um *overhead* de comunicação aceitável.

Várias tentativas foram feitas nesse sentido, concentrando-se especialmente na tentativa de estabelecer um sistema não linear com múltiplas variáveis entre os dois contextos. Apesar disso não se chegou a uma solução matemática definitiva e consistente. Por enquanto, resta a opção de determinar o número de *clusters* na RSSF de maneira empírica, utilizando o sistema de simulação computacional.

Este capítulo demonstrou a viabilidade da implementação de um SSPA que emprega RSSF, que ao utilizar as técnicas propostas garante uma taxa aceitável na entrega de dados ao veículo pulverizador durante sua passagem. Os resultados das simulações computacionais demonstraram ser possível implementar um sistema que avalie as condições ambientais, recomendando a pulverização ou seu cancelamento; a coleta de dados para avaliação da

eficácia da pulverização; e um sistema que dê suporte ao ajuste da rota do veículo pulverizador, buscando a redução do efeito deriva.

7. CONCLUSÃO

Este capítulo apresenta as considerações finais desta pesquisa, levando em consideração o desenvolvimento e os resultados obtidos ao longo da elaboração deste trabalho. São também apresentadas sugestões para trabalhos futuros, como a sequência dos estudos realizados, procurando aprimorar os modelos desenvolvidos e proporcionar a utilização prática das RSSF na pulverização agrícola.

7.1 CONTRIBUIÇÃO DA TESE

Este trabalho apresentou como contribuição original a proposição do protocolo ProRDPuv, caracterizado pela adaptação e combinação de diferentes técnicas de roteamento de dados em um contexto com nó sorvedouro móvel. Por meio dele, é possível a entrega dos dados dos nós fixos da RSSF para o nó móvel, especialmente no contexto da pulverização agrícola.

Dentre as principais contribuições da Tese, podem-se citar:

- a) **uso da tecnologia de RSSF na pulverização agrícola:** essa pesquisa apresentou uma abordagem concreta de utilização das RSSF como componente no processo de pulverização agrícola, com foco na redução do efeito deriva;
- b) **sistema de simulação de RSSF no contexto da pulverização agrícola:** foi desenvolvido um *software*, baseado no simulador OMNet++, que permite a simulação de uma RSSF no contexto da pulverização agrícola. Este sistema pode ser estendido e aplicado a outros sistemas que demandam a simulação de RSSF em AP;
- c) **a organização de um sistema de *software* para suporte ao processo de pulverização:** foi proposta uma arquitetura inicial de *software* que permite a organização dos serviços e funcionalidades de um sistema que utiliza das RSSF e que provê suporte ao processo de pulverização, permitindo a avaliação das condições ambientais, o ajuste na rota da aeronave pulverizadora e a avaliação da qualidade da pulverização;
- d) **perspectiva de redução da ocorrência do efeito deriva:** os resultados das simulações computacionais mostraram que a utilização das RSSF como suporte

no ajuste da rota da aeronave pulverizadora proporcionam a redução na ocorrência do efeito deriva;

- e) **nova abordagem para representação da rota do sorvedouro móvel:** a preparação da RSSF para a passagem do sorvedouro, baseada na representação da sua rota, é uma abordagem diferenciada;

Dessa forma, contribui-se com uma perspectiva de realidade para o uso das RSSF no controle da deriva, o que proporciona melhor eficácia no processo de pulverização agrícola, menor desperdício e contaminação do meio ambiente.

7.2 DESAFIOS FUTUROS

Frente a todos os conceitos estudados, técnicas, desenvolvimento de soluções, reflexões, entre outras atividades envolvidas no processo de pesquisa, um conjunto de possibilidades e variações de soluções se apresentam. Em razão do limite de tempo e da definição do escopo do trabalho, nem sempre é possível executar uma ampla investigação dessas alternativas. Entretanto, essas possibilidades se apresentam como novas frentes de pesquisas, que permitem variações e a exploração de novos conceitos. Nesse sentido, esta seção busca propor sugestões para a continuidade deste trabalho e para a abertura de novas frentes relacionadas, inclusive integrando com outras atividades de pesquisa do Laboratório de Automação Agrícola da Escola Politécnica da USP.

São sugestões:

- *avaliar e aperfeiçoar o funcionamento do ProRDPuv quanto sua deficiência em relação ao aumento da densidade da rede.* Para reduzir a queda na taxa de entrega dos pacotes de dados, quanto a rede apresenta altos índices de densidade, propõe-se a elaboração de um algoritmo que trabalhe na camada de aplicação dos nós, verificando quando o nó está alcançando o seu segundo nível de vizinhos e então determinar que alguns sensores entrem em estado de espera (*standby*), ficando inoperante. Espera-se que um nó, ao identificar que a densidade da rede está elevada, ele avalie o seu contexto local, verificando a situação dos seus nós vizinhos e então decida por se “desligar”. Essa estratégia forçaria a redução artificial da densidade da RSSF, evitando a queda na eficácia do envio dos pacotes

de dados dos nós, com um benefício adicional de proporcionar maior tempo de vida útil da rede, pois os nós podem ligar e desligar de maneira intercalada. Nessa proposta é importante avaliar se a demanda da aplicação permite essa redução artificial da densidade da rede.

- *otimizar o processo de ajuste na rota do veículo pulverizador, com base no conjunto de dados coletados pela funcionalidade da avaliação da qualidade da pulverização.* Para isso podem ser empregadas técnicas de inteligência artificial, como metaheurísticas, ou a modelagem de um sistema de otimização combinatória, visando relacionar contextos diversos com boas soluções, de maneira a proporcionar um sistema capaz de gerar boas soluções mesmo não tendo enfrentado aquele contexto anteriormente.
- *ampliar as avaliações do protocolo de roteamento ProRDPuv proposto.* Considera-se relevante executar simulações para o contexto de uma RSSF na qual os nós são distribuídos aleatoriamente sobre a área monitorada. Essa situação impacta de maneira relevante no funcionamento do protocolo. Outro aspecto a ser explorado é a avaliação quanto ao consumo energético do protocolo de roteamento, identificando os aspectos do protocolo mais relevantes que proporcionam economia de energia. Além disso, o protocolo pode comparado com outros protocolos de roteamento que consideram um sorvedouro móvel.
- *empregar tecnologia adaptativa no protocolo de roteamento.* A tecnologia adaptativa (JOSÉ NETO, 2007) se apresenta com características que a colocam como candidata a ser empregada em RSSF, isso porque a autonomia de decisão proporcionada pela tecnologia se adequa muito bem ao contexto das RSSF, na qual cada nó deve tomar suas decisões de maneira autônoma. Os primeiros estudos e aplicação dessa tecnologia nas RSSF mostraram bons resultados, como por exemplo no aspecto da economia de energia (SANTOS, DOTA e CUGNASCA, 2011). Novas aplicações podem ser desenvolvidas, especialmente no protocolo de roteamento de dados, como recurso para otimizar seus parâmetros, ou mesmo para estabelecer um sistema multicamadas, no qual a tecnologia adaptativa pode atuar como supervisor em uma camada de mais alto nível.

- *especificação formal e detalhada de toda a arquitetura de sistema envolvendo RSSF e a aplicação da pulverização agrícola.* Dessa forma o sistema poderá ser empregado em diversos contextos, por exemplo, na pulverização por aviões ou por VANTs. Além disso, a arquitetura deve prever a compatibilidade com o padrão ISOBUS, especialmente para a pulverização por tratores.
- *desenvolver um software de gerenciamento, servindo de front-end para o usuário.* Esse sistema será a ferramenta que permite a utilização das funcionalidades previstas neste trabalho. As aplicações e seus parâmetros devem ser especificados em forma de serviços, conforme proposto.
- *construir um protótipo para verificação do funcionamento do protocolo e dos serviços propostos em um contexto real.* Um sistema real pode ser implementado utilizando equipamentos e tecnologia disponíveis no mercado atual, como por exemplo a arquitetura Arduino (FALUDI, 2010) com sensores de umidade, anemômetro, biruta, sensor de vento ultrassônico, entre outros. Como a elaboração de um sistema embarcado em uma aeronave tripulada exige maturidade e certificação, sugere-se que o primeiro passo consista do desenvolvimento de um protótipo utilizando um VANT de pequeno porte com um nó embarcado.
- *utilização do protocolo de roteamento em outros contextos de aplicação:* Apesar da referência ao contexto da pulverização agrícola, este sistema pode ser utilizado em outros contextos que demandam a coleta de dados por meio de um sorvedouro móvel, especialmente quando este sorvedouro move-se em alta velocidade e que a coleta de dados pode direcionar ou corrigir sua rota. São exemplos de contextos: sistemas de combate a incêndio; sistemas de segurança; sistemas de coleta de dados para manutenção de edificações, pontes, estradas, barragens, entre outros; sistemas de coleta de dados de monitoramento ambiental; ou sistemas de monitoramento de rebanhos.

7.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização das RSSF na agricultura de precisão já é viável atualmente, especialmente para sistemas de monitoramento ambiental. Este trabalho introduziu a possibilidade de empregar as RSSF como base de um SSPA, com objetivo de reduzir o efeito da deriva.

A perspectiva oferecida por esta pesquisa inseriu o autor como pesquisador agrícola, cujo foco esteve voltado ao processo de pulverização, na perspectiva do agricultor ou do aplicador de defensivos agrícolas. Essa condição permitiu a proposição de um modelo de sistema e de um protocolo de roteamento de dados para RSSF. Dessa forma, acredita-se que este trabalho de pesquisa oferece uma contribuição positiva ao arcabouço de ferramentas disponíveis para uso em agricultura de precisão.

Além disso, é um trabalho multidisciplinar que demanda conhecimentos em computação, redes de computadores, RSSF, mecânica dos fluídos, agricultura e pulverização agrícola, e representa a aplicação dos conhecimentos em tecnologia em um contexto de agricultura.

REFERÊNCIAS

- ADIAN, A. M.; NORWOOD, S. H.; MASK, P. L. Producers, perceptions and attitudes toward precision agriculture technologies. **Computer and Electronics in Agriculture**, v. 48, p. 256-271, 2005.
- AKENSSON, N. B.; YATES, W. E. **Pesticide application equipment and techniques**. Series FAO Agricultural Services Bulletin. Roma: Food & Agriculture, 1979.
- AKYILDIZ, I. F.; VURAN, M. C. **Wireless sensor networks**. Chichester - United Kingdom: Wiley, 2010.
- ASLAM, M. et al. Survey of extended LEACH-based clustering routing protocols for wireless sensor networks. In: International Conference on High Performance Computing and Communication, 14 and International Conference on Embedded Software and Systems, 9., 2012, Liverpool. **Proceedings...** IEEE, 2012. p. 1232-1238.
- BARROS, M. F. D. **Proposta de interconexão do padrão ISO 11783 com redes de sensores sem fio padrão ZigBee**. Escola Politécnica - Universidade de São Paulo. São Paulo. 2010. Dissertação (Mestrado).
- BARROS, M. F. D. et al. Avaliação de uma rede de sensores sem fio eKo em uma cultura de milho. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 2012, Ribeirão Preto. **Anais...** São Paulo: 2012. p. 1-8
- BOHMONT, B. L. **The new pesticide user's guide**. Fort Collins: B&K, 1981.
- BOUKERCHE, A. **Algorithms and protocols for wireless sensor networks**. NJ, USA: Wiley, 2008.
- BRASIL. **Lei Federal N. 7802**. Brasília. 1989. 11/07/1989.
- BROOKS, F. A. The drift of poisonous dusts applied by airplanes and land rigs. **Agricultural Engineering**, Peradeniya, v. 28, p. 233-244, 1947.
- CAMILLI, A. et al. From wireless sensors to field mapping: anatomy of an application for precision agriculture. **Computers and electronics in agriculture**, v. 58, p. 25-36, August 2007.

CAMP, T.; BOLENG, J.; DAVIES, V. A survey of mobility models for ad hoc network research. In: Wireless Communications e Mobile Computing (WCMC), 2002, **Anais...** 2002. p. 483-502.

CERPA, A. et al. Habitat monitoring: application driver for wireless communications technology. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**. p. 20-41, 2001.

CHAIM, A. Tecnologia de aplicação de agrotóxicos: fatores que afetam a eficiência e o impacto ambiental. In: SILVA, C. M. M. D. S.; FAY, E. F. **Agrotóxicos e ambiente**. Brasília: Embrapa, p. 289-317, 2004.

CHAIM, A. **Manual de tecnologia de aplicação de agrotóxicos**. Brasília: Embrapa, 2009.

CUNHA, J. P. A. R. D. Pesticide drift simulation under different spray conditions. **Ciência e agrotecnologia**, v. 32, p. 1616-1621, 2008.

DIMOKAS, N.; KATSAROS, D.; MANOLOPOULOS, Y. Energy-efficient distributed clustering in wireless sensor networks. **Jounal of parallel and distributed computing**, v. 70, p. 371-383, April 2010.

ESTRIN, D. et al. Next century challenges: scalable coordination in sensor networks. In: Annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, 5., 1999, New York. **Proceedings...** New York: 1999. p. 263-270.

ESTRIN, D. et al. Instrumenting the world with wireless sensor networks. In: IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2001, Salt Lake City. **Proceedings...** Salt Lake City: 2001. p. 2033-2036.

EUROPEAN, U. **Directive 2009/128/EC of the European parliament and of the Council**. 21 october 2009.

FALUDI, R. **Building wireless sensor networks: with ZigBee, XBee, Arduino, and Processing**. USA: O'Reilly, 2010.

FODOR, K.; VIDÁCS, A. Efficient routing to mobile sinks in wireless sensor networks. In: International Conference on Wireless Internet (ICST), 3., 2007, Austin. **Proceedings...** Austin: 2007.

GUPTA, G.; YOUNIS, M. Load-balanced clustering of wireless sensor networks. In: IEEE International Conference on Communications. 2003. **Proceedings...** 2003. p. 1848-1852.

HEINZELMAN, W. R.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Annual Hawaii IEEE International Conference on System Sciences, 33., 2000, Hawaii. **Proceedings...** Hawaii: 2000. p. 3005-3014.

HEWITT, A. Spray drift: impact of requirements to protect the environment. **Crop Protection**, n. 19, p. 623-627, 2000.

HIMEL, C. M. The optimum size for insecticide spray droplets. **Journal of Economic Entomology**, v. 62, p. 919-925. 1969.

HUANG, Y. et al. Development of soft computing and applications in agricultural and biological engineering. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 71, n. 2, p. 107-127, May 2010.

INAMASU, R. Y. et al. **Agricultura de precisão - Um novo olhar**. São Carlos/Sp: Embrapa Instrumentação, 2011.

IQBAL, M.; GONDAL, I.; DOOLEY, L. An energy-aware dynamic clustering algorithm for load balancing in wireless sensor networks. **Journal of communications**, v. 1, p. 10-20, June 2006.

JIN, S.; LI, K. LBCS: A load balanced clustering scheme in wireless sensor networks. In: IEEE International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering, 3., 2009, Qingdao. **Proceedings...** Qingdao: 2009. p. 221-225.

JOSÉ NETO, J. A small survey of the evolution of adaptivity and adaptive technology. **IEEE Latin America Transaction**, v. 5, n. 7, p. 496-505, 2007.

KAHN, J. M.; KATZ, R. H.; PISTER, K. S. J. Next century challenges: mobile networking for "Smart Dust". In: Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, 5., 1999, Seattle. **Proceedings...** Seattle: 1999. p. 271-278.

KARL, H.; WILLING, A. **Protocols and architectures for wireless sensor networks**. Chichester, England: Wiley, 2007.

KIM, J.-S. et al. Robust clock synchronization in wireless sensor networks through noise density estimation. **IEEE transactions on signal processing**, v. 59, p. 3035-3047, July 2011.

KÖPKE, A. et al. Simulating wireless and mobile networks in OMNeT++ the MiXiM vision. In: International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems e Workshops (ICST), 1., 2008, Marseille. **Proceedings....** Marseille: 2008. n. 71.

LAMBROU, T. P.; PANAYIOTOU, C. G. A survey on routing techniques supporting mobility in sensor networks. In: International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, 5., 2009. **Anais...** IEEE Xplore. 2009. p. 78-85.

LIOLIOS, C. et al. An overview of body sensor networks in enabling pervasive healthcare and assistive environments. In: International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, 3., 2010, Samos. **Proceedings....** Samos: ACM. 2010. n. 43.

LIU, B.; TOWSLEY, D.; DOUSSE, O. **Mobility improves coverage of sensor networks.** ACM MobiHoc. ACM Press. p. 300-308, 2005.

LYYTINEN, K.; YOO, Y. Issues and challenges in ubiquitous computing. **Communications of the ACM**, v. 45, p. 63-65, 2002.

MATTERN, F. Ubiquitous computing: scenarios for an informatized world. **Communication and the media economy of the future**, p. 145-163, 2005.

MATTHEWS, G. A. **Pesticide application methods.** New York: Longman, 1982.

MCBRATNEY, A. et al. Future directions of precision agriculture. **Precision agriculture**, v. 6, p. 7-23, February 2005.

MUNIR, S. A. et al. Mobile wireless sensor network: architecture and enabling technologies for ubiquitous computing. In: International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, 21., 2007, Niagara Falls. **Proceedings...** Niagara Falls: 2007. p. 113-120.

NASCIMENTO, E.; ZAGO, A. Avião agrícola sobrevoa escola e intoxica dezenas de crianças em GO. **G1 Goiás**, 03 maio 2013. Disponível em:

<<http://g1.globo.com/goias/noticia/2013/05/aviao-agricola-sobrevoa-escola-e-intoxica-dezenas-de-criancas-em-go.html>>. Acesso em: 13 maio 2013.

NIEZEN, G. et al. Comparing wireless sensor network routing protocols. In: AFRICON, 2007, Windhoek. **Proceedings...** Windhoek: 2007. p. 1-7.

OLIVEIRA, H. A. B. F. et al. A novel greedy forward algorithm for routing data toward a high speed sink in wireless sensor networks. In: International Conference on Computer Communications and Networks, 19., 2010, Zurich. **Proceedings...** Zurich: IEEE. 2010. p. 1-7.

PELAEZ, V. **Relatório ANVISA sobre mercado e regulação de agrotóxicos**. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Brasília. 2012.

PIGNATI, W. A.; MACHADO, J. M. H.; CABRAL, J. F. Acidente rural ampliado: o caso das 'chuvas' de agrotóxicos sobre a cidade de Lucas do Rio Verde-MT. **Ciência & Saúde Coletiva**, p. 105-114, 2007.

POTTIE, G. J.; KAISER, W. J. Wireless integrated network sensors. **Communications of the ACM**, v. 43, p. 51-58, 2000.

QUANTICK, H. R. **Handbook for agricultural pilots**. London: Collins, 1985.

RAB, R. A. B. Evolução da frota aeroagrícola brasileira - 2008 a 2012. **Agronautas** - O ponto de encontro da comunidade aeroagrícola, 13 jul. 2013. Disponível em: <www.agronautas.com/estatisticas/aviacao-agricola-brasileira/>. Acesso em: ago. 2013.

RABAEY, J. et al. PicoRadio: Ad-hoc wireless networking of ubiquitous low-energy sensor/monitor nodes. In: IEEE Computer Society Workshop on VLSI, 2000, Orlando. **Proceedings...** Orlando: 2000. p. 9-12.

ROY, C. J. Review of code and solution verification procedures for computational simulation. **Journal of computational physics**, v. 205, p. 131-156. May 2005.

SANTOS, I. M.; DOTA, M. A.; CUGNASCA, C. E. Visão geral da aplicabilidade de redes de sensores sem fio no monitoramento agrícola no estado de Mato Grosso. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão. 2010, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: 2010.

SANTOS, I. M.; DOTA, M. A.; CUGNASCA, C. E. Dynamic definition of the sampling rate of data in wireless sensor network with adaptive automata. **IEEE Latin America Transactions**, v. 9, p. 963-968, 2011.

SHIH, E. et al. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. In: Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, 7., 2001, New York. **Proceedings...** New York: 2001. p. 272-287.

SICHITIU, M. L.; VEERARITTIPHAN, C. Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks. In: IEEE Wireless Communications and Networking, 2003, New Orleans. **Proceedings...** New Orleans: IEEE. 2003. p. 1266-1273.

SIKKA, P. et al. Wireless ad hoc sensor and actuator networks on the farm. In: International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 5., 2006, Nashville. **Proceedings...** Nashville: 2006. p. 492-499.

SIKKA, P.; CORKE, P.; OVERS, L. Wireless sensor devices for animal tracking and control. In: Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, 29., 2004, Tampa. **Proceedings...** Tampa: 2004. p. 446-454.

SINGH, C. P.; VYAS, O. P.; TIWARI, M. K. An overview of routing protocols of sensor networks. In: International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control e Automation. **Anais...** 2008. p. 873-878.

SOHRABY, K.; MINOLI, D.; ZNATI, T. **Wireless sensor networks** - Technology, protocols and applications. [S.l.]: Wiley, 2007.

SRIDHARA, V.; BOHACEK, S. Realistic propagation simulation of urban mesh networks. **Computer networks**, v. 51, p. 3392-3412, August 2007..

STAFFORD, J. V. Implementing precision agriculture in the 21st century. **Journal of agricultural engineering**, v. 76, p. 267-275, July 2000.

STANKOVIC, J. A. et al. Real-time communication and coordination in embedded sensor networks. **Proceedings of the IEEE**. v 91. p. 1002-1022. 2003.

STEVANOVIC, D.; VLAJIC, N. Performance of IEEE 802.15.4 in wireless sensor networks with a mobile sink implementing various mobility strategies. In: IEEE Conference on Local Computer Networks, 33., 2008, Montreal. **Proceedings...** Montreal: 2008. p. 680-688.

SUMNER, P. E.; SUMNER, S. A. Comparison of new drift reduction nozzles. **ASAE**, n. 99, 17 p. 1999.

SUNDARARAMAN, B.; BUY, U.; KSHEMKALYANI, A. D. Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey. **Ad hoc networks**, v. 3, p. 281-323, May 2005.

TANG, Y. Overview of routing protocols in wireless sensor networks. **Journal of software**, v. 17, n. 3, 2006.

TILAK, S.; ABU-GHAZALEH, N. B.; HEINZELMAN, W. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. **ACM Mobile computing and communications review**. [S.l.]: [s.n.], p. 28-36, 2002.

VARGA, A. **OMNeT++ Modeling and Tools for Network Simulation**. [S.l.]: Springer Verlag, 2010.

VARGA, A.; HORNIG, R. An overview of the OMNeT++ simulation environment. In: International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems e Workshops, 1., 2008, Marseille. **Proceedings...** Marseille: ICST. 2008. n. 60. p. 1-10.

VLAJIC, N.; STEVANOVIC, D. Sink mobility in wireless sensor networks: when theory meets reality. In: International Conference on Sarnoff Symposium, 32., 2009, Princeton. **Proceedings...** Princeton: IEEE Press. 2009. p. 1-8.

VLAJIC, N.; XIA, D. Wireless sensor networks: to cluster ou not to cluster? In: International Symposium World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2006, Niagara Falls. **Proceedings...** Niagara Falls: IEEE. 2006. p. 268-276.

WANG, P.; AKYILDIZ, I. F. Effects of different mobility models on traffic patterns in wireless sensor networks. In: IEEE Global Telecommunications Conference, 2010, Miami. **Anais...** Miami: IEEE. 2010. p. 1-5.

WANG, W.; SRINIVASAN, V.; CHUA, K. C. Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks. In: Internatinoal Conference on Mobile Computing and Networking, 11., 2005, Cologne. **Proceedings...** Cologne: ACM. 2005. p. 270-283.

WEINGARTNER, E.; VOM LEHN, H.; WEHRLE, K. A performance comparison of recent network simulators. In: International Conference on Communications, 2009, Dresden. **Proceedings...** Dresden: IEEE. 2009. p. 1-5.

WEISER, M. The computer for the 21st century, 1991. Disponivel em: <<http://www.ubiq.com/hypertext/weiser/SciAmDraft3.html>>. Acesso em: ago. 2009.

XIAN, X.; SHI, W.; HUANG, H. Comparison of OMNET++ and other simulator for WSN simulation. In: Conference on Industrial, Electronics and Applications, 3., 2008, Singapore. **Proceedings...** Singapore: IEEE. 2008. p. 1439-1443.

YE, F. et al. A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks. In: Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, 8., 2002, Atlanta. **Proceedings...** Atlanta: ACM. 2002. p. 148-159.

YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless sensor network survey. **Computer Networks**, v. 52, p. 2292-2330, 2008.

ZHANG, B.; LI, G. Analysis of network management protocols in wireless sensor network. In: International Conference on Multimedia and Information Technology, 2008. **Anais...** 2008. p. 546-549.

ZHANG, B.; LI, G. Survey of network management protocols in wireless sensor network. In: International Conference on e-business and Information System Security, 2009, Wuhan. **Anais...** Wuhan: 2009. p. 1-5.

ZHAO, F.; GUIBAS, L. **Wireless sensor networks** - An information processing approach. [S.l.]: Elsevier, 2004.

APÊNDICE A – DOCUMENTAÇÃO DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO

Network *RDPNS*

Package: rdpns
File: [RDPNS.ned](#)

(no description)

Usage diagram:

The following diagram shows usage relationships between types. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

Inheritance diagram:

The following diagram shows inheritance relationships for this type. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

Extends:

Name	Type	Description

BaseNetwork	<i>network</i>	(no description)

Parameters:

Name	Type	Default value	Description
playgroundSizeX	<i>double</i>		x size of the area the nodes are in (in meters)
playgroundSizeY	<i>double</i>		y size of the area the nodes are in (in meters)
playgroundSizeZ	<i>double</i>		z size of the area the nodes are in (in meters)
cmType	<i>string</i>	"org.mixim.base.connectionManager.ConnectionManager"	connection manager to use
wuType	<i>string</i>	"org.mixim.base.modules.BaseWorldUtility"	world utility to use
numNodes	<i>int</i>		Total number of nodes in the network
numAirplaneNodes	<i>int</i>		Total number of airplanes

Properties:

Name	Value	Description
isNetwork		
display	<i>bgb=594,215;bgp=10,50; bgi=background/crop,t</i>	

Unassigned submodule parameters:

Name	Type	Default value	Description
connectionManager .coreDebug	<i>bool</i>		debug switch for core framework
connectionManager .sendDirect	<i>bool</i>		send directly to the node or create separate gates for every connection

connectionManager .pMax	<i>double</i>		maximum sending power used for this network [mW]
connectionManager .sat	<i>double</i>		minimum signal attenuation threshold [dBm]
connectionManager .alpha	<i>double</i>		minimum path loss coefficient
connectionManager .carrierFrequency	<i>double</i>		minimum carrier frequency of the channel [Hz]
world .useTorus	<i>bool</i>		use the playground as torus?
node.mobility .initialX	<i>double</i>		initial x coordinate of the nodes' position (1m/0 = random)
node.mobility .initialY	<i>double</i>		initial y coordinate of the nodes' position (1m/0 = random)
node.mobility .initialZ	<i>double</i>		initial z coordinate of the nodes' position (1m/0 = random)
node.netw .stats	<i>bool</i>		stats switch
node.netw .headerLength	<i>int</i>		length of the network packet header (in bits)
node.batteryStats .notAffectedByHostState	<i>bool</i>	true	
node.batteryStats .debug	<i>bool</i>	false	write per-activity and per-device statistics to omnetpp.sca (if false, only total energy and lifetime are written)
node.batteryStats .detail	<i>bool</i>	true	subscribe to battery status and record time series data in omnetpp.vec (resolution depends on battery's publishDelta)
node.batteryStats .timeSeries	<i>bool</i>	false	
node.battery .debug	<i>bool</i>	false	
node.battery .nominal	<i>double</i>		nominal battery capacity
node.battery .capacity	<i>double</i>		battery capacity
node.battery .voltage	<i>double</i>		nominal voltage
node.battery .resolution	<i>double</i>		capacity is updated at least every resolution time
node.battery .publishDelta	<i>double</i>		if > 0, capacity is published to the BB each publishTime interval

node.battery.publishTime	<i>double</i>		number of modules that will draw energy from the battery
node.battery.numDevices	<i>int</i>		
airplane.mobility.initialX	<i>double</i>		initial x coordinate of the nodes' position (1m/0 = random)
airplane.mobility.initialY	<i>double</i>		initial y coordinate of the nodes' position (1m/0 = random)
airplane.mobility.initialZ	<i>double</i>		initial z coordinate of the nodes' position (1m/0 = random)
airplane.netw.stats	<i>bool</i>		stats switch
airplane.netw.headerLength	<i>int</i>		length of the network packet header (in bits)
airplane.batteryStats.notAffectedByHostState	<i>bool</i>	true	
airplane.batteryStats.debug	<i>bool</i>	false	write per-activity and per-device statistics to omnetpp.sca (if false, only total energy and lifetime are written)
airplane.batteryStats.detail	<i>bool</i>	true	subscribe to battery status and record time series data in omnetpp.vec (resolution depends on battery's publishDelta)
airplane.batteryStats.timeSeries	<i>bool</i>	false	
airplane.battery.debug	<i>bool</i>	false	
airplane.battery.nominal	<i>double</i>		nominal battery capacity
airplane.battery.capacity	<i>double</i>		battery capacity
airplane.battery.voltage	<i>double</i>		nominal voltage
airplane.battery.resolution	<i>double</i>		capacity is updated at least every resolution time
airplane.battery.publishDelta	<i>double</i>		if > 0, capacity is published to the BB each publishTime interval
airplane.battery.publishTime	<i>double</i>		number of modules that will draw energy from the battery
airplane.battery.numDevices	<i>int</i>		
airplane.appl.headerLength	<i>int</i>		length of the application message header (in bits)
windManager.angle	<i>int</i>	0	

windManager .speed	double	0	
windManager .changeWindInterval	double	0	

Source code:

```

network RDPNS extends BaseNetwork
{
  parameters:
    int numNodes; // Total number of nodes in the network
    int numAirplaneNodes; // Total number of airplanes
    @display("bgb=594,215;bgp=10,50;bgi=background/crop,t");

  submodules:
    //Ground Nodes module
    node[numNodes]: GroundNode {
      parameters:
        numNodes = numNodes;
        @display("p=150,120;b=42,42,rect,yellow;i=device/palm2;");
    }

    //Airplane node module
    airplane[numAirplaneNodes]: AirplaneNode {
      parameters:
        numHosts = numAirplaneNodes;
        @display("p=90,50;b=42,42,rect,grey75;i=automobile/airplane2");
    }

    //Wind manager module
    windManager: WindManager {
      parameters:
        @display("p=346,0");
    }

    //Dispersion simulation module
    dispersionManager: DispersionManager {
      parameters:
        @display("p=420,0");
    }

  connections allowunconnected:
    // all connections and gates are to be generated dynamically
}

```

This documentation is released under the [Creative Commons license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Compound Module *GroundNode*

Package: rdpns.nodes.ground

File: [nodes/ground/GroundNode.ned](#)

(no description)

Usage diagram:

The following diagram shows usage relationships between types. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

Inheritance diagram:

The following diagram shows inheritance relationships for this type. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

Extends:

Name	Type	Description
WirelessNodeBatteryNetwl	compound module	(no description)

Networks:

Name	Type	Description
RDPNS	network	(no description)

Parameters:

Name	Type	Default value	Description
networkType	string	"GroundNodeNetwLayer"	type of the network layer
mobilityType	string	"ConstSpeedMobility"	type of the mobility module
arpType	string	"BaseArp"	type of address resolution module
nicType	string	"Nic802154_TI_CC2420"	
numNodes	int		Total number of nodes in the network

Properties:

Name	Value	Description
display	<i>bgb=210,450,white; i=device/palm;i2=status /battery;b=40,40,rect</i>	

Gates:

Name	Direction	Size	Description
radiIn	input		gate for sendDirect

Unassigned submodule parameters:

Name	Type	Default value	Description
mobility .initialX	double		initial x coordinate of the nodes' position (1m/0 = random)

mobility .initialY	double		initial y coordinate of the nodes' position (1m/0 = random)
mobility .initialZ	double		initial z coordinate of the nodes' position (1m/0 = random)
netw .stats	bool		stats switch
netw .headerLength	int		length of the network packet header (in bits)
batteryStats .notAffectedByHostState	bool	true	
batteryStats .debug	bool	false	write per-activity and per-device statistics to omnetpp.sca (if false, only total energy and lifetime are written)
batteryStats .detail	bool	true	subscribe to battery status and record time series data in omnetpp.vec (resolution depends on battery's publishDelta)
batteryStats .timeSeries	bool	false	
battery .debug	bool	false	
battery .nominal	double		nominal battery capacity
battery .capacity	double		battery capacity
battery .voltage	double		nominal voltage
battery .resolution	double		capacity is updated at least every resolution time
battery .publishDelta	double		if > 0, capacity is published to the BB each publishTime interval
battery .publishTime	double		number of modules that will draw energy from the battery
battery .numDevices	int		

Source code:

```

module GroundNode extends WirelessNodeBatteryNetwL
{
  parameters:
    networkType = "GroundNodeNetwLayer";
    nicType = "Nic802154_TI_CC2420";
    int numNodes; // Total number of nodes in the network

  connections allowunconnected:
}

```

This documentation is released under the [Creative Commons license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Simple Module *GroundNodeNetwLayer*

Package: rdpns.nodes.ground.netw

File: [nodes/ground/netw/GroundNodeNetwLayer.ned](#)

[C++ definition](#)

(no description)

GroundNodeNetwLayer

Usage diagram:

The following diagram shows usage relationships between types. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

GroundNodeNetwLayer

Inheritance diagram:

The following diagram shows inheritance relationships for this type. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

Extends:

Name	Type	Description
BaseNetwLayer	<i>simple module</i>	Base module for every network layer module

Parameters:

Name	Type	Default value	Description
notAffectedByHostState	<i>bool</i>	false	
coreDebug	<i>bool</i>	false	debug switch for core framework
stats	<i>bool</i>	false	stats switch
headerLength	<i>int</i>		length of the network packet header (in bits)
bCastTimer	<i>int</i>	1	Delay time to start to register and send data
isGateway	<i>bool</i>	false	Flag to mark the gateway node
clusters	<i>int</i>	1	Number of regions (clusters)
coordinates	<i>string</i>	"0 0 0 0"	
reqTemp	<i>int</i>	0	Temperature parameter

Properties:

Name	Value	Description
class	<i>GroundNodeNetwLayer</i>	

Gates:

Name	Direction	Size	Description
upperLayerIn	<i>input</i>		from upper layer
upperLayerOut	<i>output</i>		to upper layer
upperControlIn	<i>input</i>		control from upper layer
upperControlOut	<i>output</i>		control to upper layer
lowerLayerIn	<i>input</i>		from lower layer
lowerLayerOut	<i>output</i>		to lower layer
lowerControlIn	<i>input</i>		control from lower layer
lowerControlOut	<i>output</i>		control to lower layer

Source code:

```

simple GroundNodeNetwLayer extends BaseNetwLayer
{
    parameters:
        @class(GroundNodeNetwLayer);

        int bCastTimer = default(1);           // Delay time to start to register and send data
        bool isGateway = default(false);       // Flag to mark the gateway node
        int clusters = default(1);             // Number of regions (clusters)
        string coordinates = default("0 0 0 0");
        int reqTemp = default(0);             // Temperature parameter
}

```

This documentation is released under the [Creative Commons license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Compound Module *AirplaneNode*

Package: rdpns.nodes.airplane

File: [nodes/airplane/AirplaneNode.ned](#)

(no description)

Usage diagram:

The following diagram shows usage relationships between types. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

Inheritance diagram:

The following diagram shows inheritance relationships for this type. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

Extends:

Name	Type	Description
WirelessNodeBatteryNetwl	compound module	(no description)

Networks:

Name	Type	Description
RDPNS	network	(no description)

Parameters:

Name	Type	Default value	Description
networkType	string	"AirplaneNodeNetwLayer"	type of the network layer
mobilityType	string	"AirplaneMobility"	type of the mobility module
arpType	string	"BaseArp"	type of address resolution module
nicType	string	"Nic802154_TI_CC2420"	
applType	string	"AirplaneNodeApplLayer"	
numHosts	int		total number of hosts in the network

Properties:

Name	Value	Description

display	<i>bgb=210,450,white; i=device/palm;i2=status /battery;b=40,40,rect</i>	

Gates:

Name	Direction	Size	Description
radioln	<i>input</i>		gate for sendDirect

Unassigned submodule parameters:

Name	Type	Default value	Description
mobility .initialX	<i>double</i>		initial x coordinate of the nodes' position (1m/0 = random)
mobility .initialY	<i>double</i>		initial y coordinate of the nodes' position (1m/0 = random)
mobility .initialZ	<i>double</i>		initial z coordinate of the nodes' position (1m/0 = random)
netw .stats	<i>bool</i>		stats switch
netw .headerLength	<i>int</i>		length of the network packet header (in bits)
batteryStats .notAffectedByHostState	<i>bool</i>	true	
batteryStats .debug	<i>bool</i>	false	write per-activity and per-device statistics to omnetpp.sca (if false, only total energy and lifetime are written)
batteryStats .detail	<i>bool</i>	true	subscribe to battery status and record time series data in omnetpp.vec (resolution depends on battery's publishDelta)
batteryStats .timeSeries	<i>bool</i>	false	
battery .debug	<i>bool</i>	false	
battery .nominal	<i>double</i>		nominal battery capacity
battery .capacity	<i>double</i>		battery capacity
battery .voltage	<i>double</i>		nominal voltage
battery .resolution	<i>double</i>		capacity is updated at least every resolution time
battery .publishDelta	<i>double</i>		if > 0, capacity is published to the BB each publishTime interval
battery .publishTime	<i>double</i>		number of modules that will draw energy from the battery
battery .numDevices	<i>int</i>		
appl .headerLength	<i>int</i>		length of the application message header (in bits)

Source code:


```

module AirplaneNode extends WirelessNodeBatteryNetw
{
  //-module AirplaneNode extends WirelessNodeBattery {
  parameters:
    string applType = "AirplaneNodeApplLayer";
    networkType = "AirplaneNodeNetwLayer";
    //-applicationType = "AirplaneNodeApplLayer";
    nicType = "Nic802154_TI_CC2420";
    mobilityType = "AirplaneMobility";
    int numHosts; // total number of hosts in the network

  submodules:
    appl: <applType> like IBaseApplLayer;
}

```

This documentation is released under the [Creative Commons license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Simple Module *AirplaneNodeApplLayer*

Package: rdpsn.nodes.airplane.appl

File: [nodes/airplane/appl/AirplaneNodeApplLayer.ned](#)

[C++ definition](#)

(no description)

AirplaneNodeApplLayer

Usage diagram:

The following diagram shows usage relationships between types. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

AirplaneNodeApplLayer

Inheritance diagram:

The following diagram shows inheritance relationships for this type. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

IBaseApplLayer

AirplaneNodeApplLayer

Parameters:

Name	Type	Default value	Description
debug	<i>bool</i>		Debug switch (from interface)
headerLength	<i>int</i>		Length of the application message header (in bits) - (from interface)
wingSpan	<i>double</i>	14m	int sizeofBlock @ unit("m");
numberOfNozzles	<i>int</i>	14	
spraySpeed	<i>double</i>	0	
sprayAngle	<i>double</i>	0	

Properties:

Name	Value	Description
class	<i>AirplaneNodeApplLayer</i>	

Gates:

Name	Direction	Size	Description
lowerLayerIn	<i>input</i>		from network layer
lowerLayerOut	<i>output</i>		to network layer

lowerControlIn	<i>input</i>	control from network layer
lowerControlOut	<i>output</i>	control to network layer

Source code:

```

simple AirplaneNodeApplLayer like IBaseApplLayer
{
    parameters:
        bool debug; // Debug switch (from interface)
        int headerLength @unit("bit"); // Length of the application message header (in bits) - (from interface)
        //int sizeOfBlock @ unit("m");
        double wingSpan @unit("m") = default(14m);
        int numberOfNozzles = 14;
        double spraySpeed @unit("mps") = default(0);
        double sprayAngle = default(0);

        @class(AirplaneNodeApplLayer);

    gates:
        input lowerLayerIn; // from network layer
        output lowerLayerOut; // to network layer
        input lowerControlIn; // control from network layer
        output lowerControlOut; // control to network layer
}

```

This documentation is released under the [Creative Commons license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Simple Module *AirplaneNodeNetwLayer*

Package: rdps.nodes.airplane.netw

File: [nodes/airplane/netw/AirplaneNodeNetwLayer.ned](#)

[C++ definition](#)

(no description)

AirplaneNodeNetwLayer

Usage diagram:

The following diagram shows usage relationships between types. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

AirplaneNodeNetwLayer

Inheritance diagram:

The following diagram shows inheritance relationships for this type. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

Extends:

Name	Type	Description
BaseNetwLayer	<i>simple module</i>	Base module for every network layer module

Parameters:

Name	Type	Default value	Description
notAffectedByHostState	<i>bool</i>	false	
coreDebug	<i>bool</i>	false	debug switch for core framework
stats	<i>bool</i>	false	stats switch
headerLength	<i>int</i>		length of the network packet header (in bits)
coordinates	<i>string</i>	"0 0 0 0 0 0"	

Properties:

Name	Value	Description
class	<i>AirplaneNodeNetwLayer</i>	

Gates:

Name	Direction	Size	Description
upperLayerIn	<i>input</i>		from upper layer
upperLayerOut	<i>output</i>		to uppe layer
upperControlIn	<i>input</i>		control from upper layer
upperControlOut	<i>output</i>		control to upper layer
lowerLayerIn	<i>input</i>		from lower layer
lowerLayerOut	<i>output</i>		to lower layer
lowerControlIn	<i>input</i>		control from lower layer
lowerControlOut	<i>output</i>		control to lower layer

Source code:

```

simple AirplaneNodeNetwLayer extends BaseNetwLayer
{
    parameters:
        @class(AirplaneNodeNetwLayer);

        string coordinates = default("0 0 0 0 0 0");
}

```

This documentation is released under the [Creative Commons license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Simple Module *AirplaneMobility*

Package: rdpsn.nodes.airplane.mobility

File: [nodes/airplane/mobility/AirplaneMobility.ned](#)

[C++ definition](#)

(no description)

Usage diagram:

The following diagram shows usage relationships between types. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

Inheritance diagram:

The following diagram shows inheritance relationships for this type. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

Extends:

Name	Type	Description
LinearMobility	<i>simple module</i>	This is a linear mobility model with speed, angle and acceleration parameters. Angle only changes when the mobile node hits a wall: then it reflects off the wall at the same angle.

Parameters:

Name	Type	Default value	Description
notAffectedByHostState	<i>bool</i>	true	
coreDebug	<i>bool</i>	false	debug switch for the core framework
constraintAreaMinX	<i>double</i>	-1m/0	min x position of the constraint area, unconstrained by default (negative infinity)

constraintAreaMinY	<i>double</i>	-1m/0	min y position of the constraint area, unconstrained by default (negative infinity)
constraintAreaMinZ	<i>double</i>	-1m/0	min z position of the constraint area, unconstrained by default (negative infinity)
constraintAreaMaxX	<i>double</i>	1m/0	max x position of the constraint area, unconstrained by default (positive infinity)
constraintAreaMaxY	<i>double</i>	1m/0	max y position of the constraint area, unconstrained by default (positive infinity)
constraintAreaMaxZ	<i>double</i>	1m/0	max z position of the constraint area, unconstrained by default (positive infinity)
initialX	<i>double</i>	uniform(constraintAreaMinX, constraintAreaMaxX)	initial x coordinate of the nodes' position
initialY	<i>double</i>	uniform(constraintAreaMinY, constraintAreaMaxY)	initial y coordinate of the nodes' position
initialZ	<i>double</i>	uniform(constraintAreaMinZ, constraintAreaMaxZ)	initial z coordinate of the nodes' position
initFromDisplayString	<i>bool</i>	false	initial position will be read from display string
debug	<i>bool</i>	false	debug switch
speed	<i>double</i>		speed of the host (in m/s)
angle	<i>double</i>		angle of linear motion (degrees)
acceleration	<i>double</i>		acceleration of linear motion (m/s ²)
updateInterval	<i>double</i>		time interval to update the hosts position (seconds)
takeOffTime	<i>double</i>		
marginToStop	<i>int</i>	10m	

Properties:

Name	Value	Description
display	<i>i=block/cogwheel</i>	
class	<i>AirplaneMobility</i>	

Source code:

```

simple AirplaneMobility extends LinearMobility
{
    parameters:

```

```
double takeOffTime @unit("s");  
int marginToStop @unit("m") = default(10m);  
  
@class(AirplaneMobility);  
}
```

This documentation is released under the [Creative Commons license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Simple Module *WindManager*

Package: rdpns.environmentSimulation.wind

File: [environmentSimulation/wind/WindManager.ned](#)

[C++ definition](#)

TODO auto-generated type

Usage diagram:

The following diagram shows usage relationships between types. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

Inheritance diagram:

The following diagram shows inheritance relationships for this type. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

Networks:

Name	Type	Description
RDPNS	<i>network</i>	(no description)

Parameters:

Name	Type	Default value	Description
angle	<i>int</i>	0	
speed	<i>double</i>	0	
changeWindInterval	<i>double</i>	0	

Source code:

```
//
// TODO auto-generated type
//
simple WindManager
```

```
{  
  int angle = default(0);  
  double speed @unit("mps") = default(0);  
  double changeWindInterval @unit("s") = default(0);  
}
```

This documentation is released under the [Creative Commons license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Simple Module *DispersionManager*

Package: rdpns.environmentSimulation.dispersion

File: [environmentSimulation/dispersion/DispersionManager.ned](#)

[C++ definition](#)

(no description)

Usage diagram:

The following diagram shows usage relationships between types. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

Inheritance diagram:

The following diagram shows inheritance relationships for this type. Unresolved types are missing from the diagram. Click [here](#) to see the full picture.

Networks:

Name	Type	Description
RD PNS	network	(no description)

Source code:

```

simple DispersionManager
{
    parameters:
        //int sizeOfBlock @ unit("m");
        //int numGroundSensorNodes;
        //double dispersionFactor; // randomness
        //double particleUpdateInterval @ unit("s"); // XXX - actually, this can be get by the interval of the UAV's movement!
}
  
```

This documentation is released under the [Creative Commons license](#)