

RODRIGO TRINDADE GONÇALVES

**MULTI-K: UM PROTOCOLO DE ROTEAMENTO PARA REDES DE SENSORES  
SEM FIO USANDO ÁRVORES DE ESPALHAMENTO PARCIAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2007

**RODRIGO TRINDADE GONÇALVES**

**MULTI-K: UM PROTOCOLO DE ROTEAMENTO PARA  
REDES DE SENSORES SEM FIO USANDO ÁRVORES  
DE ESPALHAMENTO PARCIAIS**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Ciência da  
Computação, para obtenção do título  
de *Magister Scientiae*.

APROVADO: 10 de agosto de 2007.

---

Prof. Mauro Nacif Rocha  
(Co-orientador)

---

Prof. Ricardo dos Santos Ferreira  
(Co-orientador)

---

Prof. Alcione de Paiva Oliveira

---

Prof. Antonio Alfredo Ferreira Loureiro

---

Prof. Carlos de Castro Goulart  
(Orientador)

Aos meus pais Jesuino e Cleonice,  
ao meu orientador Carlos de Castro Goulart,  
ao colega Carlos Maurício Seródio Figueiredo  
e, em especial, a minha companheira Janine.

## **AGRADECIMENTOS**

- Aos meus pais Jesuino e Cleonice, pelo apoio e amor incondicionais, sem eles eu não teria chegado até aqui.
- Ao meu irmão Vinícius que é um grande amigo.
- Ao amigo e prof. Carlos de Castro Goulart pela orientação neste trabalho e pela ajuda no meu processo de crescimento pessoal.
- Ao prof. Antônio Alfredo Ferreira Loureiro por abrir as portas do DCC/UFMG para ajudar na realização deste trabalho.
- Ao colega Carlos Maurício Seródio Figueiredo pelo auxílio, empenho e grande dedicação.
- A minha companheira Janine pelo seu amor e apoio.
- Aos meus co-orientadores Mauro Nacif Rocha e Ricardo dos Santos Ferreira.
- Aos funcionários do DPI, em especial ao secretário da pós-graduação Altino Alves de Souza Filho, pela grande competência e amizade; à chefe de expediente Eliana Ferreira Rocha, pela presteza e dedicação.
- A todos os professores e colegas do mestrado pelo convívio.

## **BIOGRAFIA**

Rodrigo Trindade Gonçalves, filho de Jesuino Gonçalves Lima e Cleonice Trindade Gonçalves, brasileiro, nascido em 12 de maio de 1982 no município de Viçosa, no Estado de Minas Gerais.

No ano de 2000 concluiu o ensino médio no Colégio Universitário da Universidade Federal de Viçosa - Coluni, UFV. Em 2005 concluiu o curso de Ciência da Computação na Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF. Neste mesmo ano ingressou no programa de pós-graduação em Ciência da Computação na Universidade Federal de Viçosa - UFV, onde se tornou mestre do curso de mestrado do Departamento de Informática - DPI, defendendo esta dissertação em agosto de 2007.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b>	vi
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	vii
<b>RESUMO</b>	viii
<b>ABSTRACT</b>	ix
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 O problema e sua importância . . . . .	3
1.2 Hipótese . . . . .	5
1.3 Objetivos . . . . .	5
1.4 Organização do Texto . . . . .	6
<b>2 Redes de Sensores Sem Fio</b>	<b>7</b>
2.1 O Sensor . . . . .	7
2.2 Aplicações . . . . .	9
2.2.1 Aplicações militares . . . . .	10
2.2.2 Aplicações de ambiente . . . . .	11
2.2.3 Aplicações na área da saúde . . . . .	11
2.2.4 Aplicações comerciais . . . . .	12
2.3 Métricas de desempenho . . . . .	13
2.3.1 Eficiência do uso de energia e vida útil do sistema . . . . .	13
2.3.2 Latência e precisão . . . . .	14
2.3.3 Tolerância a falhas . . . . .	15
2.3.4 Escalabilidade . . . . .	16
2.3.5 Exposição dos sensores de uma RSSF . . . . .	16
2.4 Arquitetura básica de uma RSSF . . . . .	16

2.5	Qualidade de Serviço em RSSFs . . . . .	17
2.5.1	Desafios para o suporte a QoS em RSSFs . . . . .	18
2.5.2	Trabalhos relacionados à QoS em RSSFs . . . . .	20
2.6	Protocolos de roteamento para RSSF . . . . .	23
2.6.1	EF-Tree ( <i>Earlier-First Tree</i> ) . . . . .	24
2.6.2	SID ( <i>Source-Initiated Dissemination</i> ) . . . . .	25
2.7	Comentários sobre este Capítulo . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Multi-K: a versão modificada do protocolo Multi</b>	<b>29</b>
3.1	Multi: Protocolo Adaptativo Híbrido para Disseminação de Dados em RSSFs . . . . .	30
3.1.1	Regra Adaptativa . . . . .	30
3.1.2	Descrição do algoritmo . . . . .	31
3.2	O protocolo Multi-K . . . . .	33
3.3	Resultados esperados com a modificação proposta . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Avaliação do Multi-K</b>	<b>37</b>
4.1	Metodologia . . . . .	37
4.2	Simulações e Resultados . . . . .	39
4.2.1	Análise comparativa do Multi e Multi-K em cenários com distribuição uniforme . . . . .	40
4.2.2	Análise comparativa do Multi e Multi-K em cenários com distribuição exponencial . . . . .	44
4.3	Análise geral dos resultados . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Conclusões e Perspectivas Futuras</b>	<b>50</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>50</b>

**LISTA DE TABELAS**

4.1 Parâmetros de simulação. . . . . 38



## LISTA DE FIGURAS

2.1	Hardware básico de um nodo sensor (Loureiro et al., 2003). . . . .	8
2.2	Alternância entre estados de escuta ( <i>listen</i> ) e dormência ( <i>sleep</i> ). . . . .	14
2.3	Representação de nodos sensores em uma estrutura hierárquica. . . . .	15
2.4	Arquitetura das Redes de Sensores (Pinto, 2004). . . . .	17
2.5	Funcionamento do EF-Tree (Figueiredo et al., 2004). . . . .	25
2.6	Funcionamento do SID (Figueiredo et al., 2004). . . . .	26
3.1	Regra adaptativa do Multi (Figueiredo et al., 2007). . . . .	32
3.2	Disseminação de dados via <i>broadcast</i> para construção da árvore. . . . .	34
4.1	Avaliação da Robustez. . . . .	41
4.2	Avaliação da Escalabilidade. . . . .	42
4.3	Energia com tráfego eventual. . . . .	43
4.4	Topologias de rede utilizando as distribuições uniforme e exponencial. . . . .	45
4.5	Consumo de energia em cenário baseado em eventos utilizando localiza- ção. . . . .	46

## RESUMO

GONÇALVES, Rodrigo Trindade, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2007.

**Multi-K: Um protocolo de roteamento para redes de sensores sem fio usando árvores de espalhamento parciais.** Orientador: Carlos de Castro Goulart. Co-Orientadores: Mauro Nacif Rocha e Ricardo dos Santos Ferreira.

Este trabalho apresenta uma versão modificada do protocolo de disseminação de dados Multi, para rede de sensores sem fio (RSSF), chamado Multi-K. Uma RSSF é uma rede formada por um conjunto de dispositivos autônomos distribuídos que usam sensores para monitorar de forma cooperativa as condições físicas ou ambientais. O Multi é um protocolo adaptativo híbrido, comportando-se de maneira reativa quando a frequência de eventos é baixa ou de maneira pró-ativa quando a frequência de eventos aumenta. No comportamento pró-ativo, o Multi gera uma árvore de espalhamento para a rede, que deve ser mantida periodicamente. A diferença entre os protocolos Multi e Multi-K é construção da árvore de espalhamento. No primeiro protocolo, a construção da árvore tem alcançabilidade máxima, ou seja, atinge todos os nodos da rede. No segundo, é efetuada a construção parcial com o objetivo de alcançar os nodos com profundidade máxima do nodo fonte. O protocolo Multi-K usa uma abordagem de construir, a partir do nodo sorvedouro, uma árvore de  $k$  saltos (*hops*) até cada nodo fonte (ou gerador de dados). A distância  $d$  (em *hops*) de um nodo fonte até o nodo *sink* é definida pelo caminho de custo mínimo. Quando dois ou mais nodos estão transmitindo dados, o número de saltos  $k$ , para a construção da árvore, é determinado pelo maior valor de  $d$ . Desta forma, se a alta frequência de eventos se concentrar em áreas próximas ao nodo *sink*, haverá um número menor de mensagens de controle para construir e manter a árvore de espalhamento parcial. A modificação proposta foi simulada usando o simulador NS-2 (*Network Simulator 2*)

e comparada com a versão original do protocolo Multi. Os cenários de simulação consideraram duas situações distintas. Na primeira, os nodos eram distribuídos uniformemente e os eventos também ocorriam com distribuição uniforme. Nesta situação, os resultados mostraram que a abordagem proposta no Multi-K é escalável, mantém a taxa de entrega de dados e consegue uma pequena redução no consumo de energia quando comparada com o Multi. Na segunda situação, com cenários de simulação com distribuição não-uniforme dos nodos e estes, localizando-se em regiões próximas ao nodo *sink*, o protocolo Multi-K apresentou uma solução muito interessante, pois obteve uma redução do consumo de energia bastante significativa em comparação ao protocolo Multi. Este último conjunto de simulações representam aplicações reais no qual os eventos concentram-se em áreas próximas ao nodo *sink*.

## ABSTRACT

GONÇALVES, Rodrigo Trindade, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August of 2007.

**Multi-K: a routing protocol for wireless sensor networks using partial spanning trees.** Adviser: Carlos de Castro Goulart. Co-Advisers: Mauro Nacif Rocha and Ricardo dos Santos Ferreira.

This work presents Multi-K, a modified version of Multi which is a data dissemination protocol for wireless sensor networks. A WSN is a wireless network consisting of spatially distributed autonomous devices using sensors to cooperatively monitor physical or environmental conditions. The Multi protocol is a hybrid adaptive protocol, that can either use a reactive behavior when the frequency of events is low or can use a proactive behavior when the frequency of events is high. In the proactive behavior, Multi generates a spanning tree for the network that must periodically be refreshed. The Multi-K protocol uses an approach of branching, starting from the sink node, a tree of  $k$  hops, to each source node (node that is transmitting data). The distance  $d$  (hops) from a single source node to the sink node is defined as the shortest path. When two or more nodes are transmitting data, the number of hops  $k$ , for building the tree, is determined by the longest value of  $d$ . In this way, if the frequency of events were concentrated in the area near the sink node, it would have a lower number of control messages to build and keep the partial spanning tree. The proposed modification was simulated using simulator NS-2 (Network Simulator 2) and the results were compared with those obtained by the original version of the protocol. The simulation scenarios considered two distinct situations. In the first one, the nodes were uniformly distributed and the events also happened with uniform distribution. In this situation, the results showed that the proposed approach in Multi-K is scalable, can keep the data delivery rate and provides a small reduction in the energy

consumption when compared Multi. In the second situation, in which the simulation scenarios considered non-uniform distribution of the nodes, and with the nodes concentrated in regions near the sink node, the Multi-K protocol presented a very interesting solution, since it provided a significant reduction in the energy consumption, in comparison the Multi protocol. This last set of simulation represents real applications where the events are concentrated in areas near to the sink node.

# Capítulo 1

## Introdução

Em 1990, o IEEE (*Institute of Electrical and Eletronics Engineers*) constituiu uma equipe para colocar em prática a nova tecnologia de redes locais sem fio, denominada padrão IEEE 802.11. Esta ficou inerte por aproximadamente sete anos, mas devido às suas vantagens como flexibilidade (sem necessidade de cabos) e mobilidade (possibilidade dos dispositivos permanecerem conectados ininterruptamente dentro da área de cobertura), acabou saindo do papel e se tornando alvo de um crescimento acelerado e uma tendência mundial. Uma rede sem fio converte pacotes de dados em ondas de rádio ou em infravermelho para poder enviar para os demais dispositivos sem fio espalhados ou para os pontos de acesso, que servem para a conexão com uma rede cabeada (*wired*) ou como repetidores de sinais. Nas redes sem fio, os dispositivos são interligados usando o ar como meio de transmissão ao invés de cabos.

O crescimento da utilização de redes sem fio tornou-se mais intenso com a popularização de dispositivos portáteis, tais como telefones celulares e computadores de mão. A ascensão das telecomunicações, principalmente de redes celulares, foi um dos motivos que alavancaram este crescimento. As redes sem fio podem ser classificadas em redes com ou sem infra-estrutura. Em redes infra-estruturadas, a comunicação dos dispositivos móveis é realizada com um ou mais equipamentos centralizadores (pontos de acesso), não havendo comunicação direta entre dois dispositivos. Os dispositivos móveis sempre usam um ponto de acesso como intermediário na comunicação (Anton and Duarte, 2002).

Por outro lado, as redes sem infra-estrutura, também denominadas redes *ad hoc*, são formadas por dispositivos que constituem uma rede cooperativa, sendo capazes de estabelecer uma comunicação direta com outros dispositivos que estiverem ao seu alcance. Neste tipo de rede não há uma administração centralizada e cada dispositivo pode funcionar tanto como estação quanto como roteador (Cunha, 2004).

Apesar das vantagens de se utilizar comunicação sem fio, existem desafios intrínsecos a este tipo de ambiente que propiciam um vasto campo para pesquisa. Diferentemente do que ocorre em redes fixas, fatores como mobilidade, portabilidade e comunicação sem fio influenciam no projeto de redes móveis sem fio *ad hoc*. A habilidade dos dispositivos trocarem sua localização enquanto estão conectados à rede aumenta a volatilidade de algumas informações. Uma rede *ad hoc* é dinâmica, uma vez que tanto sua topologia quanto os membros que a compõem mudam com frequência. Quando dispositivos deixam a rede ou passam a fazer parte dela, novas rotas devem ser encontradas para que a comunicação entre os dispositivos seja mantida. Além disso, com a mobilidade dos dispositivos, a disponibilidade de serviços não pode ser garantida.

As redes de sensores sem fio (RSSFs) são uma especialização das redes *ad hoc* e podem ser compostas, em geral, de centenas a milhares de sensores dispostos em uma área geográfica de interesse a ser monitorada. Estes dispositivos coletam dados do ambiente sensoriado, dados estes que serão utilizados pelo usuário final (observador). Conseqüentemente, uma função essencial das RSSFs é a coleta dos dados até o *gateway* (nodo sorvedouro ou *sink*), que tem como função disponibilizar a informação ao observador. Essas redes possuem grande restrição ao consumo de energia, recurso este que deve ser gerenciado de forma eficiente.

Os protocolos de roteamento para as redes de sensores devem possuir características de auto-configuração para descobrir quais os nodos possuem informação (fontes), quais precisam dessa informação (destinos ou sorvedouros) e qual a melhor forma de transferir a informação de um para o outro, com consumo mínimo de energia com finalidade de prolongar o tempo de operação da rede. Se um nodo por onde trafega uma dada informação falhar, terá que ser feito um novo roteamento para que a informação

a ser coletada consiga atingir o nodo destino. A comunicação entre os nodos da rede deve ser feita de maneira que seja otimizado o consumo de energia. Neste sentido, os protocolos de roteamento têm um papel fundamental possuindo mecanismos para aumentar o tempo de vida útil da rede.

## 1.1 O problema e sua importância

Existem diversas aplicações com as redes de sensores sem fio (RSSFs). A cada dia, a tendência é que RSSFs possam ser utilizadas nos mais variados lugares, surgindo cada vez mais aplicações para seu uso.

A aplicação mais comum de sensores é na medição de condições ambientais, como temperatura, pressão, umidade e condições do clima ou do solo, mas eles também são bastante utilizados para monitorar movimentos, controlar velocidades e detectar materiais perigosos. Com o surgimento de várias aplicações, diversas pesquisas têm sido realizadas para que estas sejam viabilizadas. Um dos campos de pesquisa é o roteamento de dados. A função do roteamento é construir uma rota através da rede que conecte dois nodos distintos. A construção desta rota propicia a transmissão de pacotes entre a fonte e o destino. A escolha da rota será feita com base em uma métrica, que pode ser, por exemplo, o caminho onde o pacote de dados percorra um menor número de sensores ou com maior banda disponível.

O encaminhamento de pacotes de dados dentro da rede pode ser feito utilizando dois tipos de protocolos de roteamento: os pró-ativos e os reativos (ou sob demanda) (Rocha, 2004). Os protocolos pró-ativos seguem o mesmo modelo que é utilizado nas redes cabeadas tradicionais. Nestes protocolos, cada nodo da rede obtém informações em sua tabela de roteamento referentes a todos os possíveis destinos. As tabelas de roteamento são atualizadas constantemente provocando um número mínimo de transmissões de pacotes de dados. Estas informações são periodicamente obtidas, mesmo que futuramente uma possível rota não seja utilizada. Desta forma, quando houver a necessidade de transmitir um pacote para um determinado nodo destino, será feita uma única consulta à tabela de roteamento obtendo uma rota já conhecida



ao referido destino. As mudanças de topologia da rede podem provocar informações inconsistentes na tabela de roteamento. Conseqüentemente, existe a necessidade de atualizações freqüentes nas tabelas de roteamento dos nodos, pois a topologia da rede pode ser alterada constantemente.

Os protocolos reativos atuam sob demanda, estabelecendo uma rota para um determinado nodo de destino somente se esta rota for solicitada para o envio de um pacote de dado até este nodo. Quando a origem necessita encaminhar um pacote a um determinado nodo, é iniciado o procedimento de descoberta de rota. Este procedimento dos protocolos reativos não necessita de trocas de mensagens em intervalos regulares, conseqüentemente economizando a banda passante e energia. Entretanto, os protocolos reativos possuem um fator negativo, pois apresentam uma maior latência no encaminhamento das mensagens. A latência ocorre porque a transmissão de mensagens só se efetiva após a construção de rota ao destino. A rota descoberta é mantida por um período até que não seja mais necessária, ou que o destino se torne inalcançável por alguma falha no caminho que leve à ruptura dessa rota.

Existem ainda os protocolos híbridos que podem ter tanto um comportamento reativo quanto um comportamento pró-ativo, procurando ser uma solução de compromisso entre as duas estratégias convencionais. Atualmente, não existe um protocolo ideal que solucione todos os problemas de roteamento em redes de sensores sem fio. O Multi é um protocolo adaptativo híbrido para disseminação de dados em redes de sensores sem fio auto-organizáveis, proposto por Carlos Maurício S. Figueiredo em (Figueiredo et al., 2004). Este protocolo encontra-se fase de desenvolvimento de melhorias. O protocolo Multi, tendo sua característica híbrida, procura atender uma sub-classe maior de cenários que busca solucionar parte dos problemas encontrados. Esta característica melhora o consumo de energia em relação aos protocolos pró-ativos e possibilita a redução da latência em relação aos protocolos reativos.

O ideal é que a rede tenha capacidade de se auto-organizar perante as variações de cenário ajustando seu comportamento de forma a manter todas as suas funções (sensoriamento, comunicação, colaboração etc.), economizando recursos (energia, largura de banda etc.) durante todo o seu tempo de existência, sem a necessidade

de intervenção externa. É desejável que os protocolos ofereçam algum suporte à qualidade de serviço (QoS). Este suporte poderia melhorar a utilização dos recursos da rede, possibilitar um tráfego de dados mais equilibrado e diminuir a redundância de dados.

## 1.2 Hipótese

Visando melhorar o desempenho do protocolo Multi, pretende-se modificar o mecanismo de construção da árvore de espalhamento descrito no protocolo para diminuir o consumo de energia quando o protocolo encontra-se em modo pró-ativo. Serão analisadas as características de alguns protocolos para RSSF, dando-se ênfase ao Multi, relacionando-o a um dos principais parâmetros de QoS, o consumo de energia. Esta análise busca melhorar a eficiência do protocolo. Devido a outros trabalhos de pesquisas, na área de redes de computadores, desenvolvidos em parceria entre o DPI-UFV (Departamento de Informática da Universidade Federal de Viçosa) e o DCC-UFMG (Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais) e facilidade ao acesso às informações sobre o Multi, este protocolo será usado como estudo de caso neste trabalho.

## 1.3 Objetivos

Nesta dissertação, pretende-se:

- estudar e analisar protocolos de RSSF com o objetivo de comparar as características de suporte a QoS;
- Propor uma forma mais eficiente de aplicar os parâmetros reais de QoS no protocolo Multi com o objetivo de melhorar o consumo de energia;
- Desenvolver uma variação do protocolo Multi que tenha um melhor comportamento na abordagem de QoS;

- Usar o protocolo Multi como estudo de caso e compará-lo com a versão modificada, o protocolo Multi-K.

## 1.4 Organização do Texto

Este capítulo abordou alguns conceitos iniciais. O protocolo de roteamento Multi é o principal foco deste trabalho e melhorias serão implementadas. A motivação desta iniciativa é melhorar o consumo de energia nas RSSFs utilizando o Multi.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica na qual as Redes de Sensores Sem Fio são descritas com enfoque nos protocolos de roteamento e nos parâmetros de Qualidade de Serviço; no Capítulo 3, é descrito de forma detalhada o protocolo de estudo de caso Multi e sua versão modificada proposta, o Multi-K; no Capítulo 4, são abordados além da metodologia utilizada, os resultados e as análises obtidas a partir das simulações efetuadas; o Capítulo 5 encerra o trabalho apresentando as conclusões finais e direções para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Redes de Sensores Sem Fio

Uma rede de sensores sem fio (RSSF) é composta de centenas a milhares de dispositivos autônomos e compactos (sensores) dispostos em uma área geográfica de interesse a ser monitorada. Cada nodo sensor, que é composto de uma unidade de bateria, processador, módulo de sensoriamento (um ou mais sensores) e uma unidade de comunicação (rádio ou infra-vermelho), coleta dados do ambiente e transforma a informação obtida em uma descrição do fenômeno observado, usando os protocolos de comunicação para a troca informação na rede. Devido ao seu pequeno tamanho, os nodos são colocados próximos ao fenômeno a ser monitorado, aumentando o grau de percepção da amostra retirada (Stochero et al., 2004).

### 2.1 O Sensor

Sensores são pequenos dispositivos que surgiram com o avanço da tecnologia de sistemas micro-eleto-mecânicos (MEMS), comunicações móveis e técnicas de fabricação de componentes eletrônicos com altas taxas de integração conhecidas como VLSI (*Very Large-Scale Integration*). Estes dispositivos implementam a monitoração física de um fenômeno ambiental e geram relatórios de medidas (através da comunicação sem fio). Um sensor produz uma resposta mensurável a mudanças em condições físicas, tais como luz, pressão, umidade e temperatura.

Muitos modelos, de complexidade variada, podem ser construídos baseados na

necessidade da aplicação e características dos dispositivos. A maioria dos modelos de dispositivos sensores compartilha duas características: (i) a habilidade de detecção diminui com o aumento da distância e (ii) a habilidade de detecção pode melhorar com o aumento do tempo que o sensor fica exposto, devido à diminuição dos efeitos dos ruídos em medidas (Pereira et al., 2003). Estes modelos têm uma composição homogênea quando todos os nodos sensores são semelhantes, ou heterogêneos quando há diferenças de hardware e software entre eles.

Os nodos sensores possuem recursos de processamento, armazenamento de informações, fonte de energia e interface de comunicação. Estes recursos são disponibilizados através de um conjunto básico de componentes: processador, transceptor, memória, sensor e bateria. Estes componentes são apresentados na Figura 2.1 (Loureiro et al., 2003). Deve ser ressaltado que os recursos de processamento e memória são muito limitados quando comparados com outros dispositivos móveis como *notebooks* e *PDA*s, por exemplo. Por isso o sensor realiza tarefas simples de processamento, como verificar se dois pacotes recebidos dizem respeito a uma mesma medida para encaminhar apenas a um deles, economizando energia. O recurso de energia também é limitado, sendo um fator crítico para o tempo de vida do sensor e, em consequência, da rede como um todo.

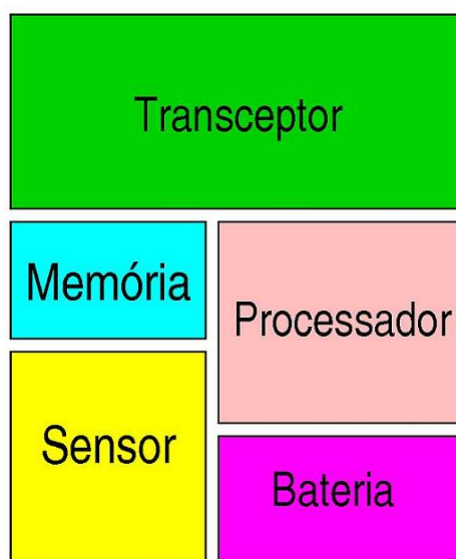


Figura 2.1: Hardware básico de um nodo sensor (Loureiro et al., 2003).

As RSSFs, em sua maioria, utilizam a comunicação a rádio em múltiplos saltos (*multi-hop*). Nessa comunicação, um pacote de dados é enviado do nodo sensor que o originou para sensores vizinhos de maneira que este pacote percorra, através de um número de sensores, até o nodo *sink*. O esquema de comunicação *multi-hop* é utilizado, pois o gasto de potência na transmissão de um pacote para um nodo vizinho que esteja próximo é menor do que o gasto de potência para a transferência de um pacote diretamente para uma estação base distante. Esta característica pode ser comprovada conforme a equação de Friis (Henry, 2006). A fórmula de transmissão de Friis permite verificar que a potência recebida em função da potência transmitida e vai diminuindo muito rapidamente à medida que a distância da fonte aumente. Considerando um conjunto de transmissor e receptor, operando em um dado comprimento de onda, o fator do ganho das antenas de transmissão e de recepção e do comprimento de onda será fixo. Assim, a potência recebida diminui de maneira inversamente proporcional ao quadrado da distância. Dessa forma, quando a distância entre transmissor e receptor dobra é necessário quadruplicar a potência de transmissão para que o sinal seja recebido com mesmo nível de potência.

$$P_r = G_{dr}G_{dt} \left[ \frac{\lambda}{4\pi r} \right]^2 P_t$$

onde

$$\begin{aligned} P_t &= \text{Potência transmitida} & G_{dr} &= \text{Ganho da Antena de Recepção} \\ P_r &= \text{Potência recebida} & G_{dt} &= \text{Ganho da Antena de Transmissão} \\ \lambda &= \text{Comprimento da onda} & r &= \text{Distância} \end{aligned}$$

Equação de transmissão de Friis.

## 2.2 Aplicações

Os sensores podem monitorar diversos tipos de condições ambientais dependendo da aplicação a ser utilizada. Dentre estas condições ambientais, podem ser citadas a temperatura, pressão, quantidade de luz no ambiente, umidade e composição da terra.

As aplicações em redes de sensores têm como principal característica o sensoriamento para a detecção de algum evento. Segundo a categorização em (Tilak et al., 2002) as RSSFs podem ser classificadas de acordo com os modelos de disseminação de dados. Estes modelos e os respectivos exemplos apresentados são: *Contínuo*, em aplicações de ambiente onde durante um determinado período de tempo dados sobre condições climáticas são coletados; *Dirigido a eventos*, por exemplo em aplicações militares quando um alvo inimigo é detectado na região sensoriada; *Iniciado pelo observador*, como em aplicações na área da saúde onde em grandes hospitais, médicos podem ser localizados através de sensores consigo portados e esta informação sobre a localização somente é fornecida caso seja solicitada pelo observador; ou *Híbrido*, caso onde os dois modelos anteriores estão agregados.

As aplicações podem também ser divididas em militar, de ambiente, de saúde e comerciais, as quais são descritas a seguir seguindo o modelo de (Akyildiz et al., 2001).

### 2.2.1 Aplicações militares

Algumas aplicações para redes de sensores no contexto militar são: o monitoramento de forças aliadas, equipamentos e munição; vigilância de campo de batalha; reconhecimento de forças e terrenos inimigos; e por fim, a avaliação de danos em batalhas (Akyildiz et al., 2001).

O monitoramento de tropas aliadas, equipamentos e munição são analisados pelos seus comandantes para que seja verificado o *status* de suas tropas nos campos de batalhas. Este monitoramento é realizado através de pequenos sensores que podem ser acoplados em veículos e equipamentos críticos para reportar o status atual. Todas as informações reportadas são reunidas na estação base e enviadas para o comandante da tropa.

Em uma situação de guerra, os sensores podem fazer o reconhecimento de forças e terrenos inimigos reportando informações em tempo real. Tais informações podem ser agregadas em poucos minutos, mesmo quando o terreno for de difícil acesso.

As redes de sensores podem ser incorporadas dentro de sistemas orientados

de munições inteligentes que reagirão de acordo com as informações coletadas pelos sensores podendo atingir o alvo que está em movimento. Após uma batalha, as redes de sensores podem reunir dados para fazer uma avaliação de danos em batalhas na área alvo.

### **2.2.2 Aplicações de ambiente**

Algumas aplicações de ambiente têm como finalidade monitorar, por exemplo, o comportamento de animais domésticos e selvagens. Sensores colocados em um número suficientes de animais permitiria o estudo de toda uma manada. Outras aplicações apresentam como finalidade o monitoramento de condições ambientais que podem afetar a colheita de determinada região ou afetar pequenos animais que ali residem. Na agricultura, alguns dos benefícios são a habilidade de monitorar o nível de pesticidas na água, o nível de erosão da terra e o nível de poluição do ar em tempo real.

### **2.2.3 Aplicações na área da saúde**

Existem inúmeras aplicações na área de saúde tais como (Akyildiz et al., 2001):

- Telemonitoramento de dados fisiológicos humanos;
- Rastreamento e monitoração de médicos e pacientes dentro de um hospital;
- Administração de remédios nos hospitais.

No telemonitoramento de dados fisiológicos humanos, o dado fisiológico coletado pela rede de sensores pode ser armazenado por um longo período de tempo e pode ser usado para a exploração médica (Ogawa et al., 1998). Estes pequenos nodos sensores permitem um movimento ótimo e livre e permitem que médicos identifiquem sintomas de pacientes mais cedo (Akyildiz et al., 2001).

O rastreamento e monitoração de médicos e pacientes dentro de um hospital já são uma realidade em grandes hospitais internacionais. Pequenos sensores são colocados em pacientes e médicos, sendo que cada sensor terá uma tarefa específica. Nos pacientes, os sensores podem reportar algumas funções vitais como os batimentos



cardíacos e a pressão sanguínea. Já os médicos podem levar um nodo sensor que permite que outros companheiros de profissão possam encontrá-los dentro do hospital.

A administração de remédios nos hospitais pode ser eficaz quando nodos sensores são colocados em medicações. A chance de obter ou prescrever uma medicação errada para pacientes pode ser minimizada. Pacientes terão nodos sensores que identificam suas alergias e medicamentos exigidos. Sistemas computadorizados como descrito em (Sibbald, 2001) têm mostrado aos hospitais que podem ajudar a minimizar a obtenção de medicamentos proibidos.

#### 2.2.4 Aplicações comerciais

Algumas aplicações comerciais são o monitoramento de áreas de desastres; estruturas com nodos sensores encaixados em seu interior; detecção e monitoramento de veículos roubados, dentre outros.

No controle do ambiente de prédios, o ar em seu interior e o calor são, geralmente, centralmente controlados. Por esta razão, dentro de um lugar, a temperatura pode variar em alguns graus. Pode ainda, um lado ser mais quente que o outro porque existe somente um controle neste lugar e o fluxo de ar vindo do sistema central não é igualmente distribuído. Nesta situação, um sistema de rede de sensores sem fio distribuído pode ser instalado para controlar o fluxo de ar e a temperatura dentro de diferentes partes deste lugar.

Atualmente já estão sendo detectados museus interativos, nos quais pessoas podem interagir com objetos nos museus para aprender mais sobre eles. Experimentos de causa e efeito em tempo real podem ser realizados por objetos que são capazes de responder ao toque ou à fala dessas pessoas, podendo ensiná-las sobre ciência e o ambiente. A rede de sensores pode informar a localização de qualquer objeto dentro do museu. Em (Rabaey, 2000) mostra-se um exemplo do museu *San Francisco Exploratum* nos Estados Unidos que retrata a combinação de medição de dados e experimentos de causa e efeito.

No rastreamento e detecção, existem dois carros próximos como descrito em (Shih, 2001). Para rastrear e detectar o veículo, primeiramente, a linha de condução

do veículo estará determinada localmente com *clusters* e então isto é transmitido para a estação base. Em segundo, o dado bruto coletado pelos nodos sensores são transmitidos para a estação base para a localização do veículo.

## 2.3 Métricas de desempenho

As principais métricas para avaliar as RSSFs são: eficiência do uso de energia que determina a vida útil do sistema, latência, precisão, tolerância a falhas, escalabilidade e exposição dos sensores (Pereira et al., 2003).

Aplicações de tempo real, por exemplo, podem gerar grande tráfego de dados, o que implica a necessidade de uma boa gerência dos recursos da rede. Neste caso, o uso da energia de modo eficiente torna-se importante para a viabilidade da aplicação.

### 2.3.1 Eficiência do uso de energia e vida útil do sistema

A energia em redes de sensores é fator muito importante, pois serve como uma das principais métricas de desempenho para determinar a vida útil do sistema. A vida útil pode ser medida por parâmetros genéricos, como o tempo que a aplicação precisa para receber as informações obtidas ou pela quantidade de nodos ativos da rede.

Uma maneira de otimizar o consumo de energia é utilizar protocolos eficientes. Um desses protocolos é o S-MAC (*Sensor Medium Access Control*) (Ye et al., 2002). Este protocolo de controle de acesso ao meio para redes sem fio foi desenvolvido tendo em vista que os nodos sensores ficam por longos períodos de tempo inativos. Como em todas as redes de meio compartilhado, o controle de acesso ao meio (MAC) é uma técnica importante que possibilita uma operação bem-sucedida da rede. Uma tarefa fundamental do protocolo MAC é evitar colisões de modo que dois nodos, em uma mesma área, não transmitam ao mesmo tempo (Pereira et al., 2003).

Existem muitos protocolos MAC que têm sido desenvolvidos para aplicações com voz e para aplicações com redes de comunicação de dados. Alguns exemplos típicos são o acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA), acesso múltiplo por divisão de código (CDMA) e protocolos baseados em disputa como IEEE 802.11 (Ye

et al., 2003). Em muitas aplicações de redes de sensores, os nodos ficam no estado de escuta por um longo tempo sem a ocorrência do evento de sensoriamento. O protocolo S-MAC é implementado de maneira que nem todos os nodos fiquem no estado de escuta, deixando alguns nodos inativos, o que favorece a contenção do gasto de energia. De acordo com a Figura 2.2, cada nodo vai para o estado de dormência (*sleep*) por algum tempo, e então é reativado e começa a monitorar o meio de comunicação para verificar se outro nodo deseja comunicar com ele.

Durante o estado *sleep*, o nodo desliga seu receptor e estabelece um tempo para acordá-lo posteriormente, economizando energia.

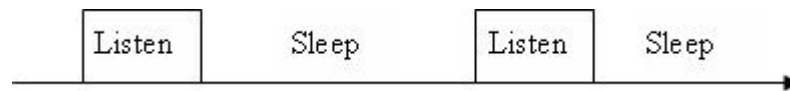


Figura 2.2: Alternância entre estados de escuta (*listen*) e dormência (*sleep*).

### 2.3.2 Latência e precisão

Nas redes de sensores, a latência é um fator muito importante, pois pode determinar a viabilidade da aplicação. A latência pode ser vista como o tempo de espera em que o nodo *sink* aguarda para receber os dados requisitados.

O tempo de espera que o ponto de agregação de dados atrasa para receber os dados está diretamente ligado à precisão dos dados que deseja obter. Se a aplicação requer uma grande precisão dos dados, em geral o tempo de espera de dados que a estação base aguarde é maior. Entretanto, em algumas situações, se a aplicação requer uma resposta rápida para a determinação de um certo fenômeno, a precisão dos dados pode ser prejudicada. Esta é a relação entre precisão e a latência. A eficiência de energia esta intrinsecamente ligada a esta relação.

As métricas podem ser especificadas estática ou dinamicamente, dependendo da aplicação envolvida. A infra-estrutura dada deve adaptar-se de tal forma que a aplicação obtenha a precisão e retardos desejados com uso de energia mínima.

### 2.3.3 Tolerância a falhas

Os sensores podem falhar devido a condições físicas ou quando sua energia termina. Pode ser difícil, ou inviável economicamente, trocar sensores existentes. A rede deve ser tolerante a falhas, ou seja, a rede deve operar com sucesso mesmo quando houver alguma falha em nodos sensores. É desejável que falhas sejam imperceptíveis para a aplicação. A tolerância a falhas pode ser alcançada através da replicação de dados. Entretanto, a replicação de dados por si própria requer consumo de energia. Há um compromisso entre replicação de dados e eficiência de energia (Pereira et al., 2003), pois quanto mais transmissões maior o gasto de energia.

A falha em nodos sensores pode ocorrer devido aos seguintes fatores: destruição, acidentalmente ou não, dos sensores, baixa carga da bateria e fatores de ambiente que afetam a propagação do sinal. Pode-se pensar na topologia de uma rede de sensores como se fosse uma árvore hierárquica, conforme mostrado na Figura 2.3, na qual o nodo raiz (nodo sorvedouro ou *sink*) corresponde à estação base. Se um único nodo desta árvore falhar, pode ocorrer a interrupção parcial ou total da comunicação da rede devido à disposição daquele nodo, já que a função do nodo sorvedouro é obter informações coletadas pelos nodos e se este não conseguir a coleta, a rede pára. Se a interrupção da rede for parcial, haverá a necessidade da descoberta de novas rotas para que seja feito o roteamento, contornando o conjunto de nodos inativos e assim possibilitando o funcionamento da rede. Se a interrupção for total, a estação base deverá enviar um aviso de que a propriedade de funcionamento da rede de sensores já não pode ser mais obtida.

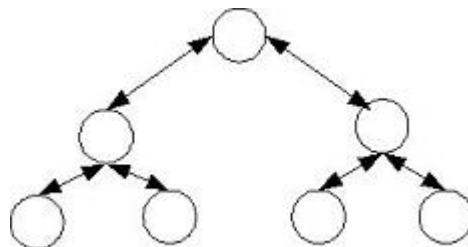


Figura 2.3: Representação de nodos sensores em uma estrutura hierárquica.

A estação base consegue fazer a distinção dos dois casos enviando um sinal de

*broadcast* para todos os nodos das redes, conseguindo deste modo saber quais nodos estão ativos e quais estão inativos.

### **2.3.4 Escalabilidade**

Uma RSSF é escalável quando a rede mantém suas propriedades e características iniciais do projeto ao incluir novos sensores. As redes de sensores devem possuir alta escalabilidade, de modo a permitir que um grande número de nodos possa fazer parte de uma rede. A escalabilidade para redes de sensores é também um fator crítico. Redes contendo de 10 a 100 mil sensores são previstas para aplicações ambientais como monitoramento em oceanos e florestas (Loureiro et al., 2003). Para redes de larga escala, é comum que a localização de interações através de hierarquia e agregação sejam críticas para assegurar a escalabilidade (Pereira et al., 2003).

### **2.3.5 Exposição dos sensores de uma RSSF**

A propriedade de detecção de algum fenômeno de interesse depende da localização dos sensores numa determinada área. A proximidade dos sensores com o ambiente a ser monitorado é de suma importância, pois quanto mais próximo o sensor esteja deste ambiente, maior será probabilidade de captação deste interesse.

A exposição pode ser definida como a medida de quão bem a rede de sensores pode observar um objeto, movendo-se num caminho arbitrário ou um objeto estático, num determinado período de tempo. (Megerian et al., 2002) desenvolveram um algoritmo para calcular a exposição em redes de sensores, especificamente para encontrar caminhos de exposição mínima. O algoritmo pode ser aplicado para qualquer distribuição e modelos de sensores, sensibilidade, e características da rede (Pereira et al., 2003).

## **2.4 Arquitetura básica de uma RSSF**

Uma rede de sensores tem como finalidade o monitoramento de algum fenômeno que se deseja observar. Os sensores são distribuídos em uma determinada região chamada

de campo de sensoriamento, como ilustrado na Figura 2.4. O nodo sorvedouro (*sink*) é responsável pela difusão das tarefas de sensoriamento (ou interesses) e coleta dos dados sensorizados, podendo atuar também como uma ponte para redes externas. Os nodos fontes são responsáveis pela monitoração do fenômeno de interesse, isto é, pela detecção das alterações físicas do ambiente (por exemplo, de temperatura, da umidade, da acústica, dentre outras) e envio dessas informações. Os nodos intermediários são responsáveis pelo roteamento das informações entre os nodos fonte e sorvedouro.

Em princípio, todos os nodos podem assumir o papel de sorvedouro, nodo intermediário e nodo fonte, o que garante uma grande flexibilidade na topologia da rede. Essa dinâmica de operação e a severa restrição de energia implicam em uma arquitetura de rede específica envolvendo os aspectos de *hardware*, *software* e *middleware* (Pinto, 2004).

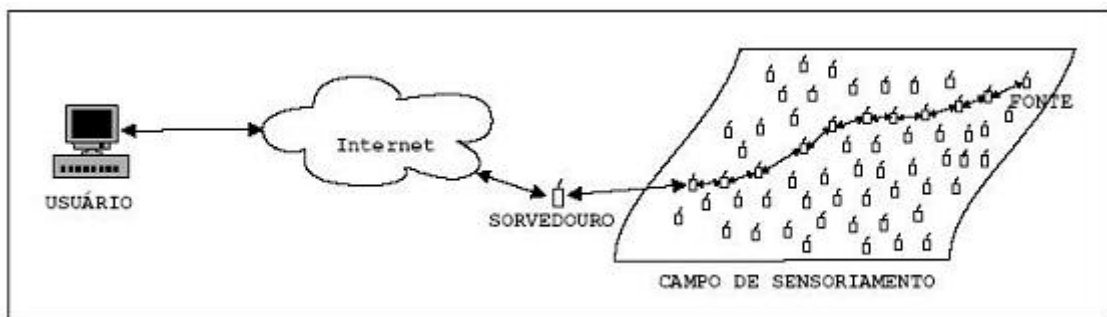


Figura 2.4: Arquitetura das Redes de Sensores (Pinto, 2004).

## 2.5 Qualidade de Serviço em RSSFs

Em RSSFs muitas pesquisas estão sendo realizadas nas áreas de arquitetura e construção de protocolos, conservação de energia e localização, sendo que o suporte a Qualidade de Serviço (QoS) se apresenta ainda como um campo de pesquisa com muitas questões em aberto.

Em (Chen and Varshney, 2004) caracteriza-se QoS em um conjunto de requisitos definidos como métricas tendo em vista o transporte de pacotes transmitidos da fonte ao destino. Algumas medidas que servem como métricas são: atraso, variação

do atraso (*jitter*), banda disponível e perda de pacotes.

Nas RSSFs a QoS pode ser vista através de duas perspectivas: rede e aplicação. Na primeira, são considerados parâmetros como cobertura, exposição, medidas de erros, consumo de energia e número ótimo de sensores ativos. Na segunda, são analisadas classes de aplicações que podem ser divididas em três classes de modelos: dirigido a eventos; dirigido a requisições; modelos de entrega contínua. Os requisitos da aplicação são caracterizados pelos seguintes fatores (Chen and Varshney, 2004):

1. Escopo: a aplicação pode ou não requerer desempenho fim-a-fim.
2. Interatividade: a aplicação pode ser interativa ou não interativa.
3. Características: a aplicação pode ou não ser tolerante a atrasos.
4. Criticalidade: a aplicação pode ou não ser crítica.

No modelo dirigido a eventos, a maioria das aplicações são interativas, intolerantes a atraso (tempo real), missões críticas e não sendo aplicações fim-a-fim. As aplicações, imprescindivelmente, necessitam dos dados sensorizados para obterem sucesso. A detecção dos eventos deve ocorrer de forma rápida e confiável. Já no modelo dirigido à requisições, a maioria das aplicações são interativas e tolerantes a atrasos. As requisições são enviadas sob demanda procurando amenizar o gasto de energia. No modelo contínuo, os sensores enviam os dados ao nodo *sink* de forma contínua a uma taxa pré-determinada. Esta taxa é estabelecida de acordo com o tipo de aplicação envolvida, tendo alguns parâmetros a serem observados como perda de pacotes, atraso e largura de banda disponível. Por fim, no modelo híbrido, os modelos descritos anteriormente podem coexistir na rede. Deste modo, pode ser necessário um mecanismo que comporte os diferentes tipos de tráfego com restrições a QoS.

### **2.5.1 Desafios para o suporte a QoS em RSSFs**

As RSSFs possuem várias características que as diferem das redes cabeadas tradicionais. Estas características impõem restrições, as quais são desafios a serem solucionados, tais como (Chen and Varshney, 2004):

- Recursos como energia, largura de banda, memória, tamanho do *buffer*, poder de transmissão, capacidade de processamento são limitados. Para trabalhar com estas restrições, os mecanismos de suporte à QoS devem ser simples.
- O tráfego de dados não é equilibrado, ou seja, o fluxo principal de dados é provido de uma grande quantidade de nodos com destino à um subconjunto pequeno de nodos *sink*. Os mecanismos devem ser projetados para suportar este tipo de tráfego.
- A redundância de dados é comum em RSSFs. A redundância ajuda nos requisitos confiança e robustez de entrega de dados. O aspecto negativo é o gasto desnecessário de energia. A agregação de dados é a solução para manter a robustez em diminuição da redundância de dados, porém o mecanismo introduz a latência e complica o projeto de QoS em RSSFs.
- Sendo as redes dinâmicas, questões como falhas dos nodos e *links*, mobilidade, transições de estado devido ao gerenciamento de energia devem ser consideradas. Redes altamente dinâmicas aumentam extremamente a complexidade do suporte à QoS.
- O equilíbrio da energia deve ser gerenciado. A energia de um único sensor ou um pequeno conjunto de sensores não deve ser drenada rapidamente. O suporte à QoS deve levar em conta este fator.
- Em algumas redes podem existir múltiplos nodos *sink*, o que impõem diferentes requisitos na rede. Os nodos *sink* podem requisitar informações diferentes ao mesmo tempo. As RSSFs devem fornecer diferentes níveis de QoS associados à diferentes nodos *sink*.
- Múltiplos tipos de tráfego: a inclusão de diferentes conjuntos de sensores aumentam os desafios para o suporte à QoS. Por exemplo, algumas aplicações podem requisitar diversos tipos de sensores para o monitoramento de temperatura, pressão e umidade; deste modo os sensores reportam as informações com



diferentes taxas de leitura. Estes ambientes heterogêneos tornam o suporte à QoS mais desafiante.

- O conteúdo dos pacotes ou uma descrição de alto nível reflete a criticalidade do fenômeno físico real. A qualidade das aplicações reflete em uma criticalidade diferente ou a priorização de pacotes. Os mecanismos de QoS podem requisitar a diferenciação de pacotes introduzindo uma estrutura de prioridades.

### 2.5.2 Trabalhos relacionados à QoS em RSSFs

As linhas de pesquisa relacionadas a QoS em RSSFs são divididas em três categorias: tradicional fim-a-fim; garantia de confiabilidade; aplicação específica.

#### 1. Tradicional fim-a-fim

O primeiro protocolo desenvolvido com a preocupação ao suporte à QoS é o SAR (*Sequential Assignment Routing*) (Sohrabi et al., 2002). O protocolo SAR visa facilitar o roteamento com múltiplos saltos (*multi-hop*). O objetivo é minimizar a média ponderada de métricas de QoS através do tempo de vida da rede. São considerados os recursos de energia, métricas de QoS de cada caminho e a prioridade dos pacotes.

A seleção do caminho é feita pelo nodo que gera o pacote, a não ser que a topologia mude o caminho fazendo com que o pacote trafegue por outra rota. Tal seleção é baseada em tabelas de roteamento e envio de *overhead* em caso de falhas. Para cada pacote roteado pela rede é computado um peso de medida de QoS com o produto da métrica de QoS e a média da prioridade dos pacotes. A idéia é prover cada pacote com um coeficiente de QoS relativo a sua prioridade.

O protocolo de roteamento SPEED utiliza a localização geográfica para tomar decisões localizadas de roteamento (He et al., 2003). O SPEED necessita que cada nodo mantenha as informações sobre cada vizinho. O protocolo também define uma velocidade de entrega de cada pacote. Deste modo, cada aplicação pode estimar o atraso fim-a-fim para os pacotes por considerar a distância no *sink* e a velocidade de entrega de pacotes antes de fazer a decisão de admissão.

## 2. Garantia de confiabilidade

(Sankaransubramaniam et al., 2003) propõem um novo esquema de transporte confiável (ESRT - *Event-to-Sink Reliable Transport*) para RSSFs. O protocolo ESRT procura executar a detecção de eventos com o gasto mínimo de energia. A operação do ESRT inclui um componente de controle de congestionamento. Este componente tem como finalidade conseguir a confiança dos dados obtidos e atender à conservação de energia. Os algoritmos ESRT são executados no nodo *sink*, necessitando de poucos recursos para sua execução. A operação do protocolo ESRT é determinada pelo estado atual da rede baseado na confiança dos dados reportados e no congestionamento da rede. Se o grau de confiança é menor que o limite estabelecido, a taxa de envio dos dados dos nodos fontes ao *sink* é reajustada para uma frequência maior visando alcançar o nível desejável. Se o nível de confiança é mais alto do que o requerido, a frequência de envio de dados é reduzida, mantendo-se em um nível aceitável.

## 3. Específico da Aplicação

Em (Perillo and Heinzelman, 2003), a QoS específica da aplicação é fornecida através da junção da otimização do agendamento do sensor com o roteamento de dados. O mecanismo aumenta o tempo de vida da rede comparadas às redes que não utilizam o agendamento inteligente. O objetivo é equilibrar a confiabilidade da aplicação com o consumo eficiente de energia.

Em RSSFs, o uso eficiente dos recursos não significa somente utilizar a largura de banda de modo eficiente, mas também gastar menos energia. Deste modo, o suporte à QoS deve implementar mecanismos de controle de QoS além de garantir mecanismos empregados em redes tradicionais, que eliminam o gasto de energia desnecessário na entrega de pacotes (Chen and Varshney, 2004). Tendo como base os desafios citados na subseção 2.5.1, algumas áreas de pesquisa de suporte à QoS em RSSFs são:

- Modelos mais simples: modelos DiffServ (Li and Rekhter, 1998) e IntServ (Braden et al., 1994) não podem ser aplicáveis em RSSFs devido a complex-

idade envolvida. Modelos mais simples de QoS são necessários para identificar uma arquitetura para o suporte à QoS em RSSFs.

- Redundância/Agregação de dados: a redundância de dados em RSSFs pode ser explorada para melhorar a confiança das informações. No entanto, a redundância implica no gasto de muita energia para transmitir estes dados redundantes. Ao introduzir a agregação de dados, o gasto de energia é decrescido, porém, é introduzido um maior atraso na rede. O nível ótimo pode ser encontrado analiticamente ou por simulações de redes.
- Diferenciação de serviços: a diferenciação poderia ser feita segundo critérios como tipos de tráfego, modelos de entregas de pacote, tipos de sensores, tipos de aplicação ou conteúdo dos pacotes. Considerando a memória e a capacidade de processamento limitadas, é muito difícil obter recursos e manter muitos fluxos de estado nos nodos. O controle de alocação dos recursos da rede deve ser feito com algumas classes de tráfego. O objetivo seria maximizar a utilização dos recursos obtidos.
- Integração ao suporte à QoS: os mecanismos de suporte à QoS em RSSFs podem ser diferentes dos mecanismos das redes tradicionais. No entanto, as requisições para as RSSFs podem ser originadas através de redes, tais como a Internet. Pesquisas adicionais são necessárias para manipular as diferenças entre o tratamento da QoS nessas redes, de forma que isso fique transparente para as aplicações.
- Algoritmos de garantia à QoS adaptativa: é desejável manter a QoS durante todo o tempo de vida da rede em vez de ter uma deterioração gradual da qualidade com o passar do tempo. Isto impede lacunas em conjunto de dados recebidos pelo *sink*. Estas lacunas, que afetam diretamente QoS, são causadas pela característica dinâmica da rede. Em consequência, alguns algoritmos adaptáveis de QoS podem ser requeridos para serem utilizados perante às redes dinâmicas.

## 2.6 Protocolos de roteamento para RSSF

Na literatura, são encontrados inúmeros protocolos que tratam o roteamento de dados em RSSFs. Alguns protocolos abordam o problema da disseminação e buscam uma solução para o mesmo. Em (Machado et al., 2005) é proposto um algoritmo de disseminação de dados chamado de *Trajectory and Energy-Based Data Dissemination* (TEDD) que procura agregar conceitos de trajetória baseada em encaminhamento (TBF) com a energia, a qual é fornecida por informações sobre a energia disponível em cada parte da rede, ou seja, pelo mapa de energia.

Outros protocolos são propostos em (Ammari and Das, 2006) (Ganesan et al., 2001) (Intanagonwiwat et al., 2000) (Kulik et al., 2002) (Xuan and Lee, 2004). Eles trabalham aspectos ou cenários específicos de aplicação e procuram solucioná-los de maneira eficiente. Em (Ganesan et al., 2001), é proposto um esquema de roteamento de múltiplos caminhos, que aumenta a probabilidade de recuperação da rede em caso de falhas nos nodos sensores. Os protocolos CODE (Xuan and Lee, 2004) e LAMaR (Ammari and Das, 2006) tratam especificamente da disseminação de dados com o objetivo específico de prolongar o tempo de vida da rede. O primeiro trabalha com estrutura em *grids* para estabelecer um caminho eficiente entre os nodos fonte e os nodos *sink* móveis, enquanto o segundo explora as propriedades geométricas do diagrama de Voronoi como um de seus métodos para construir caminhos eficientes para disseminação.

Em (Hussain and Islam, 2007), é proposto o EEST (*Energy Efficient Spanning Tree*) que utiliza uma árvore de espalhamento para aumentar o tempo de vida da rede. No EEST, dada a localização dos nodos sensores e o nodo *sink*, é gerada uma seqüência de rotas em um número apropriado de iterações que maximizam o tempo da vida do rede. O objetivo é construir caminhos que não drenem rapidamente a energia de alguns nodos da rede e prover um consumo de energia balanceado por todos os nodos da rede. Outro trabalho com propósito semelhante é descrito em (Islam and Hussain, 2006). Neste trabalho, é proposto um algoritmo genético que utiliza a técnica de clusterização hierárquica. Este algoritmo escolhe os *clusters* e seus líderes. Assume-se

que os sensores estão a um *hop* de distância de seus líderes e cada líder, também está a um *hop* de distância da estação base. O objetivo deste algoritmo genético é utilizar a energia de maneira eficiente e, conseqüentemente, aumentar o tempo de vida da rede.

Em (Figueiredo et al., 2004), são ressaltadas a aplicabilidade de dois protocolos *Direct Diffusion* (Intanagonwiwat et al., 2000) e SPIN (Kulik et al., 2002). A disseminação periódica de dados é abordada no *Direct Diffusion* que tem como objetivo estabelecer canais de comunicação eficientes entre os nodos sensores e o nodo *sink* através dos conceitos de roteamento baseado nos dados e agregação de dados; o SPIN, por sua vez, reflete a característica de disseminação de dados em um cenário orientado a eventos, o que pode minimizar o consumo de recursos da rede.

O principal trabalho que tomamos por base para a sua continuação e melhoramento é o protocolo Multi (Figueiredo et al., 2004). Este protocolo híbrido consistiu em uma nova abordagem para a construção de algoritmos em RSSFs, que incorpora características dos algoritmos SID (*Source-Initiated Dissemination*) e EF-Tree (*Earlier-First Tree*). O Multi foi considerado pioneiro nesta área por focalizar as características de disseminação de dados em RSSFs, buscando o equilíbrio entre os modos reativo e pró-ativo.

### 2.6.1 EF-Tree (*Earlier-First Tree*)

Em RSSFs, o nodo *sink* tem o papel de ligação entre a rede e o ambiente infra-estruturado. Os dados sensorizados pela rede são disseminados, geralmente, através de um esquema *multi-hop* em direção ao nodo *sink*. Estes dados coletados serão fornecidos a um sistema computacional mais robusto, de forma a permitir que os mesmos sejam armazenados, analisados e disponibilizados para os seus usuários.

O protocolo EF-Tree utiliza uma estrutura de disseminação simples e eficiente que consiste na construção de uma árvore. Essa estrutura é criada e mantida pró-ativamente a partir do *sink* e conecta todos os nodos alcançáveis da rede. O EF-Tree adota uma reconstrução periódica da árvore a fim de acomodar de possíveis mudanças topológicas. O funcionamento é descrito a seguir (Figueiredo et al., 2004):

- O *sink*, para permitir que os nodos da rede disseminem seus dados até ele, deve iniciar a criação de uma árvore. Para isso, uma mensagem de controle é enviada em *broadcast* para toda a rede (Fig. 2.5(a)).
- Cada nodo que receber a mensagem de controle de construção de árvore armazena a identificação do seu originador como pai e a reencaminha em *broadcast*. Dessa forma, cada nodo da rede receberá a mensagem de controle enviada por todos os seus vizinhos, porém, só a primeira recebida determinará o seu pai e as demais serão descartadas, por isso o nome *Earlier-First Tree* (mais cedo primeiro).
- Quando um nodo possuir um dado a ser disseminado, ele o transmitirá para seu pai. Cada nodo que receber um dado a ser roteado fará o mesmo, resultando em um esquema *multi-hop* até chegar à raiz da árvore, ou seja, o nodo *sink* (Fig. 2.5(b)).
- O processo de construção da árvore é repetido periodicamente para permitir a acomodação de mudanças topológicas possíveis em RSSFs, tais como falhas, migração ou inclusão de novos nodos.

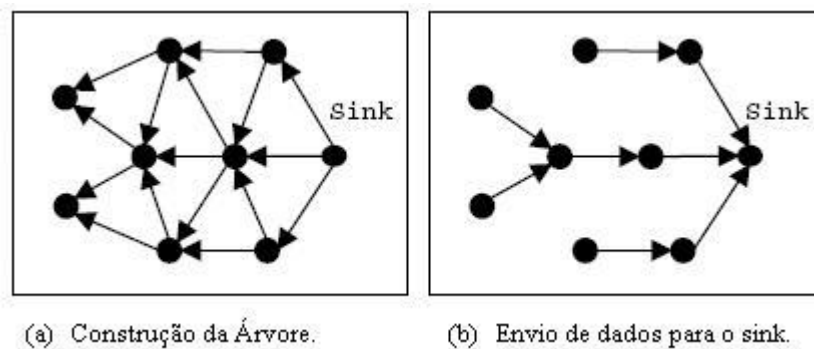


Figura 2.5: Funcionamento do EF-Tree (Figueiredo et al., 2004).

### 2.6.2 SID (*Source-Initiated Dissemination*)

O SID é um algoritmo reativo de disseminação de dados. A infra-estrutura de disseminação é iniciada na fonte dos dados quando houver a necessidade de envio destes.

Essa abordagem, diferentemente de algoritmos pró-ativos, não necessita manter, de forma contínua, uma infra-estrutura para disseminação. Em aplicações orientadas a eventos, podem ocorrer longos períodos de inatividade da rede sem que dados tenham que ser disseminados. Neste tipo de cenário, o SID tende a ser uma solução mais viável que o EF-Tree.

Como apresentado em (Figueiredo et al., 2004), o funcionamento do algoritmo SID é o seguinte:

- Quando um evento ocorrer, um nodo que o detectar disseminará na rede, em *broadcast*, os dados coletados conforme mostrado na Figura 2.6(a). Estes dados são identificados com um identificador (id.) da sua fonte e *timestamp* de geração.
- Um nodo, ao receber um dado gerado por outro nodo da rede, armazenará, em uma tabela, a sua identificação (id. da fonte e *timestamp* de geração), bem como a identificação do vizinho pelo qual o dado foi recebido. Como o dado é originalmente difundido em *broadcast* na rede, ele chegará a um nodo por todos os seus vizinhos, porém, somente o primeiro que chegar será registrado na tabela e retransmitido em *broadcast* para a rede, sendo os demais descartados.
- Da mesma forma, os dados passarão a chegar ao *sink* através de todos os seus vizinhos. O *sink*, então, mandará uma mensagem de controle requisitando o envio do dado pelo vizinho através do qual ele recebeu o dado primeiro, juntamente com a identificação do dado desejado recebido.

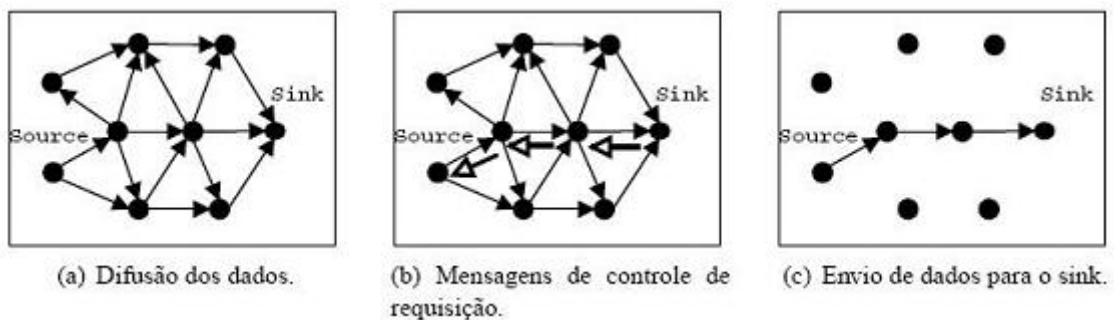


Figura 2.6: Funcionamento do SID (Figueiredo et al., 2004).

- Ao receber essa mensagem de controle, cada nodo registrará em sua tabela o identificador do originador da requisição para o respectivo dado recebido, determinando o caminho pelos quais os próximos dados devem seguir. Em seguida, a mensagem de controle será reencaminhada ao vizinho, registrado em sua tabela, pelo qual o dado foi recebido. Esse procedimento se repetirá até a mensagem de controle chegar à fonte do dado (Fig. 2.6(b)).
- A fonte do dado, por sua vez, ao receber uma mensagem de controle de requisição, atualizará sua tabela e os próximos dados a serem transmitidos serão direcionados para o vizinho originador desta mensagem. Dessa forma, os dados passarão a ser disseminados pelo caminho inverso percorrido pelas mensagens de requisições do *sink*, resultando no caminho mais rápido (Fig. 2.6(c)).
- Para acomodar possíveis alterações topológicas da rede, devido a falhas, mobilidade ou inclusão de nodos, as mensagens de controle serão enviadas periodicamente às fontes dos dados enquanto estas estiverem gerando dados. Ao deixar de receber uma mensagem de requisição, devido a uma possível mudança topológica, um nodo (fonte ou intermediário) voltará a enviar ou reencaminhar dados em *broadcast*. Se existir um caminho, portanto, o dado voltará a chegar ao *sink* que repetirá o processo de requisição descrito anteriormente.
- Quando eventos deixarem de ser registrados, dados deixarão de ser gerados e conseqüentemente, o *sink* deixará de enviar mensagens de requisição para seus originadores. Sem envio periódico de determinado dado ou mensagem de controle associada, as entradas nas tabelas armazenadas nos nodos expirarão e a rede voltará ao estado de inatividade em que estava originalmente.

## 2.7 Comentários sobre este Capítulo

O Capítulo 2 abordou os principais aspectos das RSSFs relevantes a este trabalho. As RSSFs possuem diversas características que devem ser ponderadas para um bom funcionamento da rede. A energia é um fator crítico, pois o sensor é um dispositivo



limitado. Existem diversas aplicações com a utilização de sensores e inúmeros protocolos de roteamento que tratam do problema da disseminação de dados e, dentre eles, o Multi. Os protocolos de disseminação de dados têm grande importância para assegurar a QoS, como por exemplo, na redução no consumo de energia pela rede.

Os princípios usados nos protocolos SID e EF-Tree compõem a base de um protocolo adaptativo híbrido para disseminação de dados denominado Multi. A característica híbrida do protocolo Multi utiliza os comportamentos reativo do SID e pró-ativo do EF-Tree. No Multi, as condições momentâneas da rede determinam a transição dos estados pró-ativo e reativo e o funcionamento do protocolo, que é realizado de forma autônoma. A descrição e os detalhes do funcionamento do protocolo Multi serão apresentados no Capítulo 3. A versão modificada do Multi, intitulada Multi-K e que será apresentada igualmente no Capítulo 3, procura melhorar o parâmetro de QoS no consumo de energia. Os resultados obtidos a partir desta modificação serão mostrados Capítulo 4.

## Capítulo 3

# Multi-K: a versão modificada do protocolo Multi

Um dos problemas encontrados em RSSF é a disseminação dos dados. Os protocolos que tratam especificamente do problema da disseminação buscam soluções que melhorem o processo em detrimento da redundância de dados. O protocolo que será utilizado como estudo de caso neste trabalho é o protocolo Multi. Este protocolo aborda o problema relatado usando um comportamento híbrido, podendo se comportar tanto na forma reativa quanto na forma pró-ativa.

Uma nova proposta, baseada no protocolo Multi, será apresentada. Esta proposta busca melhorar o funcionamento do protocolo quando o mesmo trabalha em modo pró-ativo, ou seja, atuando como o EF-Tree. A modificação do protocolo resultou em uma variante nomeada Multi-K.

A principal motivação para o desenvolvimento do protocolo Multi-K foi buscar uma alternativa que amenizasse o consumo de energia na rede em comparação ao protocolo Multi. Algumas aplicações reais tendem a ter eventos concentrados em áreas próximas ao nodo *sink*, como o monitoramento de tráfego de veículos em vias principais e secundárias. Neste tipo de aplicação, o protocolo Multi-K reflete solução mais atrativa do que o protocolo Multi.

A energia, parâmetro de qualidade de serviço de fundamental importância, é objeto de diversas pesquisas em RSSFs. Tal parâmetro de QoS é um recurso escasso

devido, principalmente, às limitações de *hardware* dos nodos sensores destas redes.

### 3.1 Multi: Protocolo Adaptativo Híbrido para Disseminação de Dados em RSSFs

A ocorrência de eventos em uma RSSF pode sofrer oscilações ou alterações de acordo com as condições do ambiente e aplicações utilizadas. Os protocolos SID e EF-Tree, apresentados no capítulo anterior, possuem características específicas e a utilização de cada um baseia-se em cenários específicos. O primeiro protocolo tende a ser utilizado quando a ocorrência de eventos é imprevisível e a infra-estrutura criada é mantida somente quando há dados para transmitir. O segundo, é utilizado quando há necessidade de uma comunicação mais intensa, como em cenários de sensoriamento contínuo ou com uma grande quantidade de fontes de dados.

O Multi, protocolo proposto em (Figueiredo et al., 2004), apresenta uma nova abordagem na construção de algoritmos de disseminação de dados para RSSFs. O protocolo funciona de forma autônoma utilizando as características dos protocolos SID e EF-Tree. Em (Figueiredo et al., 2004), o Multi é apresentado e comparado com outros protocolos de roteamento. A aplicabilidade do Multi estende-se por apresentar as características híbrida e adaptativa.

#### 3.1.1 Regra Adaptativa

A primeira característica do protocolo Multi a ser ressaltada é o comportamento adaptativo. Este comportamento refere-se à capacidade de reação da rede quando é detectada alguma situação perceptiva. O nodo *sink* é o responsável por monitorar as condições da rede, analisar o estado atual e tomar uma decisão dentro de determinado conjunto de ações.

Um nodo sensor detecta um evento quando seu valor medido representa uma situação de interesse. A partir deste momento, o nodo sensor inicia a geração dos dados em direção ao nodo *sink* com a finalidade de informar e permitir o monitoramento

por alguma aplicação.

Como descrito em (Figueiredo et al., 2007), a implementação atual do protocolo Multi adota o método de processamento de sinal MAF (*Moving Average Filter*) (Smith, 1999) ou filtro de média móvel. O método é utilizado em um número de novas detecções do nodo (nodos iniciando o envio de dados) como uma estimativa para o próximo período de tempo, auxiliando na decisão a ser tomada no próximo período de tempo que pode alternar para o comportamento pró-ativo ou não. O filtro computa a média do número de medidas de entradas para produzir cada ponto de saída do sinal. O objetivo é acompanhar as mudanças no número de fontes transmitindo dados e observar as alterações em pequenos espaços de tempo.

O resultado do MAF é usado como estimativa para o próximo período de observação. Buscando estimar a próxima infra-estrutura válida no intervalo, assume-se o valor  $10 \times MAF$  e o comportamento pró-ativo será utilizado se o valor é maior ou igual a 1 (ou  $MAF \geq 0.1$ ). Se o Multi já se encontra em modo pró-ativo com uma infra-estrutura válida, esta ação torna-se desnecessária e evitada antes que a validade expire (Figueiredo et al., 2007). O funcionamento da regra adaptativa é descrita na figura 3.1.

### 3.1.2 Descrição do algoritmo

O protocolo Multi (Figueiredo et al., 2004) trabalha de forma híbrida com a associação dos protocolos SID e EF-Tree. O primeiro trabalha com o modo reativo de disseminação de dados. O nodo fonte começa a enviar dados quando necessário e assim inicia a formação da infra-estrutura de disseminação de dados. Sua aplicação é destinada a cenários nos quais a disseminação de informação ocorre orientada a eventos sem a necessidade de uma consulta específica dos dados, tendo surgido da observação de que na literatura, à época, existiam poucos trabalhos com essa característica. O segundo aborda uma estrutura de disseminação simples e eficiente que consiste na construção de uma árvore, a partir do *broadcast* de mensagens de controle pelo nodo *sink* e o ancestral de um nodo é tomado quando a primeira mensagem de controle é recebida. Esta estrutura de dados é mantida pró-ativamente a partir do nodo *sink*, conectando

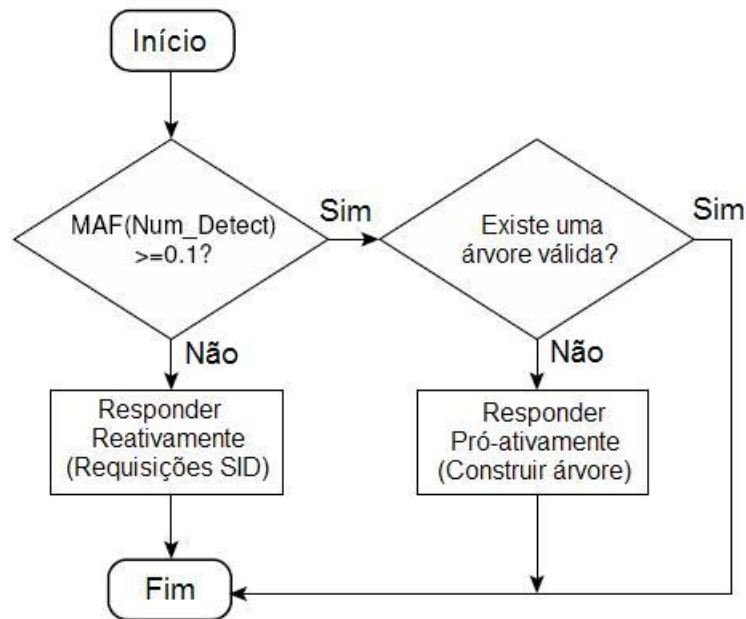


Figura 3.1: Regra adaptativa do Multi (Figueiredo et al., 2007).

todos os nodos alcançáveis da rede e possui a particularidade de reconstrução periódica da árvore, para a acomodação de possíveis mudanças topológicas.

O algoritmo do protocolo Multi é descrito da seguinte forma (Figueiredo et al., 2007):

- Inicialmente, a rede funciona de forma reativa (SID). Ao detectar um evento, um nodo envia em *broadcast* seus dados para a rede. O *sink*, ao receber um dado, emite uma mensagem de requisição para a fonte destes, definindo o caminho pelo qual os dados passarão a ser entregues.
- O *sink* contabiliza a quantidade de fontes enviando dados por um intervalo de tempo pré-definido. O intervalo de tempo é definido como sendo igual ao período de requisição de dados pelo *sink*.
- Ao detectar a elevação da quantidade de fontes de dados acima do valor determinado pelo filtro de média móvel ( $MAF \geq 0.1$ ), o *sink* passa a enviar mensagens periódicas de construção de árvore. Isso é feito com base na observação de que, a partir de um determinado número de fontes, pode-se esperar uma tendência

no crescimento do número desses eventos, e é menos custoso construir e manter uma infra-estrutura de roteamento para toda a rede do que fazê-lo para cada nova fonte individualmente.

- Ao receber uma mensagem de construção de árvore, um nodo mantém informação de seu pai e uma validade com base no *timestamp* da mensagem. A partir desse instante, todos os dados gerados ou roteados por este nodo passarão a ser enviados pelo caminho estabelecido pela árvore. Isso será feito enquanto a árvore estiver sendo reconstruída, ou seja, a validade da informação do pai do nodo é igual ao período de reconstrução da árvore.
- Quando a incidência de eventos voltar a ser reduzida ( $MAF < 0.1$ ), o *sink* interromperá as reconstruções da árvore e voltará a requisitar dados das fontes individualmente, voltando a funcionar exatamente como o SID. Com isso, os nodos terão as validades de seus pais expiradas e voltarão a transmitir seus dados conforme o estabelecido pelas mensagens de requisição.

Na transição do SID para o EF-Tree, os nodos que ainda não receberam a mensagem de controle de construção da árvore continuarão a enviar dados pelo caminho definido pelo SID. Quando os dados encontrarem uma parte da rede com a árvore definida, o caminho por ela será seguido. As perdas nas mensagens de construção da árvore impactam negativamente no protocolo, já que o *sink* pára de requisitar dados individualmente quando está atuando como EF-Tree, o que implicará em *broadcast* de dados pelos nodos que não receberem essas mensagens de controle (Figueiredo et al., 2004).

## 3.2 O protocolo Multi-K

A partir da implementação original do Multi foram feitas análises para a melhoria deste protocolo. A modificação proposta e efetuada foi a realização de um *broadcast* limitado dando origem ao Multi-K. Desta forma, será construída uma árvore parcial, diferentemente da versão original que ligava todos os nodos da rede.

Ao operar em modo pró-ativo, o Multi realiza a construção da árvore conectando todos os nodos da rede (Fig. 3.2(a)). A alteração presente no Multi-K consiste em construir uma árvore com distância de  $k$  hops do nodo *sink* até o nodo fonte (Fig. 3.2(b)). A distância  $k$  será calculada por um caminho que conecte os nodos fontes ao *sink* e apresente o menor número de hops. Caso duas ou mais fontes estejam transmitindo dados, o cálculo da distância será a maior distância dos menores caminhos que ligam o *sink* aos respectivos nodos fonte. Outras métricas poderiam ser utilizadas para a composição do fator  $k$  como a latência e energia.

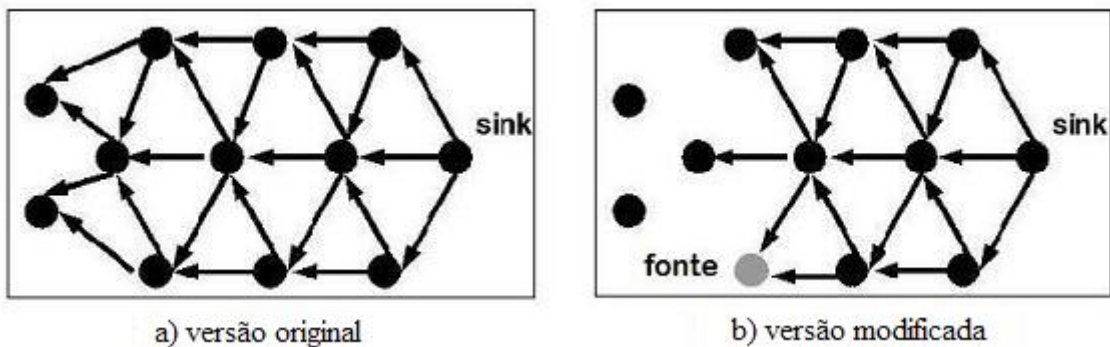


Figura 3.2: Disseminação de dados via *broadcast* para construção da árvore.

O Multi-K procura criar uma árvore de disseminação do *sink* até o nodo fonte. Um novo campo foi introduzido à mensagem de construção de árvore e faz o cálculo do número de saltos. A distância  $k$  em hops é calculada pelo nodo *sink* que escolhe o caminho que possui o menor número de hops. Para criar a árvore de disseminação, o contador será decrementado em uma unidade e quando o contador chegar a zero, a mensagem de construção de árvore será descartada e esta terá cumprido a sua meta, ou seja, chegar ao nodo fonte que possui os dados a serem transmitidos.

Desta forma, pode haver grande redução no número de mensagens de controle trocadas para a criação da árvore gerada quando os eventos detectados estiverem próximos ao nodo *sink*. A distância, em número de hops, do nodo fonte ao *sink*, determina o tamanho da árvore a ser construída e, conseqüentemente, o número de mensagens de controle a serem trocadas. Quanto maior a proximidade do nodo fonte ao *sink*, menor será o tamanho desta árvore e maior será a probabilidade de vantagem

da modificação proposta.

Salienta-se que o protocolo Multi-K distingue-se do Multi apenas quando ambos operam em modo pró-ativo. Quando os protocolos trabalham em modo reativo, ou seja, tendo o mesmo comportamento que o protocolo SID, não há nenhuma alteração e ambos funcionam da mesma forma.

O protocolo Multi-K foi implementado a partir do protocolo Multi, modificando-se a árvore de espalhamento construída em modo pró-ativo. Um campo, denominado contador, foi criado para calcular a distância em *hops* do nodo *sink* até o nodo fonte. Incrementa-se este contador em uma unidade em cada *hop* por onde uma mensagem enviada por uma mesma origem (nodo fonte) e recebida pelo destino (nodo *sink*) trafegar. O nodo *sink* escolhe o caminho que houver o menor número de *hops*. A construção de forma limitada iniciada pelo nodo *sink* com destino ao nodo fonte é realizada utilizando um determinado número inteiro, armazenado no campo contador, e este número será decrementado até zero. A inclusão do campo contador implicou na alteração do código fonte com modificações nos métodos existentes e a inserção de novos métodos para a manipulação de listas encadeadas e modificações nas funções recebimento e envio de pacotes, construção das árvores, encaminhamento de pacotes, dentre outras.

### 3.3 Resultados esperados com a modificação proposta

Ao efetuar esta mudança no protocolo Multi, as simulações descritas no Capítulo 4 pretendem evidenciar que a redução no número de mensagens de controle devido valor de  $k$  que limita a construção da árvore de espalhamento em modo pró-ativo afeta diretamente no consumo de energia da rede. A motivação desta mudança é diminuir o consumo de energia total da rede mantendo a taxa de entrega de dados da versão original do Multi, já que uma parcela significativa do consumo de energia é gasta com a transmissão de mensagens de controle para a manutenção da árvore na fase de comportamento pró-ativo.

Esta mudança de estratégia implementada no Multi-K que, em primeira análise,



pode parecer apenas uma simplificação, representa situações que podem ser encontradas em aplicações reais. Em particular para aplicações cuja deposição dos nodos sensores pode ser feita de maneira determinística. Em determinadas situações, o nodo *sink* pode ser posicionado próximo às regiões onde se prevê a ocorrência de um número mais concentrado de eventos. Seria o caso, por exemplo, de uma aplicação de monitoramento de tráfego na qual em uma via principal possui um fluxo maior (mais eventos) do que em vias secundárias.

# Capítulo 4

## Avaliação do Multi-K

### 4.1 Metodologia

A fase inicial do trabalho consistiu em estudar e analisar alguns protocolos de roteamento encontrados na literatura para as RSSFs. Uma análise dos requisitos da Qualidade de Serviço (QoS) destes protocolos foi efetuada. Terminada esta fase, o estudo do protocolo Multi foi enfatizado em função do histórico de trabalhos desenvolvidos em cooperação pelo DPI-UFV e o DCC-UFMG. O Multi tem a preocupação em prover suporte a QoS, sendo que o principal parâmetro de QoS abordado será o consumo de energia.

A ferramenta de simulação NS-2 (*Network Simulator 2*) (Ns-2, 2007) foi utilizada neste trabalho. O *Network Simulator*, atualmente na versão 2, é um simulador desenvolvido pela Universidade da Califórnia em Berkeley, que tem como objetivo permitir a simulação de tecnologias e protocolos de rede. O NS-2 é um simulador para eventos discretos que permite sua utilização nas pesquisas em redes de computadores. Este simulador apresenta ainda a capacidade de estudar o comportamento de aplicações de geração de tráfego e de diferentes mecanismos de gestão de filas de pacotes. O protocolo Multi foi implementado utilizando o simulador NS-2 e, por este motivo, utilizou-se deste mesmo simulador para a criação do Multi-K.

O simulador NS-2 é um *software* orientado a objetos que trabalha com as linguagens de programação C++ e OTcl (*Object Tcl*). Para implementar o Multi-K

foi necessário modificar e recompilar código fonte C++. Os *scripts* de simulação em OTel também foram modificados para a formação das topologias e geração de eventos para a criação das simulações. Os *logs* de saída das simulações foram manipulados utilizando a linguagem Perl (*Practical Extraction and Report Language*) para extrair e analisar os dados necessários.

As simulações seguiram os mesmos parâmetros de configuração da versão original do protocolo Multi tendo sido realizadas usando o simulador NS-2. Como descrito em (Figueiredo et al., 2004), esses parâmetros são: um *sink* apenas; mensagens de dados de 20 bytes transmitidas a cada 10s por cada nodo fonte; mensagens de controle de 16 bytes transmitidas a cada 100s. Os parâmetros de simulação foram ajustados baseados no nodo Mica 2 com o protocolo da camada MAC 802.11, conforme Tabela 4.1 (Figueiredo et al., 2004). O tempo de execução de cada simulação foi ajustado para 4000 segundos, sendo que as detecções de eventos (nodos fonte gerando dados) começaram a partir do instante 1000 segundos.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Potência de Transmissão	33mW
Potência de Recepção	30mW
Largura de Banda	76800bps
Alcance do Rádio	40m

Tabela 4.1: Parâmetros de simulação.

As simulações foram efetuadas usando um computador *desktop* com processador Celeron 2,66GHz, disco rígido de 40GB e memória de 256MB; sistema operacional Linux com a distribuição Mandriva 2006 *free*; as ferramentas Gnuplot versão 4.2 para a geração dos gráficos e o NAM (*Network Animator*) versão 1.11 para visualização da topologia de rede; a linguagem Perl para análise dos *logs* de saída obtidos através das simulações; e por fim, o simulador *Network Simulator* versão 2.29 previamente apresentado. Foram realizadas um total de 33 simulações para a geração dos gráficos e os resultados considerados foram a média aritmética destas 33 simulações,

para cada um dos cenários que serão apresentados. Todos os resultados consideram o intervalo de confiança de 95%, representados nos gráficos pelas barras verticais em cada ponto de interesse.

## 4.2 Simulações e Resultados

Os protocolos Multi e Multi-K foram avaliados em vários casos. A versão modificada é comparada com a versão original. Ressalta-se o quesito energia como o principal parâmetro de qualidade de serviço (QoS) a ser referenciado. Os protocolos serão confrontados em simulações descritas a seguir. O simulador NS-2 foi necessário para comparar os protocolos. A escolha do NS-2 justifica-se pelo seu amplo uso no meio acadêmico-científico e a implementação original do protocolo Multi ser baseada neste simulador.

Buscando avaliar o funcionamento dos protocolos Multi e a sua versão modificada, Multi-K, foi criado um cenário de simulação na qual há variação na ocorrência de eventos ao longo do tempo de simulação. O cenário representa a detecção de um evento em um tempo aleatório. O tráfego de dados na rede eleva-se quando um maior número de sensores detectam um evento e, conseqüentemente, é reduzido quando um menor número de sensores o fazem. A rede torna-se inativa quando eventos não são detectados por nenhum nodo sensor situado na área sensorizada.

Os aspectos observados nas simulações foram: taxa de entrega de dados, robustez, escalabilidade e energia. Este último é o principal, uma vez que tal aspecto mostra-se como um recurso escasso em RSSFs, bem como por se apresentar o objeto da motivação deste trabalho.

A seguir, será apresentada uma análise comparativa dos protocolos Multi e Multi-K em cenários com destruição uniforme dos nodos sensores e eventos. Posteriormente, será apresentada a avaliação destes protocolos em cenários não-uniformes, representando aplicações reais em que a distribuição dos nodos sensores pode ser previamente especificado. Neste último conjunto de cenários, uma maior concentração de nodos sensores pode ser colocada em regiões estratégicas, onde a probabilidade de

ocorrência do fenômeno monitorado é maior.

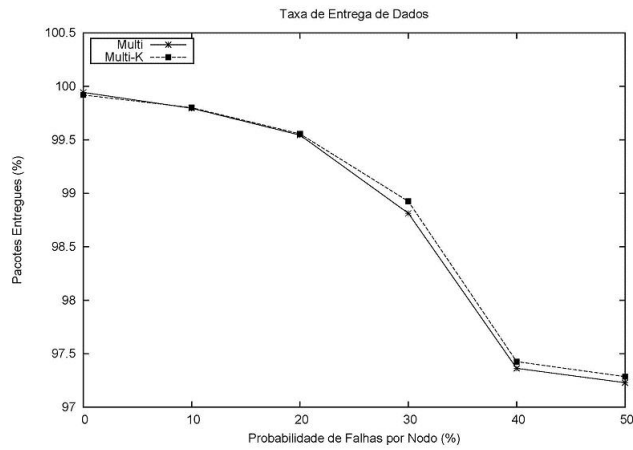
#### **4.2.1 Análise comparativa do Multi e Multi-K em cenários com distribuição uniforme**

As primeiras simulações buscaram verificar o comportamento dos protocolos Multi e Multi-K em cenários com distribuição uniforme dos nodos sensores na rede. Os sensores são inseridos na rede de forma que área monitorada seja igualmente sensorizada, procurando não obter a formação de concentrações de nodos em regiões desta área.

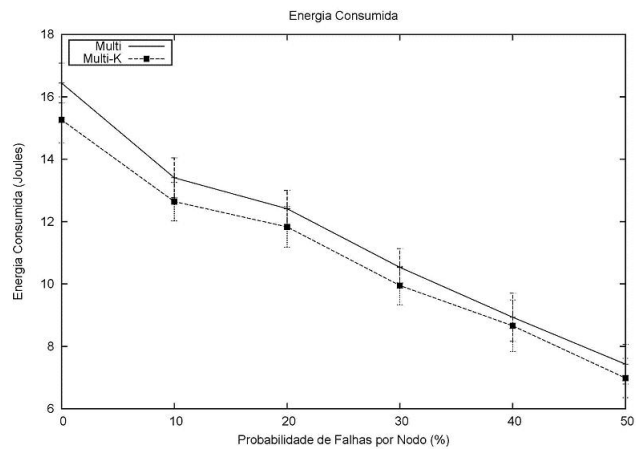
O objetivo é comparar o comportamento do Multi-K em cenários similares aos que foram usados para analisar a economia de energia do Multi, com seu comportamento híbrido em relação aos protocolos reativos e pró-ativos (Figueiredo et al., 2004).

O primeiro aspecto verificado nas simulações foi a robustez. Foi simulada uma rede com 50 nodos distribuídos uniformemente em uma área de 100x100m, 20 fontes (nodos gerando dados) escolhidos aleatoriamente entre todos os existentes na simulação, a variação de probabilidade de falha de 0 a 50%. Um nodo pode falhar em um instante aleatório no tempo de simulação e se isso ocorrer, ele permanecerá até o final da simulação em estado de total inatividade (Figueiredo et al., 2004). Os resultados de um conjunto de 33 de simulações efetuadas são mostrados na Figura 4.1. A variação da taxa de entrega de dados com a probabilidade de falhas foi muito semelhante para ambos os protocolos. Como pode ser visto na Figura 4.1(a), a oscilação foi de 97 a 100%. O Multi-K apresentou comportamento muito similar ao Multi alcançando uma mesma taxa de entrega de pacotes, mesmo quando a probabilidade de falhas é ampliada. A variação máxima da taxa de entrega de dados, entre os dois protocolos, foi de 0,063%.

O consumo de energia foi avaliado e os resultados são mostrados na Figura 4.1(b). As barras verticais indicam o intervalo de confiança de 95%. Os dois protocolos tiveram um comportamento similar sendo que o protocolo Multi-K obteve melhor desempenho em relação ao protocolo Multi. A redução no consumo de energia foi de



(a) Taxa de entrega de dados.

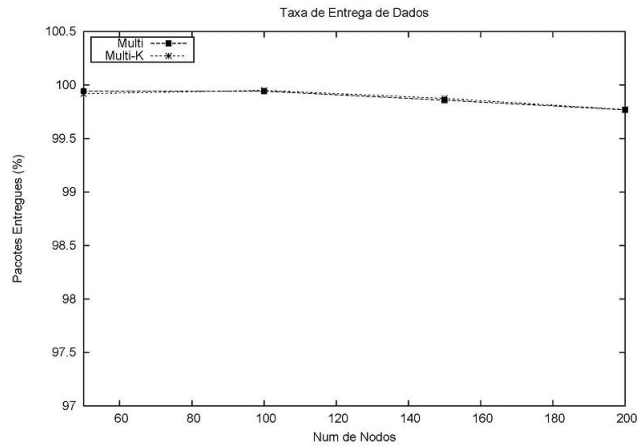


(b) Energia total.

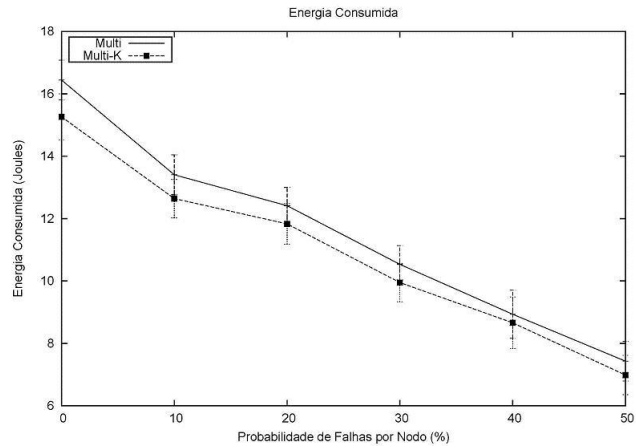
Figura 4.1: Avaliação da Robustez.

até 7,2% obtendo uma média de 5%. O decréscimo de energia ao elevar a probabilidade de falhas dos nodos sensores é devido à redução do número de mensagens de controle e de dados trafegados pela rede. Ao ocorrer uma falha, o nodo sensor pára de transmitir informações e o gasto de energia referente ao sensoriamento, transmissões e recepções deste sensor é extinto.

A escalabilidade foi avaliada em simulações com as mesmas configurações do cenário anterior, exceto a probabilidade de falhas que foi fixada em 0% e o tamanho da rede que teve uma variação de 50 a 200 nodos. Foram avaliados a taxa de entrega e o consumo de energia em função do aumento do número de nodos da rede. Os resultados



(a) Taxa de entrega de dados.

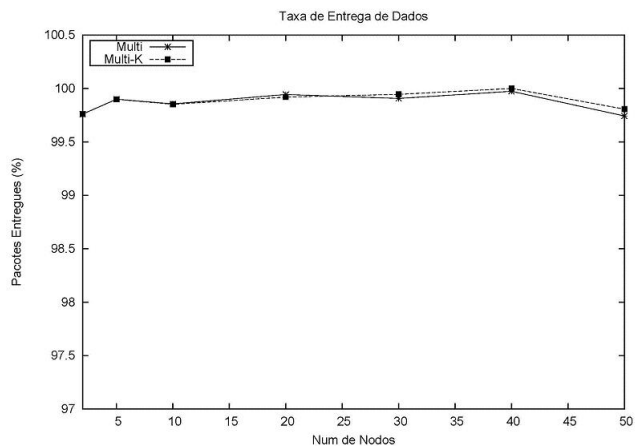


(b) Energia total.

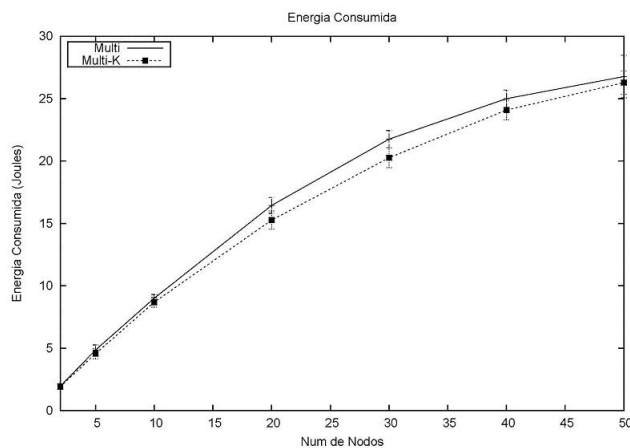
Figura 4.2: Avaliação da Escalabilidade.

podem ser observados na Figura 4.2. O comportamento dos protocolos mostrou-se estável ao avaliar a taxa de entrega de dados que manteve-se acima de 99,94% como observado na Figura 4.2(a). Com relação à energia total consumida, o protocolo Multi-K economizou, em média, 3% de energia em relação ao Multi atingindo uma máxima redução de 7% quando o número de nodos é 100, conforme pode ser observado na Figura 4.2(b).

No próximo cenário de simulação dos protocolos Multi e Multi-K variou-se a quantidade de nodos que geram dados com a taxa de probabilidade de falhas em 0%.



(a) Taxa de entrega de dados.



(b) Energia total.

Figura 4.3: Energia com tráfego eventual.

Os nodos geram dados aleatoriamente com distribuição uniforme no decorrer do tempo de simulação. A taxa de entrega dos dados e o consumo de energia dos protocolos podem ser observados na Figura 4.3(a). O Multi-K leva vantagem em relação ao Multi, pois a construção da árvore limitada diminui o tráfego de informações de controle na rede. Neste conjunto de simulações efetuadas, obteve-se uma redução média de 4,4% e máxima de 7,1% da energia total consumida pela rede, conforme pode ser observado na Figura 4.3(b). A taxa de entrega de dados manteve-se acima de 99,7%.

Até o momento, abordou-se as simulações executadas com uma distribuição uniforme comparando o Multi-K com o Multi. A disposição dos nodos sensores na



rede e a ocorrência dos eventos seguiram a distribuição uniforme. Na próxima seção, será abordada a distribuição não-uniforme, focando-se na implementação proposta do Multi-K .

#### 4.2.2 Análise comparativa do Multi e Multi-K em cenários com distribuição exponencial

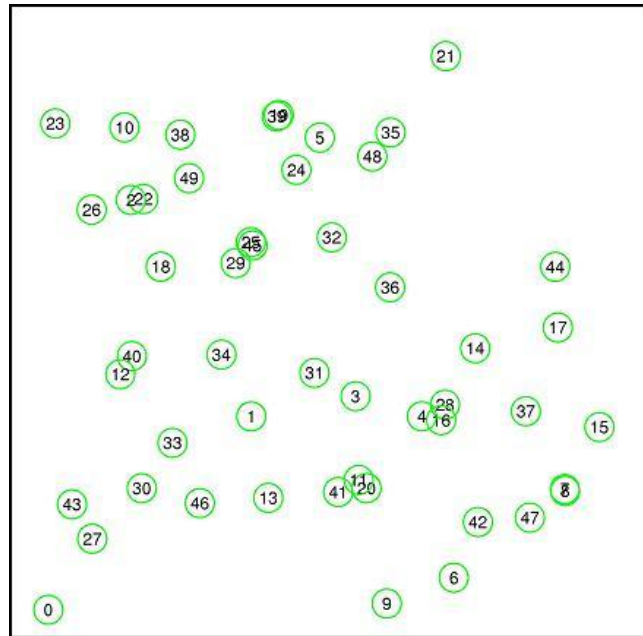
As simulações a seguir utilizaram uma distribuição não-uniforme dos nodos. Manteve-se a geração dos eventos de forma aleatória, porém, observando o comportamento relativo à localização dos eventos.

Foram criados cenários onde a ocorrência dos eventos situava-se em função da distância do evento ao nodo *sink*. Um raio de cobertura foi delineado a partir deste nodo. Os eventos foram gerados dentro deste raio de cobertura. Procurou-se contemplar as aplicações nas quais existisse uma concentração de nodos sensores que reportasse algum evento sensoriado, procurando analisar a distância destes nodos sensores ao nodo *sink*. O exemplo do monitoramento de tráfego de veículos em vias principais e secundárias citado no capítulo anterior enquadra-se neste conjunto de aplicações. Pode-se concentrar número maior de nodos sensores e o nodo *sink* em regiões de maior fluxo de veículos para o monitoramento de uma certa característica como, por exemplo, a velocidade destes.

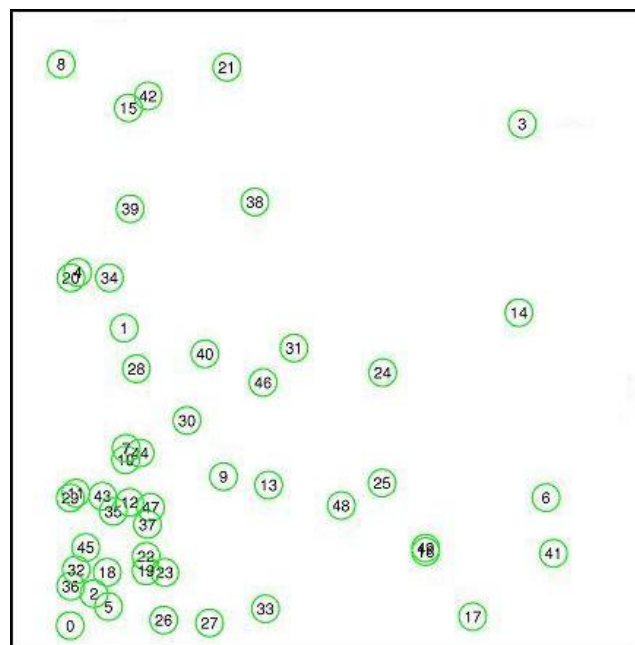
Para ilustrar as distribuições uniforme e exponencial dos nodos sensores na rede, a Figura 4.4 apresenta a formação de duas topologias com 50 nodos cada. O nodo *sink* é indicado na figura com a numeração 0 (zero) situado no canto inferior esquerdo. A figura representa uma das topologias formadas entre as 33 simulações criadas com cada distribuição. Na distribuição uniforme, não há formação de concentrações de nodos em nenhum ponto da rede, diferentemente da distribuição exponencial, que apresenta maior concentração de nodos em torno do nodo *sink*. Estes comportamentos podem ser confrontados nas figuras 4.4(a) e 4.4(b).

Foi simulada uma rede com os nodos distribuídos utilizando uma distribuição exponencial em uma área de 100x100m com a taxa de probabilidade de falhas em 0%.

A geração dos eventos seguiu esta mesma distribuição. Em média, das 33 simulações geradas, 2 foram descartadas por apresentarem valores gerados muito discrepantes

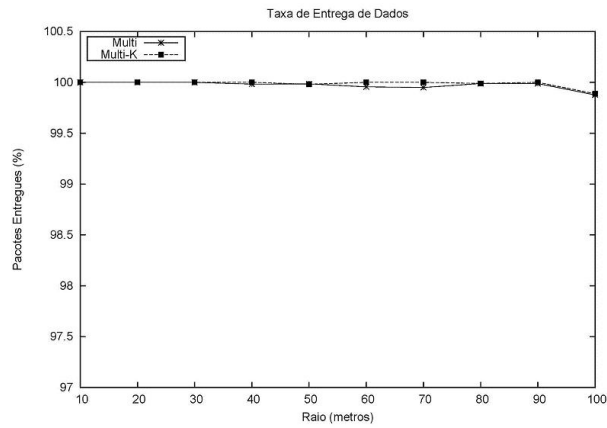


(a) Topologia de rede com distribuição uniforme.

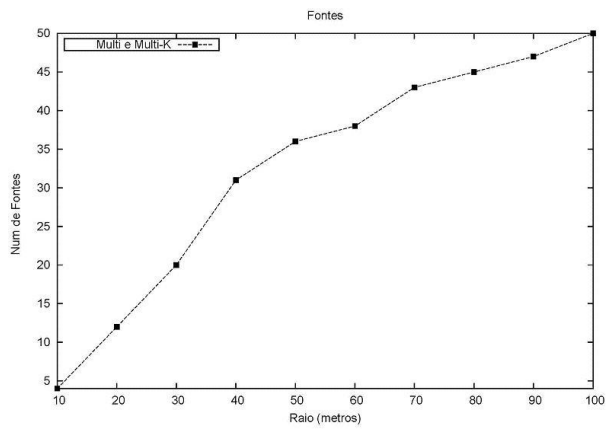


(b) Topologia de rede com distribuição exponencial.

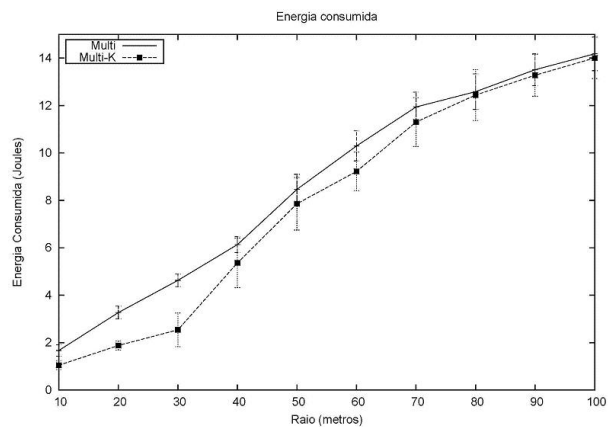
Figura 4.4: Topologias de rede utilizando as distribuições uniforme e exponencial.



(a) Taxa de entrega de dados.



(b) Número de fontes por raio.



(c) Energia total.

Figura 4.5: Consumo de energia em cenário baseado em eventos utilizando localização.

das demais simulações, devido à geração das topologias em que a maioria dos nodos ficaram muito próximos ao nodo *sink* ou muitos destes localizavam-se fora da área proposta.

Na Figura 4.2.2, são mostrados os resultados obtidos. A taxa de entrega de pacotes de dados manteve-se constante nos protocolos Multi e Multi-K, verificando-se em ambos a taxa de 100%, conforme mostrado na Figura 4.2.2(a). O número de fontes situadas na área de cobertura, a cada medida do raio, é apresentado na Figura 4.2.2(b). O aumento do raio implica em uma maior área de cobertura e, conseqüentemente, um maior número de nodos fonte reportando dados. A Figura 4.2.2(c) apresenta comparação dos protocolos no quesito consumo de energia em função do tamanho do raio. O protocolo Multi-K conseguiu reduzir em até 45,09% o consumo de energia em relação ao Multi, apresentando uma redução média de 15,67% no consumo de energia. A maior redução foi encontrada quando o raio assumiu o valor 30 e apresentando o número de 20 nodos fonte. Esta redução máxima obtida decorre de um número bastante significativo de nodos fonte enviando dados (mais de 40% do total de nodos fonte nesse conjunto de simulações) e uma distância relativamente pequena (30 metros). A tendência do aumento no ganho comparativo do Multi-K em relação ao Multi é verificado até a distância de 30 metros e, a partir dessa distância, com o raio entre 40 e 70 metros a redução média de energia ficou na faixa de 6,87% e com o raio variando entre 80 e 100 metros, a redução no consumo de energia foi da ordem de 1,45%.

A substancial redução do consumo de energia acima citado justifica-se pela nova característica proposta no protocolo Multi-K. A partir do instante em que o Multi-K comporta-se de modo pró-ativo, as construções periódicas das árvores parciais são efetuadas. Para analisar a Figura 4.2.2(c), duas componentes devem ser analisadas: número de fontes enviando dados e a distância dos nodos ao *sink*. Até a distância de 30 metros, o aumento do número de nodos fonte em conseqüência do aumento do raio eleva o tráfego de dados na rede, favorecendo o protocolo a operar mais tempo em modo pró-ativo que reativo. Com a distância de 30 metros e o número de nodos fonte igual a 21, obtém-se o maior ganho relativo na comparação dos protocolos Multi-K

em relação ao Multi. De 40 a 70 metros, o aumento da distância dos nodos fonte em relação ao *sink* interrompe a tendência de elevação do ganho comparativo e a taxa percentual comparativa mantêm-se em um mesmo patamar, diminuindo com o aumento da distância. O aumento do raio eleva consideravelmente o tamanho das árvores parciais criadas. Por fim, de 80 a 100 metros, as árvores parciais tendem a alcançar todos os nodos da rede, obtendo um ganho comparativo desprezível, já que nesta situação o Multi-K se comporta de maneira semelhante ao Multi. Ou seja, o número de nodos fonte e a distância destes em relação ao nodo *sink* influenciam de maneira crucial no consumo de energia da rede.

Nas simulações anteriores, com distribuição uniforme dos nodos conforme apresentado na seção 4.2.1, a redução no consumo de energia era tímida pelo fato de que a construção e manutenção da árvore era sempre controlada pelo nodo fonte mais distante, ou seja, com maior número de *hops* de distância do nodo *sink*. Se ao menos um nodo fonte estivesse na extremidade da área de cobertura ou situado a uma grande distância do nodo *sink*, a solução tenderia ao pior caso, resultando na construção total da árvore. Com a restrição imposta neste último conjunto de simulações, a geração dos eventos, apesar de ser aleatória, era limitada pelo raio. Este cenário demonstra o ganho expressivo no consumo de energia do protocolo Multi-K em relação ao protocolo Multi ao analisar a distância na ocorrência dos eventos em relação ao *sink*.

### 4.3 Análise geral dos resultados

Com os resultados obtidos nas simulações, conclui-se que o protocolo Multi-K apresenta uma solução escalável com uma rede de até 200 nodos, mantém a taxa de entrega de dados com variação não significativa e reduz o consumo de energia. Em cenários com distribuição uniforme dos nodos, o Multi-K conseguiu redução de até 7,2% em relação ao Multi. No cenário com concentração de nodos em regiões próximas ao nodo *sink*, proposto no último conjunto de simulações, a redução no consumo de energia elevou-se de forma notória e muito favorável ao protocolo Multi-K, chegando a 45,09%.

Demonstrou-se, neste capítulo, através das simulações efetuadas, que a solução proposta pelo Multi-K pode ser muito interessante para o consumo de energia, que é um parâmetro crucial para a QoS de aplicações reais, nas quais existe a tendência de uma distribuição não uniforme dos nodos. A utilização otimizada deste parâmetro é de essencial importância em RSSFs e o protocolo Multi-K apresenta solução importante na melhoria no consumo de energia.

No capítulo seguinte serão apresentadas as conclusões finais do trabalho e perspectivas futuras.

# Capítulo 5

## Conclusões e Perspectivas Futuras

O Multi foi o primeiro protocolo híbrido a apresentar uma nova abordagem de auto-organização de redes de sensores sem fio onde há adaptação autônoma em disseminação de dados (Figueiredo et al., 2004). Este protocolo híbrido tem sua funcionalidade ampliada por apresentar característica adaptativa. Em cenários de grande variabilidade de ocorrência de eventos, o Multi é uma solução efetiva a ser utilizada.

A energia, por ser um recurso escasso em RSSFs, deve ser utilizada de maneira otimizada, procurando aumentar o tempo de vida da rede. Este trabalho apresentou uma modificação na versão original do Multi. A nova versão apresentada e intitulada Multi-K apresentou melhora significativa no consumo total de energia da rede em situações nas quais a distribuição dos nodos é não-uniforme.

A modificação presente no protocolo Multi-K preservou os parâmetros taxa de entrega de dados e robustez, mantendo-os nos mesmos patamares encontrados no Multi. A taxa de entrega é característica muito importante, pois esta implica diretamente no consumo de energia da rede. Se o protocolo Multi-K apresentasse uma solução com reduções significativas no consumo de energia e na taxa de entrega de dados, a redução da energia não representaria benefício, pois esta seria advinda da redução no tráfego de mensagens e dados, e não resultante da modificação inserida no Multi-K. A escalabilidade também manteve-se em níveis similares à versão original, observando uma pequena melhora no consumo de energia.

O tipo de aplicação interfere de maneira crucial no desempenho dos protocolos.

O Multi-K propõe a construção parcial da árvore em modo pró-ativo, usando como métrica o número de *hops*. Esta solução é fortemente indicada em aplicações nas quais existe um conhecimento superficial do comportamento das mesmas e a ocorrência dos eventos localiza-se em regiões próximas do nodo *sink* que irá disponibilizar, gerenciar e agrupar as informações coletadas pela rede de sensores. Em aplicações cuja localização da ocorrência dos eventos não pode ser prevista, o Multi-K apresenta a solução com ganhos relativos ao consumo de energia mais tímidos, devido ao fato de que se um evento ocorre na periferia da rede, a árvore total conectando todos os nodos da rede será contruída e a atuação do protocolo Multi-K será equivalente a do protocolo Multi.

A distância em *hops* entre o nodo *sink* e nodos fonte foi utilizada como métrica para efetuar a construção parcial da árvore e obter redução no consumo de energia. Outras métricas poderiam ser utilizadas para reduzir o consumo de energia. A localização geográfica dos nodos, por exemplo, pode ser empregada para efetuar um *broadcast* limitado para a construção da árvore de forma direcionada a uma região específica da rede na qual se encontra o conjunto de nodos fonte, minimizando o número de mensagens de controle enviadas e recebidas.

Com base na localização dos eventos, outra decisão pode ser tomada, como adotar comportamentos em diferentes partições da rede como implementado de modo semelhante aos protocolos *ad hoc* de roteamento Zrp e Sharp (Anton and Duarte, 2002). Neste caso, seriam criadas zonas de pró-atividade. Estas zonas seriam criadas em torno de alguns nodos definidos como pró-ativos e nodos a um certo raio do nodo definido como pró-ativo são definidos como pertencentes à zona pró-ativa. Os nodos que estiverem fora destas zonas pró-ativas utilizariam o modo reativo. Neste caso, ambos os modos, reativo e pró-ativo, coexistiriam na rede. A informação de localização é uma sugestão a ser utilizada em trabalhos futuros.

Outra abordagem possível é a utilização de múltiplos nodos *sink* que poderiam ser colocados em regiões com maiores concentrações de nodos e cada *sink* construir uma árvore parcial em modo pró-ativo utilizando o protocolo Multi-K. Esta é uma solução interessante e o impacto desta mudança de abordagem deve ser verificado através de simulações.



# Referências Bibliográficas

- Akyildiz, I. F., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2001). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38:393–422.
- Ammari, H. M. and Das, S. (2006). An energy-efficient data dissemination protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'06)*. Washington, DC, USA.
- Anton, E. R. and Duarte, O. C. M. B. (2002). Segurança em redes sem fio ad hoc. In *Gerenciamento de Chave de Grupo, XIV Congresso Brasileiro de Automática*, Natal, RN.
- Braden, R., Clark, D., and Shenker, S. (1994). Integrated services in the internet architecture: an overview. RFC 1633, IETF.
- Chen, D. and Varshney, P. K. (2004). Qos support in wireless sensor networks: A survey. In *Proceedings of the 2004 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2004)*. Las Vegas, Nevada, USA, June 21-24.
- Cunha, D. D. O. (2004). Conservação de energia em redes ad hoc. Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE - Rio de Janeiro - RJ - Brasil. Dissertação de Mestrado.
- Figueiredo, C. M. S., Loureiro, A. A. F., and Nakamura, E. F. (2004). Protocolo adaptativo híbrido para disseminação de dados em redes de sensores sem fio auto-organizáveis. *22º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Gramado, RS, Brasil*.

- Figueiredo, C. M. S., Nakamura, E. F., Loureiro, A. A. F., and Ruiz, L. B. (2007). An event-detection estimation model for hybrid adaptive routing in wireless sensor networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC'07)*. Glasgow, Scotland, June 24-28.
- Ganesan, D., Govindan, R., Shenker, S., and Estrin, D. (2001). Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 5(4):11–25.
- He, T., Stankovic, J. A., Lu, C., and Abdelzaher, T. (2003). Speed: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks. In *Proceedings of the International conference on Distributed Computing Systems*. Providence, RI, May.
- Henry, R. (2006). Electromagnetic waves & transmission. Disponível em: [hkn.colorado.edu/resources/latex/emfinal/emfinal.pdf](http://hkn.colorado.edu/resources/latex/emfinal/emfinal.pdf). Acessado em 20/06/2007.
- Hussain, S. and Islam, O. (2007). An energy efficient spanning tree based multihop routing in wireless sensor networks. In *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Hong Kong, March.
- Intanagonwiwat, C., Govindan, R., Shenker, S., and Estrin, D. (2000). Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00)*, pages 56–67. Boston, MA, USA.
- Islam, O. and Hussain, S. (2006). An intelligent multi-hop routing for wireless sensor networks. In *Workshop Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology, (IAT)*. IEEE Computer Society, December.
- Kulik, J., Heinzelman, W. R., and Balakrishnan, H. (2002). Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. In *Proceedings of the Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, volume 8, pages 169–185. Kluwer Academic Publishers.

- Li, T. and Rekhter, Y. (1998). Provider architecture for differentiated services and traffic engineering. RFC 2430, IETF.
- Loureiro, A. A. F., Nogueira, J. M. S., Ruiz, L. B., Mini, R. A. D. F., Nakamura, E. F., and Figueiredo, C. M. S. (2003). Redes de sensores sem fio. *21º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Natal, RN, Brasil*.
- Machado, M. D. V., Goussevskaia, O., Mini, R. A. F., Rezende, C. G., Loureiro, A. A. F., Mateus, G. R., and Nogueira, J. M. S. (2005). Data dissemination in autonomic wireless sensor networks. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 23(12).
- Megerian, S., Koushanfar, F., Qu, G., Veltri, G., and Potkonjak, M. (2002). Exposure in wireless sensor networks: theory and practical solutions. *Wireless Networks*, 8(5):43–454.
- Ns-2 (2007). The network simulator - ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acessado em 20/06/2007.
- Ogawa, M., Tamura, T., and Togawa, T. (1998). Fully automated biosignal acquisition in daily routine through 1 month. *International Conference on IEEE-EMBS, Hong Kong*, 4:1947–1950.
- Pereira, R., Amorin, C. L., and Castro, M. C. S. (2003). Tutorial sobre redes de sensores. Disponível em: <http://magnum.ime.uerj.br/cadernos/cadinf/vol14/3-clicia.pdf>. Acessado em 26/03/2007.
- Perillo, M. and Heinzelman, W. (2003). Providing application qos through intelligent sensor management. In *Proceedings of the 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA '03)*. May.
- Pinto, A. J. G. (2004). Mecanismo de agregação de dados empregando técnicas paramétricas em redes de sensores. Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE - Rio de Janeiro - RJ - Brasil. Dissertação de Mestrado.

- Rabaey, J. M. (2000). Computer: Picoradio supports ad hoc ultra-low power wireless networking. *IEEE Computer Magazine*, pages 42–48.
- Rocha, L. G. S. (2004). Uma análise dos impactos de ações maliciosas de nós no roteamento em redes ad hoc. Master’s thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE - Rio de Janeiro - RJ - Brasil. Dissertação de Mestrado.
- Sankaransubramaniam, Y., Akan, B., and Akyildiz, I. F. (2003). Esrt: Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks. In *MobiHoc*. Annapolis, Maryland, June.
- Shih, E. (2001). Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. *Proceedings of ACM MobiCom’01, Rome, Italy*, pages 272–286.
- Sibbald, B. (2001). Use computerized systems to cut adverse drug events: report. Technical report, CMAJ: Canadian Medical Association Journal. 164 (13) 1/2p, 1c.
- Smith, S. W. (1999). The scientist and engineer’s guide to digital signal processing, california technical publishing. Technical report, CA, USA. 2nd edition.
- Sohrabi, K., Gao, J., Ailawadhi, V., and Pottie, G. (2002). Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, pages 16–27.
- Stochero, J. M., Pinto, A. J. G., and Rezende, J. F. (2004). Roteamento com agregação de dados em redes de sensores. GTA, UFRJ.
- Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N. B., and Heinzelman, W. (2002). A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM Mobile Computing and Communications Review (MC2R)*, 6(2), pages 28–36.
- Xuan, H. L. and Lee, S. (2004). A coordination-based data dissemination protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference*, pages 13–18.

Ye, W., Heideman, J., and Estrin, D. (2003). Medium access control with coordinated, adaptive sleeping for wireless sensor networks. Technical report, USC/ISI. isi-tr-567.

Ye, W., Heidemann, J., and Estrin, D. (2002). An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Infocom*, pages 1567–1576, New York, NY, USA. USC/Information Sciences Institute.