

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**UMA SOLUÇÃO DE ROTEAMENTO PARA REDES DE  
SENSORES SEM FIO MÓVEIS HETEROGÊNEAS**

**MATEUS APARECIDO VILELA**

**ORIENTADORA: PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. REGINA BORGES DE ARAÚJO**

São Carlos - SP  
Agosto/2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**UMA SOLUÇÃO DE ROTEAMENTO PARA REDES DE  
SENSORES SEM FIO MÓVEIS HETEROGÊNEAS**

**MATEUS APARECIDO VILELA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação, área de concentração: Processamento Digital de Imagens: Algoritmos e Arquitetura.  
Orientadora: Dra. Regina Borges de Araújo.

São Carlos - SP  
Agosto/2012

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

V699sr

Vilela, Mateus Aparecido.

Uma solução de roteamento para redes de sensores sem fio móveis heterogêneas / Mateus Aparecido Vilela. -- São Carlos : UFSCar, 2013.

118 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2012.

1. Redes de computação. 2. Redes de sensores sem fio. 3. Protocolo de roteamento. 4. Modelos de mobilidade. 5. Agregação de dados. 6. Clusterização. I. Título.

CDD: 004.6 (20<sup>a</sup>)


**Universidade Federal de São Carlos**  
**Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação**

**“Uma Solução de Roteamento para Redes de Sensores Sem Fio Móveis Heterogêneas”**

Mateus Aparecido Vilela

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação

Membros da Banca:



---

Prof. Dra. Regina Borges de Araujo  
(Orientadora - DC/UFSCar)



---

Prof. Dr. Helio Crestana Guardia  
(DC/UFSCar)



---

Prof. Dr. Alex Sandro Roschildt Pinto  
(IBILCE/UNESP- São José do Rio Preto)

São Carlos  
Setembro/2012

*Dedico este trabalho aos meus pais (Celso e Vera), a minha noiva e futura esposa (Emirielí) e também aos meus irmãos (Maicon e Mariane), que mesmo não estando presentes na terra, tenho certeza que estão olhando e rezando por toda minha família.*

# AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar a Deus, por ter me dado a vida, saúde, proteção e força para lutar pelos meus objetivos e conquistas.

Aos meus pais Celso e Vera, aos meus irmãos (Maicon e Mariane), por serem meu alicerce, ajudando-me a tomar decisões, apoiando e incentivando-me a alcançar meus objetivos e conquistar meus sonhos.

A minha noiva amada e futura esposa Emirieli, que junto dos meus pais, sempre esteve ao meu lado, não deixando que eu desistisse mesmo nas horas mais difíceis e esteve presente quando mais precisei.

A Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Regina Borges de Araújo, pela oportunidade, amizade, palavras de motivação, encorajamento, incentivo, orientação e discussões que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao pesquisador e grande amigo Leandro Ap. Villas pelo valioso apoio, incentivo e discussões que contribuíram para realização do trabalho.

A todos os amigos presentes no Laboratório WINDIS durante a jornada do mestrado, Adriano, Adriel, Antônio Dourado, Allan, Alexandre, Claudia, Fernando, Gilmar, Gislaine, Guilherme, Leonardo, Luciana, Márcio e Rafaela pela amizade e discussões que de alguma forma contribuíram para a realização do trabalho.

A todos os amigos que de forma direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Computação da UFSCar que de certa forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e também para meu crescimento profissional, acadêmico e pessoal.

*“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”*

*Jose de Alencar*

# RESUMO

As Redes de sensores sem Fio (RSSFs) e Redes de Sensores Sem Fio Móveis (RSSFMs) estão sendo cada vez mais utilizadas por diferentes aplicações, tais como: monitoramento de animais, monitoramento de sinais vitais, monitoramento ambiental, vigilância e proteção de infraestruturas críticas, vazamento de gás, dentre inúmeras outras. Algumas dessas aplicações já fazem uso de nós sensores móveis. Devido aos recursos restritos dos nós sensores, principalmente em relação ao consumo energético, o desenvolvimento de soluções baseadas em RSSF e RSSFM torna-se limitado. O uso de nós sensores móveis, que tipicamente têm mais recursos computacionais, de energia e de comunicação, pode ajudar a reduzir o consumo de energia dos nós fixos, aumentando o tempo de vida da rede. Redes que utilizam nós sensores (fixos e móveis) com diferentes tipos de *hardware* são denominadas Redes de Sensores Sem Fio Móvel Heterogênea. Neste trabalho é apresentado o RAHMoN (*Routing Algorithm for Heterogeneous Mobile Networks*), que faz uso da técnica de agregação de dados para reduzir o tráfego de transmissões na rede, da hierarquização de nós (*clustering*), da utilização de nós sensores (fixos e móveis) e de um *sink* em alta velocidade. No RAHMoN, a rede é configurada utilizando *flooding* e *flooding reverse* para coletar a posição dos nós sensores fixos e formar uma matriz de adjacência. Essa matriz auxilia na construção de rotas durante a entrega dos dados para o *sink* e será armazenada nos nós sensores móveis. Resultados de avaliação mostram que a nossa solução consegue garantir uma alta taxa de entrega de pacotes, diminuir a latência e reduzir o atraso de entrega dos pacotes. A solução foi comparada com o WHISPER, presente na literatura e também voltado à entrega de dados para o nó *sink* em alta velocidade.

**Palavras-chave:** Redes de Sensores Sem Fio, Redes de Sensores Sem Fio Móveis, Roteamento, Modelos de Mobilidade, Agregação de dados, clusterização, *sink* móvel.



# ABSTRACT

The Wireless Sensor Networks (WSNs) and Mobile Wireless Sensor Networks (MWSNs) are being increasingly used by different applications, such as monitoring of animals, monitoring of vital signs, environmental monitoring, surveillance and protection of critical infrastructure, leaking gas, among many others. Some of these applications are already making use of mobile sensor nodes, such as underwater monitoring, precision agriculture, among many others. Due to restricted resources of sensor nodes, especially in relation to energy consumption, the development for solutions based on WSN and MWSN becomes limited. The use of mobile sensor nodes, which typically has more computational resources, power and communication, can help to reduce the energy consumption of fixed nodes, increasing the lifetime of the network. Networks that use mobile sensor nodes (fixed and mobile) with different types of hardware are called Wireless Sensor Networks Heterogeneous Mobile. This paper presents the RAHMoN (Routing Algorithm for Heterogeneous Mobile Networks), which makes use of data aggregation technique to reduce the traffic transmissions on the network, hierarchy of nodes (clustering), and use of sensor nodes (fixed and mobile) that collaborate to deliver data to a sink node at high speed. In RAHMoN, the network is configured using the techniques of inundation (flooding) and inundation reverse (reverse flooding) to collect the fixed position of sensor nodes and form an adjacency matrix. This matrix helps to build routes for data delivery to the sink and is stored in the mobile sensor nodes. Results show that our solution can guarantee a high packages delivery rate, low latency and reduce the delay of packet delivery. The solution was compared with the WHISPER, present in the literature and also focused on the delivery of data to sink node at high speed.

**Keywords:** Wireless Sensor Networks, Mobile Wireless Sensor Networks, Routing, Mobility Models, Data aggregation, clustering, mobile sink.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1– Tipos de sensores .....	25
Figura 2.2– Componentes do nó sensor sem fio.....	28
Figura 2.3– Deposição dos nós através do VANT.....	29
Figura 2.4– Deposição do sensor manual.....	30
Figura 2.5– Funcionamento básico da RSSF.....	31
Figura 2.6– Consumo de energia do módulo de um nó sensor.....	34
Figura 2.7– Pilha de protocolos OSI e RSSF.....	42
Figura 3.1– Representação de um nó executando o modelo <i>Random Walk</i> .....	56
Figura 3.2– Representação de um nó executando o modelo <i>Random Waypoint</i> .....	58
Figura 3.3– Representação de um nó executando o modelo <i>Random Direction</i> .....	60
Figura 5.1- ilustração de aplicação de monitoramento de hidrelétrica por meio de rede heterogênea (nós fixos, VANT e robôs terrestres).....	77
Figura 5.2– Configuração da rede (atualização de saltos e formação da lista de vizinhos) .....	82
Figura 5.3– Coleta de posição dos nós sensores (formação da estrutura da rede) ..	83
Figura 5.4 – <i>Sink</i> coletando matriz do <i>INIT_FLOOD</i> .....	84
Figura 5.5– Nós móveis recebendo a matriz (estrutura da rede dos nós fixos).....	85
Figura 5.6 – Tipos de formações de <i>clusters</i> .....	89
Figura 5.7 – Entrega de dados usando somente nós fixos .....	90
Figura 5.8– Entrega de dados ao <i>sink</i> .....	91
Figura 5.9 – Formato da mensagem de configuração inicial da rede.....	92
Figura 5.10 – Formato da mensagem de coleta de posição de nó sensor.....	93
Figura 5.11 – Formato da mensagem de próxima posição do nó <i>sink</i> .....	93
Figura 5.12 – Formato da mensagem de alerta de evento para formação de cluster	94
Figura 5.13 – Formato da mensagem de dados coletados enviada pelos nós <i>relay/cluster</i> ao <i>sink</i> .....	95
Figura 5.14– Diagrama de sequência da configuração da rede e coleta de posição dos nós sensores .....	96
Figura 5.15– Diagrama de sequência do envio da próxima posição do <i>sink</i> para os nós (fixos e móveis) .....	96

Figura 5.16– Diagrama de sequência do envio da mensagem de alerta e <i>cluster-head</i> eleito.....	97
Figura 5.17 – Diagrama de sequência do envio dos dados coletados do nó líder de grupo ou retransmissor para o nó <i>sink</i> .....	97
Figura 5.18 – Total de pacotes entregues ao nó <i>sink</i> .....	102
Figura 5.19– Média aritmética referente à quantidade de saltos utilizados para a entrega de pacotes.....	103
Figura 5.20– Média aritmética de número de saltos, variando a velocidade do <i>sink</i> .....	104
Figura 5.21 – Taxa de Entrega variando a altura do <i>sink</i> .....	105
Figura 5.22– Atraso na entrega do pacote .....	106

# LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Classificação das Redes de Sensores sem Fio. ....	38
Tabela 2.2– Métricas para a qualidade do protocolo.....	47
Tabela 4.1 – Soluções de roteamento para RSSF e RSSFM .....	75
Tabela 5.1 – Parâmetros da simulação.....	100

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- BSD** – *Berkeley Software Distribution*
- CBR-M** – *Cluster Basead Routing Mobile*
- DBCM** – *Data Centric Braided Multipath*
- CDMA** – *Code Division Multiple Access*
- DC** – *Departamento de Computação*
- DD** – *Direction Diffusion*
- GHz** – *GigaHertz*
- GPS** – *Global Position System*
- ECDGA** – *Energy-Saving Cluster-Based Data Gathering Algorithm*
- EERPWSM** – *Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks with Node and Sink Mobility*
- IEEE** – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
- IP** – *Internet Protocol*
- LEACH** – *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*
- LEACH-M** – *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy Mobile*
- MAC** – *Medium Access Control*
- MBC** – *Mobile Based Cluster Protocol*
- MEMS** – *Micro-Electro Mechanical Systems*
- MWSN** – *Mobile Wireless Sensor Network*
- OSI** – *Open Systems Interconnection*
- PLL** – *PhaseLocked Loop*
- RAHMoN** – *Routing Algorithm for Heterogeneous Mobile Networks*
- RSSF** – *Redes de Sensores Sem Fio*
- RSSFm** – *Redes de Sensores Sem Fio Móvel*
- SiNAlgo** – *Simulator for Network Algorhthms*
- SMP** – *Sensor Management Protocol*
- SQDDP** – *Sensor Query and Data Dissemination Protocol*
- TADAP** – *Task Assignment and Data Advertisement Protocol*
- TCP** – *Transmission Control Protocol*
- TDMA** – *Time Division Multiple Access*

**VANT** – Veículo Aéreo Não Tripulado

**WHISPER** – *Wireless High Speed Routing*

**WINDIS** – *Wireless Networking and Distributed Interactive Simulation*

**WSN** – *Wireless Sensor Network*

**ZBR** – *Zone Based Routing*

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1 Motivação.....	20
1.2 Objetivos .....	21
1.3 Organização do Trabalho.....	22
<b>CAPÍTULO 2 - REDES DE SENSORES SEM FIO E REDES DE SENSORES MÓVEIS .....</b>	<b>24</b>
2.1 Componentes do nó sensor .....	27
2.2 Funcionamento Básico.....	30
2.3 Características das RSSF .....	31
2.3.1 Desafios e Limitações.....	32
2.3.2 Consumo de Energia .....	32
2.3.3 Tolerância a Falhas .....	35
2.3.4 Agregação de Dados .....	36
2.3.5 Ambiente de Operação.....	37
2.3.6 Escalabilidade.....	38
2.3.7 Classificação das RSSF .....	38
2.3.8 Topologia .....	40
2.4 Arquitetura de comunicação em RSSF .....	42
2.4.1 Camada Física.....	43
2.4.2 Camada de Enlace .....	44
2.4.3 Camada de Rede.....	44
2.4.4 Camada de Transporte.....	45
2.4.5 Camada de Aplicação.....	46
2.4.6 <i>Cross-layer</i> .....	47
2.5 Métricas para avaliação da qualidade do monitoramento .....	47
2.6 Aplicações em Redes de Sensores sem Fio.....	48
2.7 Redes de Sensores Sem Fio Móveis .....	49
2.8 Comparação entre Redes de Sensores Sem Fio x Redes de Sensores Sem Fio Móveis.....	52

2.9 Considerações Finais .....	53
<b>CAPÍTULO 3 - MODELOS DE MOBILIDADE .....</b>	<b>54</b>
3.1 <i>Random Walk</i> .....	55
3.2 <i>Random Waypoint</i> .....	57
3.3 <i>Random Direction</i> .....	58
3.4 Impacto dos Modelos de Mobilidade nas aplicações de integração do INCT-SEC .....	60
3.5 Considerações Finais .....	61
<b>CAPÍTULO 4 - PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO PARA REDES DE SENSORES MÓVEIS .....</b>	<b>64</b>
4.1 Roteamento Centralizado em Dados ( <i>Data-Centric</i> ) .....	67
4.2 Roteamento Plano.....	68
4.3 Roteamento Hierárquico.....	68
4.4 Roteamento Baseado na Localização .....	70
4.5 Agregação de Dados.....	71
4.6 Soluções de Roteamento .....	72
4.7 Considerações Finais .....	75
<b>CAPÍTULO 5 - RAHMON: ALGORITMO DE ROTEAMENTO PARA REDE HETEROGÊNEA MÓVEL.....</b>	<b>76</b>
5.1 RAHMOn ( <i>Routing Algorithm for Heterogeneous Mobile Networks</i> ) .....	78
5.2 Fase 1: Configuração da Rede.....	81
5.2.1 Formação da lista de vizinhos .....	81
5.2.2 Descoberta da estrutura da rede (topologia) .....	82
5.2.3 Disseminação da estrutura da rede .....	84
5.3 Fase 2: Alerta de Evento.....	86
5.3.1 Anúncio de evento .....	86
5.3.2 Agrupamento (formação do <i>cluster</i> ).....	87
5.4 Fase 3: Entrega dos dados coletados para o <i>sink</i> .....	89
5.5 Mensagens e Diagramas de sequência .....	92
5.6 Avaliação de Desempenho.....	98
5.6.1 Cenário da simulação .....	99
5.7 Resultados da Simulação.....	100



5.8 Considerações Finais.....	107
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....</b>	<b>108</b>
6.1 Principais contribuições :.....	109
6.2 Artigos Publicados e Submetidos.....	110
6.3 Trabalhos Futuros .....	110
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>112</b>

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

---

As redes de sensores sem fio (RSSFs) estão sendo e deverão ser cada vez mais utilizadas em decorrência principalmente dos avanços da tecnologia dos sistemas micro-eleto-mecânicos (MEMS). Os sensores desenvolvidos estão cada vez menores, com melhor custo benefício e poder de processamento maior, porém, ainda com problema de restrição de energia (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

As redes de sensores são compostas por nós sensores, também conhecidos como “sensores inteligentes”, compostos por módulos de sensoriamento, processamento e de comunicação, que trocam informação por meio de comunicação sem fio (AKYILDIZ et al., 2002)(YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). Na estrutura dos sensores, há um módulo de comunicação acoplado e pode haver vários tipos de sensores, tais como: magnéticos, térmicos, acústicos, entre outros (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

Sensores inteligentes são implantados num ambiente, formando assim o cenário das redes de sensores sem fio e coletam dados do ambiente onde foram inseridos e em seguida encaminham esses dados para um nó sorvedouro que é denominado *sink*. O nó *sink* tem uma capacidade computacional superior aos demais nós e tipicamente é responsável por processar as informações (dados coletados) fornecidas pelos nós sensores, disponibilizá-las para observadores externos e disseminar as informações de controle para a rede.

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) são projetadas visando uma otimização dos recursos disponíveis (energia, raio de comunicação, largura de banda, armazenamento e processamento) de forma que seja possível

maximizar o tempo de vida desses nós, pois seus recursos são limitados. De acordo com (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008), para atingir o propósito de tirar o máximo de proveito do nó sensor, os projetos de RSSFs são baseados no ambiente a ser monitorado, o que é fundamental para se determinar o tamanho, a topologia da rede e ainda a forma de deposição. O monitoramento eficiente do ambiente é de extrema importância para o desenvolvimento de um projeto para uma aplicação de RSSF, especialmente quando há possibilidade de ocorrer situações de risco à vida e/ou ao patrimônio (AKYILDIZ et al., 2002).

Para que o monitoramento do ambiente por meio de RSSF seja executado de forma eficiente, é necessário utilizar protocolos específicos e adequados, visando garantir e manter os requisitos funcionais e não funcionais da aplicação, por exemplo, segurança, confiabilidade, eficiência das informações (dados coletados) transmitidas na rede e garantir também um maior tempo de vida útil dos nós sensores e da RSSF como um todo.

Ao desenvolvermos soluções para uma RSSF, temos que levar em consideração que o consumo de energia deve ser eficiente para que seja possível garantir que o tempo de vida da rede seja adequado às necessidades da aplicação (AKYILDIZ et al., 2002).

Para executar o monitoramento da região de interesse, seja essa região de pequena ou de grande dimensão, os nós sensores são implantados no ambiente. Esses nós sensores podem ser estáticos ou móveis, podendo estar acoplados a robôs, VANTs<sup>1</sup>, quadricópteros, animais, pessoas, entre outros, e pode ser necessária uma alta densidade de nós, dependendo do tamanho da área que se deseja monitorar.

De acordo com (SHIH et al., 2001), em alguns casos a densidade de nós pode chegar em 20 nós por metro quadrado e devido à proximidade dos nós sensores, pode ocorrer o fato dos nós sensores coletarem informações redundantes, análogas ou semelhantes. O problema de redundância ocorre em uma mesma região, devido os nós estarem espacialmente correlacionados, ou seja, implantados na mesma região em que ocorreu um evento.

---

<sup>1</sup>VANTs: Veículos Aéreos Não Tripulados.

A utilização de nós sensores que possuem mobilidade pode auxiliar na coleta de dados, otimizando a entrega dos mesmos para um nó *sink* e ainda evitando um problema conhecido nas redes de sensores como *energy-hole*<sup>2</sup>. Os nós próximos do *sink* se esgotam energeticamente mais rápido que os demais nós, já que antes dos pacotes de dados chegarem ao *sink*, a grande maioria vai passar por seus vizinhos (nós que estão próximos ao *sink*), causando um gasto de energia muito maior nesses nós do que nos demais que compõem a rede.

A mobilidade está cada vez mais presente em aplicações de RSSF. Algumas aplicações que integram RSSF e nós móveis, incluem:

- Monitoramento subaquático: é formada uma RSSF sob o oceano para detectar restos de acidentes de aviões para fins de recuperação e identificação. Nessa aplicação são usados parcialmente nós sensores móveis e veículos submarinos autônomos não tripulados (AUV) (AKYILDIZ; POMPILI; MELODIA, 2005);
- Rede de apoio à esquadra de robôs: pequenos nós móveis são depositados no ambiente e responsáveis por coordenar a rede para realização de tarefas comuns, tais como: troca de informações entre robôs e transmissão dos dados coletados para uma base remota através da rede (KANTOR et al., 2003) (KOTAY et al., 2005);
- Rede de coleta de informação de localização de pessoas/equipamentos: os nós coletam os dados e funcionam como objetos de controle, podem ser utilizados para coletarem informações de um hospital, itens em armazém, entre outros (BROOKS; RAMANATHAN; SAYEED, 2003);

---

<sup>2</sup>*Energy-hole*: Problema causado nos nós que estão próximos ao nó *sink* em redes compostas por *sink* fixo, que consome mais energia do que os demais nós, pois todo o tráfego de dados passa por eles (nós próximo ao *sink*).

O desenvolvimento crescente dos sistemas embarcados, como os robôs (terrestres, aéreos e aquáticos), quando integrados às aplicações de redes de sensores sem fio, pode auxiliar diferentes classes de aplicações, tais como: monitoramento ambiental, salvamento e prevenção de catástrofes (desmoronamento de terras, enchentes, entre outras). As redes de sensores sem fio móveis (RSSFMs) visam a combinar as soluções, por exemplo, de roteamento, de localização, entre outras. E os robôs móveis proporcionam uma vasta área para os pesquisadores, podendo ser analisadas aplicações integradoras, avaliação de algoritmos, análise de modelos de mobilidade, entre outras áreas de pesquisa.

Neste trabalho é apresentada uma solução de roteamento para redes heterogêneas. As redes heterogêneas são consideradas neste trabalho como sendo redes compostas por diferentes tipos de nós sensores, com capacidades e características diferentes, tais como mobilidade, maior capacidade de processamento, comunicação e energia. O foco deste trabalho é desenvolver uma solução de roteamento que suporte aplicações integradoras geradas no Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Sistemas Embarcados Críticos (INCT-SEC).

A solução suporta em uma mesma rede nós sensores fixos e móveis com diferentes graus de mobilidade (de veículos autônomos terrestres a veículos autônomos aéreos), faz uso da técnica de agregação de dados, visando reduzir o tráfego de dados na rede, utiliza nós sensores móveis terrestres e um nó *sink* em alta velocidade, representando um VANT.

## 1.1 Motivação

As RSSFs apresentam limitações dos recursos disponíveis em seus nós sensores em termos de capacidade energética, processamento e comunicação. Sendo assim, desenvolver projetos/soluções voltados para as RSSFs conseguindo otimizar o máximo possível desses recursos limitados e ainda garantindo uma entrega confiável dos dados é um grande desafio. Ainda mais se a rede possuir

mobilidade, pois os nós móveis, diferentemente dos nós estáticos, a cada momento estarão em uma localização diferente, o que dificulta ainda mais, por exemplo, o desenvolvimento de soluções de roteamento.

Pesquisas voltadas para as redes de sensores sem fio utilizando nós móveis têm sido apresentadas frequentemente. Muitas utilizam somente um nó móvel, e normalmente esse nó é o *sink*, o responsável por percorrer toda a rede e recolher os dados coletados pelos nós sensores estáticos. Outras já utilizam os nós móveis para coletar as informações do ambiente e encaminhá-las ao nó *sink*, que por sua vez é fixo. Analisando as diversas soluções encontradas na literatura e também devido à necessidade de aplicações que utilizam veículos do INCT-SEC para agricultura de precisão, monitoramento ambiental, segurança, entre outras, surgiu o interesse em pesquisar sobre redes de sensores sem fio móveis heterogêneas, fazendo uso da mobilidade dos nós sensores móveis e considerando o *sink* como nó móvel. O intuito é aumentar a taxa de entrega dos dados coletados, reduzir o consumo de energia entre os nós sensores fixos, diminuir a quantidade de saltos para entregar os dados coletados e ainda entregar os dados com menor latência.

Os pontos que motivaram o desenvolvimento deste trabalho foram a utilização dos nós sensores móveis auxiliando na coleta e roteamento dos dados e a utilização de um nó *sink* móvel em alta velocidade.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma solução de roteamento utilizando nós sensores fixos e móveis com diferentes graus de mobilidade para coletar os dados, entregando-os a um nó *sink* móvel de modo a atender as necessidades de aplicações do INCT-SEC. A aplicação da qual a solução proposta neste trabalho faz parte tem como objetivo principal monitorar uma infraestrutura crítica. Onde os nós sensores serão depositados no ambiente interno e externo a fim de coletar informações do ambiente monitorado e entrega-los para um nó *sink*, o qual será um VANT em alta velocidade.

Dessa forma, o objetivo é desenvolver uma solução de roteamento, utilizando técnicas de clusterização, agregação de dados e nós móveis em ambiente composto por diferentes tipos de nós sensores. A solução visa garantir uma entrega de dados confiável, diminuir o consumo de energia dos nós fixos, aumentando o tempo de vida da rede e entregar os dados para um *sink* móvel em um tempo mais preciso (próximo à sua ocorrência).

Os objetivos específicos incluem:

- Avaliação da solução proposta por meio das seguintes métricas:
  - Escalabilidade;
  - Taxa de Entrega de pacotes;
  - Atraso do pacote;
  - Número médio de saltos;
  
- Comparação da solução proposta desenvolvida com a eficiente solução WHISPER FOLLOW (OLIVEIRA; BARRETO; FONTAO, 2010);

### 1.3 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado da seguinte maneira:

O Capítulo 2 descreve os fundamentos de Redes de Sensores Sem Fio e de Redes de Sensores Sem Fio Móveis.

O Capítulo 3 apresenta os modelos de mobilidade mais utilizados para representar os movimentos de pessoas, animais, robôs, etc em ambientes de simulação, incluindo os modelos que foram utilizados em nossa solução.

No Capítulo 4 são descritos protocolos de roteamento para Redes de Sensores Sem Fio e também para Redes de Sensores Sem Fio Móveis.

O Capítulo 5 apresenta a solução de roteamento proposta para Redes de Sensores Sem Fio Móveis Heterogêneas, descrevendo a metodologia de pesquisa utilizada, à forma de avaliação da solução e por fim, os resultados obtidos.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas e as perspectivas de trabalhos futuros.



# Capítulo 2

## REDES DE SENSORES SEM FIO E REDES DE SENSORES MÓVEIS

---

---

O presente capítulo aborda fundamentos das Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) e das Redes de Sensores Sem Fio Móveis (RSSFMs), mostrando ao final as principais características que as diferenciam.

O capítulo tem como objetivo descrever as fundamentações teóricas das Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) e das Redes de Sensores Sem Fio Móveis, seus componentes, suas características, suas restrições, os ambientes de operação e suas aplicações. Também descreve como é composta a arquitetura de uma determinada RSSF e como a mesma pode ser classificada.

As redes de sensores sem fio (RSSFs) são compostas por uma grande quantidade de pequenos dispositivos autônomos distribuídos, denominados nós sensores, capazes de coletar dados de seu entorno (MERGEN; ZHAO; TONG, 2006).

Os nós sensores são capazes de armazenar dados em pequena quantidade, possuem processamento e comunicação sem fio com restrição energética (bateria) que são utilizados para formar redes. Eles são nós capazes de se comunicar utilizando tecnologias sem fio, como *Wi-fi*, *Bluetooth*, *ZigBee*, entre outras.

Nós sensores são dispositivos de baixa potência que podem ser equipados com um ou mais sensores, processador, memória, modulo de comunicação e um atuador sem fio. Existem diferentes tipos de sensores, tais como químicos, térmicos, biológicos, óticos e magnéticos, que podem ser associados ao nó para monitorar alguma característica do ambiente, como: temperatura, som, vibração, pressão e movimentos em diferentes localizações e condições físicas ou ambientais (YICK;

MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). A figura 2.1 ilustra alguns tipos de sensores para redes de sensores.

A implantação dos nós sensores normalmente acontece dentro ou muito próximo ao fenômeno/evento, algumas vezes em ambientes de difícil acesso. Por esse motivo, é implantado um rádio de comunicação sem fio para que possa ser estabelecida a transmissão dos dados coletados no ambiente para uma estação base chamada de nó *sink*<sup>3</sup> ou sorvedouro (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

Cada nó pode possuir diferentes tipos de sensores acoplados, podendo ser utilizado em diversas aplicações, dentre as quais podemos citar: monitoramento ambiental, equipamentos, comunicações, rastreamento de pessoas, proteção de pontos sensíveis guardados pelo exército, aplicações críticas, salvamento de vidas, preservação de patrimônios e muitas outras informações, dependendo do ambiente onde são depositados e dos requisitos necessários à aplicação.



Figura 2.1– Tipos de sensores

<sup>3</sup>*Sink*: É um nó sensor que possui maior poder de processamento e memória, sendo responsável pela recepção dos dados coletados e pelo envio deles para a estação base.

O *hardware* com o qual os nós sensores são construídos está sendo cada vez mais aprimorado para gerar um melhor custo benefício, porém, ainda apresenta limitações computacionais como memória, processamento, comunicação e energia (AKYILDIZ et al., 2002). Geralmente esses sensores são utilizados no monitoramento de informações em ambientes hostis, inóspitos<sup>4</sup> e de difícil acesso, como florestas, vulcões, rios e oceanos.

A evolução da comunicação sem fio permite monitoramentos remotos (Pinto, 2004). Com essa evolução, setores industriais e logísticos podem monitorar remotamente caminhões durante o trajeto, através dos sensores de rastreamento. Outro exemplo é a utilização da comunicação sem fio no setor bioquímico para prevenir vazamentos e outros problemas, evitando assim possíveis acidentes. Na área militar, a comunicação sem fio é utilizada a fim de auxiliar na realização de salvamentos, monitoramento de grandes áreas militares para execução de manobras e rastreamento (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). Áreas com potencial de utilização das RSSFs incluem:

- Saúde: monitoramento de doenças contagiosas; interface para deficientes; monitoração de pacientes cardíacos; diagnóstico de distúrbios em hospitais; monitorar e localizar pacientes e médicos nos hospitais (ENDLER, 2006). A biomedicina utiliza as RSSFs nos monitoramentos com intuito de melhorar a qualidade de vida das pessoas (BRI et al., 2009).
- Aplicações militares: monitoramento de tropas; reconhecimento de terrenos; detecção de alvos; detecção de ataques biológicos, químicos e nucleares; proteção de pontos críticos (ENDLER, 2006).
- Meio Ambiente: rastrear o movimento de pequenos animais; monitorar as condições ambientais que podem afetar colheitas e plantios (por exemplo: geadas, detecção de componentes químicos ou biológicos e irrigação); mapear a biocomplexidade ambiental; estudo da poluição e muitas outras aplicações.

---

<sup>4</sup>Inóspitos: Impróprio para ser habitado.

- Infraestrutura/equipamentos: monitorar e identificar possíveis falhas em estruturas (por exemplo: pontes e prédios); monitorar máquinas e equipamentos (como: motores e dutos de gás), diagnósticos sobre o funcionamento e condições de máquinas.
- Aplicações Comerciais: automação de vendas e processos industriais; manutenção de inventário; monitorar o controle do processo de qualidade de produtos; detecção e vigilância (por exemplo: de veículos e de estabelecimentos).

## 2.1 Componentes do nó sensor

Uma RSSF é formada por um conjunto de dispositivos autônomos, denominados nós sensores. Os principais componentes de um nó sensor são: unidade de transmissão e recepção, unidade de energia, unidade de sensoriamento e unidade de processamento. Porém, dependendo da necessidade de utilização do nó sensor e da aplicação do mesmo, ele também pode possuir unidades adicionais como: unidade de movimentação, unidade geradora de energia externa e ainda uma unidade de localização (AKYILDIZ et al., 2002).

A figura 2.2 ilustra tais unidades presentes nos nós sensores. Todos esses componentes necessitam ter um pequeno diâmetro para que possam ser alocados dentro do nó. É muito importante que eles trabalhem consumindo o mínimo possível de energia, sendo indispensável para a rede operar autonomamente e se adaptar facilmente a diferentes ambientes.

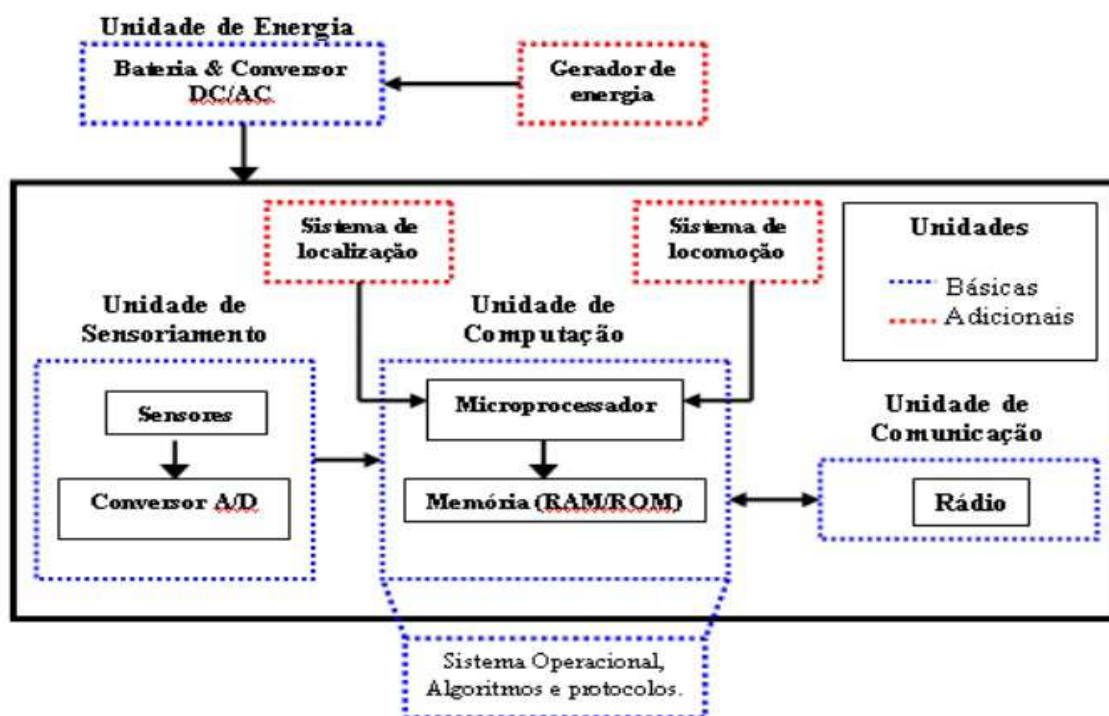


Figura 2.2– Componentes do nó sensor sem fio (Villas, 2007)

O nó sensor possui uma unidade de computação onde é executado o *software*, também chamado de componente lógico. Os fabricantes de nós sensores tendem a projetá-los cada vez mais com pequenas dimensões. Como resultado, essa redução de tamanho acaba impondo limitações nos recursos dos nós, como capacidade da fonte de energia, processador e transceptor. Apesar dos nós sensores possuírem individualmente pouca capacidade computacional e de energia, um esforço colaborativo entre os mesmos permite a realização de uma tarefa maior (Ruiz, 2003). Uma RSSF também pode ser composta de dispositivos atuadores que permitem ao sistema controlar parâmetros do ambiente monitorado. Outras unidades podem ser incorporadas ao nó sensor dependendo da aplicação e do interesse para qual o nó será utilizado.

A unidade de sensoriamento é composta pelas subunidades transdutores e conversores A/D. Os dados analógicos coletados do ambiente são convertidos em informações digitais e enviados para a unidade de processamento. Esta, por sua vez, está associada a uma pequena unidade de armazenamento responsável pelas informações sentidas na unidade de sensoriamento ou recebidas pela unidade de transmissão e recepção. A unidade de processamento é responsável pelos

procedimentos, que ao serem executados, fazem os sensores trabalharem de forma colaborativa entre si a fim de realizar a tarefa de sensoriamento. A unidade de energia é composta por células de energia e bateria, caso seja necessário, também pode ser acoplada a uma unidade de geração de energia. As unidades de transmissão e recepção são responsáveis pela comunicação na camada física da rede.

A unidade de localização é muito importante para a maioria das aplicações, já que grande parte das técnicas de roteamento conhecidas requer dados sobre localização. Sendo assim, é comum que um nó sensor tenha uma unidade de localização. Normalmente, todas as unidades que compõem o nó sensor devem formar um dispositivo cujo tamanho seja igual ou inferior a uma caixa de fósforos, podendo chegar ao tamanho de uma moeda ou que ocupe aproximadamente um centímetro cúbico. Além do tamanho, há outros requisitos para os nós sensores: consumir o mínimo de energia possível, baixo custo de produção, autonomia e adaptação ao ambiente.



**Figura 2.3– Deposição dos nós através de um VANT**

## 2.2 Funcionamento Básico

O funcionamento das RSSFs consiste a princípio na deposição dos nós sensores, que podem ser lançados por um avião, helicóptero ou VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), como ilustra a Figura 2.3 ou na deposição dos mesmos um a um na área de interesse, como ilustra a Figura 2.4. Após a deposição dos nós sensores no ambiente, temos a descoberta de rotas, na qual os nós estabelecem as rotas que serão usadas para a transmissão de dados. Em seguida o nó *sink* propaga as tarefas de sensoriamento (pacotes de consulta) na rede e aguarda as respostas.

Quando um evento de interesse é detectado, os nós coletam a informação e após algum processamento, enviam os dados ao nó *sink* pelo caminho definido no protocolo de roteamento, que é o responsável por descobrir rotas e garantir a entrega dos dados até o *sink*. A figura 2.5 ilustra o funcionamento básico das RSSFs.

Devido as constantes mudanças de topologias provocadas na rede seja pela mobilidade dos nós sensores ou por falhas dos nós, é necessária uma manutenção periódica da rota a ser usada. Pelo fato de tipicamente o nó *sink* possuir características especiais, ele é responsável por coletar/receber as informações dos nós sensores.



Figura 2.4– Deposição manual (CROFT et al., 2008)

## 2.3 Características das RSSF

Um projeto de redes de sensores sem fio deve levar em consideração e tentar superar os desafios encontrados nesse tipo de rede, que são: agregação de dados; baixo consumo de energia; tolerância a falhas; limitações de *hardware*; mudanças de topologias da rede; meios de transmissão; expansibilidade; ambiente de operação. Geralmente esses requisitos são abordados separadamente nos diversos trabalhos sobre redes existentes na literatura. As características e requisitos derivam das limitações tecnológicas dos dispositivos e das restrições das aplicações.

A seguir são apresentados os fatores (características e requisitos) que têm impacto direto na arquitetura e nas decisões de um projeto de uma RSSF (AKYILDIZ et al., 2002) (RUIZ; NOGUEIRA; LOUREIRO, 2004). Os projetos de redes de sensores sem fio são diferentes dos projetos de redes tradicionais pelo fato de que cada aplicação tem seu próprio projeto (orientado a aplicação).

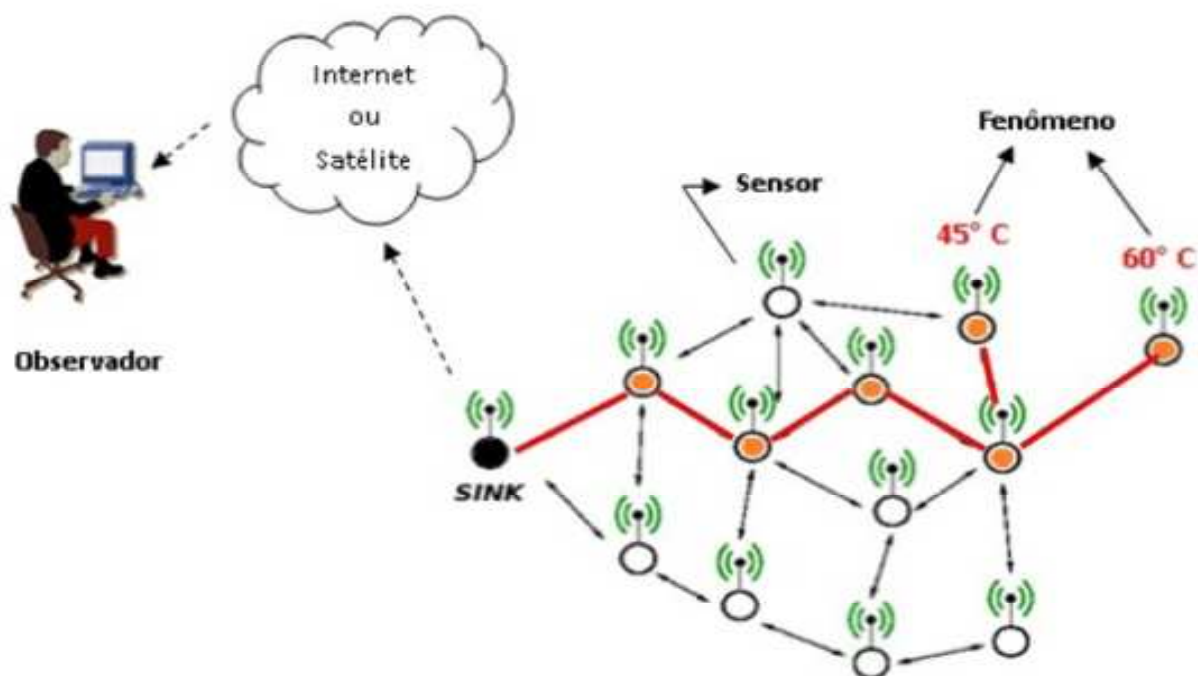


Figura 2.5– Funcionamento básico da RSSF



### 2.3.1 Desafios e Limitações

As redes de sensores sem fio compartilham muitas semelhanças com sistemas distribuídos, porém estão sujeitas a uma variedade de desafios e restrições. Essas restrições podem causar impacto direto no projeto de uma RSSF, estimulando o desenvolvimento de protocolos e algoritmos que diferem de outros sistemas distribuídos.

Esta seção descreve as principais restrições de uma RSSF.

### 2.3.2 Consumo de Energia

A principal restrição atualmente associada com o projeto de rede de sensores é o consumo energético, já que os nós sensores operam com quantidade de energia limitada. Os nós sensores normalmente são alimentados através de baterias, que devem ser substituídas ou recarregadas (utilizando a energia solar, por exemplo) quando esgotadas. Em algumas aplicações é impossível ou inviável fazer a substituição da bateria. Neste contexto, os nós sensores são simplesmente descartados quando sua fonte de energia está esgotada (WALTENEGUS, 2010).

O nó sensor deve ser capaz de conseguir operar até que seu tempo de missão termine ou até que sua bateria possa ser substituída. O tempo da missão depende muito do tipo de aplicação. Por exemplo, para monitorarem movimentos glaciais que possam operar por vários anos, enquanto um sensor em um cenário de batalha pode ser necessário apenas para algumas horas ou dias. Esta exigência permeia todos os aspectos do nó sensor e projetos de redes. Por exemplo: as escolhas feitas na camada física de um nó sensor afetam o consumo de energia de todo o dispositivo e o projeto de protocolos de nível superior (SHIH et al., 2001).

Dessa forma, as capacidades de sensoriamento: processamento e comunicação do nó sensor são limitados pela disponibilidade de energia (AKYILDIZ et al., 2002). Devido ao tamanho reduzido do nó sensor, não se tem a possibilidade de utilizar uma bateria grande, o que poderia aumentar o tempo de vida útil do nó. Assim, a energia fica limitada e por esse motivo o consumo de energia em RSSF é algo tão primordial.

Obviamente, o tempo de vida do sensor na rede é determinado pelo tempo de vida da bateria, ou seja, protocolos e algoritmos para RSSF têm que ser sensíveis ao consumo de energia. Em algumas aplicações, principalmente as que monitoram ambientes hostis, pode ocorrer problema de perda de comunicação quando o tempo da bateria acabar, pois será muito difícil obter o acesso ao nó para que possa ser efetuada a troca dessa bateria. Em (AKYILDIZ et al., 2002) os autores descrevem três módulos de consumo que os sensores seguem:

- Sensoriamento: ao sentir/sensoriar uma ocorrência de evento na área de cobertura;
- Processamento: ao executar qualquer tipo de informação;
- Comunicação: ao comunicar-se com outros nós (transmissão e/ou recebimento de qualquer tipo de informação);

A tarefa de um nó sensor pode ser dividida em três categorias: sensoriamento, processamento de dados e comunicação. O módulo de sensoriamento de um nó é a unidade responsável por detectar eventos no ambiente e convertê-los para sinais digitais.

Segundo BOUKERCHE e NIKOLETSEAS (2004), o consumo de energia de um módulo de sensoriamento varia de acordo com a natureza da aplicação. Caso ocorra mau funcionamento ou falha de alguns nós, isto poderá causar mudanças na topologia e, conseqüentemente, a necessidade de reorganização de rotas para a entrega dos dados.

A importância da conservação de energia induz os pesquisadores ao desenvolvimento de protocolos e algoritmos cientes de energia para redes de sensores. Dentre os três módulos, a comunicação para transmitir as informações é o que mais consome energia em um nó sensor, como mostrado na Figura 2.6.

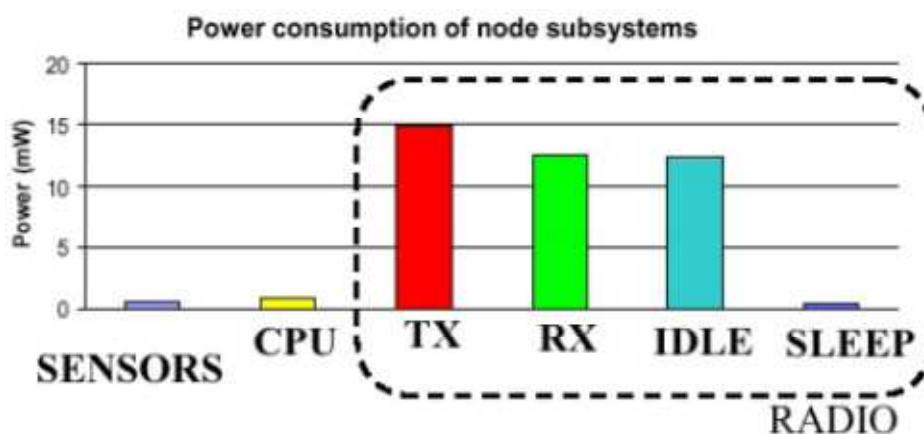


Figura 2.6– Consumo de energia do módulo de um nó sensor (BOUKERCHE; WASHINGTON; LINUS, 2003).

Nas comunicações de curta distância, a quantidade de energia que se gasta para transmissão e recepção é quase a mesma que se gasta em uma transmissão de longa distância. Os componentes do circuito de *transceiver* consomem energia valiosa do sistema, em especial o PLL (*Phase Locked Loop*). Ao mencionarmos o gasto médio de energia, normalmente não se leva em conta o gasto no início da transmissão em que o PLL está ativo e o consumo de energia é bem maior. Como em uma rede de sensores sem fio o tamanho dos pacotes de dados é tipicamente pequeno, o consumo inicial passa a dominar sobre o consumo total do sistema de transmissão. Assim, esse gasto também deve ser levado em consideração, pois é quando o PLL está ativo, mas não está ocorrendo o envio da informação que seria a coluna “IDLE”, que está sendo ilustrada na Figura 2.6 (BOUKERCHE; WASHINGTON; LINUS, 2003).

Nas RSSFs, otimizar o consumo de energia é uma tarefa bastante complexa, pois não se limita a diminuir o consumo de um único nó sensor, mas também a prolongar o tempo de vida da rede como um todo. Para alcançar esse objetivo, é necessário que um minucioso controle de dissipação de energia seja incorporado em todos os estágios do projeto e operação de uma RSSF. O sistema deve ainda ser capaz de fazer avaliações dinâmicas entre o consumo de energia, nível de desempenho e fidelidade operacional (RAGHUNATHAN et al., 2002). Na maioria das vezes, o consumo de energia é o fator fundamental do projeto de redes de sensores sem fio. Devido às fontes de energia serem escassas e muitas vezes não substituíveis, sempre que possível devem ser utilizados métodos para economizar

energia em redes de sensores sem fio. Por esse motivo, muitas pesquisas são voltadas para os algoritmos responsáveis pela transmissão e escoamento de dados na rede a fim de melhorá-los. A criação de novos algoritmos de roteamento com maior eficiência em relação à utilização de energia até o desligamento dos módulos de comunicação dos nós em determinados momentos também tem sido uma área muito pesquisada.

### **2.3.3 Tolerância a Falhas**

Em RSSF é de suma importância que os sistemas de monitoramento, sejam eles de ambientes físicos ou de infraestruturas críticas, ofereçam alta confiabilidade sobre os dados que são gerados. Com o emprego de uma RSSF em ambientes potencialmente hostis, como uma aplicação crítica, elevam-se muito as chances de falhas em algum ponto da observação. As severas restrições de consumo de energia tornam as técnicas tradicionais baseadas na redundância dos componentes dos nós sensores inadequadas (FENG; KOUSHANFAR; POTKONJAK, 2002).

A tarefa global da rede de sensores é fornecer informações sobre o ambiente monitorado. Tolerância a falhas ou confiabilidade da rede é a habilidade de manter as funcionalidades da rede sem qualquer interrupção devido às falhas dos nós (SHIH et al., 2001). Protocolos e algoritmos devem ser implementados para alcançar os níveis de tolerância a falhas requisitadas pelas aplicações das redes de sensores (AKYILDIZ et al., 2002).

Em RSSF as falhas são possíveis e aceitáveis, mas a rede deve saber lidar com elas de maneira automática e natural. Os nós sensores podem falhar por diversos motivos: falta de energia, tornar-se inoperante pela falta de visibilidade para outro nó da rede, em função do ambiente onde o nó sensor está localizado, ou até mesmo, por algum dano físico. Devido às RSSFs serem compostas de vários nós sensores distribuídos no ambiente que está sendo monitorado ou sensoriado, a falha de alguns nós não deve atrapalhar o funcionamento do resto da rede. Isto é conhecido como tolerância a falhas (SHEN; CHAVALIT; JAIKAEOCHAIPORN, 2001).

A tolerância a falhas garante que um sistema está disponível para uso sem qualquer interrupção na presença das mesmas. Assim, ser tolerante a essas possíveis falhas aumenta a disponibilidade e conseqüentemente confiabilidade do sistema. A abordagem mais popular para tolerância a falhas é o roteamento *multipath*. Esse roteamento trabalha com múltiplos caminhos entre os nós de origem até o *sink*, determinando um aumento de consumo e geração de tráfego. O roteamento *multipath* oferece benefícios adicionais de balanceamento de carga e agregação (ALWAN; AGARWAL, 2009).

Nas RSSFs existem diferentes níveis de tolerância a falhas, o que possibilita o desenvolvimento de algoritmos e protocolos de controle da rede específico e adequados para cada situação (AKYILDIZ et al., 2002), ou seja, se uma rede de sensores está sendo utilizada em um ambiente no qual ocorre pouca interferência, o protocolo pode ser mais simples. Já uma rede de sensores implantada em um ambiente doméstico pode possuir um nível de tolerância a falhas menor do que uma aplicação de alto risco, por exemplo: o monitoramento de um vulcão e monitoramento de um ambiente químico.

### 2.3.4 Agregação de Dados

Um problema encontrado nas RSSFs é a redundância de dados. A agregação de dados é uma técnica que reduz o custo de comunicação e aumenta a confiabilidade na transmissão de dados. Na agregação, os dados são coletados de vários sensores e, após serem combinados são transmitidos até o *sink* (estação base). As técnicas de agregação normalmente utilizam funções matemáticas, como média, mediana, valor mínimo e/ou valor máximo, com intuito de diminuir o tráfego de pacotes na rede. O método de agregação de dados geralmente é usado quando a rede utiliza-se da formação de *clusters* para auxiliar na coleta ou na entrega dos dados coletados (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

Um *cluster* trabalha com a eleição de um nó que fica responsável por enviar as informações agregadas até o *sink*. Esse nó pode ou não ter um maior poder de processamento. Quando se trabalha com *cluster* visa-se diminuir o consumo de energia, concentrando a comunicação somente em um nó.

### 2.3.5 Ambiente de Operação

O ambiente de operação é o local que se deseja observar ou monitorar utilizando as RSSFs. De acordo com (AKYILDIZ et al., 2002), os nós sensores devem funcionar sob as mais diversas condições: calor ou frio extremo, sob alta pressão no fundo de um oceano e em diferentes tipos de ambientes.

A lista a seguir mostra alguns dos diversos locais onde os nós sensores são comumente utilizados:

- Interior de grandes maquinários;
- Fundo de oceano;
- Dentro de ciclone;
- Superfície de oceano durante um tornado;
- Campo contaminado;
- Campo de batalha;
- Chão de casas ou fábricas;
- Acoplados a animais;
- Acoplados a veículos;
- Próximo a um vulcão;
- Acoplados à pele humana;
- Acoplados a robôs;
- Acoplados a aviões (VANT), etc.

A deposição desses nós sensores pode ser feita aleatoriamente no ambiente ou eles podem ser fixados próximos e até mesmo dentro do local a ser monitorado. Uma RSSF possui a característica de ser autônoma. Dependendo da aplicação, as RSSFs podem ser utilizadas em áreas geograficamente extensas e/ou remotas. A deposição dos nós sensores tipicamente é feita em locais estratégicos para facilitar o monitoramento e é a técnica mais utilizada. A região coberta pelos nós sensores (raio de alcance) é chamada área de cobertura.

Os ambientes a serem monitorados podem variar desde um terreno regular até um terreno totalmente irregular e pouco acessível, por exemplo: um vulcão ou

uma floresta. Em caso de terreno pouco acessível, a deposição dos nós pode ser feita através de helicópteros, aviões e até mesmo de VANT. Nos ambientes hostis e de difícil acesso, normalmente os nós sensores são descartáveis, pois não há possibilidade de trocar a bateria desses nós. Em ambientes de fácil acesso, dependendo da aplicação, pode ser efetuada a troca de bateria do nó sensor ou até mesmo a troca de outro componente, caso seja necessário.

### 2.3.6 Escalabilidade

Uma RSSF normalmente é composta por uma enorme quantidade de nós sensores, podendo ser centenas, milhares ou milhões deles, dependendo da aplicação. KARL E WILLIG (2007) consideram a escalabilidade um requisito indispensável para a RSSF. A rede não pode perder desempenho ou interromper seu funcionamento (entrega de dados ou comunicação) quando um nó sensor for adicionado ou excluído dela. O protocolo ou algoritmo desenvolvido deve prever que a rede pode trabalhar com alta densidade de sensores e precisa estar ciente quanto à escalabilidade.

### 2.3.7 Classificação das RSSF

A classificação das Redes de Sensores Sem Fio depende do objetivo e da área de aplicação das mesmas. As aplicações são influenciadas pelas características citadas nas seções anteriores. Segundo (RUIZ et al., 2004), as RSSFs podem ser classificadas segundo a configuração, o sensoriamento, o tipo de comunicação e o tipo de processamento.

As RSSFs podem ser classificadas das seguintes formas:

**Tabela 2.1– Classificação das Redes de Sensores sem Fio.**

<b>Quanto à Configuração</b>	
<b>Composição</b>	<p><b>Heterogênea:</b> RSSF composta por nós com <i>hardware</i> diferentes;</p> <p><b>Homogênea:</b> RSSF composta por nós com <i>hardware</i> iguais;</p>

<b>Organização</b>	<b>Hierárquica:</b> RSSF onde os nós estão organizados em grupos ( <i>cluster</i> ). Cada grupo possui um líder ( <i>cluster-head</i> ); <b>Plana:</b> RSSF onde os nós não estão organizados em grupos;
<b>Mobilidade</b>	<b>Estacionária:</b> RSSF onde todos os nós permanecem no mesmo local onde foram depositados durante o tempo de vida da rede; <b>Móvel:</b> RSSF onde os nós podem se movimentar e se deslocar do local onde foram depositados;
<b>Densidade</b>	<b>Balanceada:</b> RSSF que possui uma concentração e distribuição de nós considerada ideal, segundo objetivo da rede; <b>Densa:</b> RSSF que possui alta concentração de nós por unidade de área; <b>Esparsa:</b> RSSF que possui uma baixa concentração de nós por unidade de área;
<b>Distribuição</b>	<b>Irregular:</b> RSSF que tem uma distribuição não uniforme dos nós na área monitorada; <b>Regular:</b> RSSF que tem uma distribuição uniforme de nós sobre a área monitorada;
<b>Quanto ao Sensoriamento</b>	
<b>Coleta</b>	<b>Periódica:</b> Os nós sensores coletam os dados da área monitorada em intervalos regulares; <b>Contínua:</b> Os nós sensores coletam os dados continuamente; <b>Reativa:</b> Os nós sensores coletam os dados quando ocorrem eventos de interesse ou quando solicitado pelo observador; <b>Em tempo real:</b> Os nós sensores coletam a maior quantidade de dados possível no menor intervalo de tempo;
<b>Quanto à Comunicação</b>	
<b>Disseminação</b>	<b>Programada:</b> Os nós sensores transmitem as informações em intervalos regulares;



	<p><b>Contínua:</b> Os nós sensores transmitem os dados continuamente;</p> <p><b>Sob demanda:</b> Os nós sensores transmitem os dados quando há ocorrência de eventos ou consulta do nó observador;</p>
<b>Conexão</b>	<p><b>Simétrica:</b> Todas as conexões existentes entre os nós sensores, com exceção do <i>sink</i>, têm o mesmo alcance;</p> <p><b>Assimétrica:</b> As conexões entre os nós sensores comuns têm alcance diferente;</p>
<b>Transmissão</b>	<p><b>Simplex:</b> Os nós sensores possuem transceptor que permite apenas transmissão da informação;</p> <p><b>Half-duplex:</b> Os nós sensores possuem transceptor que permite transmitir ou receber em um determinado instante;</p> <p><b>Full-duplex:</b> Os nós sensores possuem transceptor que permite transmitir ou receber dados ao mesmo tempo;</p>

### 2.3.8 Topologia

Uma RSSF utiliza de centenas a milhares de nós sensores, dependendo da sua aplicação. A deposição desses nós sensores pode ser feita através de helicópteros, aviões, VANT ou simplesmente depositados no ambiente onde se deseja monitorar. Devido ao grande número de nós sensores utilizados por uma RSSF, o gerenciamento da topologia é um grande desafio. Por outro lado, as mudanças de topologia de uma RSSF são comuns durante uma aplicação, seja por motivo de falhas em alguns nós ou até mesmo pela movimentação (correnteza do rio ou robôs) dos nós sensores.

De acordo com (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008), o ambiente de interesse da aplicação onde serão depositados, os nós sensores têm um papel muito importante na formação da topologia da rede. Nas aplicações que trabalham com sensores móveis (robôs), as topologias mudam frequentemente, mudando assim, a rota de comunicação com o *sink*. Essas aplicações possuem um alto grau

de complexidade para o desenvolvimento de algoritmos de roteamento. Outros motivos que podem fazer com que a topologia da rede mude são:

- Alta densidade de nós na região de interesse: uma parte dos sensores pode ser desligada e a outra parte continua ligada monitorando o ambiente para manter o funcionamento da rede;
- Falha em um nó sensor por: falta de energia, interferência na comunicação ou defeito interno do nó;
- Quando as informações são enviadas em espaços de tempo longos. O sensor pode mudar seu status para o modo *sleep* para economizar energia e aumentar seu tempo de vida útil.

RSSFs que trabalham somente com nós estáticos também podem ter suas topologias bem dinâmicas devido aos motivos citados anteriormente, por exemplo, em casos de falhas de nós sensores. Os algoritmos desenvolvidos precisam de cuidado no caso de um nó que esteja na rota de comunicação até o *sink* falhar e então mudar a rota para o nó mais próximo. Essa técnica é abordada na seção de tolerância a falhas.

Segundo (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008), podemos encontrar duas principais topologias: estrela e *mesh*. A topologia estrela consiste na comunicação direta dos sensores com o *sink*, limitando o tamanho da área de comunicação. A topologia *mesh* consiste na comunicação entre rotas criadas por nós sensores até o *sink*. Ainda há protocolos que trabalham com a topologia de árvore, onde os nós se comunicam com o mais próximo até a informação chegar ao *sink*. No caso de algum nó sensor intermediário falhar, novas rotas podem ser criadas. Assim, a comunicação até o *sink* é garantida.

## 2.4 Arquitetura de comunicação em RSSF

Nesta seção discutiremos características, funcionalidades e objetivos de cada camada da arquitetura de comunicação em RSSF. A figura 2.7 ilustra a camada OSI e a pilha de protocolos de RSSF. As RSSFs possuem um modelo diferente das redes tradicionais que trabalham com o padrão OSI.



Figura 2.7– Pilha de protocolos OSI e RSSF

As RSSFs possuem um modelo de pilha de protocolo que trabalha com cinco camadas: Camada Física (MAC), Camada de Enlace, Camada de Rede, Camada de Transporte e a Camada da Aplicação. Para que uma aplicação de RSSF seja eficiente, tenha vida prolongada e tenha sucesso no envio das informações para o *sink*, em alguns casos é necessário fazer um *cross-layer* (cruzamento das funções entre as camadas), eliminando característica que é a total abstração entre as camadas da rede (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

Quando uma aplicação utiliza a rede ela não interage diretamente com o *hardware* e sim com o *software* do protocolo. A noção de protocolos em camadas fornece um conceito básico para o entendimento de como um conjunto complexo de

protocolos podem trabalhar juntos com o *hardware* para prover um sistema de comunicação eficiente (VILLAS, 2007).

A pilha de protocolos da RSSF caracteriza-se através do esforço colaborativo dos elementos da rede (nós sensores) em conjunto com a disponibilidade de energia de cada nó sensor para que seja possível o estabelecimento de novas rotas, aplicação de técnicas como agregação de dados, entre outras. A comunicação ocorre com a utilização de meios sem fio, por exemplo: *Wi-fi*, *Bluetooth*, *ZigBee*, entre outros.

### 2.4.1 Camada Física

A camada física está relacionada diretamente com a parte física do nó sensor (*hardware*). Ela é responsável pela seleção e geração da frequência portadora, detecção de sinal, modulação e encriptação de dados. A principal função é fazer modulação e demodulação do sinal digital, transformando as ondas de rádio recebidas em dados digitais. Os *transceivers* realizam essa função ao enviar e receber qualquer informação (AKYILDIZ; VURAN, 2010).

A frequência mais utilizada para manter a comunicação entre os nós sensores é a 2.4GHz, utilizada nos padrões IEEE 802.11, 802.15.4 e *Bluetooth*. O fato de a frequência não ser licenciada gera um problema, pois outros dispositivos e aparelhos sem fio trabalham com a mesma frequência. Assim, dependendo do ambiente, poderão ocorrer problemas por interferência.

A camada física pode influenciar no raio de comunicação de uma RSSF, pois se ela trabalhar com baixo consumo de energia, terá uma potência menor na transmissão e conseqüentemente, terá uma transmissão de curto alcance. A transmissão de curto alcance diminui a complexidade de implementação e reduz custos. No modelo OSI, o protocolo MAC (*Medium Access Control*) é considerado parte da camada de enlace, mas em RSSF essa camada determina o tempo certo que o nó sensor deve fazer acesso ao meio e tentar se comunicar (KARL; WILLING, 2007).

## 2.4.2 Camada de Enlace

O objetivo da camada de enlace é assegurar que em uma rede de comunicação existam conexões confiáveis. Isso é possível através da detecção de quadros de dados, multiplexação de dados, controle de erros e acesso ao meio. O acesso ao meio (MAC) é o ponto mais crítico para diversas aplicações de RSSF.

O protocolo de controle de acesso ao meio para a RSSF deve atender dois objetivos. O primeiro é criar uma infraestrutura de rede com os nós sensores depositados no ambiente e estabelecer enlaces de comunicação para a transferência de dados. Assim se forma a infraestrutura básica para a comunicação sem fio, nó a nó, e oferece a habilidade de auto-organização para a RSSF (AKYILDIZ et al., 2002). O segundo é compartilhar os recursos de comunicação entre os nós sensores com eficiência (WU et al., 2000).

O protocolo MAC é fundamental na operação da rede, pois sua função é evitar colisões durante a transmissão. Existem diversos protocolos MAC disponíveis para as RSSFs, mas eles possuem restrições quando aplicados. Alguns protocolos MAC conhecidos são: TDMA e o CDMA. O protocolo TDMA (*Time Division Multiple Access*) exige uma elevada taxa de transmissão e coordenação entre os nós. O protocolo CDMA (*Code Division Multiple Access*) e os baseados em contenção da especificação IEEE 802.11, requerem que os nós escutem o canal para receber um possível tráfego, provocando um elevado gasto de energia. Tais aspectos implicam em modificações ou desenvolvimento de novos protocolos MAC específicos para a RSSF (AKYILDIZ et al., 2002).

## 2.4.3 Camada de Rede

Na Camada de rede, os protocolos são responsáveis pelo roteamento dos dados desde os nós sensores da origem do evento até o *sink*, uma vez que os nós sensores de uma rede estão espalhados na área a ser monitorada e trabalham em conjunto para entregar os dados coletados.

Os protocolos da camada de rede, diferentes dos tradicionais que buscam diminuir o retardo fim a fim ou aumentar a vazão, visam a estabelecer rotas que

possam economizar energia a fim de aumentar o tempo de vida da rede e em alguns casos, sacrificam outras métricas de desempenho. Na camada de rede, tratar das mudanças de topologia, da escalabilidade e da interface com outras redes são alguns dos requisitos esperados. Muitas pesquisas de RSSF estão concentradas na camada de rede (BOUKERCHE; WASHINGTON; LINUS, 2003) (INTANAGONWIWAT et al., 2003).

No desenvolvimento de um protocolo da camada de rede é necessário se atentar a alguns princípios básicos para desenvolver um protocolo de roteamento (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

Alguns desses princípios são:

- Eficiência energética: baixo consumo de energia na rede;
- Confiabilidade: garantir a entrega dos dados até o *sink*;
- Criação de rotas: utilizando os sensores com maior nível de energia;
- Escalabilidade: manter o funcionamento da rede quando se adiciona ou exclui um nó sensor;

O protocolo de roteamento precisa gerenciar a comunicação entre os sensores usando o mínimo possível de energia, sendo tolerante a falhas e apresentando prerrogativas de segurança. Os protocolos de roteamento de RSSF diferem dos protocolos das redes tradicionais. Por exemplo, o IP (*Internet Protocol*) não funciona em RSSF, pois os nós sensores não possuem endereço IP e também por serem redes centralizadas em dados. A técnica de agregação de dados é utilizada para solucionar esse problema (KARL; WILLIG, 2007).

#### **2.4.4 Camada de Transporte**

Essa camada é responsável por garantir a comunicação fim a fim entre os nós de origem e destino na RSSF. A camada de transporte é necessária quando a aplicação necessita ser acessada pela Internet ou por outras redes externas (AKYILDIZ et al., 2002).

Na RSSF, a camada de transporte deve suportar múltiplas aplicações, ser tolerante quanto à perda de pacotes devido às falhas na comunicação, o que é comum acontecer na comunicação sem fio, devido ao congestionamento e à colisão de pacotes. Ao desenvolver um protocolo para a camada de transporte, deve-se ter o cuidado de abstrair ao máximo para que ele funcione estavelmente com qualquer aplicação (KARL; WILLIG, 2007).

Os protocolos fim a fim nas RSSFs são diferentes do protocolo TCP, são baseados em endereçamento global, pois se baseiam em atributos para indicar os destinatários dos pacotes. Além disso, fatores como, consumo de energia e roteamento centrado em dados (*data-centric*) exigem um tratamento diferente na camada de transporte de uma RSSF.

O funcionamento do controle de congestionamento se dá pela seguinte forma: quando é detectada a colisão de pacotes, um mecanismo de controle informa aos nós responsáveis por congestionar o tráfego na rede para diminuir a taxa de transferência a fim de evitar maiores danos e ajudar a não causar preenchimento total do *buffer*, que também resulta na perda de pacotes. Dependendo do interesse da aplicação, o controle pode ser detectado fim a fim ou a cada salto dado na rede.

### 2.4.5 Camada de Aplicação

Essa camada é a responsável por fazer a interface entre o protocolo de comunicação e o aplicativo que solicitou ou receberá a informação através da rede. Existem diversas aplicações definidas e propostas para a RSSF, sendo cada vez mais desenvolvidas especificamente para atender à aplicação.

Na literatura (TILAK; ABU-GHAZALEH; HEINZELMAN, 2002) (HEIDMANN; SILVA; STRIN, 2003), destaca-se a importância da participação da aplicação no processo de comunicação em RSSF. Muitas aplicações desenvolvidas fazem otimizações específicas visando reduzir o número de transmissões a fim de diminuir o consumo total de energia na rede.

Segundo (AKYILDIZ et al., 2002), pesquisas em RSSF para a camada de aplicação ainda são pouco exploradas e sugere três possíveis protocolos de

aplicações de apoio: o de gerenciamento de sensores (SMP); o de aviso de dados e designação de tarefas (TADAP); o de consultas e disseminação de dados (SQDDP).

### 2.4.6 Cross-layer

*Cross-layer* é uma técnica de interação entre as camadas de protocolo. Essa função descaracteriza a abstração absoluta entre os protocolos no modelo de camadas. A técnica de *cross-layer* pode trazer grandes benefícios para a RSSF, pois interage com os protocolos como se não houvesse camadas individuais. Por exemplo, quando um pacote é enviado da camada de aplicação e trafega pelas demais camadas, este será encapsulado e as informações adicionais podem ser incorporadas em seu cabeçalho.

Quando o pacote contendo todos os cabeçalhos chegar ao destino, cada camada vai desencapsular, interpretar e retirar o seu cabeçalho. Todos esses encapsulamentos causam *overhead* e isso é prejudicial para a RSSF. Quando se executa o *cross-layer* é necessário deixar algumas "formalidades" de lado. Porém, com essa técnica, é possível economizar processamento, banda de comunicação, armazenamento e principalmente energia, pois não se consome energia enviando e recebendo cabeçalhos grandes e desnecessários (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

## 2.5 Métricas para avaliação da qualidade do monitoramento

Algumas métricas são utilizadas para avaliar de forma geral o desempenho e a performance da rede durante sua existência, conforme apresenta a tabela 2.2.

Tabela 2.2– Métricas para a qualidade do protocolo.

Camadas e serviços	Métricas Qualidade de Monitoramento
Roteamento e Consulta	- Escalabilidade
Agregação e Fusão de Dados	- Precisão no rastreamento - Atraso no rastreamento



	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consumo de Energia do nó</li> <li>- Controle de pacote (<i>overhead</i>)</li> </ul>
Modelo de mobilidade de alvo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Algoritmo de escalabilidade</li> <li>- Consumo de energia do nó</li> <li>- Adaptabilidade</li> </ul>
Modelo de localização ou colocação do nó	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Precisão no roteamento</li> <li>- Consumo de energia do nó</li> <li>- Cobertura da região</li> <li>- Controle de pacote (<i>overhead</i>)</li> </ul>
Algoritmo de localização	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Precisão no rastreamento</li> <li>- Consumo de energia do nó</li> <li>- Controle de pacote (<i>overhead</i>)</li> </ul>
Algoritmo de escalonamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Algoritmo de escalabilidade</li> <li>- Precisão no Rastreamento</li> <li>- Cobertura da região</li> <li>- Consumo de energia do nó</li> <li>- Controle de pacote (<i>overhead</i>)</li> </ul>
Protocolos MAC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Algoritmo de escalabilidade</li> <li>- Consumo de energia do nó</li> <li>- Controle de pacote (<i>overhead</i>)</li> </ul>

## 2.6 Aplicações em Redes de Sensores sem Fio

Nessa seção será abordado um pouco mais sobre as áreas e algumas aplicações nas quais as redes de sensores sem fio estão sendo utilizadas. Segundo (SOHRABY; MINOLI; ZNATI, 2007), as redes de sensores têm sido utilizadas em diferentes contextos de aplicações, tais como: sistemas de detecção de ameaças nucleares (radiação), biomédicas, detecção de intrusos e monitoramento sísmico.

O foco tem se voltado também para aplicações químicas e biológicas, aplicações de segurança nacional, aplicações militares, aplicações de controle de tráfego, fiscalização do trânsito, vigilância por vídeo, aplicações industriais, de produção, de automação, de controle de processos, gerenciamento de estoque, robótica, aplicações meteorológicas, monitoramento ambiental e vigilância de fronteiras nacionais (CHONG; KUMAR; MEMBER, 2003).

A seguir algumas aplicações que podem utilizar as redes de sensores sem fio:

- Aplicações na área Militar: segurança de pontos críticos; monitoramento de forças inimigas; monitoramento de forças amigáveis e equipamentos; vigilância no campo de batalha; detecção de ataques, nucleares, biológicos ou químicos;
- Aplicações na área Ambiental: monitoramento meteorológico; detecção de incêndios em florestas; detecção de enchentes em rios; agricultura de precisão;
- Aplicações na área da Saúde: monitoramento remoto de dados fisiológicos de pacientes; rastreamento e monitoramento de médicos e pacientes de um hospital; monitoramento e assistência a pacientes idosos;

## 2.7 Redes de Sensores Sem Fio Móveis

As Redes de Sensores Sem Fio podem ser classificadas, quanto à mobilidade em estáticas ou dinâmicas. Nas redes estáticas não há qualquer tipo de mobilidade. Nas redes dinâmicas podemos ter a mobilidade nos nós sensores que monitoram o ambiente, no nó sorvedouro (*sink*) e até mesmo no fenômeno. Ainda é possível que exista mobilidade em dois ou nós três ao mesmo tempo.

As Redes de Sensores Sem Fio Móveis (RSSFMs) recebem esse nome pelo fato de trabalharem com nós sensores que possuem mobilidade. A rede de sensor sem fio móvel pode ser considerada móvel quando passar a conter no mínimo um

nó móvel. Normalmente, quando há somente um nó móvel na rede, esse nó é o *sink*. É possível ainda ter uma rede onde todos os nós sensores possuem mobilidade ou somente alguns nós são móveis e os demais nós sensores são fixos.

Os nós sensores móveis podem se movimentar pelo ambiente que está sendo monitorado. A mobilidade do nó pode ocorrer por dois motivos: através das forças da natureza (vento, correnteza de um rio, entre outras) ou os sensores podem estar acoplados em robôs, pessoas, animais ou até mesmo em objetos.

Uma RSSFM é composta por um conjunto de nós sensores capazes de se mover por conta própria e interagirem com o ambiente físico. Esses nós móveis têm a capacidade de sensoriamento, processamento e comunicam-se com os demais nós estáticos e móveis.

O conceito de Redes de Sensores sem Fio Móveis surgiu nos últimos anos e tem sido muito explorado. Muitos projetos estão sendo desenvolvidos utilizando e explorando as Redes de Sensores Sem Fio Móveis. Embora as Redes de Sensores Sem Fio Móveis estejam no auge, o pesquisador Marc Weiser previu este conceito no início da década de 90 (WEISER, 1991). Com a evolução das Redes de Sensores Sem Fio algumas aplicações passaram a utilizar um nó *sink* ou agentes móveis. Segundo (MUNIR et al., 2007), quando começaram as pesquisas relacionadas à mobilidade, ela foi considerada um problema. Mas com o passar do tempo e com o surgimento das RSSFMs, as quais exploram a mobilidade dos nós, a mobilidade passou a ser considerada uma vantagem em relação às RSSFs compostas por nós fixos, pois a mobilidade pode aumentar o potencial das aplicações.

De acordo com (Liu et al., 2005), a mobilidade tem o potencial de aumentar o tempo de vida da rede e aumentar a capacidade de coletar os dados que estão sendo sensorizados. Segundo (Rahimi et al., 2003), durante a comunicação da rede (comunicação entre os nós), a mobilidade pode possuir atraso no endereçamento local e problemas de latência. A RSSFM possui praticamente as mesmas características existentes nas RSSFs já citados anteriormente na seção de desafios e limitações, porém existem algumas características fundamentais entre nós fixos e nós móveis. Os nós móveis possuem a capacidade de se reposicionar e organizar-se na rede. Outra diferença entre as RSSF e RSSFM é distribuição de dados. Na

RSSF, os dados podem ser distribuídos usando o roteamento fixo ou *flooding*, enquanto na RSSFM é necessário utilizar um roteamento dinâmico, devido a mobilidade dos nós sensores.

A mudança de topologia nas RSSFMs é ainda mais dinâmica com relação à RSSF. Isso ocorre devido à mobilidade dos nós sensores. A natureza dinâmica é refletida na escolha dos protocolos de roteamento da camada MAC e da camada física (*hardware*). Ainda em relação à mobilidade, a estimativa da localização é muito importante para o conhecimento aproximado ou até mesmo exato do local onde se encontra o nó *sink* móvel ou o nó sensor móvel. Em algumas aplicações, o nó móvel (normalmente o nó *sink*) pode possuir uma bateria recarregável, pois quando há necessidade de troca de bateria, o nó *sink* se desloca até um ponto onde encontra as novas baterias ou até mesmo o *sink* móvel pode ser trocado por outro (MUNIR et al., 2007).

Os desafios para desenvolver aplicações voltadas para RSSFMs incluem: implantação, localização, auto-organização, navegação e controle, consumo de energia, cobertura, manutenção e processamento de dados. As RSSFMs podem ser aplicadas a diferentes domínios de aplicações, tais como: domínio industrial, comercial, militar, e entre muitos outros domínios (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

Normalmente em um monitoramento ambiental, por exemplo, feito em áreas de desastres, a deposição dos nós sensores móveis deve ser feita de forma manual, utilizando os nós móveis após a implantação para proporcionar a área de cobertura requerida. Na vigilância militar e no monitoramento (ambiental ou militar), os nós móveis podem colaborar e até mesmo tomar decisões baseadas no alvo (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). Com a utilização de nós sensores móveis na rede torna-se possível atingir um grau mais elevado de cobertura e conectividade em relação aos nós sensores estáticos. Também é possível que os nós sensores se movam ou planejem com antecedência uma forma adequada de sair/desviar de obstáculos presentes nas regiões obstruídas (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

A grande parte dos protocolos que foram desenvolvidos para a RSSF e que atenderam a mesma pode possuir um desempenho baixo, ou até mesmo não

atender totalmente às necessidades das aplicações de RSSFM, devido os nós possuírem mobilidade e as soluções propostas não se adaptarem para trabalhar com nós móveis. Por esse motivo, alguns pesquisadores reavaliam seus protocolos e os modificam para atender às necessidades das RSSFMs. As RSSFMs demonstram possuir um melhor desempenho quando comparadas com as RSSFs. Uma das vantagens das RSSFMs em relação às RSSFs é o uso de energia, pois nas RSSFMs não existem os problemas de *energy-hole* encontrados nas RSSFs.

As RSSFMs possuem praticamente as mesmas restrições que as RSSFs. Porém, além das restrições de energia, processamento e armazenamento de cada nó sensor, ao desenvolver aplicações voltadas para RSSFM é preciso levar em consideração a mobilidade do nó sensor, a orientação dos sensores (trajetória), a mudança de topologia dinâmica que ocorre devido à mobilidade dos nós móveis, a velocidade do nó sensor e a área de cobertura. Analisando todos esses fatores, é possível desenvolver soluções voltadas para RSSFMs que sejam eficientes, robustas e que ajudem os nós sensores a economizar energia e assim, aumentar o tempo de vida dessas redes.

## **2.8 Comparação entre Redes de Sensores Sem Fio x Redes de Sensores Sem Fio Móveis**

Esta seção aborda de uma forma sucinta uma comparação entre as Redes de Sensores Sem Fio e Redes de Sensores Sem Fio Móveis. As características das redes são muito similares, porém as RSSFs são compostas por nós sensores estáticos, tipicamente com capacidades de energia e processamento restritas e, dependendo do ambiente onde são depositados, os nós se tornam descartáveis. Por exemplo, para nós sensores depositados em ambientes de difícil acesso, não há a possibilidade de trocar um nó ou mesmo a bateria de alguns deles. A topologia da rede pode sofrer pouca alteração, por exemplo, conforme os nós sensores morrem, ou de acordo com o roteamento utilizado na entrega dos dados. A distribuição dos dados também é feita de forma diferenciada, pois todos os nós possuem uma

posição fixa, então pode ser utilizado o roteamento fixo, por exemplo, através de inundação.

Uma RSSFM é composta de nós sensores, capazes de se moverem no ambiente monitorado, onde podem se comunicar entre si (nós móveis) e também com os nós estáticos. Além dessa diferença, do nó se mover, os nós sensores móveis podem possuir um maior processamento e consumo energético, muitas vezes por estarem acoplados a robôs (terrestres, aéreos, aquáticos) de médio/grande porte. Em alguns casos é possível até trocar a bateria do nó sensor ou até mesmo o nó, dependendo do ambiente ao qual a aplicação está servindo (MUNIR et al., 2007).

Diferente das RSSFs que possuem uma topologia pouco alterada, salvo os casos já citados, a topologia das RSSFMs muda constantemente, o que dificulta e aumenta a complexidade do desenvolvimento de novas soluções de roteamento para esse tipo de rede. A atualização constante dos nós que possuem mobilidade também é um fator que a diferencia das RSSF, pois devido os nós utilizarem os modelos de mobilidade para representar os movimentos do mundo real, estão em constante mudança de direção e trajetória.

Uma das características que diferenciam as redes de sensores sem fio das redes de sensores sem fio móveis, tipicamente, é a mobilidade dos nós sensores, o que acaba diferenciando quanto a: topologia dinâmica, localização, cobertura da rede, consumo de energia, roteamento dinâmico. Devido à mobilidade dos nós sensores é possível suavizar a coleta de dados na rede e aumentar a taxa de entrega dos dados coletados para o nó *sink*.

## 2.9 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os principais fundamentos da área de RSSF e de RSSFM, suas características, limitações e aplicações. As RSSFs são elementos importantes, responsáveis pelo sensoriamento do ambiente e percepção de fenômenos de importância para as aplicações. Os requisitos apresentados neste

capítulo precisam ser observados para desenvolver aplicações e protocolos, sejam para Redes de Sensores Sem Fio ou Redes de Sensores Sem Fio Móveis.

Foram apresentadas também as RSSFMs, redes essas que possuem características similares às RSSFs, porém utilizam os nós sensores móveis e modelos de mobilidade para auxiliar em aplicações de monitoramento ambiental, rastreamento de alvo, entre outros tipos. Observamos também que, ao desenvolvermos as aplicações voltadas para a RSSF e a RSSFM, é de extrema importância à otimização do consumo de energia.

# Capítulo 3

## MODELOS DE MOBILIDADE

---

O capítulo tem como objetivo descrever os modelos de mobilidade mais importantes para representar os movimentos dos nós sensores móveis do mundo real em ambientes de simulação. Os modelos de mobilidade são projetados para descrever o padrão de movimento dos nós sensores móveis, sendo: sua localização, velocidade e aceleração, que mudam ao longo do tempo (BAI; HELMY, 2003). Os modelos de mobilidade podem ser utilizados por redes de sensores sem fio móveis (RSSFMs), redes ad hoc móveis (MANETs) e redes veiculares (VANETs).

Os modelos de mobilidade são utilizados para reproduzir/simular os movimentos de carros, pessoas, animais, robôs (aquáticos, terrestres, aéreos), entre outros elementos do mundo real, considerando diversos aspectos, como a mudança na velocidade e direção do nó. É preciso considerar também que as mudanças citadas ocorrem periodicamente.

De acordo com (COOPER et al., 2009) (VASANTHI et al., 2011) os modelos de mobilidade podem ser divididos em duas categorias: Entidade (*Entity*) e Grupo (*Group*), descritas a seguir.

- Entidade: nos modelos de desta categoria de mobilidade cada nó sensor se movimenta pelo ambiente de forma independente dos demais nós contidos na rede.
- Grupo: nos modelos desta categoria os nós sensores são organizados por grupos e o padrão de movimento dos nós pertencente ao grupo será definido por um único nó, denominado nó líder de grupo.



Os modelos de mobilidade podem possuir restrições e limitações. Assim, a mobilidade do nó sensor pode ser limitada pela aceleração, pela velocidade e pela mudança de direção. De acordo com (BAI; HELMY, 2003), uma das características que os modelos de mobilidade possuem é a dependência temporal e a dependência espacial. Na dependência espacial há uma dependência de velocidade ou direção entre dois ou mais nós, dependências estas que podem se aproximar mais de cenários realistas.

Por exemplo, considerando que dois veículos estão em uma estrada, para evitar o acidente, a velocidade de um veículo não deve ultrapassar a velocidade do veículo que está à sua frente, ou seja, dois nós se movem na mesma direção, há alta dependência espacial.

Na dependência temporal, o nó depende da velocidade anterior para calcular a velocidade atual. Assim, as velocidades de um único nó estão correlacionadas.

Os modelos de mobilidade *Random Walk* e *Random Waypoint* são modelos sem memória e, portanto são incapazes de suportar a característica de dependência temporal.

A dependência espacial ocorre quando temos uma dependência de velocidade ou direção entre dois ou mais nós, dependências estas que podem se aproximar mais de cenários realistas. A seguir, serão apresentados alguns dos modelos mais utilizados para a avaliação de algoritmos de roteamento para RSSFMs, MANETs e VANETs.

### 3.1 *Random Walk*

O modelo de mobilidade *Random Walk* (também conhecido por *Brownian Motion*) foi proposto inicialmente para simular/reproduzir os movimentos de partículas em física. O comportamento do modelo de mobilidade se propõe a imitar o movimento de forma inesperada em nós móveis, assim como em partículas (CAMP; BOLENG; DAVIES, 2002).

No modelo *Random Walk*, os movimentos dos nós dependem dos parâmetros de direção, velocidade e intervalo de tempo ou tempo de pausa, sendo o tempo de

pausa o intervalo em que o nó permanece estático (BRESLAU et al., 2000). A movimentação dos nós é simulada da seguinte forma: cada nó seleciona de forma aleatória sua direção  $[0, 2\pi]$  no intervalo de tempo  $t$  (*time pause t*). Após selecionar a direção, uma nova velocidade é selecionada também de forma aleatória  $[0, V_{max}]$ .

O *Random Walk* é um modelo de mobilidade sem memória, ou seja, o modelo não utiliza a informação da localização ou velocidade usada no intervalo de tempo anterior para decidir a nova direção para qual o nó irá se mover. Por exemplo, a velocidade atual do nó não necessita da velocidade anterior para ser selecionada e a escolha da velocidade futura do nó também será independente da velocidade atual (BAI; HELMY, 2003). Esse modelo não reproduz um comportamento de movimentação de muitas aplicações do mundo real, por não possuir memória e nem tempo de pausa, por possibilitar mudança brusca e aceleração repentina.

Objetos no mundo real, contudo tendem a realizar mudança suave e aceleração que cresce e decresce de forma incremental. A figura 3.1 ilustra o movimento de um nó móvel usando o modelo *Random Walk* iniciado a partir do centro da área de simulação. No gráfico plotado, a coluna x representa a área de simulação e a coluna y representa a posição (CAMP, BOLENG; DAVIES, 2002).

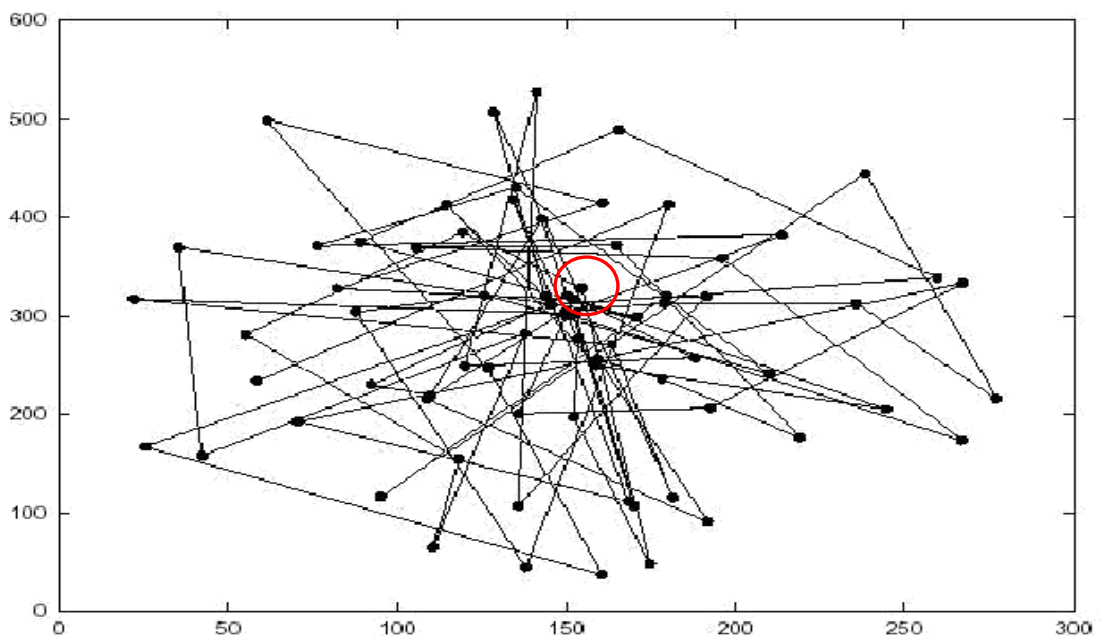


Figura 3.1– Representação de um nó executando o modelo *Random Walk*  
(CAMP; BOLENG; DAVIES, 2002)

### 3.2 *Random Waypoint*

O modelo de mobilidade *Random Waypoint* foi proposto por (BROCH; MALTZ; JOHNSON, 1998) e é atualmente o mais utilizado para a avaliação de protocolos de roteamento em RSSFM e MANETs devido à sua simplicidade.

A movimentação dos nós que utilizam esse modelo é feita de forma que cada nó seleciona de forma aleatória uma localização dentro do campo de simulação, sendo essa localização seu destino. Após estabelecer o destino, o nó seleciona a velocidade constante escolhida de forma aleatória e uniforme dentro do intervalo  $[0, V_{max}]$ , onde o parâmetro  $V_{max}$  é a velocidade máxima permitida. Quando o nó chegar ao ponto selecionado (destino), o mesmo irá permanecer estático (parado) por um intervalo de tempo definido como tempo de pausa  $T_{pause}$  (BRESLAU et al., 2000). No caso do valor do tempo de pausa ser igual a zero ( $T_{pause} = 0$ ), a mobilidade é contínua.

Após o término do tempo de pausa, o nó repete o processo até o término da simulação.

Nesse modelo, a escolha do destino e velocidade de um nó é feita de forma independente dos demais nós da rede, ou seja, cada nó escolhe seu destino e velocidade a cada intervalo de tempo. Os parâmetros que determinam o comportamento da mobilidade dos nós no modelo *Random Walk* são o tempo de pausa ( $T_{pause}$ ) e a velocidade máxima  $V_{max}$ . No caso de haver nós com velocidade máxima baixa e tempo de pausa longo, a topologia da rede tende a se tornar estável. Por outro lado, se os nós têm velocidade máxima alta e tempo de pausa curto, a topologia da rede tende a se tornar dinâmica. Assim, alterando os dois parâmetros, é possível gerar diversos cenários com diferentes mobilidades.

O modelo *Random Waypoint*, assim como o *Random Walk*, é um modelo sem memória, ou seja, não necessita saber a velocidade anterior para calcular a nova velocidade/direção. A figura 3.2 ilustra o movimento de um nó móvel usando o modelo *Random Waypoint*, iniciado a partir de um ponto escolhido aleatoriamente na

área de simulação. No gráfico plotado, a coluna x representa a área de simulação e a coluna y representa a posição (CAMP, BOLENG; DAVIES, 2002).

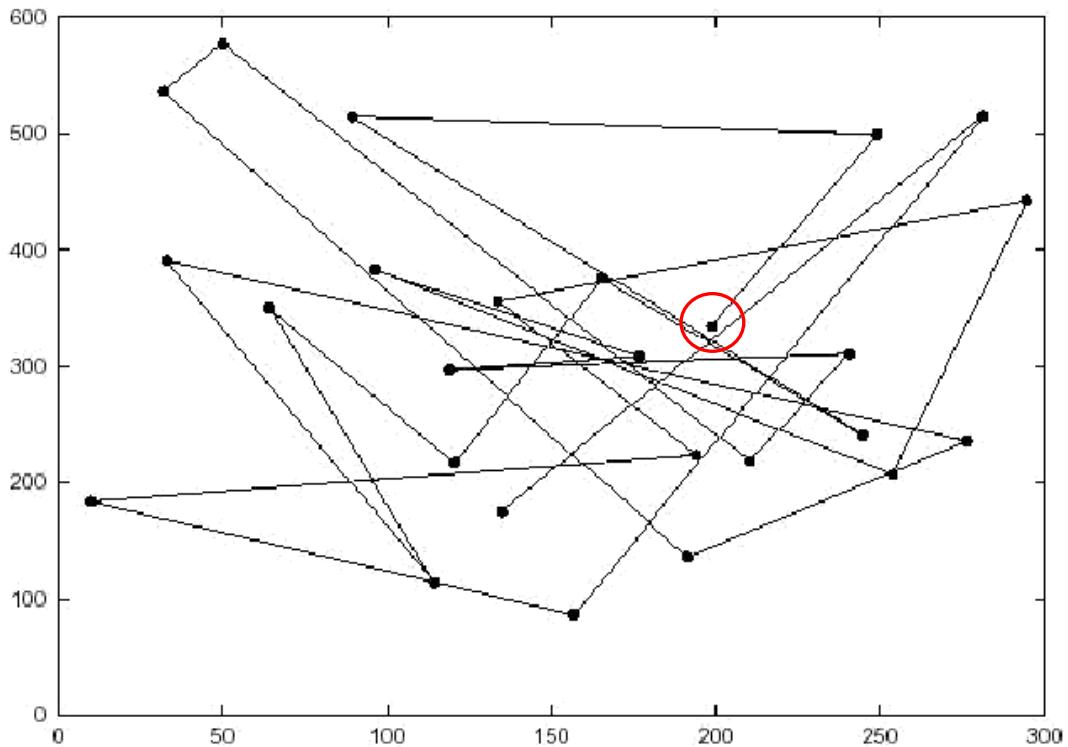


Figura 3.2– Representação de um nó executando o modelo *Random Waypoint* (CAMP; BOLENG; DAVIES, 2002)

### 3.3 *Random Direction*

O modelo de mobilidade *Random Direction*, proposto por (ROYER; MELLIAR-SMITH; MOSERT, 2001), foi introduzido para superar um problema que estava ocorrendo nas simulações que utilizavam o modelo *Random Waypoint*.

No modelo *Random Waypoint*, observou-se que o número médio de vizinhos em um determinado nó periodicamente aumentava e diminuía na medida em que a simulação avançava. O problema ocorria quando os nós mudavam frequentemente de velocidade.

De acordo com (ROYER; MELLIAR-SMITH; MOSERT, 2001), essa variação ocorre devido às características inerentes do modelo de mobilidade, pois, como o nó tem o dever de selecionar um destino na área de simulação, é mais provável que o mesmo escolha percorrer na direção em que existe um maior número de destinos que possam ser escolhidos.

Tipicamente o centro do ambiente monitorado contém uma concentração maior de nós, sendo assim o nó se predispõe a escolher os destinos que estão mais próximos do centro da área de simulação ou até mesmo que passe pelo centro, o que pode fazer com que os nós convirjam mais para o centro e depois se dispersem. Essas modificações são denominadas densidades de ondas, que são as flutuações no número médio de vizinhos durante um intervalo de tempo.

O comportamento do modelo de mobilidade *Random Direction* funciona com as escolhas dos seguintes parâmetros: cada nó sensor seleciona de forma aleatória um destino (coordenadas) no campo monitorado e um ângulo de movimento uniforme aleatório entre  $[0, 2\pi]$  é atribuído para cada nó sensor. Em seguida, seleciona-se a velocidade  $[V_{min}, V_{max}]$  de forma aleatória e uniforme.

Após o nó selecionar o ângulo de movimento e a velocidade, o mesmo percorre seu trajeto até o limite da rede (borda). Ao atingir o limite da rede (borda), um novo ângulo de movimento entre  $[0, 180^\circ]$  e uma nova velocidade serão selecionados. O modelo de mobilidade *Random Direction* faz com que os nós sejam forçados a ocupar de forma uniforme o campo monitorado durante um período de tempo, sendo então, as ondas de densidade reduzidas (COOPER et al., 2009).

O modelo de mobilidade *Random Direction* tem como característica positiva ser uma variação do modelo *Random Waypoint*, exceto pelo problema de ondas de densidade e por manter a distribuição uniforme das rotas selecionadas por cada nó sensor. O modelo de movimento não é um modelo considerado realístico, pois a distância média definida entre os nós é considerada alta em relação a outros modelos (PANDA; MOHAPATRA, 2009).

A figura 3.3 ilustra o movimento de um nó móvel usando o modelo *Random Direction*, iniciado a partir do centro da área de simulação. No gráfico plotado, a coluna x representa a área de simulação e a coluna y representa a posição (CAMP, BOLENG; DAVIES, 2002).

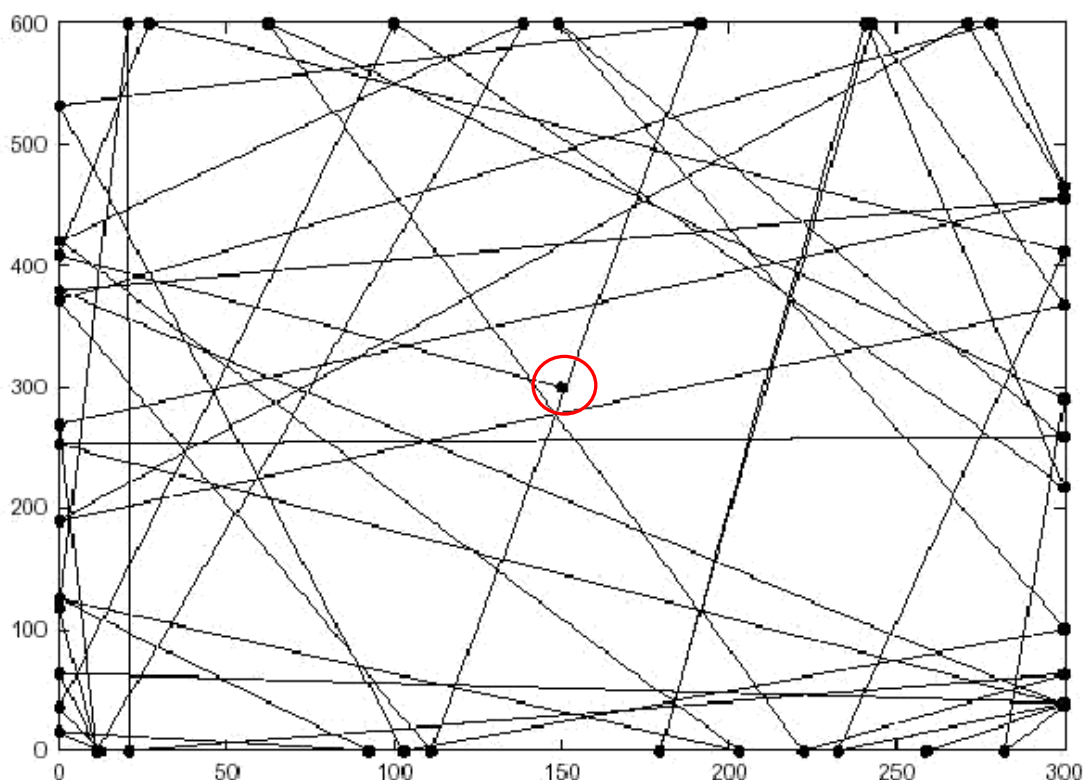


Figura 3.3– Representação de um nó executando o modelo *Random Direction*(CAMP; BOLENG; DAVIES, 2002)

### 3.4 Impacto dos Modelos de Mobilidade nas aplicações de integração do INCT-SEC

O Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Sistemas Embarcados Críticos (INCT-SEC), possui um grupo de trabalho voltado para o desenvolvimento de soluções que visam a integração e aplicações em benefícios de áreas estratégicas do desenvolvimento brasileiro.

Algumas dessas aplicações desenvolvidas por pesquisadores integrados ao INCT-SEC fazem uso dos veículos móveis (terrestres, aéreos e aquáticos) visando desenvolver aplicações que possam ser utilizadas em áreas como segurança, proteção, prevenção, agricultura de precisão, entre outras. A solução proposta nesse trabalho visa integrar as redes de sensores sem fio e os veículos (terrestres e

aéreos) desenvolvidos pelo INCT-SEC, com o intuito de auxiliar no projeto de monitoramento de infraestruturas críticas. Para representar os padrões de movimentos desses veículos (terrestres e aéreos), se faz necessário o uso dos modelos de mobilidade, os quais podem aumentar o desempenho das aplicações e ainda auxiliar na coleta de dados.

A solução proposta utiliza os modelos *Random Direction* e *Random Waypoint*. O *Random Direction* foi escolhido por representar os movimentos borda a borda na rede, assim é possível que um VANT previsto no projeto, execute o trajeto (monitorando ambiente) garantindo que toda a rede será coberta. O *Random Waypoint* foi escolhido para representar os movimentos dos veículos terrestres (robôs de pequeno e médio porte), porque eles vão executar um trajeto totalmente aleatório no ambiente monitorado, devido à grande quantidade de nós sensores espalhados no ambiente, eles não necessitam percorrer um trajeto pré-definido.

A solução proposta neste trabalho será utilizada para o monitoramento de infraestruturas críticas, do qual faz parte de um projeto que está relacionado ao INCT-SEC que trabalha com monitoramento e proteção de pontos críticos. A infraestrutura crítica escolhida para aplicar a solução foi uma hidrelétrica. Onde os nós sensores fixos farão o monitoramento próximo à hidrelétrica, os nós móveis serão utilizados para monitorar o ambiente interno e externo da região da hidrelétrica e por fim o VANT fará o monitoramento aéreo, responsável também por coletar os dados dos nós sensores espalhados no ambiente.

Nossa solução não se aplica somente para a aplicação de infraestrutura crítica, podemos utilizar nossa solução também no monitoramento ambiental, ou ainda no rastreamento de um alvo, onde a cada momento em que o alvo passar pelo nó sensor será acionado e considerado uma ocorrência de evento.

### 3.5 Considerações Finais

Nesse capítulo são apresentados os modelos de mobilidade mais utilizados para representar os movimentos de pessoas, animais, robôs e veículos autônomos (terrestres, aquáticos e aéreos) em ambientes de simulação.

Dentre os modelos que foram apresentados, destaca-se o modelo *Random Direction*, que será utilizado pela solução para representar (simular) os movimentos do nó *sink*, o qual irá representar um veículo autônomo aéreo em aplicações, por exemplo, de monitoramento ambiental, em que receberá os dados coletados pelos nós sensores (fixos e veículos autônomos terrestres).

O outro modelo que será utilizado no trabalho é o *Random Waypoint*. Esse modelo será utilizado pelos nós sensores móveis terrestres, representando veículos autônomos terrestres que percorrem o ambiente monitorado, podendo ser utilizados como nós de interconexão de sub-redes, ou ainda como mulas de dados.

No próximo capítulo são apresentadas soluções de roteamento para RSSFs e RSSFMs.



# Capítulo 4

## PROCOLOS DE ROTEAMENTO PARA REDES DE SENSORES MÓVEIS

---

---

Este capítulo apresenta uma síntese dos protocolos de roteamento para redes de sensores sem fio e redes de sensores sem fio móveis. Os algoritmos de roteamento têm como objetivo principal determinar a construção de rotas utilizando o mínimo possível de dissipação de energia com o máximo de confiabilidade a fim de garantir a entrega eficiente dos dados coletados pelos nós sensores (fixos ou móveis) até o nó *sink* ou uma estação base.

Garantir os parâmetros citados acima e muitos outros (dependendo da aplicação) nos algoritmos de roteamento é um grande desafio. O algoritmo pode se tornar ainda mais complexo, dependendo, por exemplo, da densidade dos nós, do ambiente em que os nós são depositados, da mobilidade, já que a cada momento um nó sensor pode estar em uma posição diferente daquela em que enviou os dados.

Os algoritmos de roteamento para as RSSFs que utilizam somente nós fixos possuem uma complexidade menor e conseguem definir a topologia da rede com uma maior facilidade, pois não necessitam da confirmação da posição de cada nó sensor a cada intervalo de tempo, já que os nós são estáticos e não possuem mobilidade. Diferentemente dos algoritmos para as RSSFs, os algoritmos utilizados em RSSFMs têm a árdua tarefa de atualizar a topologia rede utilizando o mínimo de comunicação (transmissões) para que possa utilizar a mobilidade dos nós ou do *sink* a favor da execução de um roteamento mais eficiente dos dados coletados na rede (MUNIR et al., 2007).

O roteamento dos dados coletados é um dos desafios de RSSF e de RSSFM, devido às diversas características já citadas anteriormente no texto. Algumas das características que distinguem as RSSFs e RSSFMs das redes convencionais e das redes ad hoc sem fio (AKKAYA; YOUNIS, 2005) (PERKINS, 2000) são:

- Impossibilidade de utilizar endereçamento global na deposição de uma grande quantidade de nós sensores. As soluções clássicas baseadas em IP não podem ser aplicadas nas RSSFs e nas RSSFMs.
- As aplicações de RSSF e RSSFM necessitam que os dados coletados no campo monitorado sejam encaminhados para um nó sorvedouro, diferentemente das redes convencionais de comunicação.
- Pode haver redundância nos dados enviados para o nó sorvedouro, já que mais de um nó pode sensoriar a ocorrência de um evento. Assim, é possível explorar essa redundância utilizando correlação espacial, fusão de dados, entre outros, através de algoritmos de roteamento que visam reduzir o consumo energético da rede.
- Os nós sensores tipicamente possuem recursos limitados, exigindo assim um gerenciamento cauteloso de seus recursos.

Devido a essas e outras características das RSSFs e também das RSSFMs, diferentes protocolos foram desenvolvidos visando solucionar o problema de roteamento nas RSSFs. (SCHURGERS; SRIVASTAVA, 2001)(HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000) (INTANAGONWIWAT; GOVINDAN; ESTRIN, 2000) (INTANAGONWIWAT et al., 2003)(BRAGINSKY; ESTRIN, 2002) (CHU; HAUSSECKER; ZHAO, 2002)(MANJESHWAR; AGRAWAL, 2001)(YAO; GEHRKE, 2002)(SHAH; RABAEY, 2002)(SADAGOPAN; KRISHNAMACHARI; HELMY, 2003).

Os protocolos de roteamento normalmente são classificados como *data-centric* (centralizado em dados) e hierárquico, e ambos podem apresentar diferentes conceitos em suas soluções, tais como agregação de dados, fusão de dados,

correlação espacial ou temporal, entre outros. Além de o roteamento desenvolver soluções para a RSSF e para a RSSFM, é preciso ainda se preocupar com a disseminação dos dados coletados pelos nós sensores (fixos ou móveis), garantindo pelo menos que o mínimo de dados seja roteado pela rede e ainda garantir a confiabilidade desses dados roteados. Existem pelo menos três tipos de técnicas que ajudam a garantir uma confiabilidade: agregação de dados, correlação (espacial ou temporal) e fusão de dados. As mesmas são apresentadas nas próximas seções.

Em (LAMBROU; PANAYIOTOU, 2009) os protocolos de roteamento para RSSF e RSSFM foram classificados em:

- Proativos: são protocolos de roteamento similares aos protocolos de rede cabeada, pois o percurso é conhecido antes mesmo de ser requisitado, ou seja, os nós podem encaminhar os dados para o *sink* sem ocorrer a necessidade do envio de mensagens de controle com intuito de descobrir a rota (LAMBROU; PANAYIOTOU, 2009).
- Reativos ou sob demanda (*on demand*): são protocolos de roteamento que, ao contrário dos protocolos proativos, determinam a rota somente quando necessário, ou seja, quando ocorre uma comunicação ou quando ocorre um evento. Esse tipo de protocolo remove a necessidade de atualizações constantes de rota para as rotas que não estão em uso no momento. Mas por outro lado, pode causar um atraso no início da comunicação, pois a rota precisa ser descoberta (LAMBROU; PANAYIOTOU, 2009).
- Híbridos: são protocolos que visam combinar o melhor das abordagens citadas (proativo e reativo) em um mesmo protocolo. Um exemplo de protocolo que utiliza essa combinação é o ZoroMSN (NASSER; AL-YATAMA; SALEH, 2011).

De uma forma mais geral, o roteamento dos dados coletados, seja nas RSSFs ou nas RSSFMs, pode ser dividido em roteamento plano, hierárquico e baseado na localização (AL-KARAKI; KAMAL, 2004). As próximas seções abordam de forma resumida esses roteamentos.

No roteamento plano, todos os nós presentes no campo monitorado possuem papéis/ funcionalidades idênticos, ou seja, não existe nenhum nó líder que poderá decidir o comportamento dos demais nós da rede.

No roteamento hierárquico, pode haver nós sensores que desempenhem diferentes funcionalidades na rede. Por exemplo, um nó sensor no campo monitorado fica responsável por receber os dados dos demais nós da rede e encaminhá-los até o nó sorvedouro.

No roteamento baseado em localização, exploram-se as posições dos nós sensores com intuito de construir rotas menores para auxiliar no encaminhamento dos dados coletados pelos nós sensores (AL-KARAKI; KAMAL, 2004).

#### 4.1 Roteamento Centralizado em Dados (*Data-Centric*)

Devido à grande quantidade de nós sensores envolvidos em uma mesma coleta de dados, torna-se impossível permitir a associação de identificadores (ID) globais a cada um dos nós sensores distribuídos na rede, tornando o acesso a um conjunto específico de nós cada vez mais complexo. Desse modo, cada nó sensor encaminha seus dados para o nó *sink*, o que gera uma redundância no tráfego da rede. Esse tipo de abordagem é ineficiente e possui um alto custo energético (alto consumo de energia), restringindo ainda mais o uso nas RSSFs e RSSFM.

Os protocolos que utilizam a abordagem centralizada em dados buscam agregar os dados redundantes gerados em múltiplos nós sensores fontes (detectores de evento) ao longo do encaminhamento dos dados coletados até o nó *sink* com intuito de reduzir o número de transmissões e assim economizar energia em toda a rede. (KRISHNAMACHARI; ESTRIN; WICKER, 2002)(AL-KARAKI; KAMAL, 2004).

O primeiro protocolo proposto apresentando a negociação entre os nós sensores com intuito de eliminar a redundância e economizar energia foi o SPIN (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000)(HEINZELMAN; KULIK; BALAKRISHNAN, 1999). Em (INTANAGONWIWAT; GOVINDAN; ESTRIN, 2000), foi proposto o *Direction Diffusion (DD)*, que posteriormente tornou-se referência na

abordagem de protocolos centralizados em dados. Após o *DD*, novos protocolos foram projetados seguindo conceitos similares (SCHURGERS; SRIVASTAVA, 2001) (BRAGINSKY; ESTRIN, 2002).

## 4.2 Roteamento Plano

Os protocolos de roteamento plano executam a entrega dos dados coletados pelos nós sensores através de múltiplos saltos (*multi hop*). Nessa abordagem, todos os nós sensores sabem a quantidade de saltos a que se encontram do nó destino (sorvedouro). Em RSSF e RSSFM o valor do salto é o tamanho do raio de comunicação do nó sensor.

Os protocolos que utilizam o roteamento plano tipicamente são usados em RSSF que possuem topologia plana. Nessa topologia, os nós sensores são homogêneos, ou seja, possuem capacidades idênticas e cada nó sensor possui a mesma funcionalidade a fim de colaborar na execução da tarefa de coleta de dados no campo monitorado (AL-KARAKI; KAMAL, 2004).

## 4.3 Roteamento Hierárquico

Os protocolos de roteamento que utilizam a abordagem hierárquica com apenas um nível de hierarquia podem acabar sobrecarregando o nó *sink*. Caso ocorra um grande aumento de nós na rede, essa sobrecarga pode afetar o funcionamento por completo da rede, gerando atrasos de comunicação e aumento do tráfego de pacotes na rede devido às rotas inadequadas.

Uma forma de fazer com que o sistema (rede) suporte uma carga adicional e ainda seja capaz de cobrir a área extensa sem comprometer a qualidade no serviço é a utilização de mecanismos de *clustering*. Nesses mecanismos, em cada região onde ocorre um evento, um nó é determinado como *cluster-head* ou nó líder e recebe os dados de seus vizinhos.

Os protocolos de roteamento baseado em hierarquia prezam, de forma geral, pelo consumo homogêneo de energia entre os nós na rede. Dessa forma, os nós sensores se agrupam formando *clusters* e trocam informações com um nó eleito líder de grupo, visando assim facilitar a agregação ou fusão dos dados coletados, com o intuito de reduzir o número de mensagens e pacotes de dados coletados que trafegam pela rede.

De acordo com (LE-TRUNG et al., 2009), a grande maioria das arquiteturas de disseminação de dados em RSSF e RSSFM são hierárquicas e podem ser:

- Baseadas em árvore: nessa arquitetura, os nós são organizados em árvores, onde os dados coletados são transmitidos até o nó *sink* através dos nós que possuem uma quantidade menor de saltos até o nó raiz (*sink*), ou seja, através dos nós intermediários;
- Baseadas em grade (*grid*): nessa arquitetura, os nós sensores são organizados em forma de grade e eles são considerados concentradores de dados de uma região (grade) fixa;
- Baseadas em cadeia: nessa arquitetura, os nós têm como objetivo principal encaminhar apenas os dados de seus vizinhos mais próximos;
- Baseadas em *cluster*: nessa arquitetura, um conjunto de nós formam grupos e elegem um nó líder para gerenciar os nós membros.

Os protocolos de roteamento que utilizam a arquitetura baseada em *clusters* adotam como forma de eleger o nó líder ou ainda *cluster-head*, a quantidade de energia que cada nó sensor membro do grupo possui armazenada. Normalmente, o nó com um maior nível energético armazenado será eleito o *cluster-head* (LIN; GERLA, 1997) (SRIKANTH; BABU, 2009).

O LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*), proposto em (INTANAGONWIWAT; GOVINDAN; ESTRIN, 2000), foi o primeiro protocolo que visou à formação de *clusters*. A abordagem de eleição do nó *cluster-head* era baseada na força do sinal recebido e estes eram utilizados como roteadores pelo nó

*sink*. A comunicação com o nó *sink* é feita somente pelos nós eleitos *cluster-heads*. Essa era uma forma de economizar energia dos demais nós sensores da rede. O conceito do LEACH serviu de inspiração para que outros modelos de roteamento hierárquico pudessem ser desenvolvidos (MANJESHWAR; AGRAWAL, 2001)(GUPTA; RIORDAN; SAMPALLI, 2005)(LINDSEY; RAGHAVENDRA, 2002)(NING; CASSANDRAS, 2007).

#### 4.4 Roteamento Baseado na Localização

Os protocolos de roteamento que utilizam a abordagem de localização visam explorar a localização geográfica (coordenadas, posição) dos nós sensores e têm o intuito de auxiliar no roteamento dos dados coletados. A distância entre os nós vizinhos pode ser estimada de duas maneiras: baseada no sinal de rádio recebido ou obtida utilizando um hardware de localização, por exemplo, o GPS (*Global Position System*) (AL-KARAKI; KAMAL, 2004).

Muitos protocolos de roteamento para RSSFs e RSSFMs necessitam saber a localização dos nós sensores. Na maioria, essa informação de localização do nó sensor é de extrema importância para que possa ser descoberta a distância entre dois nós sensores a fim de obter uma estimativa do consumo de energia dos nós.

Devido às RSSFs e às RSSFMs não possuírem um esquema de endereçamento do tipo endereços de IP e os nós sensores estarem espalhados em uma determinada região, a informação de localização pode ser utilizada para auxiliar no roteamento dos dados a fim de obter uma forma mais eficiente em termos de energia.

Em uma rede onde se conhece a região a ser monitorada e é possível usar a informação de localização dos nós sensores, há possibilidade de efetuar consultas apenas para uma região em particular, reduzindo assim significativamente o número de transmissões. Alguns dos protocolos baseados em localização foram desenvolvidos primeiramente para redes *AdHoc* móveis (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001) (RODOPLU; MENG, 1999) (LI; HALPEM, 2001), porém alguns

desses protocolos podem ser aplicados em redes de sensores onde exista pouca mobilidade ou nenhuma mobilidade dos nós sensores.

O uso de GPS nas RSSFs e nas RSSFMs é mais um desafio, pois existe a limitação do GPS funcionar apenas em ambientes externos e sem obstrução do sinal, além do dispositivo possuir um alto custo, inviabilizando o uso em nós pequenos e de baixo custo. Existem ainda outras técnicas de localização baseadas em trilateração ou multilateração, porém não oferecem uma precisão eficiente para serem utilizadas em RSSFs (KRISHNAMACHARI; ESTRIN; WICKER, 2002).

Em (OLIVEIRA; BARRETO; FONTAO, 2010) (BOUKERCHE et al., 2007), foram propostas técnicas de localização que necessitam apenas de dois pontos de referência e que não necessitam da utilização de dispositivo de GPS. Existem outras soluções baseadas em arranjos adaptativos de antenas (KUCUK et al., 2008).

## 4.5 Agregação de Dados

A agregação de dados é uma técnica, frequentemente implementada nos protocolos de roteamento, seja para a RSSF ou para a RSSFM. O funcionamento da técnica de agregação acontece da seguinte forma: quando ocorre um evento ou o nó *sink* solicita algum tipo de informação, todos os nós que sentiram o evento ou receberam uma requisição de informação vão enviar os dados para o nó sorvedouro, passando por vários nós.

Quando temos vários nós enviando a informação através dos nós intermediários, podemos aplicar técnicas de agregação de dados com o intuito de reduzir a quantidade de dados enviados na rede e otimizar a escolha de rotas, aumentando a longevidade da rede em termos de consumo de energia.

As técnicas de agregação de dados podem incluir a aplicação de média, mediana e valor máximo sobre dados resultantes da agregação. O tipo da técnica a ser escolhida vai depender do tipo de aplicação que está sendo usada (NAKAMURA; LOUREIRO; FRERY, 2007).

As técnicas de agregação podem ser aplicadas dentro dos *clusters* e/ou durante o roteamento dos pacotes de dados coletados pelos nós sensores. Quando



ocorre esse último processamento, damos o nome de *in-network*, pelo simples fato da agregação ocorrer entre o nó de origem e o nó de destino (*sink*) (FASOLO et al., 2007).

Existem duas abordagens na agregação de dados:

- Agregação sem redução de tamanho: esse processo executa a concatenação dos dados. Como consequência, é possível economizar no *overhead* de pacotes, porém o tamanho dos dados contidos nos pacotes roteados não será diminuído. Por exemplo, um nó agregador pode receber diferentes tipos de informação, como temperatura e umidade e enviá-las todas numa mesma mensagem (FASOLO et al., 2007);
- Agregação com redução de tamanho: nesse processo, os dados vindos de diferentes origens são combinados e comprimidos a fim de reduzir a quantidade de informação enviada pela rede. Esse processo só é possível quando os dados recebidos forem do mesmo tipo. Por exemplo: o nó agregador recebe duas ou mais informações de temperatura. Nesse caso, pode ser efetuada a média ou valor mínimo/máximo (FASOLO et al., 2007);

## 4.6 Soluções de Roteamento

As técnicas de roteamento de dados coletados na RSSFM são praticamente as mesmas que foram apresentadas anteriormente no texto. A única diferença é que, quando se trabalha com mobilidade, deve-se considerar que a cada intervalo de tempo o nó sensor estará em uma posição geográfica diferente da anterior.

Muitos dos algoritmos que são desenvolvidos para trabalhar com RSSF podem não ser utilizados para atender às necessidades de RSSFM, que possuem os mesmos desafios das RSSF, tais como: processamento, armazenamento, consumo de energia do nó sensor e ainda o controle de topologias dinâmicas, trajetória dos nós sensores e a alta taxa de perda de pacotes de dados durante a

comunicação da rede. Esses desafios aumentam a complexidade para desenvolver uma solução voltada a atender as aplicações de RSSFM.

Nessa seção serão apresentadas algumas soluções que foram desenvolvidas visando atender às necessidades das RSSFMs, já que muitos dos protocolos de roteamentos convencionais projetados para a RSSF estática não são adequados para as RSSFMs devido às restrições já mencionadas. Apesar do protocolo de roteamento baseado em árvore ser eficaz para a mudança de topologia e outros desafios, esses protocolos ainda não são suficientemente robustos para resolver o desafio de topologias dinâmicas com nós móveis.

O LEACH-M proposto por (KIM; CHUNG, 2006), foi um dos primeiros algoritmos baseado em clusterização. Este algoritmo foi desenvolvido para trabalhar com nós sensores móveis e tinha como principal objetivo confirmar se um nó móvel, quando membro de um *cluster*, poderia se comunicar com o *cluster-head* em um intervalo de tempo específico (*TDMA Scheme*), consumindo o mínimo de energia. O LEACH-M é dividido em duas fases: fase de configuração e fase de estado estável (*steady-state*).

Na fase de configuração, a rede é configurada e ocorre a formação dos *clusters*. Na segunda fase, a operação é dividida em *frames* (quadros) para que os nós possam enviar os dados para o *cluster-head* a cada *slot* de tempo que foi definido pelo *cluster-head*. Na solução, se o nó membro não enviar os dados em até dois *rounds*, o nó será considerado que está fora do *cluster* e o pacote será dado como perdido.

Em (AWWAD et al., 2009) foi proposto o CBR-M (*Cluster Based Routing Mobile*). O CBR-M, assim como LEACH-M, trabalha com *clusters* e foi desenvolvido para resolver o problema da taxa de perda de pacotes que, junto com o consumo de energia, é um dos principais problemas em RSSF e RSSFM. Diferentemente do LEACH-M, onde o nó após dois *rounds* era descartado do *cluster* e o pacote era considerado perdido, no CBR-M, quando o nó membro for descartado do *cluster*, ele verifica se existe outro nó *cluster-head* com um *time slot* livre. Caso encontre, os dados são encaminhados para esse *cluster-head* e o nó “perdido” passa a ser membro do novo *cluster*.

Em (DENG; LI; SHEN, 2011), foi proposto o MBC, uma solução que visava diminuir o alto *overhead* encontrado nas soluções LEACH-M e CBR-M devido a diversas mensagens de controle que ambas utilizam na formação do *cluster* e também para o nó perdido se juntar ao novo *cluster*. O MBC trabalha estimando um tempo de conexão para construir um caminho confiável, dependendo da estabilidade da conexão entre o nó membro e o nó *cluster-head*.

No MBC, cada nó elege a si próprio como *cluster-head* baseado em dois parâmetros: nível de energia e o fator de mobilidade para conseguir alcançar um consumo de energia balanceado em todos os nós da rede. O nó que possuir um fator de mobilidade menor será eleito *cluster-head*. Pelo fato de se mover em baixa velocidade, consegue ocupar a região do *cluster* por mais tempo. O nó eleito *cluster-head* é responsável por dividir os *slots* de tempo para os nós membros enviarem os dados coletados. O *slot* de tempo é calculado de acordo com o tempo de conexão estimado. Quando um nó perde ou vai perder conexão com o *cluster-head*, este envia uma nova mensagem de solicitação para se juntar a outro *cluster* a fim de evitar a perda de pacotes.

Em (NASSER; AL-YATAMA; SALEH, 2011), foi proposto o ZoroMSN, uma solução em que a rede é dividida em partes (denominadas zonas), onde cada zona elege um *cluster-head* (*zone-head*) responsável por receber os dados dos nós membros e encaminhá-los até um nó *sink* (denominada estação base). Os nós eleitos *cluster-head* atuam como roteadores, ajudando a diminuir o *broadcast* da rede.

Existem muitas outras soluções de redes de sensores sem fio móveis na literatura: ZBR (AHMED; HUSSAIN, 2011), WHISPER (OLIVEIRA; BARRETO; FONTAO, 2010), ECDGA(PENG; XU, 2009), DBCM (ARONSKY; SEGALL, 2010), EERPWSM(DEVA SARMA; KAR; MALL, 2011), entre outras, podendo ser baseadas em consulta, orientadas a evento, periódicas, trabalhar de forma hierárquica, clusterização, roteamento plano, entre outros.

A seguir, é apresentada uma tabela com algumas soluções de redes de sensores sem fio móveis encontradas na literatura. Em seguida serão feitas as considerações finais do capítulo. E por fim, no próximo capítulo, é apresentada a solução desenvolvida neste trabalho de mestrado.

**Tabela 4.1– Soluções de roteamento para RSSF e RSSFM**

	Hierárquica	Tipo de Roteamento	Sink	Modelo de Mobilidade	Tipo de Nós	Nó Utiliza GPS
LEACH-M [Kim 2006]	Sim	Consulta	Fixo	Random Walk	Homogêneo	Não
MSRPR [Wang 2008]	Sim	Consulta	Móvel	Random Waypoint	Homogêneo	Sim
CBR-M [Awwad 2009]	Sim	Consulta	Fixo	Random Waypoint	Homogêneo	Não
ECDGA [Peng 2009]	Sim	Consulta	Móvel	Random Walk	Heterogêneo	Não
DBCM [Aronsky 2010]	Não	Consulta	Fixo	Random Waypoint	Homogêneo	Não
WHISPER [Oliveira 2010]	Não	Consulta	Móvel	Pre-definido	Homogêneo	Não
MBC [Deng 2011]	Sim	Periódico	Fixo	Random Waypoint	Homogêneo	Não
ZoroMSN [Nasser 2011]	Sim	Periódico	Fixo	Random Walk	Homogêneo	Sim
ZBR [Ahmed 2011]	Sim	Orientado a Evento	Fixo	Random Walk	Homogêneo	Sim
EERPWSM [Kumar 2011]	Sim	Periódico	Móvel	Random Direction	Homogêneo	Sim
RAHMoN [Vilela 2012]	Sim	Orientado a Evento	Móvel	Random Waypoint / Random Direction	Heterogêneo	Sim

## 4.7 Considerações Finais

Neste capítulo, apresentamos os principais tipos e características de roteamento em RSSF e RSSFM, tais como: roteamento centralizado nos dados, roteamento plano, roteamento hierárquico e roteamento baseado na localização. Também foram apresentadas algumas das soluções encontradas na literatura para RSSF ou RSSFM. Dentre as soluções apresentadas, podemos observar que muitas delas, fazem uso da mobilidade somente no nó *sink* ou somente nos nós móveis coletores de dados, diferente da solução apresentada aqui, que utiliza a mobilidade nos nós sensores coletores de dados e também no *sink*.

No próximo capítulo é apresentada a solução de roteamento proposta neste trabalho, chamada Algoritmo de Roteamento para Rede Heterogênea Móvel (RAHMoN).

# Capítulo 5

## RAHMoN: ALGORITMO DE ROTEAMENTO PARA REDE HETEROGÊNEA MÓVEL

---

Este capítulo descreve o RAHMoN, um Algoritmo de Roteamento para Rede Heterogênea Móvel, caracterizada por nós sensores fixos e móveis, tendo ainda um nó *sink* de alta mobilidade (veículo autônomo aéreo).

As redes heterogêneas são redes compostas por diferentes tipos de nós sensores com diferentes capacidades de *hardware*. Em nossa solução, consideramos as redes heterogêneas como compostas de nós sensores fixos e móveis de diferentes graus de mobilidade. Essas redes podem ser aplicadas em áreas de segurança, agricultura de precisão e monitoramento ambiental. No Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Sistemas Embarcados Críticos (INCT-SEC), diferentes aplicações estão sendo criadas que integram redes de sensores fixos a veículos autônomos terrestres, aquáticos e aéreos.

Na figura 5.1 é mostrado um cenário de aplicação de redes heterogêneas na área de segurança de infraestruturas críticas. Onde o número 1 representa os nós sensores fixo, o número 2 representa os nós sensores móveis de médio porte e o número 3 representa o VANT. Infraestrutura crítica é considerada qualquer construção ou patrimônio que, em caso de invasão ou sabotagem, cause danos à população local, regional e até mesmo nacional. Por exemplo: hidrelétricas, redes de abastecimento de energia, entre outras. Consideramos o nó *sink* como sendo um veículo aéreo não tripulado (VANT). Este é responsável por receber os dados coletados do nó sensor, seja ele fixo ou móvel.



**Figura 5.1- ilustração de aplicação de monitoramento de hidrelétrica por meio de rede heterogênea (nós fixos, VANT e robôs terrestres)**

A utilização de nós móveis integrados a nós sensores fixos pode otimizar a entrega dos dados coletados até o nó *sink*, superando o problema de *energy-hole* (buracos na rede) e diminuindo o consumo de energia dos nós, aumentando assim, o tempo de vida da rede. O problema de buracos na rede pode surgir quando a deposição de nós sensores é feita de forma não uniforme e aleatória.

O RAHMoN foi projetado e desenvolvido com o objetivo de suportar a integração de nós sensores fixos e móveis, utilizando o menor caminho para entregar os dados coletados para o *sink*, além de entregar os dados próximos ao tempo real de suas ocorrências. Como os nós sensores móveis possuem um raio de alcance muito maior que os nós sensores fixos, essa entrega se torna possível. A solução RAHMoN é apresentada e avaliada nas próximas subseções.

## 5.1 RAHMoN (*Routing Algorithm for Heterogeneous Mobile Networks*)

O RAHMoN é uma solução de roteamento para redes de sensores sem fio móveis heterogêneas orientadas a evento. Portanto, quando um nó sensor detecta a ocorrência de um evento, uma mensagem é enviada aos seus vizinhos (*broadcast*) informando o ocorrido.

O RAHMoN visa atender os principais desafios das RSSFMs, listados a seguir:

- Consumo otimizado de energia da rede;
- Comunicação em topologia dinâmica;
- Tolerância a falhas;
- Escalabilidade;
- Maior taxa de entrega dos dados de interesse da aplicação;
- Entrega dos dados coletados próximos aos tempos das ocorrências dos eventos;
- Redução do problema de *energy-hole*;
- Redução da taxa de perda de pacotes;

O tipo de roteamento adotado nesta solução é o hierárquico. Quando ocorre um evento nesse tipo de roteamento, é formado um grupo (*cluster*) e um nó é eleito o responsável por receber os dados coletados de seus vizinhos e entregá-los ao *sink*, utilizando o menor caminho. O nó responsável por receber os dados recebe o nome de líder ou cabeça de grupo (*cluster-head*).

O RAHMoN utiliza a estrutura de árvore de saltos para fazer o roteamento dos dados coletados, também conhecida como roteamento multi saltos (*multihop*).

A configuração da árvore de saltos é realizada na primeira fase do algoritmo (as fases do algoritmo são descritas no final desta subseção) e é mantida durante todo o funcionamento da rede, salvo em casos de falhas ou no caso de um nó móvel

ser eleito cabeça de grupo (*cluster-head*) e este estiver próximo ao *sink*. Neste caso, a entrega dos dados coletados pode ser feita através de um salto (*hop*) apenas.

No decorrer do roteamento, um nó sensor pode assumir diferentes papéis, que são:

- Coordenador (*coordinator*): nó que detectou o evento no momento da ocorrência;
- Membro (*member*): nó que coleta os dados no ambiente e encaminha ao *cluster-head*;
- Retransmissor (*relay*): nó que encaminha o pacote dos dados coletados para o nó cabeça de grupo (*cluster-head*) ou ao *sink*;
- Cabeça de grupo (*cluster-head*): nó responsável por receber os pacotes de dados coletados dos nós membros e encaminhá-los ao *sink*.

RAHMoN suporta diferentes tipos de mobilidade na mesma rede. Os modelos de mobilidade adotados na solução são:

- *Random Direction*: utilizado para representar a mobilidade do VANT;
- *Random Waypoint*: para representar a mobilidade dos nós sensores móveis terrestres.

Todos os nós sensores na rede precisam estar cientes de suas localizações (coordenadas) e essa informação pode ser utilizada na eleição do nó cabeça de grupo (*cluster-head*) e também na entrega dos dados coletados.

A rede inicialmente é configurada utilizando a árvore de saltos através de técnica de inundação (*flooding*)<sup>5</sup>. No *flooding*, uma mensagem de configuração é transmitida aos nós vizinhos através de técnica de difusão (*broadcast*). O nó que recebe a mensagem de configuração atualiza o salto, e também sua lista de vizinhos e encaminha a mensagem de configuração para o próximo nó. Esse processo é repetido até que os nós de borda sejam alcançados. Quando os nós de borda são encontrados, é dado início ao *flooding* reverso.

---

<sup>5</sup>*Flooding* ou inundação: a cada pacote recebido o nó verifica se é o nó destino. Caso não seja, o pacote é encaminhado aos vizinhos, exceto para o nó que lhe enviou o pacote. Na versão controlada, os pacotes recebidos e encaminhados são descartados.



No *flooding* reverso, o nó de borda transmite uma mensagem de coleta de posição com intuito de coletar a posição de todos os nós da rede. O nó que recebe a mensagem de coleta de posição armazena, incrementa sua posição na mensagem e transmite para seus vizinhos através de *broadcast*. Esse processo é explicado em detalhes nas próximas subseções.

A entrega dos dados coletados pelos nós sensores utiliza a estrutura da rede da (topologia da rede) para a construção de rotas. Tipicamente, a técnica de menor caminho é utilizada. Portanto, podemos ter diferentes construções de rotas para entregar os dados coletados ao *sink*. Essas rotas serão descritas na seção 5.2 com mais detalhes.

Quando o nó *sink* recebe um pacote de dados coletados do nó retransmissor (*relay*), ele envia uma mensagem de confirmação ao nó retransmissor (*relay*) que o enviou os dados, finalizando assim o processo de entrega de dados. RAHMoN é dividido em três fases:

- **Fase 1 – Configuração da rede:** nessa etapa é feita uma inundação (*flooding*) inicial para configurar a rede e *flooding* reverso, coletando a posição dos nós sensores fixos para construir uma matriz de adjacência, a qual armazenará a estrutura da rede dos nós fixos.
- **Fase 2 – Alerta de evento:** quando ocorre um evento, um grupo (*cluster*) é formado e um nó é eleito como cabeça de grupo (*cluster-head*). O nó cabeça de grupo (*cluster-head*) é responsável por receber os dados dos nós membros (*members*)
- **Fase 3 – Entrega de dados ao *sink*:** nesse processo, o nó cabeça de grupo (*cluster-head*) constrói uma rota (utilizando saltos) visando entregar os dados que foram recebidos dos nós membros para o nó *sink*.

As fases do RAHMoN serão descritas e ilustradas a seguir.

## 5.2 Fase 1: Configuração da Rede

A fase de configuração da rede é dividida em três etapas: formação da lista de vizinhos, descoberta da estrutura da rede e a disseminação da estrutura da rede.

A configuração da rede tem início após a deposição dos nós sensores no ambiente a ser monitorado.

Assumimos na solução que o nó com o menor identificador (ID) será eleito como o nó *INIT\_FLOOD* e que este nó será depositado próximo do local onde o nó *sink* irá iniciar seu trajeto no campo monitorado. O nó *INIT\_FLOOD* transmite uma mensagem de configuração por *flooding* controlado, atualizando o salto dos nós e construindo a árvore de saltos. O processo é repetido até que os nós de borda sejam encontrados. Após a mensagem chegar ao nó de borda, inicia-se o *flooding* reverso, onde o nó de borda transmite uma mensagem de coleta de posição a seus vizinhos. O processo é o mesmo do *flooding*, porém inicia-se com os nós de borda e é executado até a mensagem de coleta de posição encontrar o nó *INIT\_FLOOD*.

Quando a mensagem de coleta de posição contendo todas as posições encontrar o nó *INIT\_FLOOD*, esse nó irá armazenar todas as posições dos nós fixos da rede em uma matriz de adjacência, formando a estrutura da rede, essa matriz será transmitida ao nó *sink*. Após o nó *sink* receber a matriz com a estrutura da rede, o mesmo somente irá transmitir a matriz somente aos nós móveis junto com a informação de sua próxima posição do seu trajeto para todos os nós da rede.

No decorrer do texto, o termo VANT será utilizado como referência ao nó *sink*. As etapas da fase são apresentadas com mais detalhes nas próximas subseções.

### 5.2.1 Formação da lista de vizinhos

Na etapa inicial é feita a configuração da rede usando a construção da árvore de saltos e a formação da lista de vizinhos. A etapa é executada ainda sem a participação do VANT.

A configuração da árvore de saltos é iniciada com a transmissão de uma mensagem do nó raiz da árvore. Nesse caso, o nó raiz é o nó *INIT\_FLOOD*. A

escolha é feita utilizando o nó com menor identificador (ID). O nó *INIT\_FLOOD* é responsável por iniciar o *flooding* da rede. A configuração da árvore de saltos é feita somente nos nós sensores fixos.

No *flooding*, o nó *INIT\_FLOOD* transmite a mensagem de configuração (*Msg\_InitialConfiguration*) aos nós que estão ao seu redor (vizinhos) por *broadcast*. A *Msg\_InitialConfiguration* é composta por duas informações: *[ID, HopToNode]*.

O campo ID armazena a identificação do nó sensor que enviou a mensagem. O valor do campo *HopToNode* contém o número de salto, e esse valor é iniciado com 1. Ao receber a mensagem de configuração, o nó atualiza o salto, armazena os nós vizinhos em sua lista de vizinhos e reencaminha a mensagem de configuração aos seus vizinhos. A figura 5.2 ilustra o processo de configuração da rede (atualização de saltos). O processo de *flooding* é executado até a mensagem de configuração encontrar os nós de borda. Após a mensagem de configuração encontrar os nós de borda, a segunda etapa é iniciada. Essa é descrita na próxima subseção.

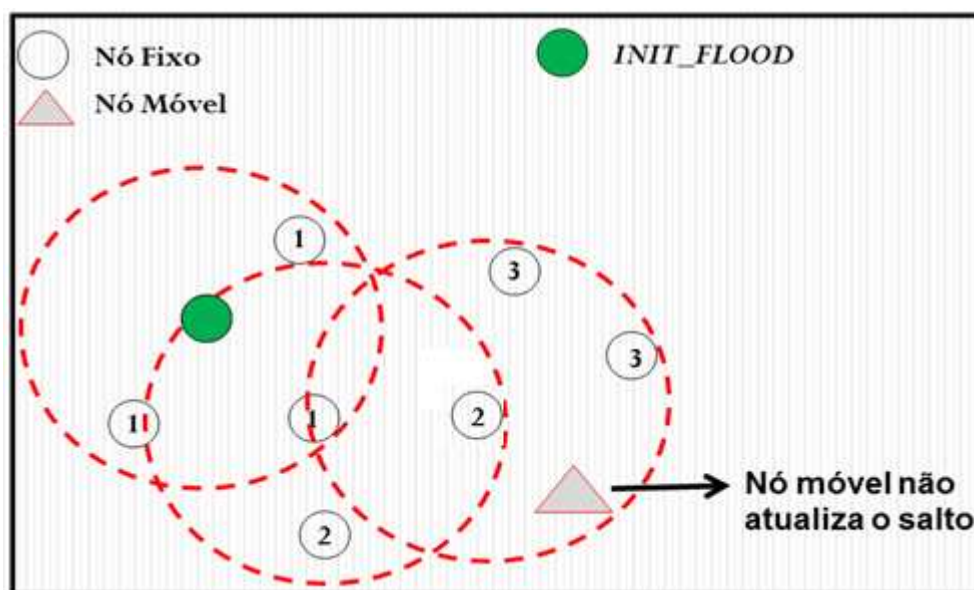


Figura 5.2– Configuração da rede (atualização de saltos e formação da lista de vizinhos)

### 5.2.2 Descoberta da estrutura da rede (topologia)

Nesta etapa, o objetivo é descobrir a posição de cada nó sensor fixo da rede e construir a matriz de adjacência, formando a estrutura da rede. A matriz de

adjacência auxilia o algoritmo na construção de rotas para entregar os dados coletados ao nó *sink*. A coleta de posição dos nós sensores é feita através da técnica de *flooding* reverso. Ao receber a mensagem de configuração, os nós de borda atualizam o valor do seu salto, suas listas de vizinhos e em seguida transmitem em *broadcast* para seus vizinhos a mensagem de coleta de posição *Msg\_PositionCollection*.

A mensagem de coleta de posição é composta por três informações: [*senderID*, *positionNode*, *NeighborList*]. Esta, por sua vez, é transmitida ao nó com menor salto. Assim, é possível fazer o processo reverso da configuração da árvore de saltos. O campo *senderID* representa o *ID* do nó que enviou a posição ao vizinho, o campo *positionNode* é composto pela posição do nó sensor fixo e o campo *NeighborList*, contém as posições dos seus vizinhos. Assim, quando essas informações chegarem até o nó *INIT\_FLOOD*, este formará a matriz de adjacência.

A figura 5.3 ilustra a coleta de posição dos nós sensores. Novamente os nós sensores móveis vão descartar a mensagem de coleta de posição.

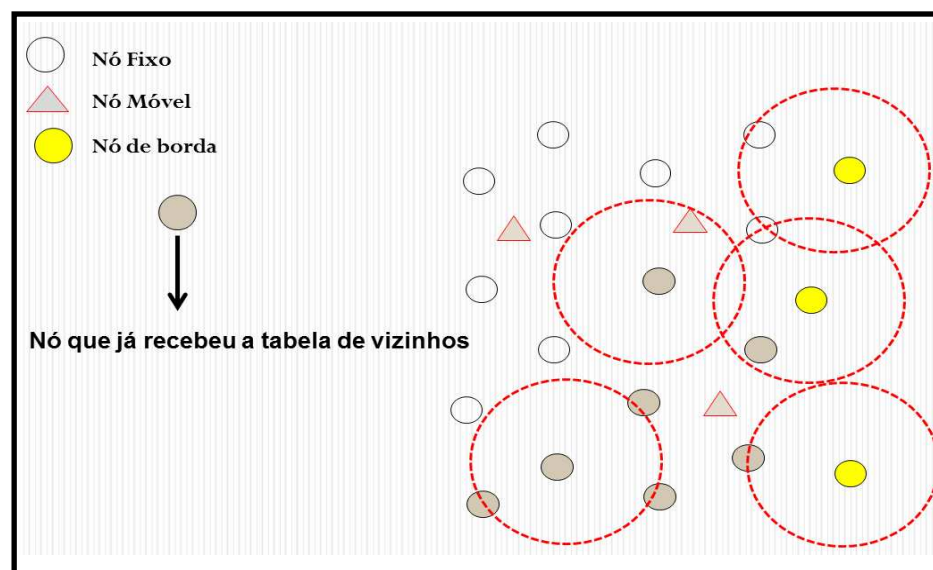


Figura 5.3– Coleta de posição dos nós sensores (formação da estrutura da rede)

Os nós sensores transmitem a mensagem de coleta de posição através da rede até que a mensagem seja entregue ao nó denominado *INIT\_FLOOD*. Esse nó é responsável por iniciar o envio da mensagem de configuração na etapa um da fase um do algoritmo. Em seguida, a matriz de adjacência é construída.

A matriz formada pelo nó *INIT\_FLOOD* contém a identificação e a posição de cada nó sensor. Assim, é possível formar a estrutura da rede, que será utilizada na terceira fase do algoritmo para construir rotas utilizando o menor caminho para entregar os dados coletados ao nó *sink*.

A segunda etapa é finalizada somente quando o nó *INIT\_FLOOD* transmite a matriz construída contendo a estrutura da rede ao nó *sink*.

Nossa solução assume que quando o VANT decolar, este irá passar primeiramente próximo ao nó *INIT\_FLOOD* para coletar a matriz contendo a estrutura da rede dos nós fixos, dando início a terceira e última etapa da fase de configuração da rede, que será descrita na próxima subseção. A figura 5.4 ilustra o nó *sink* coletando a matriz do nó *INIT\_FLOOD*.

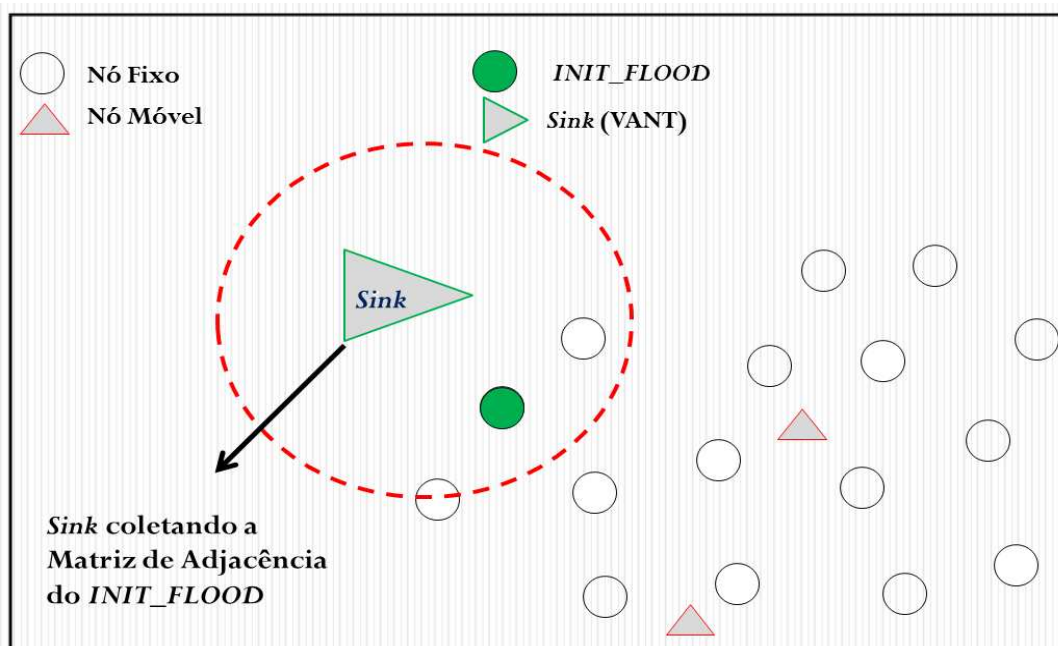


Figura 5.4– *Sink* coletando matriz do *INIT\_FLOOD*

### 5.2.3 Disseminação da estrutura da rede

A terceira e última etapa da fase de configuração é a disseminação da estrutura da rede e tem como objetivo transmitir a estrutura da rede (armazenada na matriz de adjacência) aos nós sensores móveis no ambiente monitorado. O intuito de transmitir a estrutura da rede aos nós móveis é auxiliar na terceira fase do algoritmo,

onde é feita a construção de rotas para a entrega dos dados coletados, verificando qual o menor caminho (distância) até o nó VANT.

Ao receber a matriz de adjacência, o VANT incrementa qual será sua próxima posição (executando o modelo de mobilidade implementado) e transmite a mensagem de próxima posição (*Msg\_NextPositionSink*) a todos os nós da rede, porém, somente os nós móveis recebem a estrutura da rede. Os demais nós apenas armazenam qual será a próxima posição no trajeto executado pelo VANT.

A *Msg\_NextPositionSink* contém três informações, sendo: [ID, matriz[ ][ ], *nextPositionSink*]. O campo ID é o identificador do nó *sink*, campo matriz contém a estrutura da rede dos nós fixos e o campo *nextPositionSink* contém a próxima posição do trajeto do VANT. A mensagem será transmitida para a rede a cada encontro do VANT com a borda da rede. O modelo de mobilidade utilizado informa ao VANT quando chega à borda da rede e então o VANT transmite sua próxima posição aos nós. Assim, os nós sabem qual será o próximo trajeto que o VANT irá executar.

A figura 5.5 ilustra a transmissão da matriz de adjacência aos nós móveis da rede.

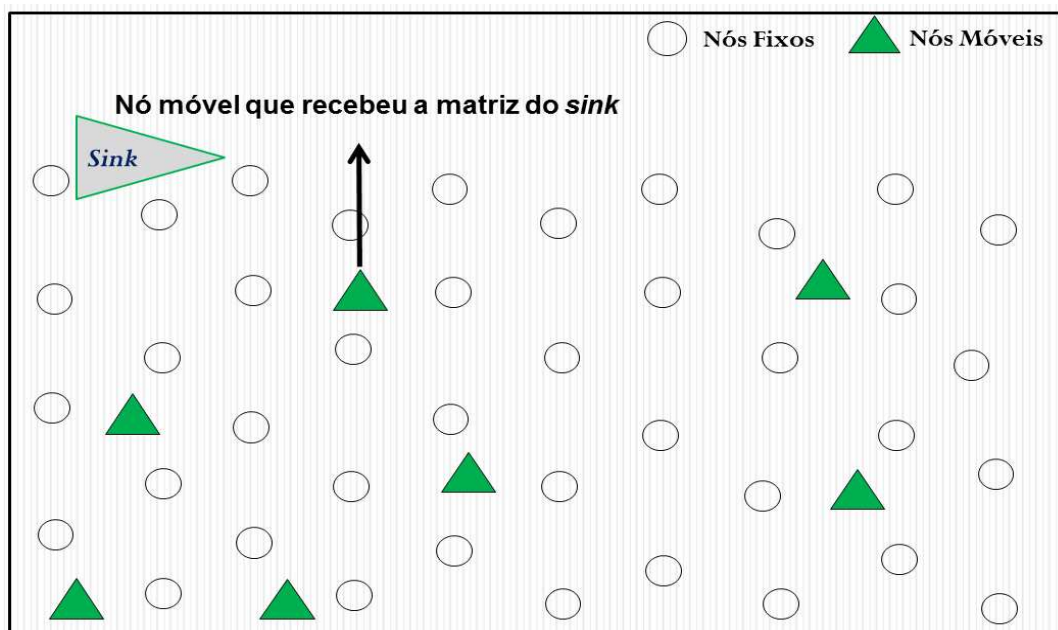


Figura 5.5– Nós móveis recebendo a matriz (estrutura da rede dos nós fixos)

A matriz de adjacência é armazenada somente nos nós móveis por possuírem um maior poder de armazenamento, processamento e capacidade energética do que os nós fixos. Ao transmitir a matriz, contendo as posições de todos os nós sensores fixos, recebida somente pelos nós sensores móveis, o VANT executará o seu trajeto para chegar à sua próxima posição, finalizando assim a fase de configuração da rede.

A próxima fase do RAHMoN é a ocorrência de eventos, descrita na seção 5.3

### 5.3 Fase 2: Alerta de Evento

A segunda fase do RAHMoN é a fase de alerta de evento, que é dividida em duas etapas: anúncio de evento e agrupamento (formação de *cluster*). Quando há ocorrência de um ou mais eventos, o nó que detectou transmite uma mensagem de alerta de evento aos seus vizinhos (*broadcast*). Onde um grupo (*cluster*) é formado e em seguida um nó é eleito cabeça de grupo (*cluster-head*).

O nó eleito cabeça de grupo (*cluster-head*) será o responsável por receber os dados dos nós membros (*member*) do grupo (*cluster*) e construir uma rota (através de saltos) para enviar os dados até o nó *sink*.

No decorrer do trabalho serão utilizados os termos *cluster* (representando o grupo de nós sensores), *cluster-head* (representando o nó cabeça de grupo), *member* (representando membro do grupo) e *relay* (representando o nó retransmissor).

#### 5.3.1 Anúncio de evento

Quando há a ocorrência de um evento, um nó que identificou assume o papel de coordenador (*coordinator*) e transmite uma mensagem de alerta de evento (*Msg\_AlertEvent*) contendo as informações: [*eventID*, *HopToNode* e *distToSink*] aos seus vizinhos (*broadcast*), verificando se outros nós também sentiram o evento.

O campo *distToSink* armazena a distância que o nó sensor está em relação ao nó *sink* (VANT). A distância armazenada no campo *distToSink* é calculada

usando a informação de *NextPositionSink* (próxima posição) recebida do VANT (*Sink*) enviado pelo mesmo quando atinge a borda de rede e a posição atual (*positionNode*) do nó sensor.

O nó que recebe a mensagem de alerta de evento automaticamente assume o papel de membro (*member*) do grupo (*cluster*) e retorna as informações solicitadas na mensagem de alerta de evento (*Msg\_AlertEvent*) através da mensagem *Msg\_ReturnEvent* composta por três informações: [*eventID*, *HopToNode* e *distToSink*] para o nó coordenador (*coordinator*). A distância em relação ao VANT é utilizada como parâmetro para eleger o nó *cluster-head* na segunda etapa da fase dois, que trata da eleição do *cluster-head*, a ser descrita a seguir.

### 5.3.2 Agrupamento (formação do *cluster*)

Nessa etapa, após a formação do grupo (*cluster*), inicia-se a eleição do nó cabeça de grupo (*cluster-head*).

No RAHMoN podemos ter três diferentes tipos de formação de *cluster*, modificando assim a eleição do *cluster-head*. As possíveis formações são:

- a) **Cluster composto somente de nós fixos:** nesta formação de *cluster*, o nó será eleito *cluster-head* de acordo com os parâmetros de menor distância (*distToSink*) do nó em relação ao VANT e o maior nível energético (*energyLevel*). O campo *distToSink* é calculado em cada nó assim que recebe a atualização da próxima localização do VANT. Essa atualização é enviada pelo mesmo através da *Msg\_NextPositionSink* a cada momento em que ele atinge a borda da rede. O campo *energyLevel* recebe atualização a cada envio e recebimento de mensagem executado pelo nó sensor. No caso do *cluster* possuir dois nós com a mesma distância, escolhemos como *cluster-head* o nó que possuir um maior nível energético.
- b) **Cluster composto por um nó móvel e os demais nós fixos:** nessa formação, o parâmetro utilizado para eleger o *cluster-head* é a mobilidade do nó sensor. Quando temos um nó móvel presente no local do evento, este será eleito o *cluster-head*, evitando custo de clusterização. No RAHMoN,



consideramos que o nó móvel possui nível energético e raio de comunicação maior em relação aos nós fixos. Antes de executar seu próximo trajeto, o nó muda a direção para a mesma direção que o nó *sink* (VANT). Assim, o nó móvel ficará na mesma direção ou próximo ao VANT e poderá enviar os dados coletados.

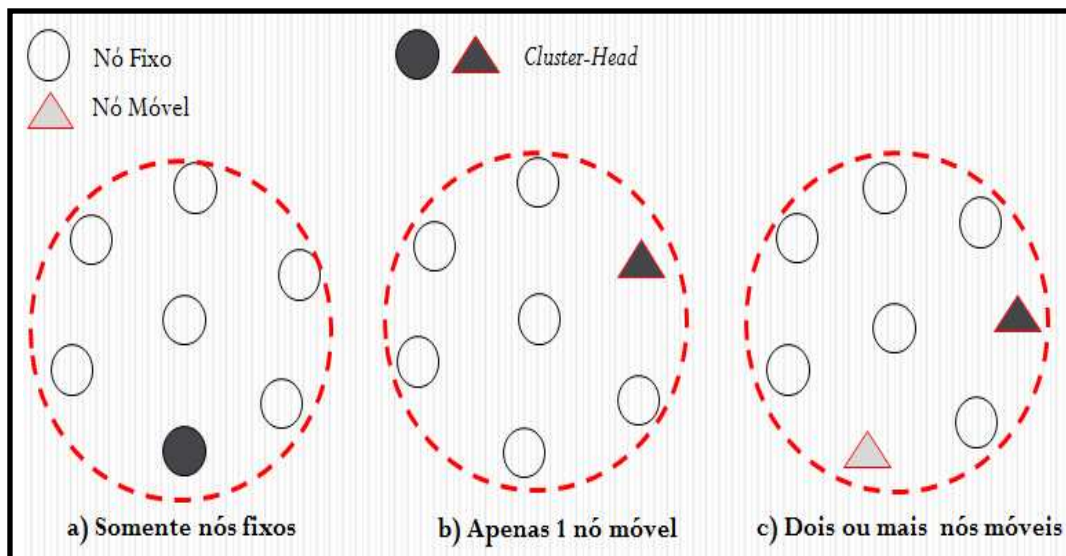
- c) **Cluster composto por dois ou mais nós móveis e os demais fixos:** nessa formação, verificamos qual nó móvel possui a menor distância (*distToSink*) em relação à próxima localização do *sink* (VANT). Assim, podemos garantir que o nó eleito *cluster-head* irá à mesma direção ou próximo ao nó *sink* e escolhemos o nó que possui a menor distância e o maior nível de energia entre os nós móveis como *cluster-head*.

Após a eleição do *cluster-head*, o coordenador envia uma mensagem (*Msg\_ClusterHead*) composta por três informações: [*ID*, *positionNode*, *distToSink*] informando aos membros (*member*) do grupo (*cluster*) qual nó foi eleito.

Os nós membros (*member*) que possuem dados verificam se o nó eleito *cluster-head* está em seu raio de comunicação. Caso esteja, encaminham os dados coletados a ele líder de grupo (*cluster-head*). Caso contrário, encaminham os dados ao nó que enviou a mensagem e esse faz o papel de nó *relay* e transmite até o *cluster-head*.

Após os dados serem recebidos pelo *cluster-head*, ele inicia o processo de construção de rotas, através de múltiplos saltos (*multihop*), dando início a terceira e última fase do algoritmo, descrita na próxima seção.

A figura 5.6 ilustra as três possíveis formações de *clusters* que podem ocorrer na segunda etapa (agrupamento) da fase dois.

Figura 5.6– Tipos de formações de *clusters*

### 5.4 Fase 3: Entrega dos dados coletados para o *sink*

A terceira e última fase do RAHMoN possui apenas uma etapa e é iniciada assim que os nós sensores membros (*member*) do grupo (*cluster*) encaminham os dados coletados ao nó eleito cabeça de grupo (*cluster-head*). Ao receber os dados, o *cluster-head* os agrega e verifica qual o melhor caminho para iniciar a construção da rota para entregar os dados já agregados até o nó *sink* (VANT).

No RAHMoN podemos ter diferentes tipos de rotas para entregar os dados coletados até o nó *sink* (VANT), a serem descritas na próxima subseção.

A construção de rotas para entregar os dados já agregados até o nó *sink* (VANT) é executada pelo nó *cluster-head* e tem como objetivo entregar os dados utilizando a técnica de menor distância visando diminuir a latência. Observamos na seção 5.3 que a solução permite diferentes formações de *clusters* e, dependendo de qual nó for eleito *cluster-head*, teremos uma construção de rota diferente.

No caso do nó selecionado como *cluster-head* ser um nó sensor fixo, o nó transmite a mensagem *Msg\_dataCollectionAgr* aos vizinhos através de múltiplos saltos (*multihop*).

O processo de *multihop* é executado até que o nó *sink* (VANT) é encontrado e então os dados são enviados. No final da transmissão, o *sink* envia uma mensagem

de confirmação de recebimento (*Msg\_Ack*) ao nó sensor que o encaminhou o pacote de dados coletados, finalizando assim a entrega dos dados coletados. A figura 5.7 ilustra a entrega dos dados coletados através de uma construção de rota usando somente nós fixos.

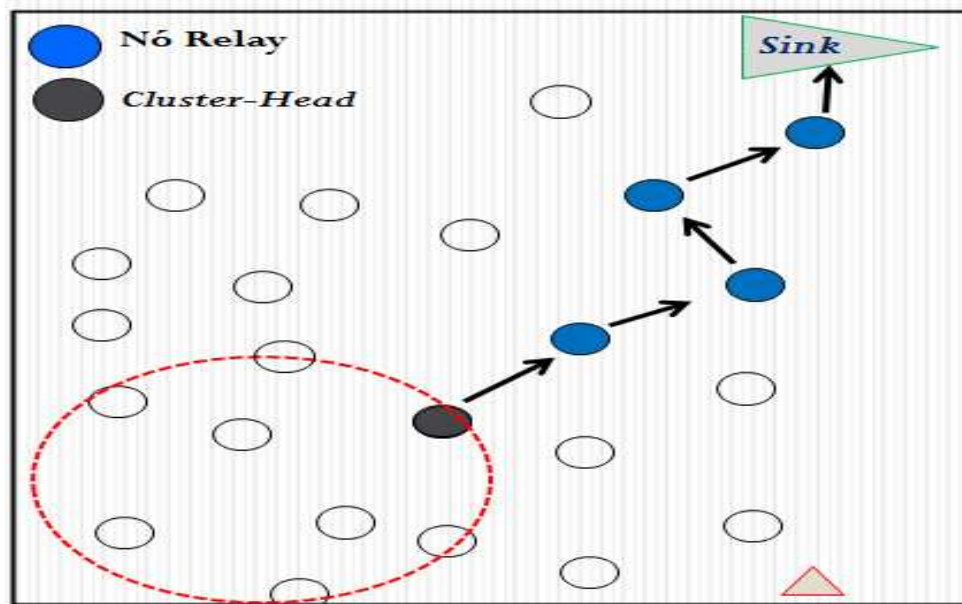


Figura 5.7 – Entrega de dados usando somente nós fixos

Quando o nó selecionado como *cluster-head* for um nó móvel, a construção de rotas para entregar os dados coletados até o nó *sink* pode ser feita utilizando a estrutura da rede (topologia da rede) armazenada em forma de matriz pelos nós móveis ou entregar os dados diretamente ao nó *Sink* (VANT). Devido ao fato do nó móvel possuir a localização dos nós sensores fixos próximos à posição do nó *sink* (VANT) e o raio de comunicação ser muito maior do que o dos nós sensores fixos, podemos entregar os dados das seguintes formas:

- a) **Entrega de dados usando a estrutura da rede (topologia):** o nó móvel utiliza a estrutura da rede para entregar os dados quando o nó *sink* não estiver no seu raio de alcance. Então, o *cluster-head* verifica qual nó contido na matriz está mais próximo ao nó *sink* e encaminha os dados a esse nó, que recebe o nome de *relay* e encaminha os dados ao *sink*.



## 5.5 Mensagens e Diagramas de sequência

Nessa seção são apresentadas as mensagens utilizadas nas etapas do algoritmo: a configuração da rede, coleta de posição, alerta de evento, eleição *decluster-head* e entrega dos dados coletados para o *sink*. Em seguida são apresentados os diagramas de sequências referentes às trocas de mensagens entre os nós sensores.

A mensagem *Msg\_InitialConfiguartion* é responsável por iniciar a configuração da rede. Através dessa mensagem é feita configuração de saltos, dando início também ao *flooding*, onde cada nó sensor que recebe a mensagem, atualiza o número de salto e reencaminha a mensagem para seus vizinhos via *broadcast*. O formato da *Msg\_InitialConfiguration* é mostrado na figura 5.9 e descrita abaixo:



Figura 5.9 – Formato da mensagem de configuração inicial da rede

Onde:

- **ID** – armazena a identificação do nó sensor que enviou a mensagem;
- **HopToNode** – armazena o número de saltos pelos quais a mensagem passou. É iniciado no nó *INIT\_FLOOD* com valor zero e incrementado de 1 cada vez que a mensagem passa por um nó sensor;

A *Msg\_PositionCollection* é utilizada para executar a coleta de posição de cada nó sensor. A mensagem começa ser transmitida assim que os nós de borda são encontrados, dando início ao *flooding* reverso, onde cada nó sensor que receber a mensagem, irá adicionar sua posição no campo *positionNode*, sua lista de vizinhos no campo *NeighborList* e transmitirá a mensagem aos vizinhos com menor salto em *broadcast*. A figura 5.10 mostra o formato da mensagem e a descreve abaixo.



Figura 5.10 – Formato da mensagem de coleta de posição de nó sensor

Onde:

- **ID\_D** – o campo armazena a identificação do nó sensor que iniciou o *flooding* na etapa um do algoritmo, esse nó é o *INIT\_FLOOD*;
- **senderID** – armazena a identificação do nó sensor de maior salto que transmitiu a mensagem ao nó;
- **positionNode** – armazena duas a posição do nó sensor, essa posição pode ser passada em coordenadas (x,y,z) e será utilizada no cálculo para descobrir qual a distância do nó em relação ao nó *sink*;
- **NeighborList** – armazena em uma lista (vetor) duas informações: a identificação (ID) que auxiliará o nó *INIT\_FLOOD* na formação da matriz de adjacência;

A mensagem de próxima posição do *sink* (*Msg\_NextPositionSink*) será encaminhada a cada momento em que o nó *sink* atingir a borda da rede. Sendo o campo Matriz [ ] [ ], enviado somente na primeira transmissão do *sink* para os nós móveis, a partir da segunda transmissão, esse campo não será mais transmitido. A figura 5.11 ilustra o formato dessa mensagem recebida por todos os nós da rede.



Figura 5.11 – Formato da mensagem de próxima posição do nó *sink*

Onde:

- **ID** – armazena a identificação do nó *sink*;
- **nextPositionSink** – armazena a posição do nó *sink*, essa posição é enviada a cada momento em que o *sink* atinge a borda da rede e é obtida através do modelo de mobilidade *Random Direction*;
- **Matriz[ ] [ ]** – contém todas as posições dos nós sensores fixos. O campo é enviado somente na primeira mensagem enviada pelo *sink*

para que os nós móveis possam armazenar a estrutura da rede dos nós fixos;

A mensagem de alerta de evento ( *Msg\_AlertEvent* ) é transmitida pelos nós que sentiram a ocorrência do evento, dando início à formação do *cluster*. A figura 5.12 mostra o formato da mensagem e descreve os campos a abaixo:



Figura 5.12 – Formato da mensagem de alerta de evento para formação de cluster

Onde:

- **eventID** – armazena a identificação do nó sensor que sentiu a ocorrência do evento;
- **HoptoNode** – armazena o número de saltos que o nó que sentiu a ocorrência do evento está do nó *INIT\_FLOOD*;
- **distToSink** – armazena a distância do nó sensor em relação ao nó *sink*, o campo é atualizado a cada recebimento da mensagem de próxima posição do *sink* (*Msg\_NextPositionSink*);

A mensagem de retorno de evento (*Msg\_ReturnEvent*) é enviada para dar continuidade à formação de cluster, iniciada pelo nó que sentiu o evento e os campos são os mesmos contidos na mensagem de alerta de evento, por isso não será apresentada.

Após a eleição para eleger o nó *cluster-head*, o nó que foi eleito o nó coordenador transmite a mensagem aviso de *cluster-head* (*Msg\_ClusterHead*) aos nós membros do *cluster*. Os campos dessa mensagem são os mesmos da mensagem de alerta de evento e retorno de evento e também não será ilustrado e nem descrito novamente.

A mensagem *Msg\_dataCollectionAgr* contém todos os dados coletados dos nós membros do *cluster* e será transmitida pelo nó *cluster-head* diretamente para o *sink* (caso o *sink* esteja em seu raio de alcance) ou para um nó *relay* até que o *sink*

seja encontrado. O formato da mensagem é ilustrado na figura 5.13e descrito abaixo:



Figura 5.13 – Formato da mensagem de dados coletados enviada pelos nós *relay/cluster* ao *sink*

Onde:

- **ID\_D** – armazena a identificação do nó de destino que a mensagem deve ser entregue, ou seja, o nó *sink*;
- **ID** – armazena a identificação do nó sensor que transmitiu a mensagem contendo os dados coletados;
- **dataCollectionAgr** – armazena os dados coletados, esses dados variam de acordo com interesse da aplicação, por exemplo, podem ser valores de temperatura;

A mensagem de confirmação (*Msg\_Ack*) não foi listada, devido a essa mensagem encaminhar somente uma confirmação para o nó que enviou os dados para o *sink*.

Os diagramas de sequência são utilizados para ilustrar as trocas de mensagens que ocorre durante todo o processo de funcionamento do algoritmo. Na figura 5.14 o diagrama representa a troca de mensagens entre o nó *INIT\_FLOOD* e os nós fixos.

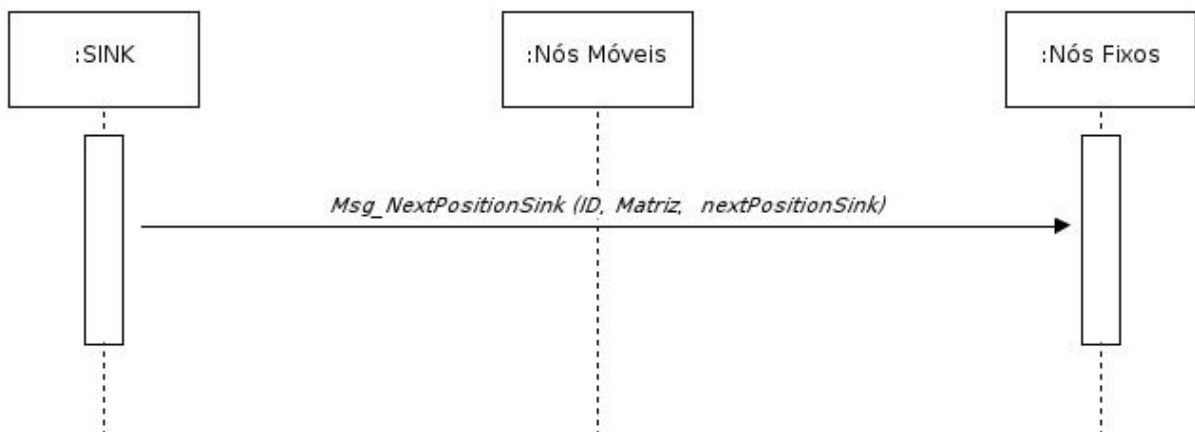
No diagrama, o nó *INIT\_FLOOD* encaminha a mensagem de configuração para os nós fixos, que transmitem a mensagem de coleta de posição ao nó *INIT\_FLOOD*. A mensagem de coleta de posição só será transmitida para o *INIT\_FLOOD*, após a mensagem de configuração atingir os nós de borda.





**Figura 5.14– Diagrama de seqüência da configuração da rede e coleta de posição dos nós sensores**

O diagrama apresentado na figura 5.15 representa o envio da mensagem de próxima posição transmitida pelo nó *sink* aos nós sensores (fixos e móveis). Essa mensagem será transmitida para toda a rede a cada momento em que o *sink* encontrar a borda da rede. Assim, todos os nós sensores sabem qual a próxima posição do *sink*.



**Figura 5.15–Diagrama de seqüência do envio da próxima posição do *sink* para os nós (fixos e móveis)**

A figura 5.16 representa o diagrama de seqüência das trocas de mensagens durante a formação do *cluster* e o anúncio de qual nó foi eleito o *cluster-head*. As

mensagens representadas no diagrama são trocadas somente entre os nós contidos no *cluster*.

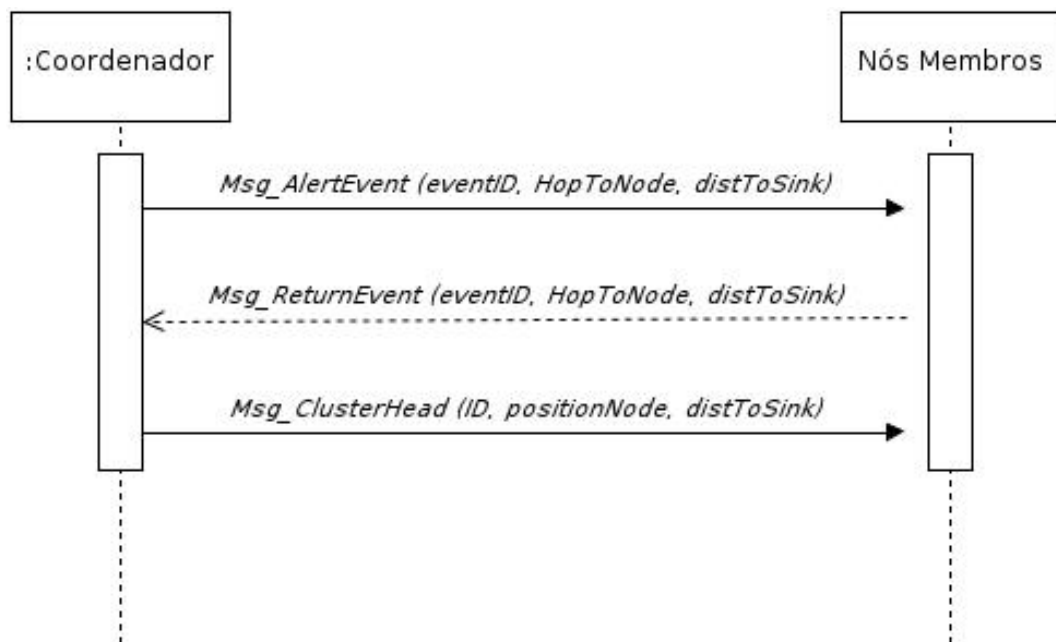


Figura 5.16– Diagrama de sequência do envio da mensagem de alerta e *cluster-head* eleito

A figura 5.17 representa o diagrama de sequência referente o envio dos dados coletados. O envio dos dados coletados pode ser feito pelo nó líder de grupo (*cluster-head*) ou nó retransmissor (*relay*) para o nó *sink*. Em seguida o nó *sink* retorna a mensagem de confirmação para o nó que enviou a mensagem

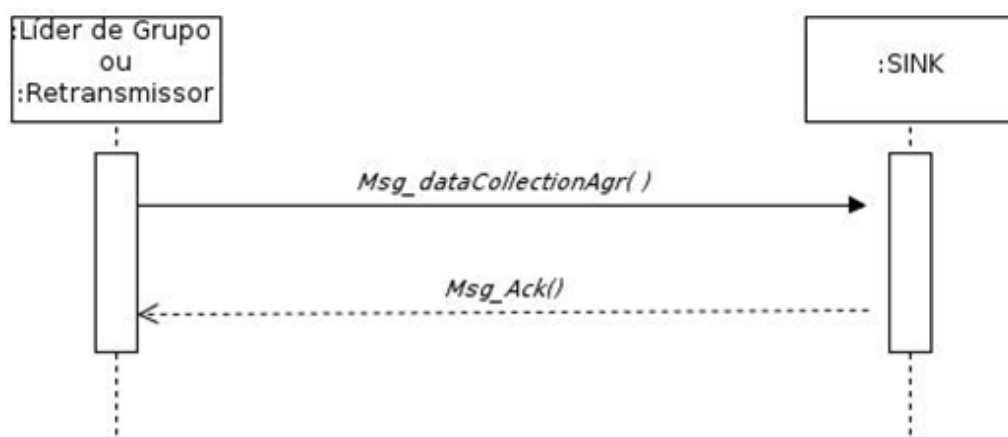


Figura 5.17 – Diagrama de sequência do envio dos dados coletados do nó líder de grupo ou retransmissor para o nó *sink*

## 5.6 Avaliação de Desempenho

A solução proposta neste trabalho foi comparada ao WHISPER FOLLOW (OLIVEIRA; BARRETO; FONTAIO, 2010). O WHISPER foi projetado para ser executado em cenário que utiliza nós sensores fixos coletando e enviando os dados para um nó *sink* móvel em alta velocidade. O principal objetivo do WHISPER é mostrar que um nó móvel em alta velocidade não está na mesma localização a partir da qual enviou o pacote de consulta (*package query*) aos nós sensores fixos.

O WHISPER FOLLOW é uma solução baseada em consulta e utiliza o roteamento plano para entregar os dados ao nó *sink*. O *sink* envia pacotes de consultas aos nós sensores periodicamente e os nós que possuem ocorrência de evento encaminham os dados ao nó vizinho em direção ao nó *sink*. O processo é repetido até o pacote encontrar o *sink*.

A ferramenta para comparação e avaliação utilizada foi o simulador *SiNAlgo* (*Simulator for Network Algorithms*) versão 0.7.5.3 (SINALGO, 2008). O *SiNAlgo* é um *framework* escrito em Java utilizado por pesquisadores para testar, analisar e validar algoritmos de redes e redes de sensores, que permitem a simulação abstraindo as camadas subjacentes da pilha de protocolos. As principais características do *SiNAlgo* são:

- Alto desempenho: suporta simulações com grande quantidade de nós em tempo aceitável em relação a outros simuladores;
- Prototipagem rápida de algoritmos de rede escrito em Java;
- Independência de plataforma;
- Suporte para ambientes 2D e 3D;
- Simulação assíncrona e síncrona;
- *Software* livre (licença BSD).

### 5.6.1 Cenário da simulação

As simulações foram executadas utilizando o seguinte cenário: os nós sensores fixos e móveis foram depositados no local através da deposição não-determinística. Os eventos são aleatórios e podem ocorrer em qualquer parte da área da rede monitorada.

O cenário é composto por:

- Um nó *sink* móvel, este representando um VANT em alta velocidade com as seguintes características:
  - Velocidade acima de 100 km/h;
  - Modelo de mobilidade *Random Direction*;
  - Localização contínua (ex. equipado com GPS);
- Nós sensores fixos (estáticos):
  - Raio de comunicação de 30 metros;
  - Sistema de localização (coordenadas);
- Nós sensores móveis de médio porte (robôs móveis):
  - Velocidade de 8 m/s (equivalente a 28,8 Km/h);
  - Modelo de mobilidade *Random Waypoint*;
  - Raio de comunicação de 200 metros;
  - Localização contínua (ex. equipado com GPS);

O evento foi simulado cobrindo um raio de 80 metros. A densidade dos nós sensores varia de acordo com a quantidade de nós utilizados em cada simulação. Foram executadas 33 simulações, variando a quantidade de nós sensores fixos e móveis. A área monitorada também foi alterada durante as simulações.

As trocas de mensagens entre os nós sensores e o disparo de eventos foram feitos de forma síncrona, devido ao *framework* só permitir a utilização de nós móveis em simulações síncronas. Os parâmetros utilizados na simulação são apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros da simulação

Parâmetros	Valores
Nó <i>Sink</i>	1 (Móvel)
Velocidade do <i>sink</i>	300 km/h
Modelo de Mobilidade	<i>Random Direction</i>
Quantidade nós móveis	25
Raio de comunicação nós móveis	200 m
Modelo de Mobilidade	<i>Random Waypoint</i>
Densidade	0.01 nós/m <sup>2</sup>
Quantidade de nós fixos	576
Raio de comunicação nós fixos	20 m
Área monitorada	272 x 272 m

## 5.7 Resultados da Simulação

A solução proposta neste trabalho, o RAHMoN, foi comparada ao WHISPER FOLLOW. Ambos foram avaliados com condições similares e as métricas utilizadas para avaliação e confecção dos gráficos são descritas a seguir:

- Escalabilidade: Adicionando ou removendo nós do campo monitorado a rede deve manter o mesmo desempenho;
- Taxa de entrega de pacotes: é a quantidade de pacotes de dados coletados que foram entregues ao nó *sink*;

- Número médio de saltos: é a quantidade média de saltos que um nó leva para entregar os dados coletados até o *sink*;
- Velocidade do *sink*: nessa métrica foi calculado o número de saltos que o nó pode obter, levando em consideração a velocidade do *sink*;
- Altura do *sink*: é calculada a taxa de entrega, variando a altura do nó *sink*;
- Atraso do Pacote: é o tempo em que o pacote de dados levou para chegar até o nó *sink*;

A escalabilidade da solução foi avaliada ao longo da simulação, aumentando o número de nós sensores da rede de 144 a 2048, mantendo uma densidade constante de 0,01 nós/m<sup>2</sup>.

A área monitorada aumenta de acordo com a quantidade de nós sensores depositados na rede. O número de nós móveis variou entre {0,7,14, 21 e 28}. Os resultados são mostrados na figura 5.18.

No comportamento das soluções avaliadas em relação à taxa de entrega, sob a mesma quantidade de nós sensores fixos no campo de rede monitorado e sem nenhum nó móvel no RAHMoN, podemos observar que o WHISPER apresenta uma alta taxa de pacotes entregues 95% e o RAHMoN atinge uma taxa menor, cerca de 91%.

Observamos que, conforme aumentamos a quantidade de nós sensores móveis no ambiente monitorado, o RAHMoN consegue atingir uma taxa de entrega superior ao WHISPER.

Enquanto o WHISPER atinge uma taxa de entrega de aproximadamente 97.8% em um campo monitorado contendo 2048 nós e sem nenhum nó móvel, o RAHMoN consegue atingir uma taxa de aproximadamente 99.7% de pacotes entregues no mesmo campo monitorado contendo 28 nós sensores móveis.

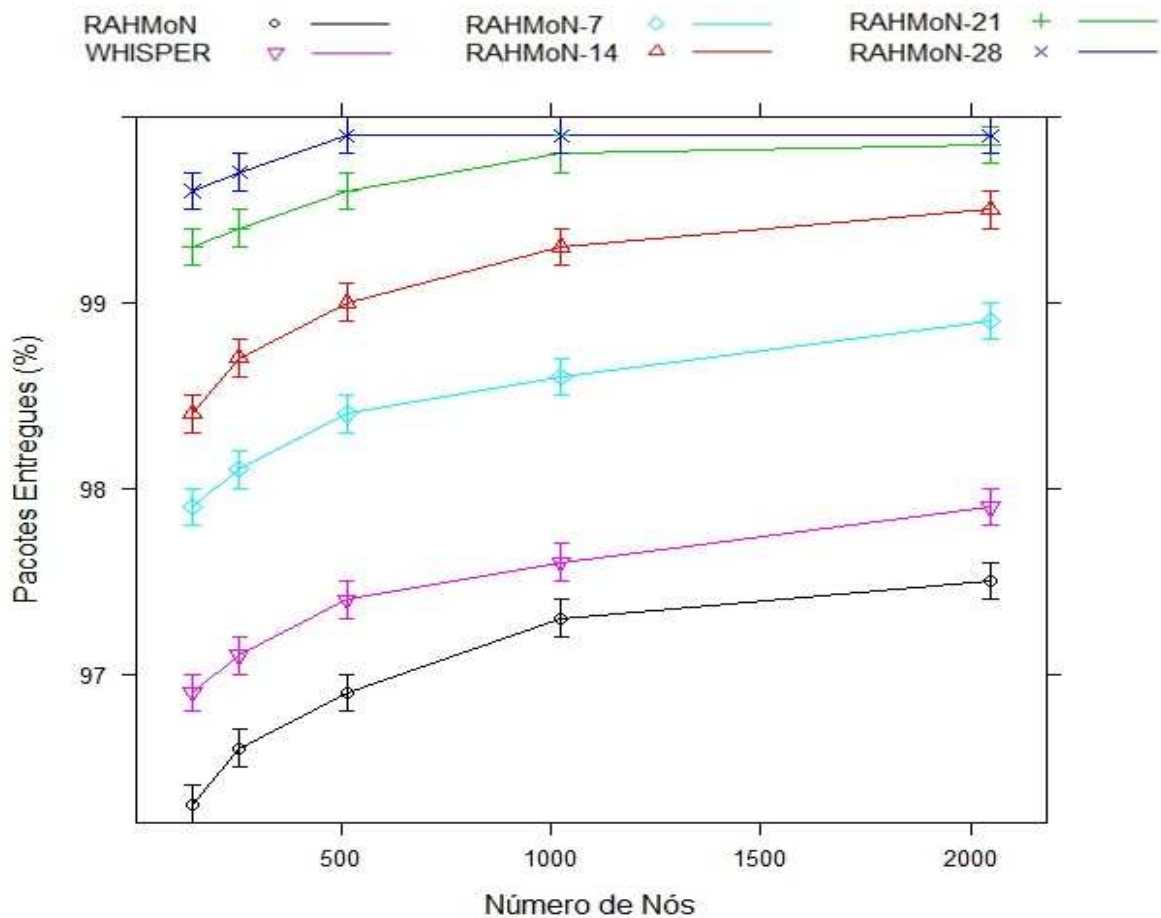
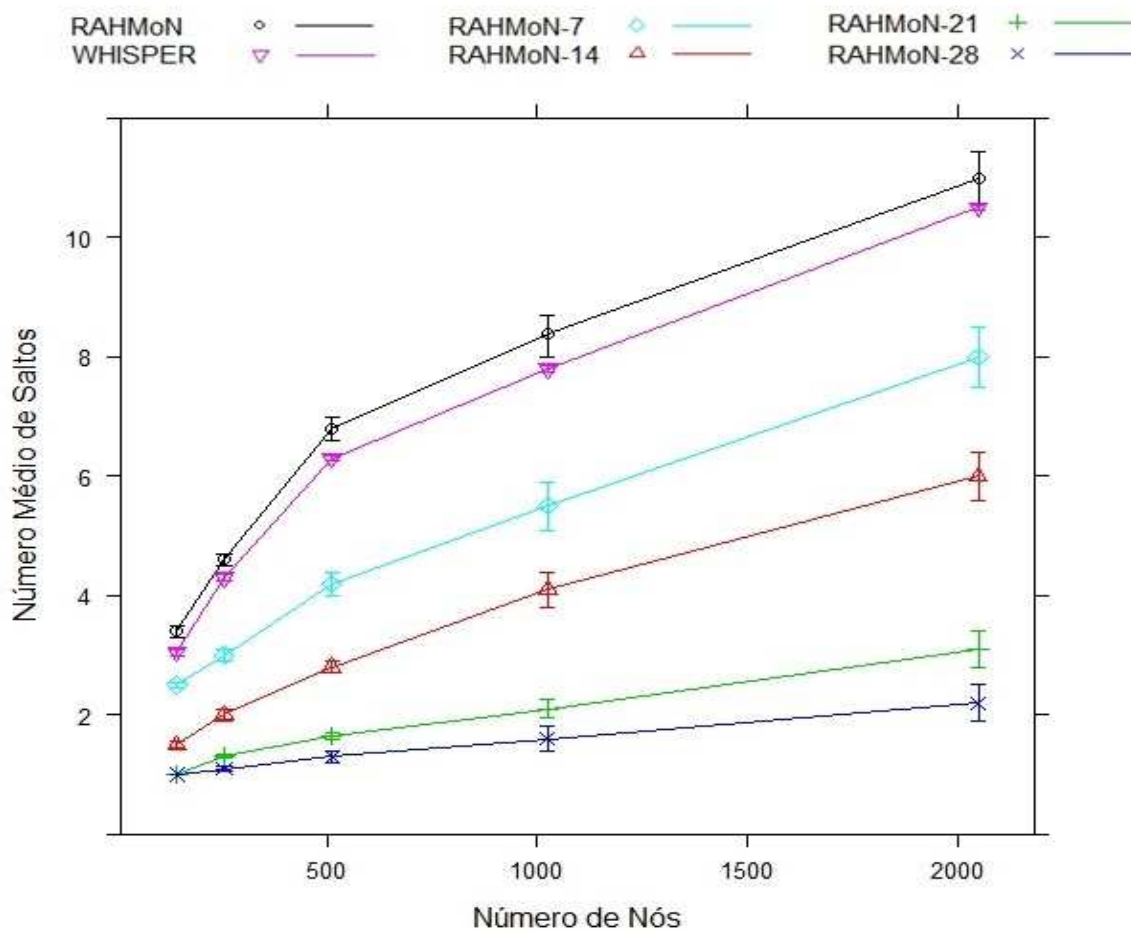


Figura 5.18 – Total de pacotes entregues ao nó *sink*

O aumento da taxa de entrega do RAHMoN é possível devido à solução utilizar nós sensores móveis com raio de comunicação superior ao dos nós sensores fixos. O raio de comunicação utilizado na simulação para os sensores foi respectivamente de 20 metros (20 m) para os sensores fixos e 200 metros (200 m) para os nós sensores móveis.

Um ponto interessante a se destacar é que conforme ocorre o aumento de nós sensores móveis no campo monitorado, aumenta também a chance dos dados coletados serem entregues próximos ao tempo real da ocorrência. Isso é possível devido ao RAHMoN utilizar os nós móveis para fazer o roteamento dos pacotes até o *sink*.



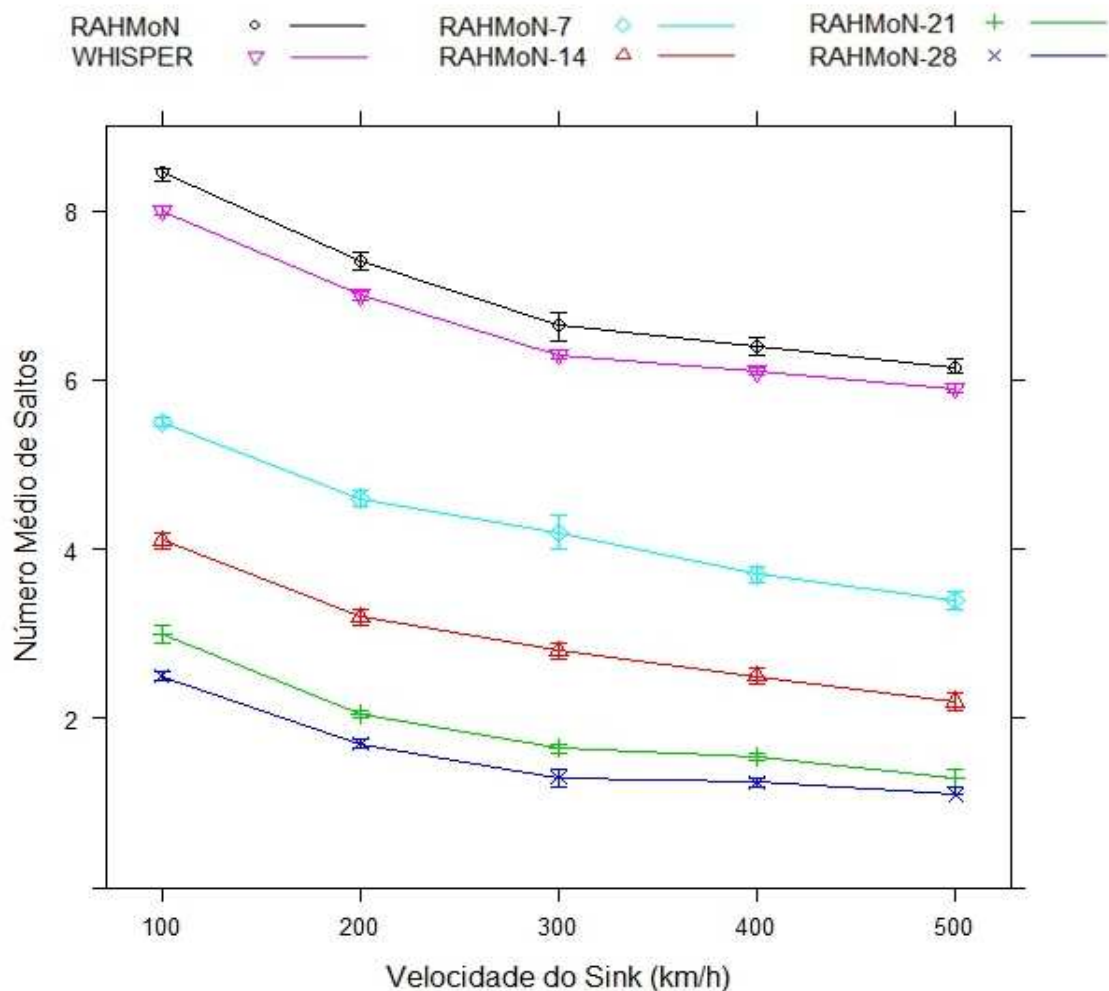
**Figura 5.19– Média aritmética referente à quantidade de saltos utilizados para a entrega de pacotes**

A figura 5.19 mostra o gráfico referente à métrica de número médio de saltos para entregar o pacote de dados coletados para o *sink*. Conforme podemos observar no gráfico, o comportamento das soluções avaliadas considerando um pior caso e sem nenhum nó móvel no RAHMoN, o WHISPER supera o RAHMoN e possui um número médio de saltos equivalente a 13 saltos. No entanto, é possível observar no WHISPER que, conforme aumentamos a quantidade de nós sensores no campo monitorado, o número médio de saltos vai aumentando gradativamente.

No RAHMoN ao adicionarmos os nós móveis na rede, observamos um comportamento diferente em relação ao WHISPER, onde é mantido um número médio de saltos baixo (equivalente a 3 saltos). O motivo é devido o raio de comunicação dos nós móveis ser muito maior do que o raio de comunicação dos nós



fixos. É possível proporcionar a diminuição na quantidade de saltos, ocasionando assim um menor consumo de energia dos nós sensores fixos e aumentando o tempo de vida da rede.



**Figura 5.20 – Média aritmética de número de saltos, variando a velocidade do sink**

A figura 5.20 ilustra os resultados e o comportamento das soluções avaliadas referentes à métrica de quantidade de número médio de saltos variando a velocidade do sink. A velocidade foi variada de 100 km/h até 500 Km/h. Nos resultados, é possível observar que o RAHMoN supera o WHISPER em relação ao número médio de saltos (quando adicionamos nós móveis) e que, conforme ocorre um aumento na velocidade do nó sink, o WHISPER diminui a quantidade de saltos utilizados para entregar o pacote de dados coletados, chegando a um número de aproximadamente 6 saltos.

O WHISPER mantém praticamente a metade de saltos para entregar os pacotes, mesmo o *sink* estando em uma velocidade de aproximadamente 500 km/h. Podemos considerar um resultado positivo, visto que o pior caso seria 13 saltos.

O RAHMoN consegue superar o WHISPER em todas as variações de velocidade (com nós móveis adicionado ao campo). O número médio de saltos do RAHMoN é sempre inferior em relação ao WHISPER. E quando o nó *sink* atingir uma velocidade de aproximadamente 500 km/h, o número médio de saltos para entregar os dados será dois, superando o WHISPER e mostrando que a utilização dos nós móveis ajuda a diminuir a latência da rede.

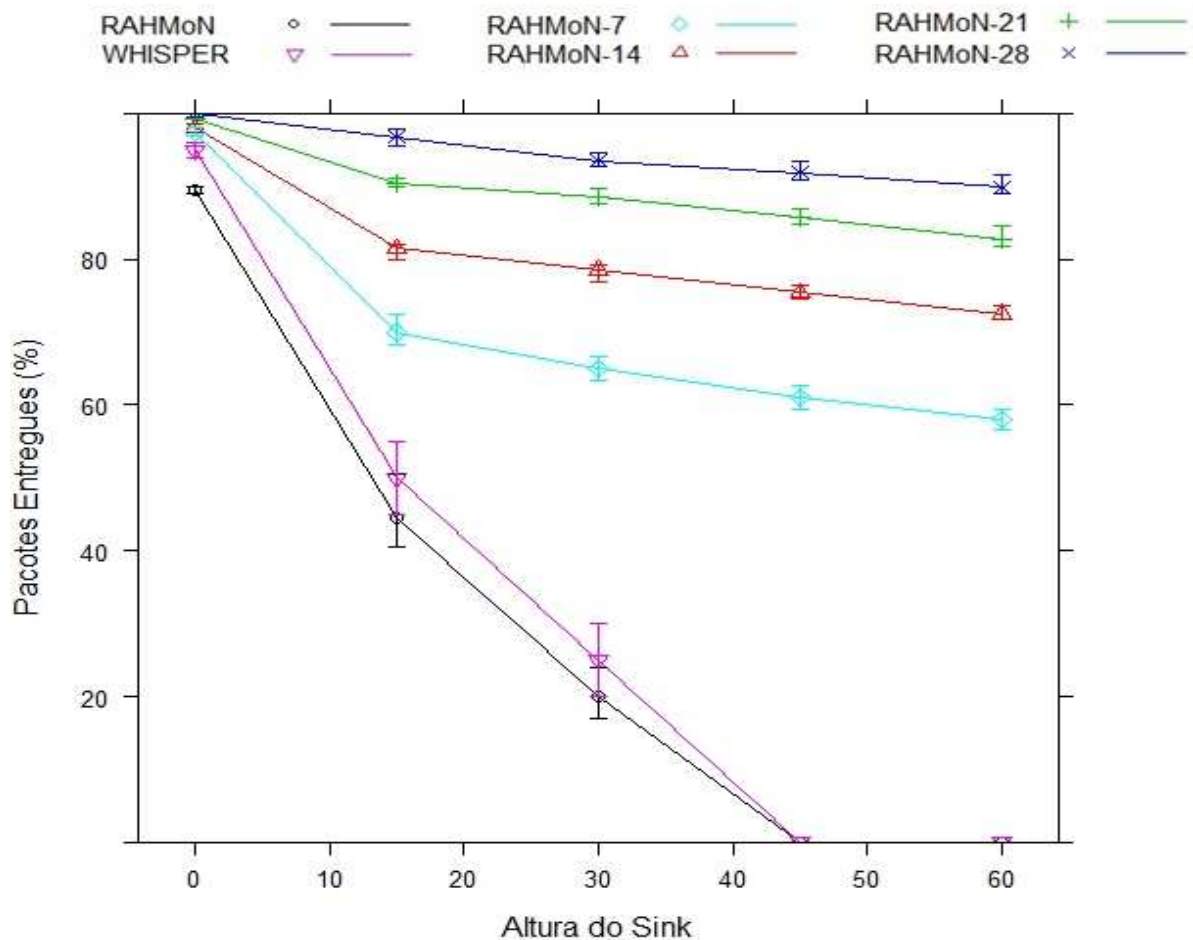


Figura 5.21 – Taxa de Entrega variando a altura do *sink*

A figura 5.21 ilustra o comportamento das soluções avaliadas referente à taxa de entrega de pacotes, variando a altura do nó *sink*. Podemos observar que o WHISPER possui uma taxa de entrega de aproximadamente 55% com a altura do

*sink* até 15 metros, conforme aumentamos a altura do nó *sink*, à taxa de entrega diminui, isso se deve pelo fato do nó *sink* sair do raio de alcance do nó sensor, o RAHMoN sem a utilização dos nós móveis, chega a uma taxa de aproximadamente 50%, conforme observado no gráfico. Por outro lado quando adicionamos os nós móveis no campo monitorado, a taxa de entrega sofre uma queda muito menor em relação ao WHISPER, devido aos nós móveis possuírem o raio de comunicação maior do que os nós fixos.

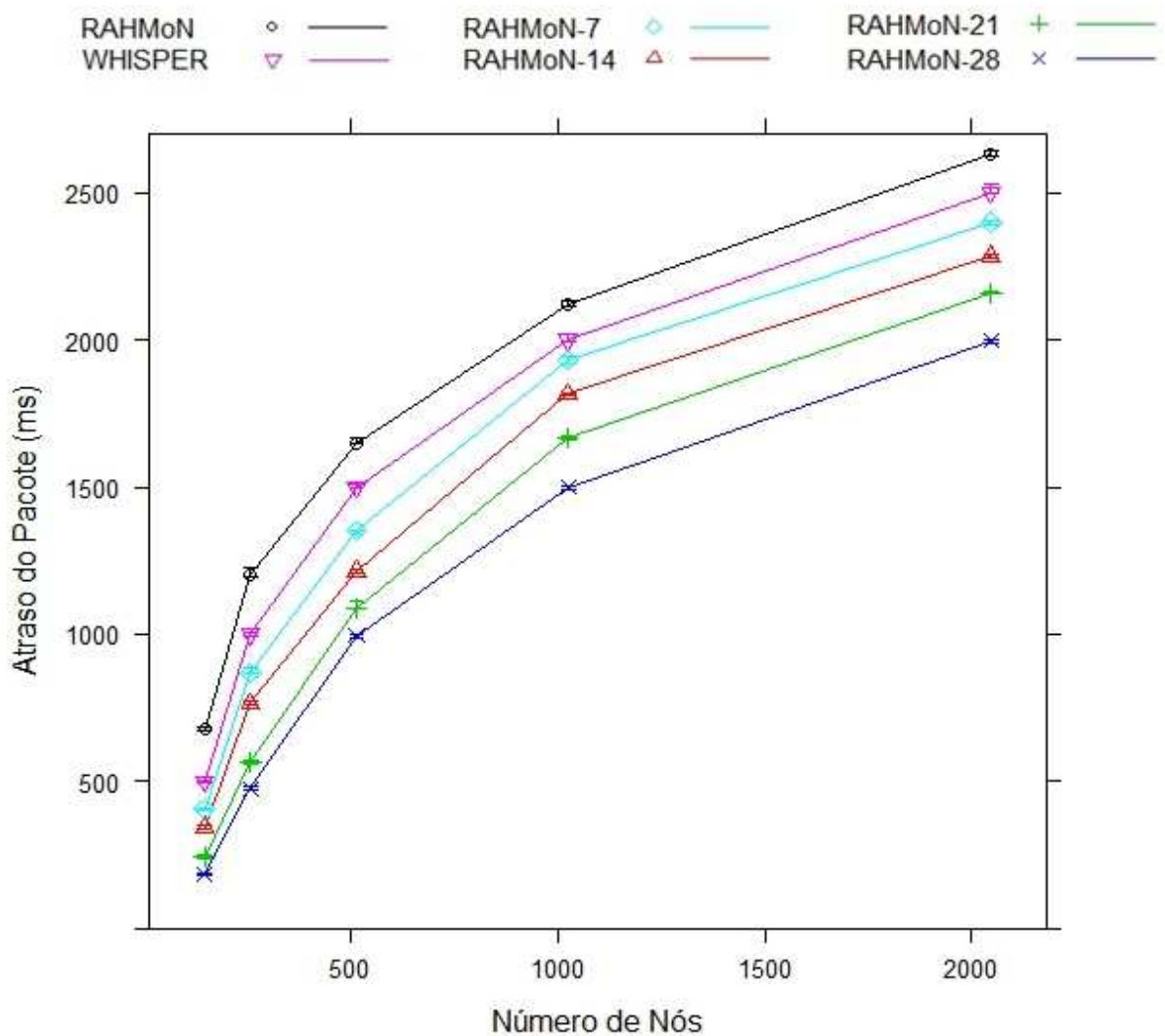


Figura 5.22– Atraso na entrega do pacote

A figura 5.22 mostra os resultados avaliados referentes ao atraso do pacote para ser entregue ao nó *sink*. O gráfico está ordenando o tempo de atraso em milissegundos. Observa-se que o WHISPER têm um atraso de aproximadamente

2500 ms, o RAHMoN no mesmo cenário (sem nós móveis) sofre um atraso ainda maior. Por outro lado ao adicionarmos os nós móveis no ambiente, o RAHMoN consegue diminuir o atraso do pacote de forma considerável, ficando abaixo, com um atraso de 1900 ms, o que implica na entrega de pacotes de dados de forma mais rápida e eficiente, quando utilizando os nós sensores móveis para fazer a entrega. É possível observar que conforme aumentamos os nós móveis na rede, conseguimos diminuir o atraso. Isso se deve pela probabilidade do nó móvel ser encontrado de forma mais rápida e este fazer a entrega do pacote de dados coletados.

## 5.8 Considerações Finais

O capítulo apresentou o RAHMoN, uma solução de roteamento de dados para redes de sensores sem fio móveis heterogêneas, que suporta a utilização de nós sensores com diferentes graus de mobilidade e ainda utiliza um *sink* em alta velocidade para coletar os dados. O RAHMoN é orientado a eventos, utiliza técnicas de agregação de dados, clusterização para reduzir o tráfego de transmissões na rede. Uma matriz de adjacência contendo as posições (coordenadas) dos nós sensores fixos é criada, formando a estrutura da rede. Essa matriz é armazenada somente pelos nós móveis e auxilia na construção de rotas para entregar os dados ao *sink*.

Como observado nos resultados, a solução apresentou uma alta taxa de entrega de pacotes, utilizou um baixo número de saltos para entregar os dados, e um atraso menor em relação ao WHISPER, quando utilizando os nós móveis que foram depositados no ambiente, o que implica automaticamente na redução do consumo de energia dos nós fixos, devido os nós móveis entregarem os dados utilizando uma quantidade menor de saltos.

# Capítulo 6

## CONCLUSÕES

---

Este trabalho apresentou o RAHMoN, solução de roteamento para redes de sensores sem fio móveis heterogêneas. O RAHMoN utilizou as técnicas de agregação de dados, roteamento hierárquico baseado na ocorrência de eventos, diferentes graus de mobilidade, modelo *Random Direction* para o VANT e o *Random Waypoint* para os nós terrestres. O RAHMoN foi projetado para suportar mobilidade dos nós e também para garantir uma alta taxa de entrega de pacotes de dados para o *sink*, visando manter por mais tempo os nós sensores fixos na rede.

A solução proposta é capaz de trabalhar em redes compostas por: somente nós fixos e/ou redes compostas por nós de diferentes graus de mobilidade e ainda nó *sink* em alta velocidade. O RAHMoN foi avaliado e comparado com o WHISPER, solução em que visa coletar os dados utilizando o roteamento plano baseado em consulta, onde os nós sensores são fixos e somente o nó *sink* possui mobilidade.

Os resultados obtidos a partir da avaliação de desempenho levam às seguintes conclusões:

- Em relação à escalabilidade, o RAHMoN demonstrou possuir estabilidade. A quantidade de nós foi variada de 144 até 2048, variando também a quantidade de nós móveis entre 0 a 28 respectivamente;

- Em relação à taxa de entrega de dados, o RAHMoN mostrou ser eficiente, superando em alguns casos a alta taxa de entrega do WHISPER;
- Em relação ao número médio de saltos, o RAHMoN mostrou conseguir entregar os pacotes de dados, utilizando praticamente a metade do que o WHISPER. O número médio de salto também se mantém muito baixo, mesmo variando a velocidade do nó *sink*;
- Em relação à altura do *sink*, O RAHMoN superou o WHISPER, utilizando os nós móveis para auxiliar no roteamento e entrega dos dados. Como observado mesmo o *sink* estando em altura superior a 30 metros, o RAHMoN consegue manter uma alta taxa de entrega de pacotes;
- Com relação ao atraso dos pacotes, WHISPER superou RAHMoN, quando não havia nenhum nó móvel no ambiente. Porém quando os nós móveis são inseridos e utilizados no roteamento, RAHMoN é superior.

### 6.1 Principais contribuições:

- Proposta e implementação da solução de roteamento para redes de sensores sem fio móveis heterogêneas, capaz de suportar diferentes modelos de mobilidade e que pode ser utilizado para futuras extensões e adaptações para novos domínios de aplicações.
- Avaliação comparativa de duas soluções com o mesmo objetivo, porém usando de técnicas diferentes (roteamento hierárquico orientado a eventos x roteamento plano baseado em consulta), ambos trabalhando com nó *sink* em alta velocidade.

## 6.2 Artigos Publicados e Submetidos

Em termos de publicações, a versão inicial deste trabalho foi publicada em:

- VILELA, M. A.; ARAUJO, R. B.. RAHMN: A Routing Algorithm for Heterogeneous Mobile Networks. In: II Brazilian Conference on Critical Embedded Systems (CBSEC), 2012, Campinas. II Brazilian Conference on Critical Embedded Systems, p. 24 – 29, 2012.

Submissões Previstas:

- VILELA, M.A.; ARAUJO, R.B.. RAHMoN: Uma Solução de Roteamento para Redes de Sensores Sem Fio Móveis Heterogêneas, a ser submetido:
  - 31<sup>st</sup>Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (SBRC), a ser realizado na cidade de Brasília-DF, entre os dias 6 a 10 de Maio de 2013.
- VILELA, M. A.; ARAUJO, R. B.. Routing Algorithm for Heterogeneous Mobile Networks, a ser submetido:
  - 18<sup>th</sup> IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'2013).

## 6.3 Trabalhos Futuros

As seguintes atividades podem ser realizadas como trabalhos futuros:

- Uma comparação da solução apresentada (RAHMoN) com outras soluções heterogêneas;

- 
- Implementação e avaliação do RAHMoN em ambiente real utilizando robôs terrestres e aéreos sendo desenvolvidos no projeto INCT-SEC;
  - Avaliação de novas métricas, por exemplo, consumo de energia entre os nós móveis; taxa de agregação de dados em diferentes rotas construídas; comparação entre agregação de dados x correlação espacial, entre outras.



# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

---

AHMED, U.; HUSSAIN, F. B. **Energy efficient routing protocol for zone based mobile sensor networks.** In: 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, Istambul, Turquia, p. 1081-1086, jul. 2011.

AKKAYA, K.; YOUNIS, M. **A survey on routing protocols for wireless sensor networks.** Ad Hoc Networks, vol. 3, p. 325–349, 2005.

AKYILDIZ, I. et al. **A survey on sensor networks.** IEEE Communications Magazine, vol. 40, nº.8, p. 102–114, ago. 2002.

AKYILDIZ, I.F.; POMPILI, D.; MELODIA, T. **Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges,** Ad Hoc Networks (Elseiver), vol. 3, nº 3, p. 257-279, 2005.

AKYILDIZ, I. F.; VURAN, M. C. **Wireless sensor networks.** Chichester West Sussex U.K.: John Wiley & Sons, 2010. (Advanced Texts in Communications and Networking).

AL-KARAKI, J.; KAMAL, A. **Routing techniques in wireless sensor networks: a survey.** IEEE Wireless Communications, vol. 11, nº.6, p. 6–28, 2004.

ALWAN, H.; AGARWAL, A. **A Survey on Fault Tolerant Routing Techniques in Wireless Sensor Networks.** 2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications, p. 366-371, jun. 2009.

ARONSKY, A.; SEGALL, A. **A multipath routing algorithm for mobile Wireless Sensor Networks.** Wmnc2010, p. 1-6, out. 2010.

AWWAD, S. A. B. et al. **Cluster Based Routing protocol for Mobile Nodes in Wireless Sensor Network.** In: 2009 International Symposium on Collaborative Technologies and Systems, p. 233-241, 2009.

BAI, F.; HELMY, A. **IMPORTANT: a framework to systematically analyze the Impact of Mobility on Performance of Routing Protocols for Adhoc Networks.** In: Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, IEEE INFOCOM 2003, v. 2, p. 825-835, 2003.

BRESLAU, L. et al. **Advances in network simulation.** In: IEEE Computer, vol. 33, nº. 5, maio 2000, p. 59--67

BOUKERCHE, A. **Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks,** In Wiley Series on Parallel and Distributed Computing, John Wiley & Sons, Inc Hoboken, New Jersey, 2009.

- BOUKERCHE, A.; CHENG, X.; LINUS, J. **Energy-aware data-centric routing in microsensor networks**. In: Proceedings of the 6th ACM international workshop on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems. New York, NY, USA, 2003, p. 42–49.
- BOUKERCHE, A. et al. **Localization systems for wireless sensor networks**. IEEE Wireless Communications, vol. 14, nº.6, p. 6 –12, dez. 2007.
- BOUKERCHE, A. and NIKOLETSEAS, S. **Protocols for data propagation in wireless sensor networks**. Plenum Press, New York, NY, USA, p. 23–51, 2004.
- BROOKS, R.; RAMANTHAN, P.; SAYEED, A. **Distributed target classification and tracking in sensor networks**. In Proceedings of the IEEE, 2003.
- BRAGINSKY, D.; ESTRIN, D. **Rumorrouting algorithm for sensor networks**. In: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications. New York, NY, USA, p. 22–31, 2002.
- BRI, D. et al. **Real Deployments of Wireless Sensor Networks**. 2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications, p. 415-423, jun. 2009.
- J. Broch, D. Maltz, D. Johnson, Y. Hu, and J. Jetcheva. **Multi-hop wireless ad hoc network routing protocols**. In: Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), p. 85–97, 1998.
- CAMP, T.; BOLENG, J.; DAVIES, V. **A survey of mobility models for ad hoc network research**. Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 2, nº.5, p. 483-502, 2002.
- CHONG, C.; KUMAR, S. P.; MEMBER, S. **Sensor Networks: Evolution, Opportunities , and Challenges**. vol. 91, nº.8, 2003.
- CHU, M. et al. **Scalable information-driven sensor querying and routing for ad hoc heterogeneous sensor networks**. In: International Journal of High Performance Computing Applications, vol. 16, ago. 2002.
- COOPER, N. et al. **Impact of Mobility Models on Multi-path Routing**. In: Mobile Ad Hoc Networks, 2009.
- CROFT, J. CHARLES, C. HULTINE, K. PATWARI, N. **Red Butte Monitoramento Canyon**. In: Sensing and Processing Across Networks at The University of Utah, 2008. Disponível em <<http://span.ece.utah.edu/pmwiki/pmwiki.php?n=Main.RedButteCanyonMonitoring>>. Acesso em: 18 jan. 2012.

- DENG, S.; LI, J.; SHEN, L. **Mobility-based clustering protocol for wireless sensor networks with mobile nodes**. IET Wireless Sensor Systems, vol. 1, nº.1, p. 39, 2011.
- DEVA SARMA, H. K.; KAR, A.; MALL, R. **Energy efficient routing protocol for Wireless Sensor Networks with Node and Sink mobility**. IEEE Sensors Applications Symposium, p. 239-243, fev. 2011.
- ENDLER, M. **Large scale body sensing for Infectious Disease Control**. In: Sentient Future Competition on European Workshop on Wireless Sensor Networks, Zurich, Suíça, p. 1-4, fev. 2006.
- FASOLO, E. et al. **In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: a survey**. IEEE Wireless Communications, vol. 14, nº.2, p. 70–87, 2007.
- FENG, J.; KOUSHANFAR, F.; POTKONJAK, M. **System-architectures for sensor networks issues, alternatives, and directions**. In: Computer Design: VLSI in Computers and Processors. Proceedings. IEEE International Conference on, p. 226–231, 2002.
- GUPTA, I.; RIORDAN, D.; SAMPALLI, S. **Cluster-head election using fuzzy logic for wireless sensor networks**. In: Communication Networks and Services Research Conference. Proceedings of the 3rd Annual. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, p. 255–260, 2005.
- Heidemann, J., Silva, F., and Estrin, D. **Matching data dissemination algorithms to application requirements**. In Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems, SenSys '03, New York, NY, USA, P. 218-229, 2003.
- HEINZELMAN, W. R.; KULIK, J.; BALAKRISHNAN, H. **Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks**. In: Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking. New York, NY, USA, p. 174–185, 1999..
- HEINZELMAN, W. R.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. **Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks**. Analysis, vol. 00, p. 1-10, 2000.
- INTANAGONWIWAT, C.; GOVINDAN, R.; ESTRIN, D. **Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks**. In: Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking, New York, NY, USA, p. 56–67, 2000.
- INTANAGONWIWAT, C. et al. **Directed diffusion for wireless sensor networking**. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), v. 11, p. 2–16, fev. 2003.

KANTOR, G. et al. **Distributed search and rescue with robot and sensor team.**In Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Field and Service Robotics (FSR), p. 327-332, 2003.

KARL, H.; WILLIG. **Protocols and architectures for wireless sensor networks.** Chichester West Sussex England ;Hoboken NJ: John Wiley & Sons, 2007.

KIM, D.-S.; CHUNG, Y.-J. **Self-Organization Routing Protocol Supporting Mobile Nodes for Wireless Sensor Network.** In: First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences , p. 622-626, jun. 2006.

KRISHNAMACHARI, B.; ESTRIN, D.; WICKER, S. **Modelling data-centric routing in wireless sensor networks.** In: Proceedings of IEEE INFOCOM, vol. 2, p. 1–11, 2002.

KOTAY, K.; PETERSON R.; RUS, D. **Experiments with robots and sensor networks for mapping and navigation.**In Proceedings of the International Conference on Filed and Service Robotics (FSR), 2005.

KUCUK, K. et al. **A novel localization technique for wireless sensor networks using adaptive antenna arrays.**In: Wireless Conference, European, p. 483-486, 2008.

LAMBROU, T.; PANAYIOTOU, C. **A survey on routing techniques supporting mobility in sensor networks.** In: Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, MSN '09. 5th International Conference on, p. 78–85, 2009.

LE-TRUNG, Q. et al. **Information storage, reduction and dissemination in sensor networks: A survey.** In: Consumer Communications and Networking Conference 6th IEEE, p. 1–6, 2009.

LI, L.; HALPERN, J. Y. **Minimum-energy mobile wireless networks revisited.** vol. 1, p. 278–283, jun. 2001.

LIANG, B.; HAAS, Z. J. **Predictive distance-based mobility management for PCS networks.**IEEE INFOCOM '99. Conference on Computer Communications.Proceedings.Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. The Future is Now, vol.3, p. 1377-1384, 1999.

LIN, C. R.; GERLA, M. **Adaptive clustering for mobile wireless networks.**Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol. 15, nº. 7, p. 1265–1275, set. 1997.

LINDSEY, S.; RAGHAVENDRA, C. **PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information systems.** In: Proceedings, IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: [s.n.], vol. 3, p. 1125–1130, 2002.

Liu, B., Brass, P., Dousse, O., Nain, P., and Towsley, D. **Mobility improves coverage of sensor networks.**In Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, MobiHoc '05, New York, NY, USA.p. 300–308, 2005.

MANJESHWAR, A.; AGRAWAL, D. **TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks.** In: Proceedings 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium, San Francisco, CA, USA, [s.n.], p. 2009–2015, 2001.

MERGEN, G.; ZHAO, Q.; TONG, L. **Sensor Networks With Mobile Access: Energy and Capacity Considerations.**Work, vol. 54, n<sup>o</sup>.11, p. 2033-2044, 2006.

MUNIR, S. A. et al. **Mobile Wireless Sensor Network: Architecture and Enabling Technologies for Ubiquitous Computing.** In: 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW'07), p. 113-120, 2007.

NAKAMURA, E. F.; LOUREIRO, A. A. F.; FRERY, A. C. **Information fusion for wireless sensor networks.**ACM Computing Surveys, vol. 39, n<sup>o</sup>. 3, p. 9-es, set. 2007.

NASSER, N.; AL-YATAMA, A.; SALEH, K. **Mobility and routing in Wireless Sensor Networks.**24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering(CCECE), p. 573-578, maio. 2011.

NING, X.; CASSANDRAS, C. G. **Optimal cluster-head deployment in wireless sensor networks with redundant link requirements.** In: Proceedings of the 2nd international conference on Performance evaluation methodologies and tools. ICST, Brussels, Belgium, Belgium: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2007.

OLIVEIRA, H. A. B. F.; BARRETO, R. S.; FONTAO, A. L. **A Novel Greedy Forward Algorithm for Routing Data Toward a High Speed Sink in Wireless Sensor Networks.** Time, 2010.

PANDA, S.; MOHAPATRA, R. **Implementation and a comparison of mobility models in NS-2 a thesis submitted in partial fulfillment implementation and comparison of mobility models in NS-2,** 2009, p. 1-40.

PENG, L.; XU, J. **ECDGA: An Energy-Efficient Cluster-Based Data Gathering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks.** In: 2009 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, p. 1-4, dez. 2009.

PERKINS, C. **Ad hoc networking.** Boston MA: Addison-Wesley, 2000.

- PINTO, A. J. G. **Mecanismo de Agregação de Dados Empregando Técnicas Paramétricas em Redes de Sensores**. Tese (Doutorado) — UFRJ, Rio de Janeiro, jun. 2004. Disponível em: <<http://www.gta.ufrj.br/ftp/gta/TechReports/Antonio04/Antonio04.pdf>>.
- RAGHUNATHAN, V. et al. **Energy-aware wireless microsensor networks**. IEEE Signal Processing Magazine, vol. 19, nº. 2, p. 40–50, mar. 2002.
- RODOPLU, V.; MENG, T. H. **Minimum energy mobile wireless networks**. IEEE Journal Selected Areas in Communications, vol. 17, nº. 8, p. 1333–1344, ago. 1999.
- ROYER, E. M.; MELLIAR-SMITH, P. M.; MOSERT, L. E. **An Analysis of the Optimum Node Density**. Ad hoc Mobile Networks, 2001.
- SADAGOPAN, N.; KRISHNAMACHARI, B.; HELMY, A. **The ACQUIRE mechanism for efficient querying in sensor networks**. Proceedings of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, p. 149-155, 2003.
- SCHURGERS, C.; SRIVASTAVA, M. B. **Energy efficient routing in wireless sensor networks**. vol. 00, n. c, p. 357-361, 2001.
- SHAH, R. C.; RABAEY, J. M. **Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks**. vol. 1, p. 350– 355, mar. 2002.
- SHEN, C.; SRISATHAPORNPHAT, C.; JAIKAO, C. **Sensor information networking architecture and applications**. IEEE Personal Communications, vol. 8, nº.4, p. 52–59, ago. 2001.
- SHIH, E. et al. **Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks**. In: Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '01), New York, NY, USA, p. 272–287, 2001.
- SOHRABY, K.; MINOLI, D.; ZNATI, T. **Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols and Applications**. Wiley Interscience, p. 326, 2007.
- SRIKANTH, V.; BABU, I. R. **Cluster head selection for wireless sensor networks: A survey**. Vol. 5, p. 44–53, 2009.
- RUIZ, L. B.; NOGUEIRA, J. M. S. MANNA: **Uma Arquitetura para Gerenciamento de Redes de Sensores Sem Fio**. Tese (Doutorado) — UFMG, Belo Horizonte, dez. 2003. Disponível em <<http://hdl.handle.net/1843/SLBS-5WAJRV>>.
- RUIZ, L. B.; NOGUEIRA, J. M. S.; LOUREIRO, A. A. F. **capítulo III: sensor network management**. In: Handbook of Sensor Network: Compact Wireless and Wired Sensing Systems. CRC Press, vol. 01, 2004.

TILAK, S.; ABU-GHAZALEH, N. B.; HEINZELMAN, W. **A taxonomy of wireless micro-sensor network models**. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, vol. 6, nº.2, p. 28-36, abr. 2002.

VILLAS, L. A. **Protocolos de Roteamento Cientes de QoS para Redes de Sensores e Atuadores Sem Fio**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2007.

WALTENEGUS, D.; C, P. **Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice**. In: Wireless Communications and Mobile Computing, Wiley, 1ª ed., set. 2010.

WEISER, M. **The Computer for 21st Century**. In: *Scientific Americana*, vol. 3, nº. 3, set. 1991.

WU, S. et al. **Intelligent Medium Access for Mobile Ad Hoc Networks with Busy Tones and Power Control**. vol. 18, nº.9, p. 1647-1657, 2000.

XU, Y.; HEIDEMANN, J.; ESTRIN, D. **Geography-informed energy conservation for ad hoc routing**. In: Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '01), New York, NY, USA, p. 70–84, 2001.

YAO, Y.; GEHRKE, J. **The cougar approach to in-network query processing in sensor networks**. ACM SIGMOD Record, vol. 31, p. 9–18, set. 2002.

YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. **Wireless sensor network survey**. Computer Networks, vol. 52, nº.12, p. 2292-2330, ago. 2008.