

**Universidade Federal de São Carlos**

**Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia**

**Departamento de Computação**

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

**Protocolos de Roteamento Cientes de QoS  
para Redes de Sensores e Atuadores Sem Fio**

ALUNO: LEANDRO APARECIDO VILLAS

ORIENTADORA: REGINA BORGES DE ARAÚJO

SÃO CARLOS - SP

MAIO - 2007

**Protocolos de Roteamento Cientes de QoS  
para Redes de Sensores e Atuadores Sem Fio**

**Universidade Federal de São Carlos**

**Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia**

**Departamento de Computação**

**Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação**

**Protocolos de Roteamento Cientes de QoS  
para Redes de Sensores e Atuadores Sem Fio**

**Leandro Aparecido Villas**

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

Área de concentração: Processamento de Imagens e Sinais - PIS.

SÃO CARLOS - SP

MAIO – 2007

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

V726pr

Villas, Leandro Aparecido.

Protocolos de roteamento cientes de QoS para redes de sensores e atuadores sem fio / Leandro Aparecido Villas. -- São Carlos : UFSCar, 2008.

93 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2007.

1. Protocolo de roteamento. 2. Qualidade de serviço. 3. Redes de sensores sem fio. I. Título.

CDD: 004.62 (20<sup>a</sup>)

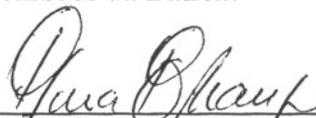
**Universidade Federal de São Carlos**  
**Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação**

***“Protocolos de Roteamento Cientes de QoS para Redes  
de Sensores e Atuadores Sem Fio”***

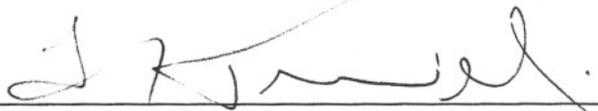
LEANDRO APARECIDO VILLAS

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

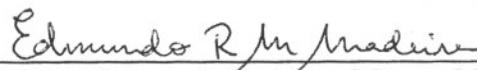
Membros da Banca:



\_\_\_\_\_  
Prof.ª. Dra. Regina Borges de Araujo  
(Orientadora – DC/UFSCar)



\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luis Carlos Trevelin  
(DC/UFSCar)



\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Edmundo Roberto Mauro Madeira  
(IC/UNICAMP)

São Carlos  
Junho/2007

*Diz a sabedoria popular chinesa que toda marcha, por mais longa e importante que seja, começa com o primeiro passo. Dar esse primeiro passo, às vezes, exige grande determinação, esforço monumental e muita coragem. Principalmente se o passo foi em direção a um caminho desconhecido, com o qual não estamos acostumados a lidar, por conta dos vícios adquiridos.*

Dedico este trabalho:

À minha querida mãe, Terezinha Gonçalves, pelo amor, incentivo e dedicação, sempre acreditando no meu sucesso.

Ao meu pai, Antonio Villas, certamente orgulhoso por mais um importante passo na minha vida.

À minha irmã, Daiane, que sempre torceu para que tudo desse certo.

À Verônica, minha namorada, pela paciência nos momentos mais difíceis.

Ao meu querido sobrinho Geovane Villas, ao qual tenho um amor imenso.

# Agradecimentos

A Deus, acima de tudo e todos, por todas as oportunidades que tive e ainda terei na minha vida;

A meus pais (Antonio e Terezinha), minha irmã Daiane e meu sobrinho Geovane, pessoas sem as quais eu não seria o que sou hoje;

À minha namorada, Verônica, pela paciência durante os inúmeros finais de semana e feriados os quais passei a frente do computador;

À prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Regina Borges de Araújo, pela motivação, encorajamento, amizade e direção durante os meus dois anos de estudos na pós-graduação.

A todos os meus familiares pela confiança irrestrita;

Aos meus amigos verdadeiros, que sempre estiveram ao meu lado, mesmo quando distantes;

A todos meus colegas do LRVNet, Ricardo, Altieres, Fernando, Diego, Bruno, Fábio, Marcio, Igor, Rodolfo, Rafaela e José Eduardo pelas discussões que contribuíram para a realização de nossos trabalhos. Agradecimentos especiais ao Richard, pelas discussões sobre o NS-2 e sobre roteamento em redes de sensores;

Aos professores do Departamento de Computação da UFSCar, principalmente aos que tive a oportunidade de conhecer durante meus dois anos de estudos;

# Sumário

---

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação e Objetivos do Trabalho .....	3
1.2	Organização da Dissertação.....	4
2	Redes de Sensores e Redes de Sensores e Atuadores sem Fio.....	5
2.1	Considerações Iniciais .....	5
2.2	Componentes dos Nós Sensores.....	7
2.3	Funcionamento Básico .....	8
2.4	Características das RSSF.....	9
2.4.1	Consumo de Energia.....	9
2.4.2	Tolerância a Falhas.....	11
2.4.3	Limitações de Hardware.....	11
2.4.4	Expansibilidade .....	12
2.4.5	Agregação de Dados.....	12
2.4.6	Ambiente de Operação .....	13
2.4.7	Topologia da Rede.....	13
2.4.8	Meio de Transmissão.....	14
2.4.9	Qualidade de Serviço (QoS).....	14
2.5	Classificação das RSSFs.....	15
2.6	Arquitetura de Comunicação para RSSFs .....	17
2.6.1	Camada Física .....	18
2.6.2	Camada de Enlace .....	19
2.6.3	Camada de Rede .....	19
2.6.4	Camada de Transporte.....	20
2.6.5	Camada de Aplicação .....	20
2.7	Redes de Sensores e Atuadores sem fio .....	21
2.7.1	Componentes do nó Atuador .....	22
2.7.2	Funcionamento Básico da RSASF .....	23
2.8	Considerações Finais .....	25
3	Protocolos de Roteamento para Redes de Sensores e de Atuadores Sem Fio.....	26
3.1	Considerações Iniciais .....	26
3.2	Protocolos Data-Centric .....	28
3.2.1	Protocolo de Sensores para Informação via Negociação – SPIN.....	28
3.2.2	Directed Diffusion – DD .....	30
3.2.3	PEQ (Periodic, Event-driven, and Query-based Protocol).....	32
3.2.4	Energy-Aware Routing.....	33
3.3	Protocolos Hierárquicos .....	35
3.3.1	LEACH.....	35
3.3.2	PEGASIS .....	36
3.3.3	PEGASIS Hierárquico.....	37
3.3.4	HPEQ (Hierarchyal PEQ).....	38
3.4	Protocolos Baseados em Localização.....	41
3.4.1	GAF .....	41
3.5	Protocolos Cientes de QoS .....	43
3.6	Considerações Finais .....	43

4	Qualidade de Serviço (QoS)	44
4.1	Considerações Iniciais	44
4.2	Qualidade de Serviço (QoS) em Redes IP	44
4.3	Garantia de Qualidade de Serviço (QoS)	45
4.3.1	Serviços Integrados	45
4.3.1.1	IntServ	46
4.3.2	Serviços Diferenciados	47
4.3.2.1	DiffServ	48
4.4	Qualidade de Serviço em Redes de Sensores sem Fio	49
4.4.1	Exigências de QoS em Redes de Sensores sem Fio	53
4.4.1.1	Desafios para a Sustentação de QoS em RSSF's	53
4.4.2	Protocolos de Roteamento ciente de QoS para RSSF's	56
4.4.2.1	Sequential Assignment Routing (SAR)	57
4.4.2.2	Adaptive Forwarding Scheme (AFS)	57
4.4.2.3	Prioritize Multipath Routing (PRIMAR)	58
4.4.2.4	Outras soluções de QoS para Redes de Sensores e Atuadores Sem Fio	58
4.5	Considerações Finais	59
5	Projeto do QARP-CP, um Protocolo de roteamento ciente de QoS com Processamento Centralizado	60
5.1	Considerações Iniciais	60
5.2	Descrição de um Protocolo de Roteamento Ciente de QoS (QARP)	62
5.3	Descrição do Protocolo de Roteamento Ciente de QoS com Processamento Centralizado nos Atuadores ( <i>QARP-CP</i> )	63
5.3.1	Construção das Árvores de Saltos	64
5.3.2	Coleta de Informações da Rede	66
5.3.3	Processamento das Informações Coletadas na Rede e Estabelecimento de Rotas	67
5.3.4	Entrega de Eventos aos Atuadores	69
5.4	Experimentos de Simulação	70
5.4.1	Cenário de Simulação e Métricas	70
5.4.2	Resultados Obtidos	71
5.4.2.1	Custos de Mensagens de Controle	71
5.4.2.2	Atraso Fim-a-Fim	73
5.4.2.3	Taxa de Perda de Pacotes	74
5.4.2.4	Confiabilidade de entrega	76
5.4.2.5	Latência	77
5.4.2.6	Gasto de Energia na Disseminação dos dados	78
5.5	Considerações Finais	80
6	Conclusões	81
6.1	Contribuições Geradas	81
6.1.1	Artigos Publicados	81
6.1.2	Artigos Submetidos	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
6.2	Trabalhos Futuros	82
6.3	Conclusões Finais	82
7	Referências Bibliográficas	84

# Lista de Figuras

---

Figura 2.1 - Tipos de Sensores .....	5
Figura 2.2 - Nós sensores espalhados em um campo de interesse [PIN 04]. .....	7
Figura 2.3 - Componentes do nó sensor sem fio .....	8
Figura 2.4- Arquitetura de Redes de Sensores [PIN 04]. .....	9
Figura 2.5 - Consumo de energia dos módulos de um nó sensor [BOU 03]. .....	10
Figura 2.6 – Pilha de protocolo da RSSF. ....	17
Figura 2.7 - Exemplos de projetos de nós sensores.....	18
Figura 2.8 – Componentes do nó Atuador.....	22
Figura 2.9 - Esquema da arquitetura física das RSASFs.....	23
Figura 2.10 - (a) Interpretação Centralizada; (b) Interpretação Descentralizada. ....	24
Figura 3.1 O protocolo SPIN. (Adaptado de [HEI 99]) .....	29
Figura 3.2 As fases do Directed Diffusion. (Adaptado de [INT 00]).....	31
Figura 3.3 Encadeamento no PEGASIS. ....	37
Figura 3.4 Agrupamento de dados em um esquema binário baseado em cadeia. ....	38
Figura 3.5 Comunicação <i>multihop</i> entre um agregador e <i>sink</i> . ....	40
Figura 3.6 Exemplo de uma grade virtual no GAF. [XUY 01].....	42
Figura 4.1 – Operação do protocolo RSVP .....	46
Figura 4.2 - Campo DS do cabeçalho do IPv4. ....	49
Figura 5.1 Formato da Mensagem MCHDR. ....	64
Figura 5.2 Construção das arvores de saltos e divisão em áreas de atuação. ....	65
Figura 5.3 Formato da Mensagem <i>MCIR</i> . ....	66
Figura 5.4 Exemplo da fase de coleta de informações da rede.....	67
Figura 5.6 Exemplo de seleção de rotas .....	69
Figura 5.7 Custos de Controle: QARP-CP X QARP x PRIMAR. ....	72
Figura 5.8 Atraso Fim-a-Fim: QARP-CP vs PRIMAR. ....	73
Figura 5.9 Taxa de perda de Pacotes: QARP-CP vs PRIMAR. ....	74
Figura 5.10 Taxa de Entrega.....	76
Figura 5.11 Latência. ....	77
Figura 5.12 Rede sem Atuadores.....	78
Figura 5.13 Rede com Atuadores .....	79

# Índice de Tabelas

---

Tabela 1 Exemplo de Tabela de Roteamento do Nó K da Figura 5.5 .....	68
Tabela 2 Parâmetros de simulação. ....	71

# Resumo

As redes de sensores sem fio estão cada vez mais sendo utilizadas para o monitoramento preciso de ambientes físicos sujeitos a situações de emergência, tais como: incêndio, vazamento de gases tóxicos e explosões. Um grande desafio dessas redes é garantir a entrega de dados coletados, mesmo na presença de situações de emergência que possam vir a causar falhas nos nós sensores e interrupções de caminhos de entrega de dados. Mecanismos de Qualidade de Serviço (QoS) visam atender requisitos de aplicações, tais como: baixa latência e confiabilidade na entrega de pacotes, reparo rápido de caminhos na presença de falhas, e longevidade da rede com dissipação uniforme de energia. Este trabalho apresenta soluções de roteamento baseadas em QoS que visam atender, simultaneamente, os principais requisitos mencionados acima. As soluções propostas como parte deste trabalho foram implementadas e simuladas no simulador de redes ns-2 e comparadas a outras soluções existentes. Métricas importantes, tais como: atraso fim-a-fim, taxa de perda de pacotes, custo de mensagens de controle, bem como gasto de energia na disseminação de dados, foram avaliadas. Os resultados mostram que a solução proposta pode ser uma alternativa em potencial para a supervisão e controle de ambientes físicos sujeitos a situações de emergência.

# **Abstract**

Wireless sensor networks are increasingly being deployed for fine-grain monitoring of physical environments subjected to critical conditions such as fire, leaking of toxic gases and explosions. A great challenge to these networks is to provide channels that satisfy the necessities of the applications for events propagation, even in the presence of emergency conditions that can lead to node failures and path disruption to the sink that receives those events. Quality of Service (QoS) mechanisms can be applied that meet application requirements such as: low latency and packet delivery reliability, fast path repair in the presence of faults and network longevity with uniform energy dissipation. This work presents QoS-based routing solutions, which aims to meet, simultaneously, the main requirements mentioned above. The proposed solutions were implemented and simulated in the NS-2 simulator. Important metrics, such as end-to-end delay, packet loss rate, control messages overhead and energy consumption, were evaluated. The results show that the proposed solutions can be a potential alternative to the supervision and control of physical environments subject to emergency situations.

# 1 Introdução

---

Evoluções tecnológicas nos sistemas microeletrônicos e na comunicação sem fio permitiram o desenvolvimento de pequenos dispositivos sensores, de baixo custo e de baixo consumo de energia. Esses dispositivos integram módulos de sensoriamento e processamento de dados com capacidade de comunicação sem fio [EST 99] [AKY 02] [PIN 04]. Essa nova tecnologia permite monitorar remotamente um ambiente e obter informações mais precisas do que as técnicas de instrumentação tradicionais, tirando vantagem do fato de ser empregada bem próxima do fenômeno de interesse [PIN 04].

Os avanços ocorridos têm estimulado o desenvolvimento e uso de sensores “inteligentes” em áreas ligadas a processos físicos, químicos, biológicos, dentre outros. É comum ter num único *chip* vários tipos de sensores, como térmico, sísmicos, acústicos, magnéticos, etc, para monitorar uma ampla variedade de condições, como temperatura, presença e movimento de pessoas e objetos, umidade, pressão, níveis de ruído, etc, que são controlados pela lógica do circuito integrado, com uma interface de comunicação sem fio. O termo “sensor inteligente” normalmente é aplicado ao chip que contém um ou mais tipos de sensores com capacidade de processamento de sinais e comunicação de dados. A tendência é produzir esses sensores em larga escala, barateando o seu custo, e investir ainda mais no desenvolvimento tecnológico desses dispositivos, levando a novas melhorias e capacidades [MAT 04].

Uma classe especial de aplicações que se beneficia das RSSF é a classe de aplicações de supervisão e controle de ambientes físicos sujeitos a situações de emergência. Para estas aplicações é importante manter um monitoramento confiável e preciso do ambiente físico, especialmente quando situações de emergência, como um incêndio, surgem. Em tais condições, é importante que as informações possam ser “sentidas” do ambiente físico enquanto o estado de emergência está em progresso, visto que informações mais precisas podem ser usadas nas seguintes situações: na prevenção de tais incidentes, quando informações obtidas do ambiente real são utilizadas em situações de treinamento de equipes de segurança; no combate, para gerenciamento de operações e tomada de decisões, quando informações mais precisas são recebidas pelas equipes de combate e resgate em

tempo-real, isto é, no momento em que estão ocorrendo e na perícia, após o incidente, para avaliação de suas causas [LOP 06].

Uma RSSF pode prover um monitoramento preciso do ambiente físico. Por exemplo, se um vazamento de gás ocorrer em uma sala repleta de botijões de gás e existir apenas um sensor nesta sala, será possível apenas dizer se há ou não vazamento. Por outro lado, se uma RSSF for utilizada, com protocolos adequados, será possível não só detectar o vazamento, mas indicar onde o vazamento iniciou e como ele evoluiu. Um monitoramento desta forma pode salvar vidas e patrimônio, além de diminuir custos de seguros.

Apesar da crescente aplicação das RSSF, os sensores são dispositivos passivos que basicamente coletam e disseminam dados, mas não atuam no ambiente. Já as Redes de Sensores e Atuadores sem Fio (RSASF), possuem os atuadores, dispositivos com maior potencial de processamento, comunicação e de energia, que podem tomar decisões e executar ações no ambiente físico, em resposta a situações interpretadas dos sensores. Por outro lado, os sensores são dispositivos altamente limitados em relação à energia e poder computacional e de comunicação. A combinação de sensores e de atuadores em uma mesma rede, chamadas de Redes de Sensores e Atuadores sem Fio (RSASF), alavanca ainda mais o potencial das RSSF no monitoramento preciso de diferentes ambientes físicos que exigem resposta imediata sob pena de riscos de morte e de perda de patrimônio.

Na classe de aplicações de preparação para emergências, em que informações importantes devem ter garantia de entrega, soluções que oferecem qualidade de serviço (QoS) em RSASF são de fundamental importância. QoS é definido de várias formas na literatura. No contexto deste trabalho, QoS é definida como a capacidade da rede de garantir que determinados fluxos de tráfego sejam tratados de forma diferenciada, de acordo com as necessidades da aplicação, e que recursos da rede sejam utilizados de forma otimizada. Entregar dados de aplicações de monitoramento de ambientes físicos em situações de emergência dentro de um período de tempo limitado requer largura de banda com mínimo atraso possível de entrega. Assim, um mecanismo de diferenciação do serviço é necessário a fim garantir este requisito.

Este trabalho focaliza no projeto e avaliação de algoritmos de QoS que atendam os requisitos estritos de RSASF para a classe de aplicação de monitoramento de ambientes

físicos em situações de emergência. Este projeto faz parte de um projeto maior, de Preparação para Emergências para monitoramento preciso de ambientes físicos sujeitos a situações de risco, que integra realidade virtual, redes de sensores e computação ciente de contexto. O projeto de Preparação para Emergências está sendo desenvolvido como resultado de uma colaboração entre o Laboratório de Realidade Virtual em Rede (LRVNet) do Departamento de Computação da UFSCar e o PARADISE Lab do SITE da *University of Ottawa* e já resultou em trabalhos de quatro alunos de mestrado do LRVNet até o momento.

## 1.1 Motivação e Objetivos do Trabalho

Numa aplicação de redes de sensores e de atuadores, a missão principal da rede é monitorar uma área sujeita a condições de emergência e ativar controles mínimos como resultado de interpretação de contextos gerados a partir dos dados coletados da rede. Neste tipo de aplicação, confiabilidade de entrega e latência mínima com gasto de energia uniforme e otimizado são requisitos cruciais que têm que ser atendidos.

A motivação principal para o trabalho aqui apresentado é que apesar de haver soluções propostas na literatura para QoS em RSASF, estas geram muito tráfego e não exploram o potencial da interação entre sensores e atuadores. Mais ainda, não atendem, de forma simultânea, todos os requisitos de aplicações de supervisão e controle de ambientes físicos sujeitos a situações de emergência.

Este trabalho propõe soluções de QoS para RSASF que visam atender, simultaneamente, os seguintes requisitos: baixa latência, confiabilidade de entrega de pacotes, expansibilidade, reconstrução rápida de caminhos na presença de falhas e dissipação de energia uniforme. Como resultado deste trabalho, dois protocolos foram projetados: QARP (*QoS-Aware Routing Protocol*) com processamento de rotas nos nós sensores; e QARP-CP (*QoS Aware Routing Protocol with Centered Processing*) com processamento de rotas nos nós atuadores.

Apesar do foco do trabalho ser a classe de aplicações de supervisão e controle de ambientes físicos sujeitos a condições de emergência, as soluções podem ser aplicadas em diversas áreas, tais como: saúde (monitoramento de sinais vitais do corpo, instrumentação médica, localização de objetos e pessoas nas dependências de um hospital, etc.), transportes

(controle de tráfego, rastreamento de veículos, etc.), militar (monitoramento do campo de batalha, apoio à tomada de decisões estratégicas em tempo real, etc.), resgate e combate (monitoramento de situações críticas, como incêndios, prisões, etc.), entre outras.

## 1.2 Organização da Dissertação

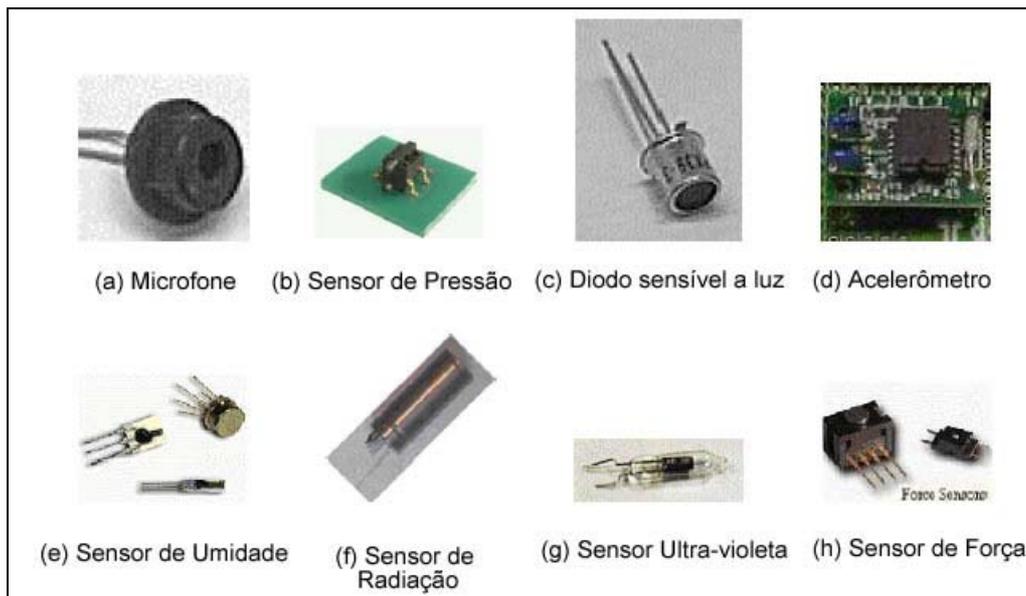
Este trabalho está organizado da seguinte forma: o capítulo 2 descreve as redes de sensores e redes de sensores e atuadores, suas aplicações e seus principais desafios. O capítulo 3 discute soluções de roteamento para redes de sensores. O capítulo 4 apresenta o conceito de Qualidade de Serviço em Redes IP e em redes de sensores. O capítulo 5 apresenta o projeto do protocolo QARP-CP, que inclui sua especificação, implementação, simulação e avaliação de desempenho. O capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho e propostas futuras, seguido de Referências Bibliográficas.

## 2 Redes de Sensores e Redes de Sensores e Atuadores sem Fio

---

### 2.1 Considerações Iniciais

Uma rede de sensores sem fio (RSSF) é composta por um grande número de pequenos nós sensores que são colocados dentro ou muito próximos do fenômeno a ser analisado [AKY 02]. Geralmente, cada nó sensor é equipado com vários tipos de sensores (e.g., temperatura, pressão, sísmico, acústico, radiação, infravermelho, além de outros). A Figura 2.1 ilustra alguns tipos de sensores. Estes nós são construídos de hardware extremamente barato e com limitações computacionais, memória, comunicação e energia.



**Figura 2.1 - Tipos de Sensores**

As RSSFs possibilitam a coleta de informações necessárias em ambientes onde o uso de fios ou cabeamento não seja possível ou viável. Elas podem estar inseridas na estrutura de um prédio, ponte, no interior de máquinas, tubulações, dentro de casa, florestas, áreas de desastre, plantações, vulcões, campo de batalha e até mesmo dentro da

retina do olho humano. O baixo custo dos nós sensores e o potencial desta tecnologia justificam a sua utilização em diversas áreas, tais como:

- Saúde: Controle de doenças contagiosas; interface para deficientes; monitorar pacientes; diagnosticar distúrbios; administrar drogas em hospitais, monitoração e localização de pacientes e médicos em hospitais [END 06] [BUL 01] [SCH 01] [WAR 01].
- Aplicações Militares: Monitoração de tropas; reconhecimento de terreno; detecção de alvos e de ataques biológicos, químicos ou nucleares [MOK 06].
- Meio-ambiente: Rastreamento do movimento dos pássaros, pequenos animais; monitoração de condições ambientais que afetam colheitas e plantio (por exemplo: combate à geadas, detecção de componentes químicos ou biológicos, irrigação); mapeamento da bio-complexidade ambiental, estudo da poluição e muitas outras [CER 01] [AGR 00] [MAI 02] [KAH 99].
- Monitoração de Estrutura/Equipamentos: Monitoração e identificação de falhas em estruturas (pontes, prédios, etc); monitoramento da fadiga de máquinas e equipamentos (motores, dutos de gás, etc); diagnósticos de máquinas [KIN 02] [KIM 05].
- Aplicações Comerciais: Automação de vendas e processo industriais; manutenção de inventário, monitoração de qualidade de produtos; detecção e vigilância de veículos e estabelecimentos [AGR 00] [CHO 00] [EST 99] [WAR 01].

Como apontado em [RUI 04b], a tendência é a produção dos nós sensores em larga escala, barateando o seu custo, e o investimento no desenvolvimento tecnológico levando a novas melhorias, como aumento de processamento e armazenamento e redução do tamanho dos nós sensores. Portanto, novas aplicações podem surgir aumentando a abrangência de uso das RSSFs.

A posição de cada nó sensor não precisa ser necessariamente pré-determinada, o que possibilita uma disposição aleatória em locais de difícil acesso, como em áreas de desastres e incêndios (Figura 2.2). Por outro lado, isto significa que os algoritmos e

protocolos para redes de sensores devem possuir a característica de auto-organização dos nós. [AKY 02].

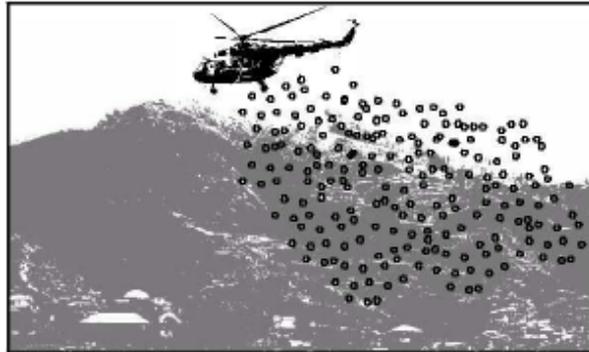


Figura 2.2 - Nós sensores espalhados em um campo de interesse [PIN 04].

Além dos nós sensores, uma RSSF possui um ou mais nós de escoamento de dados, chamados de sorvedouros (*sink*) ou estação base. O *sink* é o elemento através do qual a rede comunica-se com outras redes ou com um ou mais observadores [RUI 04a], ou seja, ele faz a interface entre a aplicação e a rede, servindo de ponto de entrada para a submissão dos interesses da aplicação e de concentrador das informações coletadas e enviadas pelos nós sensores. Os *sinks* possuem grande poder computacional e não têm restrições energéticas.

## 2.2 Componentes dos Nós Sensores

Uma RSSF é formada por um conjunto de dispositivos compactos e autônomos, chamados nós sensores. Os principais componentes de um nó sensor são a unidade de comunicação sem fio, a unidade de energia, a unidade de sensoriamento e a unidade de computação. Podendo também, dependendo da aplicação destinada, possuir unidades adicionais tais como: sistema de localização, gerador de energia e locomoção. A Figura 2.3 ilustra tais unidades presentes nos nós sensores.

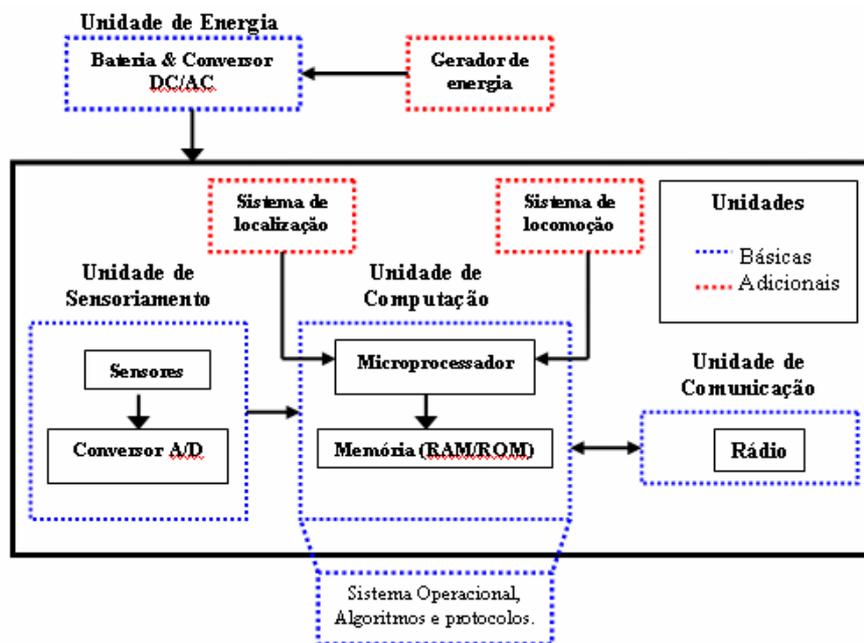


Figura 2.3 - Componentes do nó sensor sem fio (Adaptado de [AKY 02])

O componente lógico de um nó sensor é o software que é executado na unidade de computação. Os nós sensores tendem a serem projetados com pequenas dimensões e esta limitação de tamanho acaba impondo limitações nos recursos dos nós, tais como capacidade da fonte de energia, processador e transceptor. Apesar dos nós sensores possuírem individualmente pouca capacidade computacional e de energia, um esforço colaborativo entre os mesmos permite a realização de uma tarefa maior [RUI 03]. Em alguns casos, uma RSSF também pode ser composta de dispositivos atuadores que permitem ao sistema controlar parâmetros do ambiente monitorado.

## 2.3 Funcionamento Básico

O funcionamento básico das RSSFs consiste, inicialmente, do lançamento dos sensores como um todo, ou na colocação dos mesmos um a um na área a ser sensorizada, como ilustrado na Figura 2.2. Em seguida, vem a fase de descoberta de rotas, na qual os nós estabelecem as rotas que serão usadas para o tráfego de dados. O nó *Sink* então difunde as tarefas de sensoriamento na rede e aguarda as respostas. Quando um evento de interesse é

detectado, os nós coletam a informação e, após algum processamento, enviam os dados ao nó *Sink* pelo caminho definido pelo protocolo de roteamento, como ilustrado na Figura 2.4.

A dinâmica da rede, provocada pelo movimento ou pela falha dos nós, exige uma manutenção periódica da rota a ser usada. O nó *Sink* possui características especiais e é responsável por coletar a informação dos nós sensores.

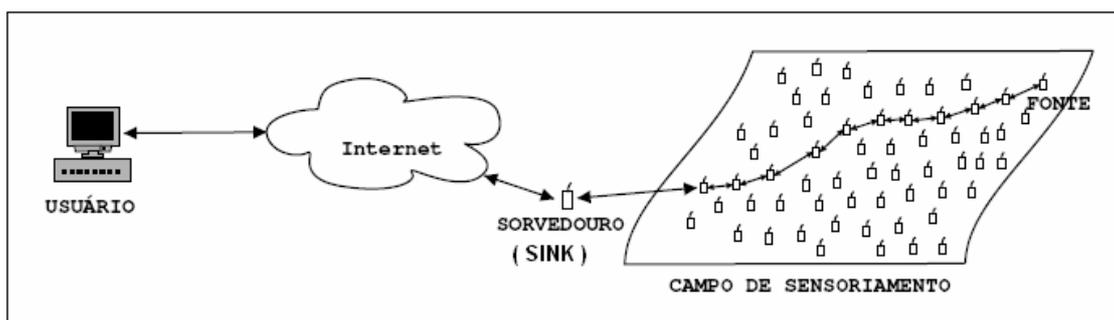


Figura 2.4- Arquitetura de Redes de Sensores [PIN 04].

## 2.4 Características das RSSF

O projeto de uma rede de sensores deve considerar e tentar superar vários desafios, que incluem: baixo consumo de energia; tolerância a falhas, limitações de hardware; expansibilidade; agregação de dados; ambiente de operação; topologia da rede; meio de transmissão. Esses requisitos são, na maioria das vezes, atendidos separadamente nos trabalhos encontrados na literatura. Poucos são os estudos que possuem uma visão integrada de todos esses desafios, que servem como guia para a elaboração de um algoritmo ou protocolo para redes de sensores com Qualidade de Serviço (QoS).

### 2.4.1 Consumo de Energia

Dentre todos os fatores relevantes a RSSF, podemos destacar o consumo energético como um dos mais importantes, visto que o nó sensor é um dispositivo microeletrônico com fonte de energia restrita. Além disso, na maioria das aplicações, pode ser impossível ou inviável fazer a substituição da fonte de energia. Dessa forma, as capacidades de sensoriamento, processamento e comunicação do nó sensor são limitadas pela disponibilidade de energia [AKY 02].

A tarefa de um nó sensor pode ser dividida em três categorias: sensoriamento, processamento de dados e comunicação. O módulo de sensoriamento de um nó é a unidade responsável por detectar eventos no ambiente e convertê-los para sinais digitais. O consumo de energia de um módulo de sensoriamento varia de acordo com a natureza da aplicação. Dentre os três módulos, o de comunicação é o que mais consome energia em um nó sensor, como mostrado na

Figura 2.5 [BOU 03] [EST 02] [SOH 00] [AKY 02].

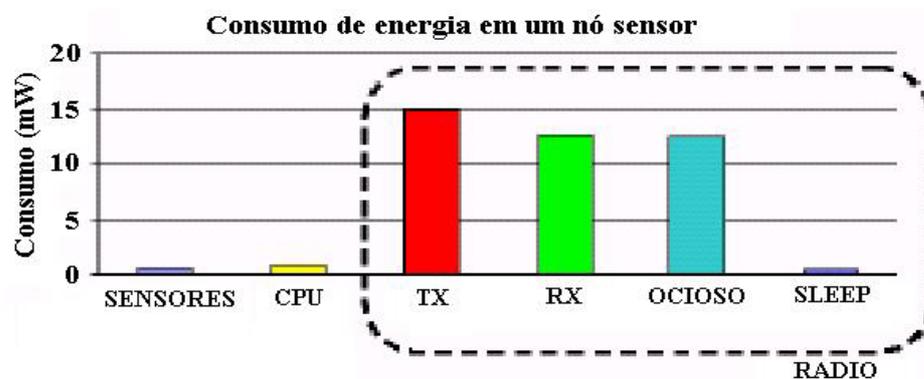


Figura 2.5 - Consumo de energia dos módulos de um nó sensor [BOU 03].

Um nó sensor normalmente é equipado com uma fonte de energia limitada. Portanto, o tempo de vida de um nó é altamente dependente do tempo de vida de sua bateria. O mau funcionamento de alguns nós pode causar mudanças na topologia e, conseqüentemente, a necessidade de reorganização de rotas para entrega de dados. A importância da conservação de energia induz os pesquisadores ao desenvolvimento de protocolos e algoritmos cientes de energia (*energy-aware*) para redes de sensores.

A otimização do consumo de energia em RSSFs é extremamente complexa, pois não se limita a diminuir o consumo de um único nó sensor, mas também a prolongar o tempo de vida da rede. Para alcançar esse objetivo, é necessário que um judicioso controle de dissipação de energia seja incorporado em todos os estágios do projeto e operação de uma RSSF. O sistema deve ainda ser capaz de fazer avaliações dinâmicas entre o consumo de energia, nível de desempenho e fidelidade operacional [RAG 02].

### 2.4.2 Tolerância a Falhas

Em alguns sistemas é muito importante uma alta confiabilidade dos dados gerados. As características de emprego de uma RSSF em ambiente potencialmente hostil, como uma aplicação crítica, elevam em muito as chances de falhas.

Os nós sensores podem falhar ou tornarem-se inoperantes por falta de energia, danos físicos, ou ainda, interferência. As severas restrições de consumo de energia tornam inadequadas as técnicas tradicionais baseadas na redundância dos componentes dos nós sensores [FEN 02]. As falhas dos nós sensores não devem afetar a tarefa global da rede de sensores, que é a de fornecer informações sobre o ambiente monitorado. A tolerância a falhas, ou confiabilidade da rede, é a habilidade de manter as funcionalidades da rede sem qualquer interrupção devido às falhas dos nós [HOB 00] [SHE 01].

Protocolos e algoritmos devem ser implementados para alcançar os níveis de tolerância a falhas requisitadas pelas aplicações das redes de sensores [AKY 02].

### 2.4.3 Limitações de Hardware

Para garantir a viabilidade em algumas aplicações, muitos sensores precisam ser extremamente pequenos, às vezes menores que um centímetro cúbico [POT 00]. Além do tamanho, existem outras restrições para os nós sensores [KAH 99], que devem:

- Consumir pouca energia;
- Operar em altas densidades;
- Possuir baixo custo de produção e ser descartáveis;
- Ser autônomos;
- Ser adaptáveis ao ambiente.

Como os nós sensores normalmente são inacessíveis, o tempo de vida da rede depende do tempo de vida das fontes de energia dos nós. A energia é também um recurso escasso devido à limitação de tamanho [MIN 01]. É possível estender o tempo de vida da

rede de sensores através da extração de energia do ambiente. Um exemplo é a célula solar, que transforma a energia térmica em energia elétrica.

Embora um maior poder computacional esteja sendo disponibilizados em processadores cada vez menores, os módulos de processamento e de memória dos nós sensores ainda são recursos escassos. Por exemplo, a unidade de processamento de um nó “*smart dust*” [POT 00] é um micro-controlador de 4 MHz com 8 KB de memória flash para instruções, 512 bytes de memória RAM e 512 bytes de EEPROM [PEA 01]. O TinyOS [TOS 06] é o sistema operacional utilizado neste processador, que possui 3500 bytes para o sistema operacional e 4500 bytes disponíveis para código.

#### 2.4.4 Expansibilidade

A suscetibilidade a falhas e a necessidade de cobertura de extensas áreas podem exigir um elevado número de nós sensores. O número de nós sensores empregados pode ser da ordem de centenas ou milhares e, dependendo da aplicação, chegar a milhões. Novos esquemas devem ser capazes de funcionar com este elevado número de nós

#### 2.4.5 Agregação de Dados

Como os nós sensores normalmente podem gerar dados redundantes, pacotes similares de múltiplos nós podem ser agregados para que o número de transmissões seja reduzido. A *agregação de dados*, ou  *fusão*, é a combinação de dados de fontes diferentes através do uso de funções como *supressão* (eliminação de pacotes duplicados), *mínimo*, *máximo*, *média*, etc [EST 99]. Algumas dessas funções podem ser utilizadas parcial ou integralmente em cada nó sensor, permitindo que os nós reduzam os dados na rede [ELS 01] [EST 00]. Ao reconhecer que o processamento consome muito menos energia que a comunicação [CHO 00], surge a possibilidade de economizar energia através da agregação de dados. Essa técnica tem sido usada para alcançar a eficiência no consumo e a otimização de tráfego em alguns protocolos de roteamento [ELS 01] [EST 00] [GIR 01]. Em algumas arquiteturas de rede, todas as funções de agregação são atribuídas a nós especializados, com mais recursos de energia, processamento e memória [CER 01]. A agregação de dados também se faz viável através de técnicas de processamento de sinais. Neste caso, é referido

como  *fusão de dados*  quando um nó é capaz de produzir um sinal mais preciso através da redução de ruídos e do uso de técnicas como o  *beamforming*  para combinar os sinais [CHO 00].

#### 2.4.6 Ambiente de Operação

Os nós de uma rede de sensores normalmente têm que funcionar sob as mais diversas condições. A lista a seguir mostra alguns locais onde as redes de sensores podem ser utilizadas [AKY 02]. Os nós devem funcionar:

- No interior de grandes maquinários;
- No fundo de um oceano;
- Dentro de um ciclone;
- Na superfície de um oceano durante um tornado;
- Em um campo contaminado;
- Em um campo de batalha;
- Em uma casa ou grandes empresas ou fábricas;
- Acoplados a animais;
- Acoplados a veículos, etc.

Os nós trabalham sob alta pressão no fundo de um oceano, sob calor ou frio extremo como dentro de máquinas, e em ambientes com muito ruído, que interferem na comunicação dos sensores.

#### 2.4.7 Topologia da Rede

Centenas a milhares de nós sensores são utilizados em uma rede, que podem ser lançados ou colocados um a um no local que se quer monitorar. Devido ao fato do grande número de nós sensores e das frequentes falhas o gerenciamento da topologia das RSSFs é uma tarefa desafiadora. Mudanças na topologia da rede é uma característica comum em RSSFs. No entanto, as mudanças de topologia das RSSFs não são atribuídas ao movimento

dos nós, como acontece em redes *Ad Hoc* tradicionais ou nos sistemas celulares. Os nós sensores permanecem, em sua maioria, estacionários após o emprego. As mudanças na topologia ocorrem quando os nós deixam de operar por falta de energia, são destruídos, ou os rádios são desligados para economizar energia [MIN 02].

#### 2.4.8 Meio de Transmissão

Uma RSSF pode explorar três possibilidades de comunicação sem fio: ótica, infravermelho e rádio frequência. A comunicação ótica consome menos energia por bit transmitido e são sensíveis às condições atmosféricas. A comunicação por infravermelho é robusta contra interferências de dispositivos elétricos e possui um baixo custo de transceptores. Nenhum desses meios de comunicação necessita de uma área física para instalação de antena, mas necessitam de uma linha de sinal (LOS – Line of Sight) para comunicação, isto é, transmissor e receptor devem estar alinhados. Logo, estes meios de comunicação não são viáveis para aplicações de monitoramento, pois a comunicação direcional nestes ambientes nem sempre é possível. A maioria dos hardwares usados em RSSFs utiliza rádio frequência. A comunicação por rádio frequência é baseada em ondas eletromagnéticas e suas vantagens são a facilidade de uso e a aceitação comercial, que tornam este tipo de comunicação viável para a plataforma dos sensores. A maioria dos projetos de hardware para nós sensores é baseada em circuitos de rádio frequência. O nó sensor  $\mu$ AMPS, descrito em [SHI 01], usa um transceptor Bluetooth de 2.4 GHz. O dispositivo sensor descrito em [WOO 01], usa um canal simples de rádio frequência operando a 916 MHz. A arquitetura do WINS [POT 00] também utiliza rádio frequência para comunicação.

#### 2.4.9 Qualidade de Serviço (QoS)

Qualidade de serviço (QoS), é um requisito importante de RSSF, pois a comunicação nas RSSFs apresenta limitações como largura de banda reduzida, altas taxas de erro e poder computacional limitado, sendo desejável uma melhor utilização dos recursos de rede através de mecanismos que provejam qualidade de serviço (QoS), esse requisito apresenta ainda muitos desafios não superados [CHE 04]. Esses desafios provêm

das diferentes características que as RSSF apresentam se comparadas às redes convencionais, a saber: limitações severas de recursos de processamento, armazenamento e comunicação, tráfego não uniforme, alta redundância de dados, rede dinâmica, gasto de energia uniforme, escalabilidade, múltiplos *sinks*, múltiplos tipos de tráfego, etc. Este requisito será descrito melhor na subseção 4.4.1.

## 2.5 Classificação das RSSFs

Todos os fatores citados anteriormente são influenciados pelos requisitos da aplicação, pois uma RSSF é um tipo de sistema dependente da aplicação. Os parâmetros de configuração e manutenção variam de acordo com os objetivos da aplicação. Da mesma forma, a classificação das RSSF também depende de seu objetivo e de sua área de aplicação [RUI 04b].

A classificação das RSSFs pode ser assim analisada quanto à sua configuração em relação aos seguintes aspectos:

### 1. Composição

- a. Homogênea - Rede composta de nós de mesma capacidade de hardware.
- b. Heterogênea - Rede composta de nós com diferentes capacidades de hardware.

### 2. Densidade

- a. Balanceada - Quando a rede apresenta uma concentração de nós sensores por unidade de área considerada ideal.
- b. Densa - Quando a rede apresenta uma alta concentração de nós sensores por unidade de área.
- c. Esparsa - Quando a rede apresenta uma baixa concentração de nós sensores por unidade de área.

### 3. Mobilidade

- a. Estacionária - Rede em que os nós sensores são fixos durante toda a vida da rede.

- b. Móvel - Rede em que os nós sensores podem ter sua posição espacial variável durante o tempo de vida de rede. Isto é, estes nós sensores podem ter a posição inicial onde foram depositados modificada por sua capacidade de locomoção, por forças da natureza e também pela entidade na qual estão acoplados.

#### 4. Distribuição

- a. Irregular - Rede que apresenta uma distribuição não uniforme na área monitorada.
- b. Regular - Rede que apresenta uma distribuição uniforme na área monitorada.

#### 5. Organização

- a. Hierárquica – Rede em que os nós são agrupados em grupos (*clusters*), onde cada grupo contém um líder (*cluster-head*). Em redes que possuem esta organização, os grupos formam hierarquias entre si, de forma que quando um dado necessita ser remetido à estação base, ele é remetido primeiro ao líder que irá enviar diretamente, ou através de outros líderes, à estação base. Fases de seleção dos nós líderes são necessárias. Esta organização tem primordialmente a intenção de reduzir o tráfego da rede com o objetivo de economizar energia.
- b. Plana - Rede em que os nós não são agrupados em grupos tendo seu funcionamento correspondente ao destacado na seção 2.3.

As RSSFs ainda podem ser classificadas quanto ao modo de sensoriamento e coleta dos dados em:

1. **Periódica** - Os nós sensores coletam dados sobre os fenômenos em intervalos regulares. Por exemplo, relatar a temperatura a cada dez minutos.
2. **Dirigida a Eventos** - Os nós sensores coletam dados quando ocorrem eventos de interesse. Por exemplo, relatar quando temperatura for maior que 60 graus.

**3. Baseada em Consultas** - Os nós sensores coletam dados quando solicitado pelo observador. Por exemplo, relatar a temperatura agora.

Qualquer projeto ou solução proposta para estas redes deve considerar as características e restrições dos nós sensores, requisitos das aplicações a serem desenvolvidas, assim como as características do ambiente onde tais redes serão aplicadas.

## 2.6 Arquitetura de Comunicação para RSSFs

Esta seção descreve a pilha de protocolos comumente admitida para RSSFs, ilustrada na Figura 2.6, discutindo as características e funcionalidades para que se tenha conhecimento dos objetivos de cada camada da arquitetura de comunicação.

Uma aplicação usando a rede não interage diretamente com o hardware da rede. Ao invés disso, a aplicação interage com o software do protocolo. A noção de protocolos em camadas fornece um conceito básico para o entendimento de como um conjunto complexo de protocolos pode trabalhar junto com o hardware para prover um sistema de comunicação eficiente. A pilha de protocolos da RSSF caracteriza-se pela exploração do esforço colaborativo e da disponibilidade de energia dos elementos da rede para o estabelecimento de rotas, agregação de dados e a comunicação empregando o meio sem fio. A pilha da RSSF é dividida nas camadas física, de enlace de dados, de rede, de transporte e de aplicação.



**Figura 2.6 – Pilha de protocolo da RSSF.**

### 2.6.1 Camada Física

A camada física é responsável por: seleção de frequência, geração da frequência portadora, detecção de sinal, modulação e encriptação de dados. A geração de frequência e detecção de sinal estão relacionadas mais ao projeto de *hardware* do transceptor.

Sabe-se que a comunicação sem fio de longa distância pode ser muito custosa em termos de energia e complexidade de implementação. Durante o planejamento de uma camada física para redes de sensores, o consumo de energia assume um papel importante, assim como os efeitos de reflexão, difração e degradação que o sinal pode sofrer. Em geral, a energia mínima requerida para transmitir um sinal sobre uma distância  $d$  é proporcional a  $d^n$ , onde  $2 \leq n < 4$  [RAP 96]. A escolha de um bom esquema de modulação também é um ponto crítico para a comunicação confiável em uma rede de sensores. Uma arquitetura de baixo consumo de espalhamento do espectro para redes de sensores é apresentada em [CHI 01].

A Figura 2.7 mostra os projetos de nós sensores para redes de sensores sem fio. Suas características comuns são: muito pequenos, baixo consumo de energia, possuem sensores para luminosidade, temperatura, umidade, pressão, aceleração, etc; possuem módulos de rádio e processamento.

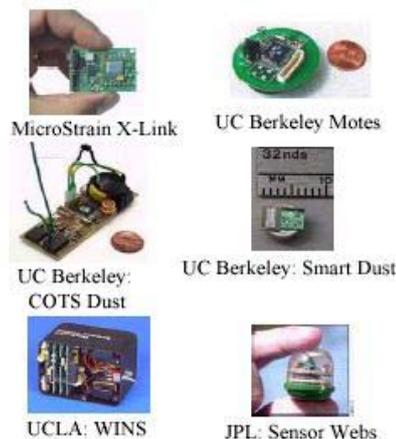


Figura 2.7 - Exemplos de projetos de nós sensores

### 2.6.2 Camada de Enlace

O objetivo da camada de enlace é assegurar conexões confiáveis em uma rede de comunicação, através das tarefas de detecção dos quadros de dados, multiplexação dos fluxos de dados, acesso ao meio e controle de erro. Embora muita dessas funções ainda não tenha sido completamente definida, o ponto mais crítico e de fundamental importância para diversas aplicações de RSSF é o protocolo de acesso ao meio (MAC).

Um protocolo de controle de acesso ao meio para redes de sensores sem fio deve atingir dois objetivos [AKY 02]. O primeiro é a criação de uma infra-estrutura de rede. Como milhares de nós sensores estão densamente espalhados por um campo de sensores, os esquemas MAC devem estabelecer enlaces de comunicação para transferência de dados. Isso forma a infra-estrutura básica necessária para a comunicação sem fio nó a nó e oferece a habilidade de auto-organização para a rede de sensores. O segundo objetivo é compartilhar eficientemente os recursos de comunicação entre os nós sensores [WU 00].

Como em toda rede que compartilha o meio de transmissão, o protocolo MAC é fundamental para o sucesso da operação da rede. A função mais importante do protocolo é evitar colisões. Existem diversos protocolos MAC disponíveis para redes sem fio. No entanto, esses protocolos possuem restrições quando aplicados às RSSFs [AKY 02]. Por exemplo, o acesso múltiplo por divisão do tempo (*Time Division Multiple Access - TDMA*) exige uma elevada taxa de transmissão e coordenação entre os nós, enquanto o acesso múltiplo por divisão de código (*Code Division Multiple Access - CDMA*) e os protocolos baseados em contenção da especificação IEEE 802.11 requerem que os nós escutem o canal para receber um possível tráfego, o que provoca um elevado dispêndio de energia. Tais aspectos implicam em modificações ou desenvolvimento de novos protocolos de acesso ao meio, específicos para RSSFs.

### 2.6.3 Camada de Rede

Os protocolos da camada de rede são responsáveis pelo roteamento dos dados entre os nós sensores e o *sink*, uma vez que os nós de uma rede de sensores estão espalhados

densamente pela área que se quer monitorar e precisam atuar em conjunto para entregar os dados coletados.

Ao contrário dos protocolos tradicionais que buscam diminuir o retardo fim-a-fim ou aumentar a vazão, em RSSFs a maior parte das pesquisas visam estabelecer rotas que permitam estender o tempo de vida da rede por meio da racionalização do consumo de energia, muitas vezes, com sacrifício de outras métricas de desempenho [YOU 01].

Tratar das mudanças de topologia, do endereçamento, da escalabilidade e da interface com outras redes são requisitos esperados para a camada de rede. A maioria das pesquisas em redes de sensores está concentrada na camada de rede [BOU 04] [INT 03]. Esta camada é abordada em detalhes na seção 3, onde serão estudados alguns protocolos de roteamento para redes de sensores, pois o foco deste trabalho é a especificação e a simulação de um protocolo de roteamento com qualidade de serviço.

#### 2.6.4 Camada de Transporte

Essa camada é necessária especialmente quando o sistema precisa ser acessado pela Internet ou por outras redes externas [AKY 02]. Diferentemente de protocolos como TCP, os esquemas de comunicação fim-a-fim nas redes de sensores não são baseados em endereçamento global. Esses esquemas devem considerar que uma nomeação de dados baseada em atributos é utilizada para indicar os destinatários dos pacotes. Além disso, fatores como consumo de energia e expansibilidade, e características como roteamento centrado em dados (*data-centric*) exigem um tratamento diferente na camada de transporte de uma rede de sensores [POT 00].

#### 2.6.5 Camada de Aplicação

Existem diversas aplicações definidas e propostas para RSSFs, cada qual com diferentes requisitos. Na literatura, vários trabalhos [TIL 02] [HEI 03] destacam a importância da participação da aplicação no processo de comunicação em RSSFs. Otimizações específicas da aplicação podem reduzir o número de transmissões e, por conseguinte, o consumo total de energia na rede. No entanto, protocolos para camada de aplicação de RSSFs ainda constituem uma região inexplorada.

A camada de aplicação contém uma série de protocolos de alto nível que são comumente necessários. Ela faz a interface entre o protocolo de comunicação e o aplicativo que pediu ou receberá a informação através da rede.

Apesar das diversas propostas de aplicações, [AKY 02] afirma em sua pesquisa sobre RSSFs que os protocolos para camada de aplicação ainda são pouco explorados e sugere três possíveis protocolos de aplicações de apoio: o de gerenciamento de sensores (SMP); o de aviso de dados e designação de tarefas (TADAP); e o de consultas e disseminação de dados (SQDDP).

## 2.7 Redes de Sensores e Atuadores sem fio

A inserção de novos elementos chamados de atuadores fornece vantagens adicionais a RSSF. Esta seção apresenta as características das redes de sensores e atuadores sem fio (RSASF), que serão utilizadas no trabalho proposto. Observa-se que muitos dos conceitos das RSSF permanecem válidos para as RSASFs.

As RSASFs possuem as mesmas propriedades das RSSFs, com capacidade adicional de reação automática e em tempo real aos eventos capturados. Algoritmos e protocolos desenvolvidos para as RSASFs devem atender aos mesmos requisitos das RSSFs, tais como: escalabilidade e eficiência energética; além disso, devem considerar a heterogeneidade dos nós e os requisitos de aplicações de tempo real [AKY 04].

Estas redes podem ser parte integrante das mesmas áreas de atuação das RSSFs. Quanto a um exemplo em caso de incêndio, os sensores transmitem a exata origem e intensidade do fogo para os atuadores, enquanto os atuadores são os “*sprinklers*” de água, que podem facilmente extinguir o fogo antes que ele se torne incontrolável. Atualmente existem muitas aplicações para RSASFs, outro exemplo, sensores e soldados robôs são colocados em um campo de batalha para formar uma RSASFs. Os soldados robôs agem dependendo das informações vindas dos nós sensores. Soldados robôs correspondem aos Atuadores. As RSASFs serão objeto deste trabalho e seus componentes são descritos a seguir.

### 2.7.1 Componentes do nó Atuador

Os nós sensores e atuadores são diferentes em vários aspectos. Primeiramente eles são destinados a atividades diferentes, nós sensores monitoram e nós atuadores atuam no ambiente. Além disso, nós sensores são de baixo custo, baixas capacidades de comunicação sem fio, computação, e dispositivos de baixa energia com sensoriamento limitado. Já os atuadores possuem um custo mais alto, melhores capacidades de comunicação sem fio, processamento, e uma bateria de maior duração.

Além disso, a quantidade de nós sensores implantados no ambiente, geralmente, é da ordem de centenas ou milhares, no entanto não é necessária uma densa distribuição de nós atuadores, pois os atuadores possuem recursos melhores e podem atuar em grandes áreas [AKY 04].

Nós atuadores possuem as seguintes unidades: energia, comunicação, processamento, decisão (controlador), atuação e um conversor digital analógico (DAC), conforme ilustra a Figura 2.8. Os eventos são recebidos pela unidade de comunicação, então cada evento é analisado na unidade de decisão gerando comandos que irão executar ações como saídas. Estes comandos são então convertidos para sinais analógicos via DAC e são transformados em ações via unidade de atuação.

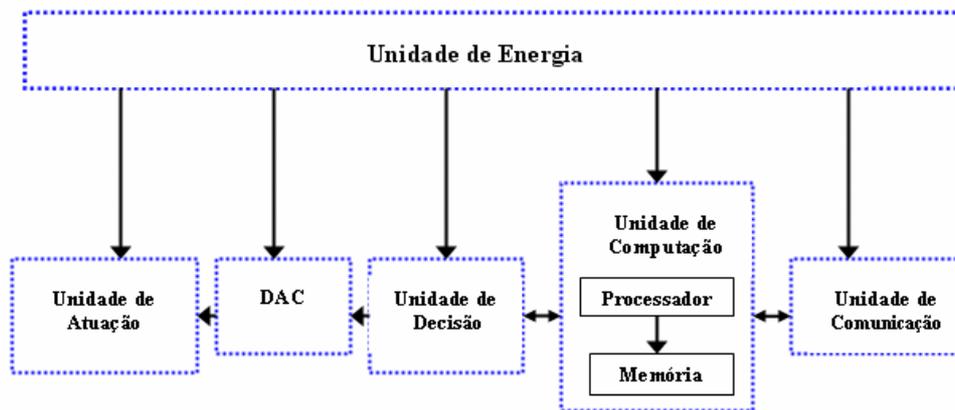


Figura 2.8 – Componentes do nó Atuador (Adaptado de [AKY 04])

### 2.7.2 Funcionamento Básico da RSASF

Em RSASFs, os sensores coletam informações do mundo físico, enquanto os atuadores processam as informações para tomar decisões e realizar ações apropriadas sobre o ambiente. Como mostrado na Figura 2.9, nós sensores e os nós atuadores são espalhados sobre uma área de sensoriamento e atuação. O *sink* monitora toda a rede e realiza a comunicação da RSASF com a aplicação, ou ainda, disponibiliza as informações coletadas a outras redes. Isto permite que os usuários façam o sensoriamento e atuem no ambiente a distância

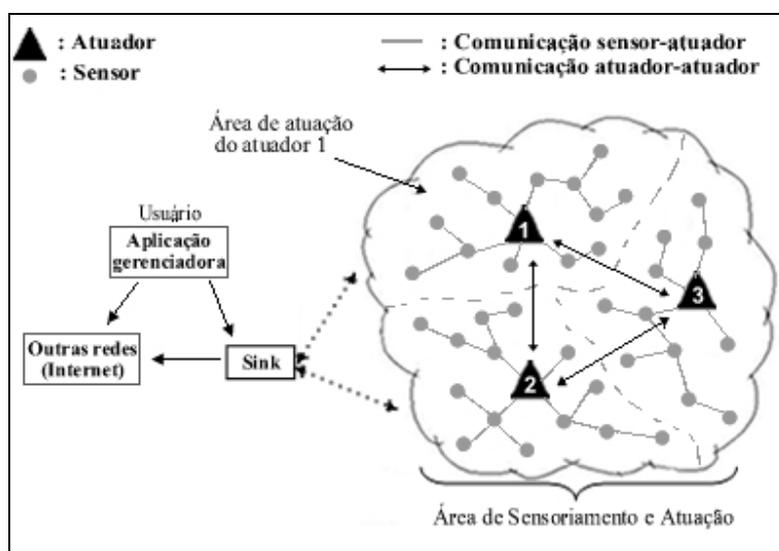


Figura 2.9 - Esquema da arquitetura física das RSASFs.

Sensores, ao detectarem um fenômeno, podem operar de duas maneiras distintas: (a) rotear os dados de volta ao *sink*; (b) transmitir os dados ao atuador que, ao processar estes dados, inicia uma ação apropriada. Em [AKY 04] foram definidas duas arquiteturas de RSASF para as duas arquiteturas, dependendo da aplicação, uma delas se torna mais vantajosa.

A primeira arquitetura, chamada de Semi-Automática, é bastante similar a arquitetura tradicional das RSSFs, onde os nós sensores ao detectarem um evento transmitem suas leituras ao *sink*, que é responsável por interpretá-las, e caso fosse necessário, enviar comandos de atuação aos atuadores, conforme ilustrado na Figura 2.10(a). A segunda é a arquitetura Automática, esquematizada na Figura 2.10(b), onde as

leituras detectadas pelos nós sensores são enviadas aos atuadores, que são responsáveis por interpretá-las, e caso fosse necessário, atuar no ambiente. A primeira arquitetura demonstra um modo de interpretação centralizada, onde o *sink* seria a entidade central responsável por coordenar todos os atuadores, enquanto a segunda demonstra um modo de interpretação distribuída, onde cada atuador seria responsável por interpretar os dados de sua região de atuação.

A interpretação de modo distribuída traz vantagens importantes no uso de ambientes de segurança crítica, como: (a) baixa latência, pois a informação sentida é encaminhada a atuadores que estão mais próximos do evento do que o *sink*; (b) longevidade maior da rede, pois dados não são roteados até o *sink*, evitando desgastar rapidamente os nós próximos ao *sink*. Embora a agregação de dados reduza os gastos dos nós próximos ao *sink*, ainda assim a falha destes nós é maior do que de outros da rede. Igualmente, com a interpretação descentralizada, podemos imaginar um maior gasto dos nós próximos ao atuador. Entretanto, os atuadores são em maior número do que o *sink*, e estão inseridos dentro do ambiente, logo possuem mais nós próximos a ele. E ainda é muito mais provável que diferentes atuadores possam ser acionados para cada evento, implicando no revezamento dos nós sensores. Como resultado, a interpretação descentralizada tem um tempo de vida maior que a centralizada [AKY 04].

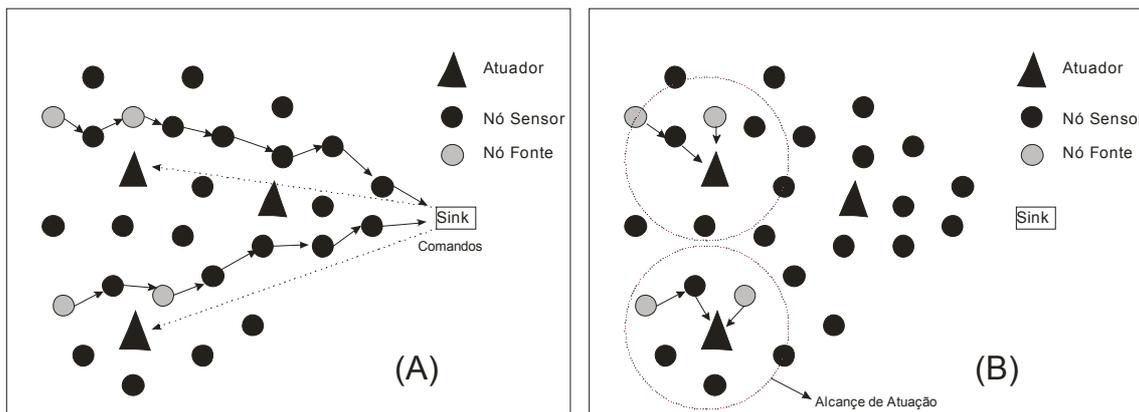


Figura 2.10 - (a) Interpretação Centralizada - eventos são enviados ao *sink*; (b) Interpretação Descentralizada - eventos são enviados aos Atuadores (Adaptado de [AKY 04]).

## 2.8 Considerações Finais

O presente capítulo apresentou os principais aspectos das RSSFs e RSASFs, incluindo suas principais características, requisitos comuns e funcionamento. Também foram apresentadas questões relacionadas à pilha de protocolos usada pelos nós sensores. É importante ressaltar que a energia constitui um fator chave no projeto de soluções para RSSFs e RSASFs. O tempo de vida da rede depende da adoção de medidas para economizar energia em todas as camadas da pilha de protocolos.

As RSASF, com seus nós atuadores, oferecem vantagens adicionais em relação às RSSF, possibilitando a reação automática, e em tempo real, aos eventos coletados pelos nós sensores. O próximo capítulo descreve os principais protocolos de roteamento para RSSF e RSASF onde serão implementados mecanismos de Qualidade de Serviço que é o foco deste trabalho.

## 3 Protocolos de Roteamento para Redes de Sensores e de Atuadores Sem Fio

---

### 3.1 Considerações Iniciais

É esperado que o uso de redes de sensores sem fio (RSSF) tenha um impacto significativo na eficiência de muitas aplicações militares e civis como supervisão de campo de batalha, monitoramento de desastres, e segurança. Esses sistemas processam dados coletados de múltiplos sensores para monitorar eventos em uma área de interesse. Por exemplo, um grande número de sensores pode ser lançado por um helicóptero em uma área de desastre. Trabalhando em rede, esses sensores podem auxiliar operações de resgate através da localização de sobreviventes, identificarem áreas de risco e tornar os soldados mais informados sobre a situação. Tais aplicações de redes de sensores podem, além de aumentar a eficiência das operações de resgate, garantir uma maior segurança ao grupo de resgate.

Porém, os nós sensores são muito limitados quanto à energia, processamento e largura de banda. Tais limitações, combinadas com o uso de um grande número de nós, impõem diversos desafios no desenvolvimento e gerenciamento de redes de sensores. Esses desafios necessitam de soluções para economia de energia em todas as camadas do protocolo. As questões relacionadas às camadas física e de enlace são geralmente comuns para todos os tipos de aplicações de sensoriamento, e as pesquisas nessas áreas focam em escalonamento dinâmico de voltagem, hardware para comunicação por rádio, particionamento do sistema, e protocolos MAC que economizam energia [HEI 00] [MIN 00] [WOO 01] [HED 02] [SHI 01]. Na camada de rede, o objetivo principal é encontrar meios de roteamento eficientes em economia de energia e, simultaneamente, encaminhar dados dos sensores ao nó sorvedouro (*sink*) de forma confiável, de modo que o tempo de vida da rede seja maximizado.

O roteamento em RSSF é uma questão desafiadora devido às diversas características que as distingue das redes sem fio *ad-hoc* [PER 00]. Primeiro, protocolos clássicos baseados em IP não podem ser aplicados em redes de sensores. Segundo, ao

contrário das redes de comunicação típicas, quase todas as aplicações para RSSF requerem o encaminhamento de dados coletados de múltiplas regiões (fontes) para um determinado *sink*. Terceiro, o tráfego gerado possui uma redundância significativa, pois múltiplos sensores podem gerar o mesmo dado para um fenômeno. Essa redundância precisa ser adotada pelos protocolos de roteamento para melhorar o uso da energia e da largura de banda. Quarto, os nós sensores são altamente limitados pela energia de transmissão, capacidade de processamento e armazenamento, o que requer um cuidadoso gerenciamento de recursos.

Devido a essas diferenças, vários algoritmos foram propostos para resolver o problema do roteamento em RSSF [HEI 99] [INT 00] [INT 03] [BRA 02] [SCH 01] [CHU 02] [MAN 01] [YAO 02] [SHA 02] [SAD 03]. Esses mecanismos de roteamento têm considerado as características dos nós sensores junto com os requisitos das aplicações e arquiteturas. Quase todos os protocolos de roteamento podem ser classificados nas seguintes categorias:

- Centrado no dado (*data-centric*);
- Hierárquico;
- Baseado em localização;
- E ciente de QoS.

Um protocolo centrado no dado é baseado em consultas e depende do método de nomeação dos dados. Esta abordagem ajuda na eliminação de muitas transmissões redundantes. Protocolos hierárquicos focam a formação de clusters onde o nó central (*cluster head*) é capaz de realizar agregação e redução de dados para economizar energia.

Protocolos baseados em localização utilizam informação de posição para despachar dados para regiões específicas ao invés de difundir para toda a rede. A última categoria a ciente de QoS inclui as abordagens de roteamento que tentam alcançar alguns dos requisitos de qualidade de serviço e economia de energia simultaneamente.

Este capítulo tem como objetivo sumarizar os mecanismos de roteamento existentes divididos em suas categorias apropriadas.

## 3.2 Protocolos Data-Centric

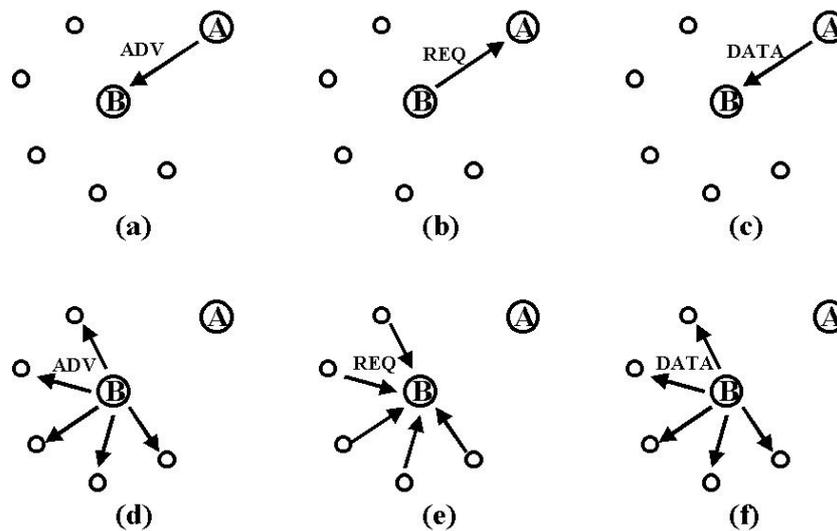
Em muitas das aplicações de redes de sensores sem fio, não é possível associar identificadores globais a cada nó devido ao grande número de nós envolvidos. Essa falta de identificação global junto com o posicionamento aleatório dos nós sensores dificulta a seleção de um conjunto específico de nós para ser consultado. Subseqüentemente, os dados normalmente são transmitidos de cada nó de uma certa região, gerando uma redundância significativa. Como esta abordagem é muito ineficiente em termos de consumo de energia, há inúmeras pesquisas em agregação de dados e capacidade de seleção de nós específicos.

No roteamento data-centric, o *sink* envia consultas a certas regiões e espera pelos dados dos sensores localizados na região selecionada. Como os dados são requisitados por meio de consultas, um sistema de nomeação se faz necessário para especificar as propriedades desses dados. O primeiro protocolo data-centric proposto foi o SPIN [HEI 99], que considera a negociação de dados entre os nós para eliminar a redundância e economizar energia. Depois, o paradigma Directed Diffusion [INT 00] [INT 03] foi desenvolvido e tornou-se uma referência para os protocolos data-centric. Foram propostos alguns protocolos [BRA 02] [SCH 01] [CHU 02] baseados no Directed Diffusion, e outros seguindo conceitos similares [MAN 01] [YAO 02] [SHA 02] [SAD 03]. Nesta Seção serão discutidos alguns dos protocolos data-centric e suas idéias principais.

### 3.2.1 Protocolo de Sensores para Informação via Negociação – SPIN

O SPIN (*Sensor Protocols for Information via Negotiation*) [HEI 99] é um protocolo de roteamento para RSSF que usa informações sobre a quantidade de energia disponível em cada sensor para fazer o roteamento. Ele utiliza-se de protocolos de negociação para disseminar as informações de um nó sensor para todos os nós sensores da rede. No SPIN quando um nó percebe que sua energia está perto de um limite pré-estabelecido ele se adapta participando menos da disseminação de dados. A idéia por trás do SPIN é nomear os dados usando descritores de alto nível ou meta-dados. Antes de uma transmissão, meta-dados são trocados entre os sensores via um mecanismo de anúncio de dados, que é o aspecto principal do SPIN. Cada nó, ao receber um novo dado, anuncia esse

dado aos seus vizinhos e, aqueles que não tiverem o dado, enviam uma mensagem de requisição para recebê-lo. A negociação dos meta-dados do SPIN resolve os problemas clássicos de inundamento (*flooding*) como a transmissão de dados redundantes, alcançando uma boa economia de energia. Não há um formato padrão para os meta-dados e é assumido como específico da aplicação. São três as mensagens definidas no SPIN para trocar dados entre os nós: a mensagem ADV para um sensor anunciar um meta-dado particular, a mensagem REQ para requisitar um dado, e DATA que transporta o dado. A Figura 3.1 resume as etapas do protocolo SPIN.



**Figura 3.1 O protocolo SPIN.** O nó A inicia anunciando seu dado para o nó B (a). O nó B responde enviando uma requisição (b). O nó A envia o dado (c) para o nó B que anuncia este dado para seus vizinhos (d). Os vizinhos de B respondem com requisições (e), que são atendidas por B, enviando o dado (f). (Adaptado de [HEI 99])

Comparando com o inundamento da rede, o SPIN é três vezes e meia mais eficiente em consumo de energia e a negociação de meta-dados praticamente reduz pela metade os dados redundantes [HEI 99]. Porém, o mecanismo de anúncio de meta-dados não pode garantir a entrega dos dados. Por exemplo, se os nós interessados no dado estão longe do nó fonte e os nós entre fonte e destino não estiverem interessados neste dado, tal dado não será entregue ao destino. Conseqüentemente, o SPIN não é uma boa escolha para aplicações de monitoramento de condições críticas, como desastres e incêndios, por exemplo, que requerem uma entrega confiável de pacotes.

### 3.2.2 Directed Diffusion – DD

O Directed Diffusion [INT 00] [INT 03] é um marco importante na pesquisa de roteamento data-centric em redes de sensores. A meta deste algoritmo é estabelecer canais de comunicação eficiente entre os nós sensores e a estação base. Este algoritmo, introduz dois novos conceitos: roteamento baseado nos dados e a agregação de dados. O roteamento baseado nos dados ocorre através da requisição de informação de interesse. Quando algum nó possui alguma informação que é de interesse de outro nó, ele envia esta informação ao nó que requisitou tal informação. O outro conceito, agregação de dados, significa que nós intermediários podem agregar seus dados em um simples pacote para reduzir transmissões e o volume total de dados transmitidos.

A idéia focaliza a difusão de dados pelos nós sensores usando um esquema de nomeação de dados. A razão principal por trás do uso de tal esquema é acabar com as operações desnecessárias do roteamento na camada de rede, economizando energia. O Directed Diffusion sugere o uso de pares atributo-valor para os dados, e consultas nos sensores, sob demanda, usando esses pares. Para criar uma consulta, um interesse é definido usando uma lista de pares atributo-valor como nome de objetos, intervalo, área geográfica, etc. O interesse é difundido (broadcast) na rede pelo sink. Cada nó que recebe o interesse pode armazená-lo para uso futuro. Os interesses armazenados nos nós são usados para comparar os dados recebidos com os valores nos interesses. O interesse também possui diversos gradientes. Um gradiente é um ponteiro para o vizinho do qual o interesse foi recebido. Utilizando interesses e gradientes, caminhos são estabelecidos entre o *sink* e os nós fontes.

Vários caminhos podem ser formados e apenas um é selecionado pelo mecanismo de reforço. O *sink* reenvia o interesse original, porém com um intervalo menor, através do caminho selecionado, forçando o nó fonte neste caminho a aumentar sua taxa de envio de dados. A Figura 3.2 mostra o protocolo Directed Diffusion.

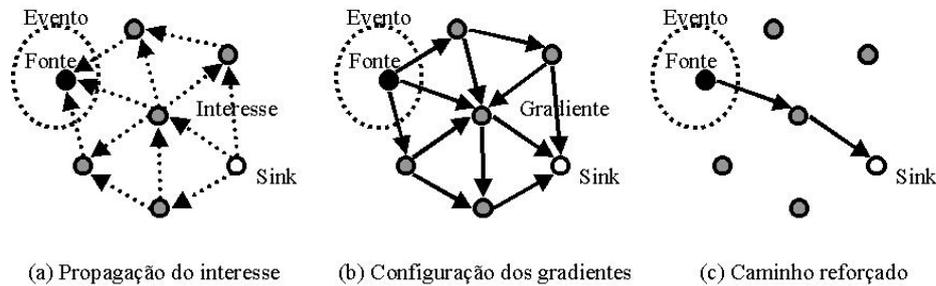


Figura 3.2 As fases do Directed Diffusion. (Adaptado de [INT 00])

O reparo de caminhos quebrados também é possível no Directed Diffusion. Quando um caminho entre um nó fonte e o *sink* falha, um caminho alternativo deve ser estabelecido. Para isso, o DD basicamente reinicia o mecanismo de reforço para procurar outros caminhos, que estão enviando dados em taxas baixas. Entretanto, o esquema de reparo de caminhos do DD possui um alto custo, pois exige um inundamento da rede para reforçar outros caminhos.

O DD difere do SPIN no mecanismo de consulta de dados sob demanda que ele possui. No DD o sink pergunta aos nós sensores se um dado específico está disponível, através do inundamento da rede com alguns interesses. No SPIN, os nós anunciam a disponibilidade de um dado permitindo que os nós interessados consultem aquele dado. O DD tem várias vantagens. Cada nó pode realizar agregação e armazenamento temporário, em adição ao sensoriamento. Outra vantagem é a eficiência no consumo de energia, garantida pelo esquema sob demanda de consulta e por não necessitar de gerenciamento global da topologia da rede.

Entretanto, o DD não pode ser aplicado a todas as aplicações de redes de sensores, devido ao seu modelo de entrega de dados baseado em consultas. As aplicações que exigem a entrega de dados contínua ao sink não funcionarão eficientemente neste modelo. Conseqüentemente, o DD não é recomendado como um protocolo de roteamento para aplicações como monitoramento ambiental e agricultura de precisão. Outro problema do DD é o esquema de nomeação de dados utilizado, que é dependente de aplicação e deve ser definido a priori.

### 3.2.3 PEQ (Periodic, Event-driven, and Query-based Protocol)

A idéia básica do algoritmo PEQ [BOU 04a] é usar nós simples e baratos, com processamento simples e sem qualquer hardware especial, usando o nível de *hop* como a informação principal para minimizar a transmissão de dados. O algoritmo de roteamento do PEQ é realizado em três passos.

O primeiro passo envolve a construção da árvore de *hops*. O sink inicia o processo de construção da árvore, que será usada para propagação de mensagens de subscrição e dados na rede. A árvore de hops é iniciada por um sink, que transmite para seus vizinhos um par atributo-valor chamado *HOP*. O algoritmo para a construção da árvore de hops é baseado no inundamento da rede, com um valor de *HOP* iniciado no sink, que é armazenado, incrementado e transmitido aos nós vizinhos (broadcast). Os nós vizinhos armazenam, incrementam e transmitem o valor de *HOP* recebido para seus nós vizinhos, e assim por diante, até que toda a rede esteja configurada com os níveis de *hops*.

O segundo passo inclui a propagação de subscrições pela rede. Após a configuração inicial da rede, a única informação que um nó possui é o nível de *hop* no qual ele está. Apenas esta informação não é suficiente para uma eficiente propagação de subscrição. Na ausência de alguma informação sobre qual nó da rede possa satisfazer o interesse do sink, uma solução para propagar a subscrição inicial para o nó correto seria inundar a rede com o interesse. Devido a este fato, o PEQ envia a mensagem de subscrição inicial na etapa de configuração da rede.

Cada nó na rede mantém uma pequena tabela de subscrições e outra de roteamento. Cada registro da tabela de subscrições representa uma subscrição distinta. Durante a propagação da mensagem de subscrição, cada nó, ao recebê-la, compara o atributo coord da subscrição com suas próprias coordenadas. Se forem iguais, a subscrição é destinada para este nó e então é armazenada em sua tabela de subscrições. Caso contrário, o nó apenas retransmite a subscrição para seus vizinhos. Durante a propagação da subscrição, quando um nó recebe um pacote de subscrição, ele processa o pacote e apanha o ID do nó que transmitiu e o sinkID. Então o nó atribui o ID do nó que transmitiu ao campo destID de sua

tabela de roteamento, e adiciona o sinkID ao registro dessa rota. Essa informação será usada para encaminhar dados para o sink.

Finalmente, o último passo é responsável pela entrega de dados dos sensores ao sink, usando rotas mais rápidas. Quando um nó precisa entregar dados a um sink, ele apenas verifica os campos sinkID e destID de sua tabela de roteamento e encaminha (*unicast*) o pacote para o nó correspondente ao destID. A configuração inicial da rede já carrega consigo uma subscrição, desta forma todos os nós da rede são configurados com rotas para entregar dados ao sink. Durante este passo, é realizado também o reparo de caminhos caso algum nó falhe. Além disso o caminho utilizado para entrega de notificações pode ser usado posteriormente pelo sink para enviar subscrições rápidas para a mesma região.

Comparado com o Directed Diffusion, o algoritmo do PEQ resultou em latências menores e obteve um melhor desempenho na taxa de entrega.

### 3.2.4 Energy-Aware Routing

Shah *et al.* [SHA 02] propuseram o uso ocasional de um conjunto de caminhos para aumentar o tempo de vida da rede. Esses caminhos são escolhidos através de uma função de probabilidade, que depende do consumo de energia de cada caminho. A sobrevivência da rede é a métrica principal nesta abordagem. Esta abordagem alega que usando sempre um mesmo caminho, a energia dos nós deste caminho se esgotará rapidamente. Alternativamente, o protocolo escolhe um dos múltiplos caminhos com certa probabilidade, aumentando o tempo de vida da rede. É assumido que cada nó possui um endereço e informação sobre sua localização e seu tipo. O protocolo está dividido em três fases [SHA 02]: configuração, comunicação de dados, e manutenção de rotas.

Fase de configuração: ocorre uma inundação localizada para encontrar rotas e criar as tabelas de rotas. Durante este processo, o custo total de energia é calculado em cada nó. Por exemplo, se uma requisição é enviada do nó  $N_i$  para o nó  $N_j$ , o nó  $N_j$  calcula o custo do caminho da seguinte forma:

$$C_{N_j, N_i} = \text{Custo}(N_i) + \text{Métrica}(N_j, N_i)$$

Aqui, a métrica de energia usada captura os custos de transmissão e recepção e também a energia residual dos nós. Os caminhos que tiverem um alto custo serão descartados. A seleção de um nó é feita de acordo com sua proximidade ao destino. O nó atribui uma probabilidade a cada um de seus vizinhos na sua tabela de roteamento ( $RT$ ) correspondente aos caminhos formados. A probabilidade é inversamente proporcional ao custo, que é:

$$P_{N_j, N_i} = \frac{1}{\sum_{k \in RT} \frac{1}{C_{N_j, N_k}}}$$

$N_j$  calcula então o custo médio para alcançar o destino através dos vizinhos na tabela de roteamento ( $RT_j$ ) usando a fórmula:

$$\text{Custo}(N_i) = \sum_{i \in RT_j} P_{N_j, N_i} C_{N_j, N_i}$$

Esse custo médio para  $N_j$  é atribuído ao campo custo da requisição.

Fase de comunicação de dados: Cada nó encaminha o pacote escolhendo aleatoriamente um nó na sua tabela de roteamento usando as probabilidades.

Fase de manutenção de rotas: é realizado um inundamento localizado da rede para reparar qualquer caminho quebrado.

A abordagem descrita é similar ao Directed Diffusion no modo como os caminhos dos nós fontes ao sink são descobertos. No DD, o dado é enviado através de múltiplos caminhos, e apenas um deles é reforçado para enviar dados a taxas mais altas. Por outro lado, Shah *et al.* selecionam aleatoriamente um único caminho, dentre as múltiplas alternativas, para economizar energia. Comparada ao DD, esta abordagem alcança uma melhoria de 21.5% na economia de energia e um aumento de 44% no tempo de vida da rede [SHA 02]. Porém, o uso de um único caminho impossibilita a recuperação do caminho

quando um nó falha, ao contrário do DD. Outra desvantagem em relação ao DD é a necessidade de coletar informação de localização e configurar o mecanismo de endereçamento para os nós, complicando a fase de configuração de rotas.

### 3.3 Protocolos Hierárquicos

Similar às outras redes de comunicação, a expansibilidade é um dos atributos mais importantes de um projeto de redes de sensores. Uma rede com apenas um nível hierárquico pode gerar uma sobrecarga no *sink* com o aumento da densidade de sensores na rede. Essa sobrecarga pode causar atrasos na comunicação e levar a um rastreamento inadequado dos eventos. Além disso, uma arquitetura com apenas um único *gateway* não é expansível para um conjunto maior de sensores, cobrindo uma área extensa, pois os sensores são tipicamente incapazes de se comunicar a longas distâncias. Para permitir que o sistema suporte uma carga adicional e seja capaz de cobrir uma vasta área de interesse sem degradar o serviço, mecanismos de *clustering* em redes vêm sendo perseguidos em algumas abordagens de roteamento.

O objetivo principal do roteamento hierárquico é manter, de forma eficiente, um consumo de energia mais homogêneo entre os nós sensores, fazendo com que eles se comuniquem com um *cluster* particular de forma *multi-hop* e realizando agregação e fusão de dados para diminuir o número de mensagens transmitidas ao *sink*. A formação de *clusters* é tipicamente baseada na reserva de energia dos sensores e na proximidade dos sensores com o *cluster head* [BUC 98] [LIC 97]. O LEACH [HEI 00a] é uma das primeiras abordagens de roteamento hierárquico para redes de sensores. A idéia proposta no LEACH serviu de inspiração para vários protocolos de roteamento hierárquico [MAN 01] [LIN 02] [LIN 01] [MAN 02], embora alguns protocolos tenham sido desenvolvidos independentemente [SUB 00] [YOU 02]. Alguns protocolos hierárquicos são detalhados nesta subseção.

#### 3.3.1 LEACH

Um dos algoritmos mais populares de roteamento hierárquico em redes de sensores é o *Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH) [HEI 00a]. A idéia é formar

*clusters* de nós sensores baseados na força do sinal recebido e no uso de *cluster heads* como roteadores para o *sink*. A comunicação com o *sink* é feita apenas pelos *cluster heads*, ao invés de todos os sensores, economizando energia. O número ótimo de *cluster heads* é estimado em 5% do número total de nós.

Todo o processamento de dados como fusão e agregação são locais ao *cluster*. A função de *cluster head* de um nó muda para outro nó aleatoriamente para balancear a dissipação de energia entre os nós. Essa decisão é tomada pelo nó, que escolhe um número aleatório entre 0 e 1. O nó torna-se um *cluster head* se o número for menor que o seguinte limiar:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p * (r \bmod \frac{1}{p})} & \text{se } n \in G \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Onde,  $p$  é a porcentagem desejada de *cluster heads* (por exemplo, 0.05),  $r$  é a rodada atual, e  $G$  é o conjunto de nós que não foram *cluster heads* nas últimas  $1/p$  rodadas.

O LEACH é 7 vezes mais eficiente em dissipação de energia se comparado com a comunicação direta. Os nós “morrem” aleatoriamente e o mecanismo de *clustering* dinâmico aumenta o tempo de vida do sistema. O LEACH é completamente distribuído e não requer um conhecimento global da rede [HEI 00a]. No entanto, os *cluster heads* comunicam-se com o *sink* diretamente e, conseqüentemente, o LEACH não pode ser aplicado em redes que monitoram grandes regiões devido à limitação do raio de alcance do rádio do nó. Além disso, a idéia de *clustering* dinâmico carrega um custo extra, como as mudanças de *heads*, anúncio do estado de um *head*, etc., que podem atenuar o ganho em economia de energia.

### 3.3.2 PEGASIS

Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS) [LIN 02] é um melhoramento do protocolo LEACH. Ao invés de formar múltiplos *clusters*, o

PEGASIS forma cadeias de nós sensores de tal forma que cada nó transmite e recebe de um vizinho e apenas um nó da cadeia é escolhido para transmitir para o *sink*. Os dados coletados passam de nó em nó, que são agregados e, eventualmente, enviados para o *sink*, como mostrado na Figura 3.3, onde o nó *c0* passa seu dado para o nó *c1*, que agrega o dado e entrega para o líder. Após o nó *c2* passar a ficha para o nó *c4*, este transmite seu dado para o nó *c3*, onde o dado é agregado e transmitido para o líder. O nó *c2* aguarda para receber os dados de ambos vizinhos e então agrega seu dado com os dados dos vizinhos. Finalmente, o nó *c2* transmite apenas uma mensagem para o *sink*.

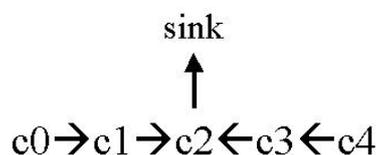


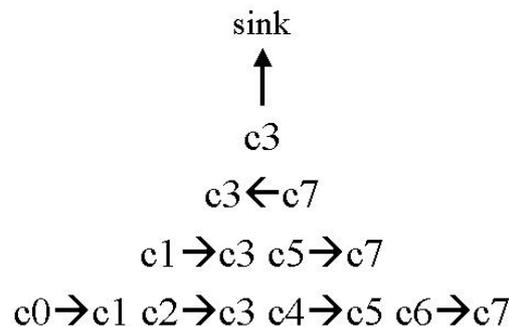
Figura 3.3 Encadeamento no PEGASIS.

A diferença para o LEACH está no uso do roteamento de múltiplos *hops*, formando cadeias e selecionando apenas um nó para transmitir para o *sink* ao invés de usar múltiplos nós. O PEGASIS superou o LEACH nas simulações em torno de 100 a 300% para tamanhos e topologias diferentes de redes. O ganho de performance é alcançado através da eliminação da sobrecarga causada pela formação dinâmica de *clusters* no LEACH e através da diminuição do número de transmissões e recepções usando agregação de dados [LIN 02].

### 3.3.3 PEGASIS Hierárquico

O PEGASIS hierárquico [LIN 01] é uma extensão do PEGASIS, que visa diminuir o atraso gerado durante a transmissão de pacotes para o *sink* e propõe uma solução para o problema de agrupamento de dados considerando a métrica energia versus atraso. Para reduzir o atraso no PEGASIS, transmissões simultâneas de mensagens de dados são realizadas. Duas abordagens são investigadas para evitar colisões e possíveis interferências de sinal entre os sensores. A primeira incorpora codificação do sinal, por exemplo, CDMA. Na segunda abordagem, apenas os nós separados espacialmente têm permissão de transmitir ao mesmo tempo.

O protocolo baseado em cadeia e com CDMA constrói uma cadeia de nós que forma uma hierarquia de árvore, e cada nó selecionado em um nível particular transmite dados para o nó em um nível mais alto na hierarquia. Esse método garante a transmissão de dados em paralelo e reduz o atraso expressivamente. Como exemplo, na Figura 3.4 o nó c3 é selecionado como o líder para a rodada 3. Como o nó c3 está na posição 3 (contando a partir do 0) da cadeia, todos os nós em posições pares enviarão para seus vizinhos da direita. Os nós que recebem de um nó do mesmo nível sobem para o próximo nível na hierarquia. No próximo nível, o nó c3 ainda está em uma posição ímpar (1). Novamente, todos os nós em posições pares vão agregar seus dados com os recebidos e enviar para a direita. No terceiro nível, o nó c3 não está mais em uma posição ímpar, então o nó c7 vai agregar seu dado e transmitir para c3. Finalmente, o nó c3 irá combinar seu dado com o recebido de c7 e transmitir a mensagem para o *sink*.



**Figura 3.4 Agrupamento de dados em um esquema binário baseado em cadeia.**

A abordagem que não se baseia em CDMA cria uma hierarquia de árvore de nós, e os efeitos de interferência são reduzidos por um cuidadoso escalonamento de transmissões simultâneas. Esse protocolo mostrou-se mais eficiente que o PEGASIS em torno de 60% [LIN 01].

### 3.3.4 HPEQ (Hierarchical PEQ)

HPEQ [BOU 05] é uma nova versão do PEQ [BOU 04a], um PEQ hierárquico, o HPEQ foi proposto para reduzir o tráfego na rede e transmitir os dados sentidos de forma eficiente para o sink. O algoritmo PEQ, descrito na Seção 3.2.3 considera apenas o melhor

caminho ao entregar dados para o *sink*. Embora minimize a latência, esta abordagem acaba gerando muito tráfego de informações e, conseqüentemente, um consumo desnecessário de energia, pois todo nó da rede precisa encaminhar seus dados ao *sink*. Para solucionar este problema, foi proposta uma evolução do PEQ chamada *Hierarchyal PEQ* (HPEQ).

O HPEQ utiliza uma abordagem de *clustering* através da seleção aleatória de nós *agregadores* que formarão *clusters* de nós sensores. Os nós pertencentes a um cluster entregam seus dados ao agregador desse cluster que, por sua vez, encaminha os dados, agregados ou não, ao *sink*. Os objetivos do HPEQ são: distribuir uniformemente o consumo de energia, *balancear* a carga entre os nós sensores, reduzir a latência, e diminuir o tráfego em uma rede de sensores, aumentando assim seu tempo de vida. O balanceamento de carga e consumo é realizado através da alternância aleatória da função de agregador entre os nós da rede. Dessa forma, a função de agregador, que consome mais energia que um nó sensor não-agregador, não é fixa, evitando o desgaste prematuro dos nós escolhidos como agregadores.

O algoritmo do HPEQ é realizado em 5 etapas: configuração inicial da rede, seleção aleatória dos agregadores, formação dos clusters, transmissão dos dados para o agregador, e transmissão dos agregadores ao *sink*. A etapa de configuração inicial da rede é idêntica à configuração inicial do PEQ [BOU 04a], onde o *sink* inicia uma difusão pela rede para construir uma árvore baseada em níveis de *hops*, que representa os melhores caminhos entre cada nó da rede e o *sink*. A única diferença é a inclusão de um campo no cabeçalho do pacote que informa a porcentagem desejada de nós que se tornarão agregadores.

Na etapa da Seleção Aleatória dos Agregadores o esquema de escolha de agregadores do HPEQ baseia-se na idéia apresentada no LEACH [HEI 00a] que, originalmente, é realizada da seguinte forma: após receber a configuração inicial, qualquer nó da rede pode se tornar um agregador a qualquer momento com uma certa probabilidade.

Na etapa da formação dos Clusters após sua seleção, cada nó agregador precisa notificar sua nova função para os nós da vizinhança para a formação de grupos. O objetivo desses grupos (ou *clusters*) é que todos os nós pertencentes a um *cluster* transmitam seus dados coletados apenas para o agregador correspondente. A formação dos *clusters* é

realizada através da propagação (*broadcast*) de uma mensagem de notificação, que é exatamente o algoritmo de configuração inicial do PEQ [BOU 04a], porém com um tempo de vida limitado (*ttl*).

Na etapa de transmissão de dados para os Agregadores quando um nó sensor captura alguma informação do ambiente físico, os dados devem ser transmitidos ao agregador do *cluster* do qual o nó faz parte. O algoritmo usado para enviar dados dos nós ao agregador é o mesmo utilizado pelo PEQ para encaminhar dados dos nós ao *sink*. Pode-se pensar nesta etapa como o agregador do HPEQ sendo o *sink* do PEQ. O HPEQ também herda o mecanismo de reparo de caminhos do PEQ, tanto para a comunicação dos nós sensores com os agregadores quanto para a comunicação entre os nós com o *sink*.

Na etapa de transmissão de dados para o *Sink*, o agregador precisa encaminhar seus dados para o *sink* após receber os dados dos nós sensores,. Diferentemente do LEACH, que usa a comunicação direta entre os agregadores (*cluster-heads*) e o *sink*, o HPEQ utiliza uma comunicação *multihop* para encaminhar dados ao *sink*. Assim, o HPEQ supera uma importante limitação do LEACH, que é a expansibilidade. No LEACH, como a comunicação entre os *cluster-heads* e o *sink* é direta, os *cluster-heads* devem aumentar seu potencial de comunicação para transmitir a distâncias maiores. Se a rede for muito extensa, apenas os *cluster-heads* mais próximos ao *sink* conseguirão alcançá-lo. Os mais afastados serão incapazes de transmitir diretamente, devido às limitações do hardware de comunicação e bateria dos nós sensores.

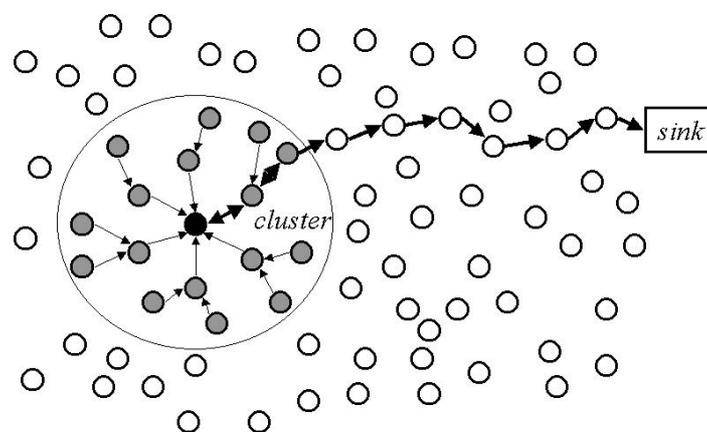


Figura 3 5 Comunicação *multihop* entre um agregador e *sink*.

Para garantir a expansibilidade do sistema, o HPEQ usa a comunicação *multihop* que funciona em uma rede de sensores homogênea, empregando sensores de baixo custo e que se comunicam a curtas distâncias e de forma colaborativa. Dessa forma, um agregador encaminha seus dados ao *sink* pela rota mais curta, formada por vários nós, que foi encontrada durante a etapa de configuração inicial da rede. A configuração inicial monta uma malha de nós sensores, com caminhos entre cada nó e o *sink*. A Figura 3 5 mostra um agregador utilizando os nós dessa malha de sensores para enviar seus dados ao *sink*.

### 3.4 Protocolos Baseados em Localização

A maioria dos protocolos de roteamento para redes de sensores necessita de informação de localização para os nós sensores. Em grande parte dos casos, a informação de localização é necessária para calcular a distância entre dois nós para poder estimar o consumo de energia. Como não há um esquema de endereçamento para redes de sensores como os endereços IP, e os nós estão espalhados em uma região, a informação de localização pode ser utilizada no roteamento de dados de uma forma mais eficiente em termos de energia. Por exemplo, se a região a ser monitorada é conhecida, usando a localização dos sensores, as consultas podem ser difundidas apenas para uma região particular, reduzindo o número de transmissões significativamente. Alguns dos protocolos discutidos foram desenvolvidos primeiramente para redes *ad hoc* móveis [XUY 01] [ROD 99] [LIL 01]. Entretanto, eles podem ser aplicados em redes de sensores onde há pouca ou nenhuma mobilidade dos nós.

Existem outros protocolos baseados em localização para redes *ad hoc* sem fio, como *Cartesian* e *Trajectory-Based Routing* [NAT 02]. Porém, muitos desses protocolos não são aplicados em redes de sensores, pois eles não foram desenvolvidos considerando a economia de energia. Esta subseção limita-se a abranger apenas os protocolos baseados em localização que economizam energia.

#### 3.4.1 GAF

O *Geographic Adaptive Fidelity* (GAF) [XUY 01] é um algoritmo de roteamento baseado em localização desenvolvido inicialmente para redes móveis *ad hoc*, mas que pode

ser aplicado em redes de sensores. O GAF conserva energia desligando nós desnecessários na rede sem afetar o nível de fidelidade do roteamento. Ele forma uma grade virtual para a área coberta. Cada nó usa sua localização GPS para se associar a um ponto na grade virtual. Os nós associados com o mesmo ponto na grade são considerados equivalentes em termos de custo de roteamento de pacotes. Tal equivalência é explorada para manter alguns nós em estado de “dormência” para economizar energia. Além disso, o GAF pode aumentar o tempo de vida da rede substancialmente com o aumento do número de nós na rede. Um exemplo é mostrado na Figura 3.8. O nó 1 pode alcançar qualquer um dos nós 2, 3 e 4 e os nós 2, 3 e 4 podem alcançar o nó 5. Então os nós 2, 3 e 4 são equivalentes e dois deles podem “dormir”.

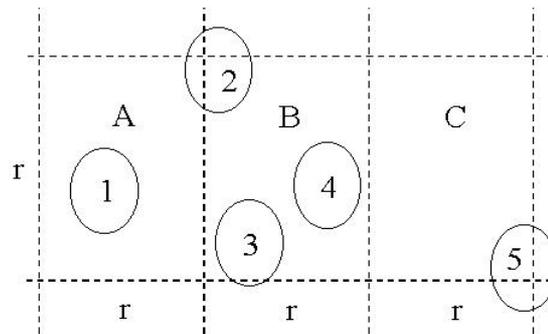


Figura 3.6 Exemplo de uma grade virtual no GAF. [XUY 01]

Os nós passam do estado de dormência para o ativo sucessivamente para promover o balanceamento de carga. Há três estados definidos no GAF: descoberta, para determinar os vizinhos na grade; ativo, para participar do roteamento; e dormência, quando o rádio é desligado. Qual nó irá dormir e por quanto tempo são parâmetros dependes da aplicação e são configurados durante o processo de roteamento. Para tratar a mobilidade, cada nó estima seu tempo de partida da grade e envia para seus vizinhos. Os nós dormentes ajustam seus tempos de dormência para manter a fidelidade do roteamento. Antes que o tempo de partida de um nó ativo termine, os nós dormentes acordam e um deles se torna ativo.

O GAF se empenha para sustentar a rede conectada como em [SUB 00], mantendo sempre um nó representativo no estado ativo em cada região da grade virtual. Os resultados de simulação mostram que o GAF tem uma performance ao menos tão boa quanto um protocolo normal de roteamento em redes *ad hoc* em termos de atraso e perda de pacotes, e

aumenta a vida da rede economizando energia [XUY 01]. Embora o GAF seja um protocolo baseado em localização, ele pode também ser considerado como um protocolo hierárquico, onde *clusters* são baseados em localização geográfica. Para cada área da grade, um nó representativo atua como um nó líder para transmitir dados para os outros nós. Porém, o nó líder não realiza agregação ou fusão de dados como no caso de outros protocolos hierárquicos.

### 3.5 Protocolos Cientes de QoS

Apesar da maioria dos protocolos de roteamento propostos para redes de sensores se encaixarem nas categorias descritas até aqui, alguns seguem abordagens diferentes como a qualidade de serviço (QoS). Os protocolos cientes de QoS consideram o requisito de atraso fim-a-fim durante a configuração dos caminhos em uma rede de sensores. Alguns protocolos serão mostrados nesta Seção 4.4.2.

### 3.6 Considerações Finais

O roteamento em redes de sensores tem atraído bastante atenção nos últimos anos e introduziu novos desafios que não são atendidos nas soluções de roteamento em redes tradicionais. Neste capítulo foram mostradas soluções de roteamento em redes de sensores que incluem as principais categorias: *data-centric*, hierárquica e baseada em localização. Embora o desempenho desses protocolos seja promissor em termos de consumo de energia, estes não atendem requisitos da classe de aplicações de supervisão e controle, tais como a garantia de entrega de pacotes com baixa latência, mesmo em situações de emergência, onde a rede pode estar sujeita a falhas. Mecanismos de Qualidade de Serviço (QoS) podem ajudar a atender esses requisitos. Alguns protocolos consideram a qualidade de serviço em seus mecanismos de roteamento. Esses protocolos, cientes de QoS, serão apresentados no próximo capítulo.

## 4 Qualidade de Serviço (QoS)

---

### 4.1 Considerações Iniciais

Não existe uma única expressão para definir Qualidade de Serviço (QoS). Na literatura existem várias definições para QoS [CAR 02] [MEL 01] [CIS 07]. Em [MEL 01] QoS é definida como a capacidade da rede de prover serviço de encaminhamento de dados de forma consistente e previsível. Em [CIS 07] QoS refere-se à capacidade de uma rede fornecer o melhor serviço para um determinado tráfego nas seguintes tecnologias de rede: IP, Frame Relay, ATM, Ethernet e outras.

No contexto deste trabalho Qualidade de Serviço é entendida como a capacidade da rede de fornecer garantias de que determinados fluxos de tráfego terão tratamento diferenciado de forma a garantir a entrega de dados, mesmo em situações de emergência.

### 4.2 Qualidade de Serviço (QoS) em Redes IP

A Internet trabalha com a filosofia do melhor esforço. Cada usuário da rede envia seus dados e compartilha a largura de banda com todos os fluxos de dados dos outros usuários. Os fluxos realizam a melhor forma possível para chegar ao seu destino, conforme as rotas definidas e a largura de banda que estiver disponível. Quando há congestionamento pacotes são descartados sem distinção. Não há garantia de que o serviço será realizado com sucesso, nem mesmo de desempenho. Entretanto, muitas aplicações necessitam de tais garantias.

Com Qualidade de Serviço, é possível oferecer maior garantia e segurança nas aplicações para Internet, uma vez que o tráfego de aplicações avançadas (voz sobre IP, videoconferência) passa a ter maior prioridade, enquanto usuários de aplicações tradicionais continuam utilizando o melhor esforço.

Atualmente existem dois modelos para implementar QoS na Internet: serviços Integrados (*IntServ*) e serviços diferenciados (*DiffServ*). *IntServ* é um modelo baseado em reserva de recursos, enquanto que, serviços diferenciados é uma proposta onde os pacotes são marcados de acordo com classes de serviços pré-determinadas.

- **Serviços Integrados (*IntServ*):** é um modelo baseado em reservas de recursos e traz melhoramentos ao modelo de rede IP para suportar transmissões em tempo real e garantir largura de banda para seqüências de dados específicas, este mecanismo será descrito na subseção 4.3.1.
- **Serviços Diferenciados (*DiffServ*):** pode reservar níveis diferentes de serviços para grupos diferentes, o que significa que o tráfego todo será dividido em grupos com parâmetros de QoS diferentes, este mecanismo será descrito na subseção 4.3.2.

### 4.3 Garantia de Qualidade de Serviço (QoS)

Somente o aumento na largura de banda não é suficiente para garantir a qualidade do serviço à aplicação, pois em se tratando de redes compartilhadas por múltiplos usuários e muitas vezes a longas distâncias, pode haver congestionamentos, provocando atrasos inadmissíveis em certas aplicações sensíveis, como por exemplo, voz e videoconferência. Existem algumas formas de prover qualidade de serviço às aplicações críticas: serviços integrados (*IntServ*), serviços diferenciados (*DiffServ*) [MEL 01] [BRU 02] [RNP 07].

#### 4.3.1 Serviços Integrados

O modelo de serviços integrados é caracterizado pela reserva de recursos. Antes de iniciar uma comunicação, o emissor solicita ao receptor a alocação de recursos necessária para definir-se uma boa qualidade na transmissão dos dados. O protocolo RSVP (*Resource Reservation Protocol*) é utilizado, nesse modelo, para troca de mensagens de controle de alocação dos recursos. A alocação de recursos diz respeito à largura de banda e ao tempo em que será mantida a conexão. Neste período de tempo, o emissor daquele serviço tem uma faixa da largura de banda disponível para transmitir seus dados.

RSVP é um protocolo de controle que roda sobre IP, ocupando o lugar do protocolo de transporte, da mesma forma que o *Internet Control Message Protocol* (ICMP), *Internet Group Management Protocol* (IGMP) ou protocolos de roteamento. As aplicações utilizam RSVP para reservar e manter durante a conexão uma determinada qualidade de serviço até a aplicação destino, e o RSVP faz isso criando um caminho entre origem e destino, perguntando a todos os nós intermediários se eles suportam a qualidade desejada, e

reservando as necessidades daquela aplicação. Para tanto, todos os nós no meio do caminho devem suportar esse protocolo. O protocolo RSVP utiliza outros protocolos para efetuar roteamento e transmissão. Seu objetivo único é a reserva, manutenção e liberação de recursos quando solicitado. Assim, pode operar em unicast, *multicast*, Ipv4, Ipv6, e outros [BRU 02].

#### 4.3.1.1 IntServ

O *IntServ* é caracterizado pela alocação de recursos para dois novos tipos de serviços que são os serviços garantidos para aplicações que necessitam de um atraso constante, e serviços de carga controlada para aplicações que requerem confiabilidade e destacam o serviço de melhor esforço.

Na Figura 4.1 é mostrado um exemplo de operação do protocolo de reserva de recursos o RSVP e abaixo é descrito seu funcionamento.

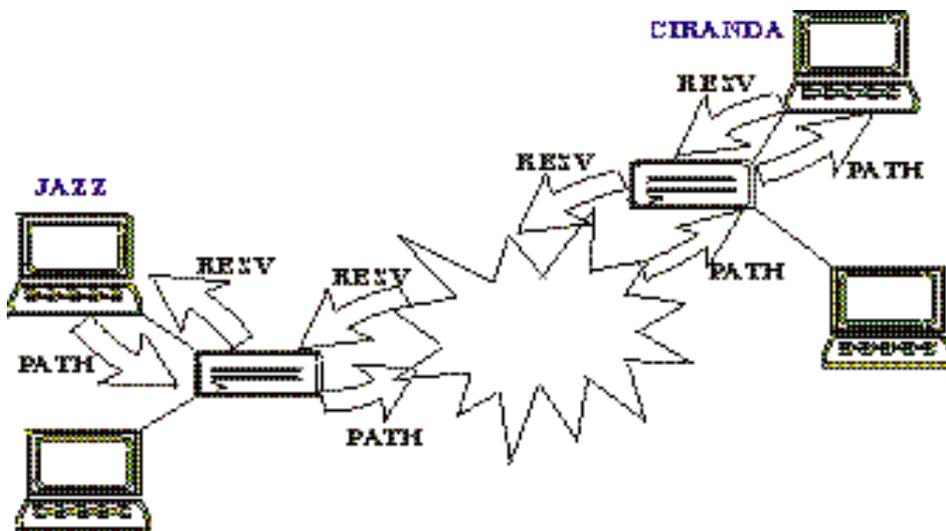


Figura 4.1 – Operação do protocolo RSVP

Suponhamos que a máquina *jazz.ufscar.br* deseje fazer uma comunicação de voz através da Internet (voz sobre IP) com a máquina *ciranda.usp.br*. Esta aplicação requer baixo atraso e baixa variação do atraso (*jitter*) para que sejam mantidos os requisitos de qualidade. Então, *jazz* envia uma mensagem especificando as características para o tráfego

(*path*) para *ciranda*. Quando a mensagem de *path* chega à *ciranda*, inicia-se o procedimento de reserva de recursos (*resv*) por todo caminho entre este dois nós da rede. Todos os roteadores entre os dois pontos passam pelo processo de alocação de recursos e qualquer um deles pode rejeitar a solicitação, informando para *jazz* que a solicitação não foi aceita. Caso todos os roteadores tenham condições de disponibilizar os recursos solicitados, é alocada a largura de banda e *buffer* necessários para a aplicação.

- **PATH:** mensagens enviadas periodicamente pelo transmissor ao endereço multicast. Contém a especificação de fluxo (formato de dados, endereço fonte, porta fonte) e características de tráfego. Essa informação é utilizada pelos receptores para achar o caminho reverso ao transmissor e determinar quais recursos devem ser reservados. Os receptores devem se cadastrar no grupo *multicast* a fim de receber mensagens PATH;
- **RESV:** mensagens geradas pelos receptores contendo parâmetros de reserva, como especificação de fluxo e de filtro. O filtro determina quais pacotes no fluxo de dados devem ser usados no classificador de pacotes. A especificação de fluxo é usada no *scheduler*, que procura manter a necessidade do receptor.

Durante a transmissão dos pacotes, são feitas classificações nos roteadores para cada fluxo, colocando-os em filas específicas para a aplicação. Como o controle é feito, basicamente, nos roteadores. Isso exige grande capacidade de processamento, armazenamento e bons algoritmos para tratamento de filas. Ou seja, aumenta o grau de complexidade nos roteadores.

### 4.3.2 Serviços Diferenciados

O modelo de serviços diferenciados implementa QoS com base na definição de tipos de serviços. No cabeçalho de um pacote IP, existe um campo chamado TOS (*Type of Service*) que pode representar o tipo do serviço. No entanto, serviços diferenciados ampliam a representação de serviços e o tratamento que pode ser dado para encaminhar um pacote, definindo um novo *layout* para o TOS, passando a chamá-lo de *DS Field* (*Differentiated Service Field*). No *DS Field*, são codificadas as classes para serviços

diferenciados. O campo TOS já existia na definição do pacote IP, mas só recentemente se definiu uma utilização para o mesmo.

Ao contrário dos serviços integrados, descrito na subseção 4.3.1.1, os padrões que utilizam serviços diferenciados preenchem um campo específico no pacote para dizer à prioridade que a aplicação tem. Assim, cada nó da rede pode priorizar ou não o encaminhamento do pacote. Com métodos adequados, incluindo a utilização de determinadas políticas nas extremidades da rede, a arquitetura de serviços diferenciados pode prover um tratamento adequado para uma boa gama de aplicações, incluindo aquelas de missão crítica, as que necessitam de baixo atraso, aplicações de voz sobre pacotes de dados, e outras. Na maioria das vezes, serviços diferenciados estão associados com a classificação do tráfego. O tráfego é agrupado em um pequeno número de classes e cada classe recebe uma Qualidade de Serviço na rede. O mecanismo DiffServ, visto a seguir, é um exemplo dessa arquitetura [BRU 02] [MEL 01].

#### **4.3.2.1 DiffServ**

O objetivo do *DiffServ* é melhorar o protocolo IP a fim de obter qualidade de serviço de uma forma escalável, ou seja, sem depender de protocolos de sinalização em cada nó ou reserva de recursos baseada em fluxo. Para isso, é utilizado o campo DS (*Differentiated Services*) do cabeçalho IP, que nada mais é do que o campo TOS (*Type Of Service*) do cabeçalho IPv4 (RFC 791) ou o campo “classe de tráfego” do IPv6 (RFC 2460). A configuração do campo DS pela aplicação vai determinar o comportamento do pacote na rede e seu tipo de serviço, ou seja, se ele vai ser mais ou menos prioritário [BRU 02].

Os serviços podem ser implementados de acordo com as seguintes diretivas:

- Marcar o campo DS do cabeçalho IP de acordo com o tipo de serviço. Usado nos limites da rede (limites de sistemas autônomos, limites administrativos internos ou *hosts*);
- Usar o campo DS para determinar a prioridade com que os pacotes serão encaminhados através dos nós da rede;

- Condicionar os pacotes nos limites da rede de acordo com os requerimentos de cada serviço, como por exemplo, monitoramento, política e conformação de tráfego. Dessa forma, cada pacote vai ter um comportamento num determinado nó, e isso é conhecido como “*per-hop behaviors*”, ou PHB. Muitos padrões de PHB estão em desenvolvimento no Internet Engineering Task Force (IETF), como por exemplo, o *Expedited Forwarding* (EF), ou “encaminhamento agilizado”, e *Assured Forwarding* (AF), ou “encaminhamento garantido”.

O campo DS é mostrado na Figura 4.2. Como podem ser visto, seis bits são usados como código para determinar o PHB que determinado pacote vai ter em cada nó da rede. Dois bits não são usados ainda.



Figura 4.2 - Campo DS do cabeçalho do IPv4.

**DSCP:** differentiated services codepoint

**NU:** Não usado atualmente

Serviços diferenciados tem sido o modelo mais utilizado para implementação de QoS. Ele exige menos dos roteadores, necessitando pouca atualização de software para prover bons métodos de classificação, policiamento, montagem e remarcação de pacotes [RNP 07].

#### 4.4 Qualidade de Serviço em Redes de Sensores sem Fio

Em uma rede de sensores sem fio, os sensores detectam eventos que são empacotados e enviados a um nó sorvedouro, através de um trajeto que consiste de múltiplos saltos em uma rede de comunicação sem fio. Pesquisas têm proposto esquemas para oferecer as funcionalidades exigidas para executar eficientemente essas operações. Para distribuir os dados ao nó sorvedouro, foram propostos vários esquemas, mostrados na

seção 3. Todos esses trabalhos objetivam reduzir o consumo de energia, provendo funcionalidade mínima para a rede.

Em uma rede de sensores, diferentes pacotes de dados podem ter diferentes importâncias. Por exemplo, se um sensor de temperatura em uma floresta, sentir 20°C em um dia normal de primavera, o valor é esperado. Por outro lado uma temperatura de 90°C na mesma situação é inesperada e poderia significar a eminência de fogo na floresta. Do ponto de vista da rede de sensores, o pacote que contém a temperatura de 90°C é mais importante do que o pacote que contém a temperatura de 20°C.

Para os pacotes que contêm a informação com importância mais elevada, a rede deve fazer um esforço maior para entregá-los. Isto significa que embora a entrega dos dados necessite ser eficiente em termos de energia, o custo de energia pode variar de acordo com a importância da informação. Isto destaca uma necessidade de ter Qualidade de Serviço (QoS) em redes de sensores.

Para as redes de computadores o modelo de Serviços Integrados (*IntServ*) e Serviços Diferenciados (*DiffServ*) descritos acima existem para fornecer a Qualidade de Serviço na rede. A diferenciação do serviço em redes cabeadas tipicamente afeta as decisões de escalonamento de pacotes. O escalonamento de pacotes baseado na prioridade do pacote ou na prioridade do fluxo traduz em um serviço melhor (nos termos da largura de banda, atraso, jitter, etc.). Desde que os meios cabeados são virtualmente sem erros, uma vez que um pacote é transmitido, alcançará com segurança seu *hop* seguinte.

Em redes de sensores, o escalonamento de pacotes não é um dos interesses principais. Tipicamente um nó sensor não tem muito espaço para armazenar pacotes em seu buffer e em conseqüência, os nós próximos ao nó sorvedouro sofreriam com os descartes de pacotes de menor prioridade e os serviços para pacotes de menor prioridade não seriam atendidos. Assim, a questão de quando escalonar um pacote para fornecer a diferenciação do serviço, não se levanta em rede de sensores.

O meio de comunicação em redes de sensores é sem fio, que tende a mais erro do que as ligações cabeadas. Além disso, devido à distribuição dos sensores em terreno desconhecido, comportamento das conexões sem fio pode ser altamente imprevisível e

poderia ter taxas de erro mais elevadas do que esperado. Embora houvesse um nó destinado do próximo *hop* para que cada pacote alcance o nó do sorvedouro, o pacote pode ser perdido ao longo do caminho. Assim para redes de sensores dois parâmetros básicos da diferenciação do serviço seriam:

**Confiabilidade na Entrega:** Um pacote de prioridade mais elevada deve ter uma probabilidade mais elevada de alcançar o nó sorvedouro. A probabilidade de um pacote alcançar o nó sorvedouro seria baseada tipicamente nas taxas de erro da conexão sem fio ao longo de seu trajeto da fonte ao destino.

Nas redes de computadores, a maneira principal de fornecer a confiabilidade é com o uso de reconhecimentos que trabalham geralmente em uma base fim-a-fim usando TCP.

Para redes de sensores, um esquema fim-a-fim de reconhecimento não pode trabalhar eficientemente, porque a probabilidade de alcance do nó fonte ao *sink* se reduziria significativamente com sua distância de *hops*. O número previsto das transmissões em tal caso seria elevado. No lugar, se usar um mecanismo de reconhecimento de *hop-por-hop*, o número das retransmissões dependeria somente do erro de canal local e o número das retransmissões seria menor. Mais adiante, um esquema baseado no reconhecimento requer que um pacote fique armazenado em um nó, até que um reconhecimento para o pacote seja recebido. Uma quantidade limitada de memória pode fazer armazenamento dos pacotes em um nó sensor serem impraticável quando a carga de tráfego na rede é muito alta.

**Latência:** Um pacote de prioridade elevada deve alcançar o nó sorvedouro com uma latência mais baixa do que um pacote de baixa prioridade. Isto significaria que um pacote de prioridade baixa poderia examinar de uma rota com um atraso maior para abrir um caminho para pacotes de uma prioridade mais elevada. Dessa forma os pacotes de baixa prioridade seriam desviados do trajeto de rota mais curta.

Em redes de sensores a latência é dependente do erro do canal junto com o atraso de propagação. Por exemplo, se um esquema fornecesse a entrega confiável através de retransmissões e reconhecimentos, o valor esperado de retransmissão dependeria da taxa de erro do canal e a latência esperada dependeria do número de retransmissões. Isto é diferente

da latência em redes de computadores que depende tipicamente do atraso da propagação e atraso no enfileiramento ao longo de seu trajeto.

O mecanismo da diferenciação de serviço em redes de sensores deve ser capaz de entregar a informação com uma confiabilidade e uma latência baseadas em sua importância. Os métodos tradicionais para a entrega de dados como *flooding* e *forwarding* por caminho único não levam em consideração a prioridade do pacote e assim seus níveis de desempenho não mudam em função da importância do pacote.

Para um mecanismo de *forwarding* por caminho único, se a probabilidade de chegada ao longo do caminho do *forwarding* for maior do que o nível desejado, então o pacote pode alcançar o destino com probabilidade de chegada desejada.

O *flooding*, por outro lado, pode alcançar um grau muito mais elevado de confiabilidade, mas os custos gerais incorridos são significativos. Usar caminho único para pacotes de prioridade baixa e o *flooding* para pacotes de prioridades mais elevadas, não fornece uma transição elegante, nos termos da confiabilidade alcançada e de custos gerais ocorridos.

Um esquema do *forwarding* que usa um caminho único usaria tipicamente o trajeto mais curto. Assim para todos os pacotes que entrega com sucesso, a latência seria mínima e mesma para todos os pacotes independente da prioridade do pacote. A energia é consumida nos nós ao longo do trajeto mais curto mesmo por pacotes insignificantes. Por outro lado, no *flooding*, não há nenhuma maneira de controlar a latência na entrega dos dados. O valor esperado da latência remanesceria o mesmo para todos os pacotes dependendo da taxa de erro do canal. Tratar a latência como um parâmetro de serviço significa que a rede deve ter o controle sobre os trajetos feitos pelos pacotes. Por exemplo, os pacotes com prioridade mais baixa podem ser distribuídos ao longo de um trajeto mais longo da latência, para conservar a energia ao longo do trajeto mais curto para pacotes de prioridade mais elevada.

Para redes de computadores existem dois mecanismos diferentes para garantir Qualidade de Serviço: *IntServ* e *DiffServ*. Nós discutimos as implicações de adaptar estes mecanismos que fornecem Qualidade de Serviço em redes de computadores, para redes de sensores.

**Modelo *IntServ*:** Aplicar-se um modelo como o *IntServ* para as redes de sensores requereria a manutenção dos estados por - fluxo em cada nó sensor. Dado a quantidade limitada de memória em um sensor e um grande número de sensores em um campo, não é possível manter estados para os fluxos em redes de sensores.

**Modelo *DiffServ*:** O conceito de *DiffServ* pode ser adaptado facilmente para redes de sensores. O nó fonte sabe o grau de importância de cada pacote que está emitindo que pode traduzir em níveis predefinidos de prioridade. Marca o nível de prioridade em cada pacote, os outros nós sensores usariam a prioridade do pacote para decidir o tipo do serviço que deve fornecer ao pacote. Este tipo de modelo é altamente escalável porque não importa o número dos sensores em um campo, um nó *forwarding* só sustentará um pacote em qualquer instante do tempo.

#### 4.4.1 Exigências de QoS em Redes de Sensores sem Fio

A rede de sensor sem fio é um membro novo da família das redes de dados sem fio com algumas características e exigências específicas. Uma rede de sensor sem fio genérica é composta de um grande número de nós sensores espalhados em um terreno de interesse. Cada um deles tem a capacidade de coletar dados sobre uma condição ambiental, isto é, temperatura, pressão, umidade, ruído etc., e emitir dados a um nó do *Sink*.

Visto que existe muitas aplicações previstas em RSSFs e suas exigências de QoS podem ser muito diferentes, é possível analisar uma individualmente, mas não pode se tratar de forma genérica. Também, é improvável que haja “um modelo apropriado para toda” solução da sustentação de QoS para cada aplicação. [CHE 04].

##### 4.4.1.1 *Desafios para a Sustentação de QoS em RSSF's*

Devido ao fato de que as RSSFs têm que interagir com o ambiente, pode-se esperar que suas características sejam muito diferentes de outras redes de dados convencionais. Assim, suas características originais particulares propõem os desafios como segue [CHE 04] [YOU 04].

- *Limitações Severas de Recursos de energia, largura de banda, memória, tamanho de buffer, capacidade de processamento, e poder limitado de*

**transmissão:** Dentre essas limitações, a energia, fornecida aos nós sensores por baterias, é um dos aspectos mais cruciais, uma vez que pode ser impossível de se substituir ou recarregar a bateria dos nós sensores, os quais podem ser implantados em terrenos ou áreas hostis ou de difícil acesso. Como consequência, essa limitação impõe uma exigência que é requisito de qualquer mecanismo de QoS em RSSFs: simplicidade. Os algoritmos que fazem uso intensivo de computação, protocolos caros de sinalização, ou que exigem manutenção de estados da rede não são praticáveis nas RSSF;

- **Tráfego Desbalanceado:** Na maioria das aplicações de RSSFs, o tráfego flui principalmente de um grande número de nós sensores para um subconjunto pequeno de nós sorvedouros (*Sink*). Os mecanismos de QoS devem ser projetados para operar nessas condições de desbalanceamento;
- **Redundância de Dados:** As RSSFs são caracterizadas pela alta redundância de dados gerados. Essa redundância, apesar de muitas vezes utilizada em mecanismos de suporte à segurança e tolerância a falhas, dissipa muita energia. A fusão dos dados ou a agregação dos dados é uma solução para redução da redundância, sem afetar a robustez da rede, porém esses mecanismos introduzem latência e maior complexidade ao projeto de QoS em RSSFs.
- **Dinamicidade da Rede:** A dinamicidade da rede pode surgir como decorrência de falhas em nós sensores, falhas da conexão sem fio, mobilidade de nós, e de transições de estado dos nós devido ao uso de esquemas eficientes de energia, que podem desligar/ligar nós em tempos diferentes, ou de reconfigurações da rede. Uma RSSF altamente dinâmica aumenta muito a complexidade de uma solução de QoS.
- **Balanceamento do Uso de Energia:** A fim de obter longevidade de rede, a carga de energia de uma RSSF deve ser distribuída uniformemente entre

todos os nós sensores, de modo que a energia de um nó sensor ou de um conjunto pequeno de nós não seja esgotada rapidamente.

- **Escalabilidade:** Em uma RSSF genérica, tipicamente, centenas ou milhares de nós sensores podem ser distribuídos em um terreno de forma compacta. Conseqüentemente, mecanismos de QoS projetados para RSSFs devem escalar para um grande número de nós sensores, isto é, os mecanismos de provimento de QoS não devem degradar rapidamente quando o número dos nós aumenta.
- **Múltiplos Sorvedouros (Sink):** Pode haver muitos nós sorvedouros, os quais impõem exigências diferentes das que são impostas pelos nós sensores na rede. Por exemplo, um sorvedouro pode pedir aos nós sensores situados ao noroeste da RSSF para enviar informações de temperatura a cada 10 minutos, enquanto um outro nó sorvedouro pode estar interessado em informações de pressão alta na área sudoeste. RSSFs devem ser capazes de atender diferentes níveis de QoS associados a diferentes sorvedouros.
- **Múltiplos Tipos de Tráfego:** Algumas aplicações podem requerer diferentes tipos de informação que, conseqüentemente, podem demandar diferentes tipos de sensores, com diferentes taxas de transmissão (temperatura, pressão, umidade, campo magnético etc., podem gerar tráfego com características distintas entre si). Esta multiplicidade de tipos de tráfego gera desafios no projeto de mecanismos de QoS.
- **Importância do Pacote de Dados:** O conteúdo de um pacote de dados que trafega pela RSSF deve refletir a importância do fenômeno físico capturado pelo nó sensor para que seja possível priorizar a sua entrega [SUD 01]. Os mecanismos de QoS devem ser capazes de identificar essas prioridades e de ajustar o sistema para atender a aplicação.

Em consequência, a sustentação de QoS para a rede pode ter que fazer exame ao menos de alguns dos desafios descritos acima.

#### 4.4.2 Protocolos de Roteamento ciente de QoS para RSSF's

Os protocolos que nomeiam os dados e consultam os nós baseando-se em alguns atributos dos dados são categorizados como *data-centric*. Muitos pesquisadores seguem este paradigma para evitar a sobrecarga de formação de *clusters*, ou o uso de nós especializados. Porém, os esquemas de nomeação, como o par atributo-valor, podem não ser suficientes para consultas complexas e eles normalmente são dependentes da aplicação. A padronização de um esquema eficiente de nomeação é uma importante direção para futuras pesquisas relacionadas a esta categoria.

Já os protocolos baseados em agrupamento dos nós em *clusters* empenham-se para transmitir dados eficientemente ao *sink*. Na maioria das vezes os *cluster heads* são nós especializados com maiores reservas de energia. Um *cluster head* realiza agregação nos dados coletados pelos nós de seu *cluster* e transmite para o *sink*. A formação dos *clusters* é o desafio mais interessante nas pesquisas da área, pois otimiza as métricas de consumo de energia e atraso. Os fatores que afetam a formação de *clusters* e a comunicação entre *cluster heads* são questões em aberto para pesquisas futuras. Outro problema para se explorar é a agregação de dados entre os *clusters*.

Os protocolos que utilizam informação de localização dos nós sensores são classificados como baseados em localização. O problema da utilização inteligente da informação de localização para ajudar o roteamento a economizar energia é o tópico principal de pesquisa.

Embora o desempenho desses protocolos seja promissor em termos de consumo de energia, mais pesquisas são necessárias para resolver o problema da qualidade de serviço (QoS) imposto pelos sensores de imagem e vídeo e pelas aplicações de tempo-real. O roteamento ciente de energia e QoS em redes de sensores garantirá largura de banda (ou atraso) durante a conexão e também fornecerá o uso de caminhos de menor custo. O roteamento com QoS nas redes de sensores possui diversas aplicações que incluem

rastreamento de alvos em tempo-real em batalhas, notificação de eventos críticos em aplicações de monitoramento, etc. Atualmente há pouca pesquisa no tratamento de requisitos de QoS em um ambiente com grandes limitações de energia como as redes de sensores.

#### **4.4.2.1 Sequential Assignment Routing (SAR)**

O *Sequential Assignment Routing (SAR)* é o primeiro protocolo para redes de sensores que inclui a noção de QoS em suas decisões de roteamento [AKY 02] [SOH 00]. É uma abordagem dirigida a tabelas e usa múltiplos caminhos para alcançar eficiência no consumo de energia e tolerância a falhas. O protocolo *SAR* cria árvores de nós levando em consideração métrica de QoS, energia residual em cada caminho e nível de prioridade de cada pacote. Através do uso de árvores, múltiplos caminhos são formados. Um desses caminhos é selecionado de acordo com os recursos de energia e a qualidade de serviço do caminho.

A recuperação de falhas é feita através da manutenção da consistência da tabela de roteamento entre os nós fonte e destino de cada caminho. Qualquer falha local ativa um procedimento de restauração de caminhos. O *SAR* mantém múltiplos caminhos dos nós para o *sink*. Esta abordagem garante tolerância a falhas, porém, o protocolo sofre com a sobrecarga para manter as tabelas e os estados em cada nó sensor, especialmente quando há um grande número de nós, tornando-se impraticáveis para redes com grande número de nós sensores [AKY 02] [AKK 04].

#### **4.4.2.2 Adaptive Forwarding Scheme (AFS)**

Em [SUD 01] foi introduzido o conceito de diferenciação de serviço nas redes de sensores sem fio e proposto o método *Adaptive Forwarding Scheme (AFS)* que usa a redundância como base para alcançar a confiabilidade e as aproximações usadas são *MultiPath Forwarding* e *Multipacket Forwarding*. O resultado da avaliação do mecanismo (AFS) mostrou ser muito promissor em termos de confiabilidades, mas quando o nível de confiabilidade desejado aumenta o número de pacotes transmitidos aumenta muito tendo um gasto de energia significativo, nos experimentos o *Adaptive Forwarding Scheme (AFS)*

mostrou ter custos gerais maiores que o método de *flooding* quando o nível de confiabilidade desejada é maior que 70% resultando em um enorme gasto de energia e nem um experimento foi feito em relação ao gasto de energia e latência.

#### **4.4.2.3 Prioritize Multipath Routing (PRIMAR)**

Em [XIA05] foi proposto o protocolo *PRIMAR (Prioritize Multipath Routing)* que tem como objetivo oferecer serviços diferenciados nas redes de sensores sem fio. Para isso, é utilizada a classificação de pacotes cientes de informação. Apesar do protocolo mostrar um bom desempenho na simulação, o protocolo focaliza apenas no atraso fim-a-fim e o método da seleção de rotas é feito de forma distribuída, ou seja, o processamento das rotas é realizado nos nós sensores e fazendo a seleção de rotas dessa maneira ocorre um gasto maior de energia com processamento e na troca de mensagens de controle para manter a tabela de roteamento atualizadas nos nós sensores.

#### **4.4.2.4 Outras soluções de QoS para Redes de Sensores e Atuadores Sem Fio**

Em [Hu 04], o paradigma de comunicação *anycast* é proposto, em que uma árvore *anycast* é construída em cada nó sensor. Essa árvore é atualizada dinamicamente de acordo com as ligações e permissões dos nós sorvedouros. Rotas são determinadas a partir de subscrição de interesse manifestado pelos nós sorvedouros. Já em [CAY 05] é proposto um protocolo de roteamento, ciente de energia, *muitos-para-muitos*, em que o atuador registra os tipos de dados de seu interesse, através do envio de uma mensagem de registro de tarefa - a partir disso, os sensores constroem suas tabelas de roteamento. Neste esquema, os dados capturados pelos nós sensores são enviados para cada atuador que mostrou interesse nesses dados.

O problema com as soluções para RSASF sumarizadas acima são a quantidade de tráfego que é gerado na rede. Mais ainda, essas soluções não exploram o potencial da interação entre sensores e atuadores, o qual poderia contribuir para a maior eficiência da rede quando da atuação no ambiente físico frente a situações de emergência.

Em [HAN 06] foi proposto ELRS: *An Energy-Efficient Layered Routing Scheme for Wireless Sensor and Actor Networks*, um esquema de roteamento ciente de energia para RSASF, em que atuadores enviam mensagem de estabelecimento de rotas para os sensores e estes armazenam as informações em tabela própria de roteamento. Quando um sensor precisa transmitir um dado para o atuador de sua área, ele escolhe um vizinho de forma aleatória, e o vizinho selecionado age da mesma forma até que o dado seja entregue ao atuador. Nesta solução, níveis de energia e atraso das rotas utilizadas não são levados em consideração, a eficiência na energia é alcançada usando os sensores de forma aleatória para entregar dados aos atuadores.

## 4.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os conceitos de QoS em Redes IP, RSSFs e RSASF, suas demandas e desafios, bem como protocolos cientes de QoS para RSASF existentes na literatura. Embora as soluções de QoS relatadas na literatura, como as mencionadas acima, se mostrem eficientes para RSSF, estas não podem ser aplicadas diretamente às RSASF. Características inerentes às RSASF, que incluem desde a estrutura heterogênea da rede (com os nós atuadores, sensores e sorvedouros), até a interação sensor-atuador e atuador-atuador, exigem soluções próprias de QoS.

No próximo capítulo, duas soluções de QoS serão apresentadas como parte deste trabalho. A primeira solução, QARP, processa as rotas nos nós sensores e não leva em consideração a taxa de recepção de pacotes na escolha do caminho de entrega dos dados. Já a segunda solução, QARP-CP, tira vantagem da existência dos nós atuadores para fazer o processamento das rotas nesses nós e também diferencia-se das soluções de QoS mencionadas acima em pelo menos três aspectos importantes: atende simultaneamente os requisitos da aplicação de baixa latência, alta confiabilidade de entrega, consumo uniforme de energia e tolerância a falhas; trata da *interação* entre sensor-atuador e atuador-atuador objetivando resposta ótima da rede às situações de emergência; e trata da seleção de rotas cientes de energia e de latência.

# 5 Projeto do QARP-CP, um Protocolo de roteamento ciente de QoS com Processamento Centralizado

---

## 5.1 Considerações Iniciais

Com os recentes avanços nas tecnologias de redes sem fio e sensores com capacidade de processamento e comunicação, as redes de sensores sem fio estão sendo amplamente utilizadas para o monitoramento de ambientes em diversas classes de aplicação [BOU 04] [MIN 01]. Uma das aplicações mais apelativas é o monitoramento de situações críticas. Em uma fábrica, por exemplo, é importante manter um monitoramento confiável do ambiente físico, especialmente quando surgem situações de emergência, quando na área existem as 3 entidades distintas: o combustível (aquilo que queima, como a madeira), o comburente (que permite a queima, como o oxigênio) e o calor que forma o fogo que podem levar a incêndios e perda de vidas humanas e de patrimônio. Nessas situações, é importante que as informações do ambiente possam ser “sentidas” enquanto o estado de emergência estiver em progresso, pois essas informações podem ser usadas pelos grupos de segurança ou resgate para o melhor gerenciamento da operação. Entretanto, para manter o fluxo de informações dos sensores durante uma emergência, uma solução de rede de sensores sem fio precisa tratar eventuais falhas nos nós sensores, que pode ocorrer devido a sensores queimados, comunicação prejudicada por interferências, esgotamento de energia, etc. Além de tolerante a falhas, uma rede de sensores para tais ambientes precisa ser confiável, oferecer baixa latência e economizar energia. Em termos de economia de energia, em um estado silencioso de monitoramento, os nós sensores podem ser programados para transmitir os dados em um esquema periódico (envie a temperatura a cada 5 minutos), ou podem seguir uma abordagem baseada em eventos (envie a temperatura apenas quando estiver acima de 60°C).

Algumas soluções existentes para economia de energia são baseadas no desligamento dos módulos de comunicação dos nós, os quais permanecem neste estado de “dormência” até serem “acordados” quando um evento desejado é acionado [INT 00]. Por

outro lado, em aplicações baseadas em consultas na rede, as consultas podem ser propagadas arbitrariamente aos nós sensores, e algumas soluções existentes para economia de energia não são adequadas, pois a transição de um estado de dormência para um estado de transmissão de dados pode ter um alto custo em termos de energia [CHT 02]. Além disso, a economia de energia e a tolerância a falhas podem apresentar interesses conflitantes quando novos caminhos, envolvendo nós dormentes, precisam ser rapidamente configurados devido às falhas em nós de outros caminhos.

Este capítulo descreve o QARP-CP um Protocolo de roteamento ciente de QoS com Diferenciação de Serviços e Processamento Centralizado, um protocolo de roteamento ciente de QoS para RSASF que pode ser empregado em aplicações baseadas em periodicidade, eventos e consulta. O QARP-CP provê baixa latência para a notificação de eventos, rápida reconfiguração de caminhos falhos, alta confiabilidade na entrega de pacotes com baixa dissipação de energia.

Ao oferecer baixa latência, alta confiabilidade mesmo na presença de falhas, e dissipação de energia uniforme, o QARP-CP torna-se uma boa escolha para as mais variadas áreas de aplicação como saúde (monitoramento de sinais vitais do corpo, instrumentação médica, localização de objetos e pessoas nas dependências de um hospital, etc), transportes (controle de tráfego, rastreamento de veículos, etc), militar (monitoramento do campo de batalha, apoio à tomada de decisões estratégicas em tempo real, etc), resgate e combate (monitoramento de situações críticas, como incêndios, prisões, etc), entre outras.

A rede de sensores é configurada através de uma árvore de *hops*, que é construída durante a fase de configuração inicial da rede. O paradigma *publish/subscribe* [EUG 03] é utilizado e adaptado para promover a interação entre os nós sensores, atuadores e o *sink*.

Este capítulo está organizado da seguinte forma: a Seção 5.2 descreve o algoritmo do QARP-CP dividido em quatro etapas. A Seção 5.3 discute os experimentos realizados, os cenários de simulação, métricas e resultados obtidos. Finalmente a Seção 5.4 conclui o trabalho.

## 5.2 Descrição de um Protocolo de Roteamento Ciente de QoS (QARP - *QoS-Aware Routing Protocol*)

QARP foi a primeira versão de um protocolo de roteamento ciente de qualidade de serviço implementada como parte deste trabalho, em que o processamento de rotas é realizado nos nós sensores.

O QARP é realizado em 3 passos: O primeiro passo envolve a construção de árvores de *hops* e a descoberta de rotas levando em consideração o nível de energia dos nós sensores e a latência entre cada nó sensor na transmissão. O algoritmo para a construção da árvore de *hops* é baseado no inundamento da rede, com o valor de *hop* iniciado nos atuadores, que é armazenado, incrementado e transmitido aos nós vizinhos (*broadcast*). Os nós vizinhos, por sua vez, armazenam, incrementam e transmitem o valor de *hop* recebido para seus nós vizinhos, e assim por diante, até que toda rede esteja configurada. O segundo passo inclui a propagação de subscrições pela rede. Após a configuração inicial da rede, a única informação que um nó possui é o nível de *hop* no qual ele está e a tabela de roteamento que contém informações para entregar dados de acordo com a prioridade do evento. Apenas esta informação não é suficiente para uma eficiente propagação de solicitações de subscrição. Na ausência de alguma informação sobre qual nó da rede possa satisfazer o interesse do *sink*, uma solução para propagar a subscrição inicial para o nó correto seria inundar a rede com o interesse. Devido a este fato, o QARP envia a mensagem de subscrição inicial na etapa de configuração da rede. Finalmente, o último passo é responsável pela entrega de dados dos sensores ao *sink* que utiliza rotas mais rápidas para pacotes de prioridade alta (obtendo menor latência) e rotas de baixo custo para pacotes de prioridade menor (economizando energia da rede). Durante este passo, é realizado também o reparo de caminhos caso algum nó falhe. Além disso, na entrega de pacotes de notificação os nós atualizam sua tabela de roteamento com os novos valores recebidos de energia e latência dos nós usados para entrega de pacote de notificação ao nó sorvedouro.

O QARP se mostrou eficiente em termos de latência e taxa de entrega. Entretanto, um dos problemas do QARP é a realização do cálculo das rotas cientes de qualidade de serviço de forma distribuída nos nós sensores, o que gera maior tráfego na rede com mensagens de controle, além de maior custo para manter as rotas atualizadas. Mais ainda, o

QARP não considera a taxa de recepção de pacotes no processamento da rota mais apropriada para entrega de pacotes diferenciados. Assim, um novo protocolo foi projetado, que é descrito na próxima seção.

### 5.3 Descrição do Protocolo de Roteamento Ciente de QoS com Processamento Centralizado nos Atuadores (*QARP-CP - QoS-Aware Routing Protocol with Centralized Processing*)

O QARP-CP é um protocolo para redes de sensores e atuadores sem fio que visa atender, simultaneamente, os principais requisitos de classes de aplicações de supervisão e controle, que utilizam RSASF para monitoramento e controle de ambientes físicos sujeitos às situações de emergência. Os requisitos atendidos incluem: baixa latência e confiabilidade na entrega de pacotes, reparo rápido de caminhos na presença de falhas, e economia de energia com gasto uniforme.

O algoritmo de roteamento QARP-CP é realizado em quatro fases. A primeira fase envolve a construção das árvores de saltos (*hops*). O nó sorvedouro inicia a configuração da rede emitindo um sinal para os nós atuadores. Os nós atuadores, ao receberem esse sinal, iniciam o processo de construção das árvores de saltos, que serão usadas para propagação de mensagens de subscrição e de dados na rede. A construção dessas árvores leva a uma divisão da rede em áreas de atuação (sub-redes), como mostra a Figura 5.2. A segunda fase consiste da coleta de informações das sub-redes e sua entrega ao atuador da área. A terceira fase é responsável pelo processamento das informações coletadas na fase 2, gerando como resultado o estabelecimento de rotas. Finalmente, na quarta e última fase, os dados dos sensores são entregues ao Atuador/Sorvedouro utilizando rotas mais rápidas para pacotes de prioridade 1 (obtendo menor latência), rotas mais confiáveis na entrega para pacotes de prioridade 2 (através de rotas com maior taxa de entrega) e rotas de baixo custo para pacotes de prioridade 3 (economizando energia da rede). As prioridades podem ser alteradas pela aplicação, podendo inclusive haver combinação de requisitos (por exemplo, seleção de rota de menor latência e de maior taxa de recepção). Durante a fase 4, pode ser realizado o reparo de caminhos em caso de ocorrência de falhas, além da atualização da

matriz de adjacência, que registra as rotas determinadas nos atuadores. As quatro fases do QARP-CP são descritas a seguir.

### 5.3.1 Construção das Árvores de Saltos

Na fase de construção das árvores de saltos, a área considerada é dividida em sub-áreas de atuação em que é configurado o nível de salto de cada nó sensor. Isso é feito a partir dos nós atuadores, logo após receberem do nó sorvedouro o sinal de configuração da rede. Os nós atuadores enviam então, através de inundação, uma mensagem MCHDR (*Mensagem de Configuração de Hops e Divisão da Rede*) para configuração de saltos e divisão da rede em áreas de atuação. A mensagem MCHDR é mostrada na Figura 5.1 e descrita abaixo:



Figura 5.1 Formato da Mensagem MCHDR.

Onde:

- **ID\_A** - Identificador do Atuador que iniciou a mensagem MCHDR;
- **HOP** - Número de saltos pelos quais a MCHDR passou. HOP é iniciado com valor 0 no Atuador e incrementado de 1 cada vez que a MCHDR passa por um sensor;
- **TLM** - Indica o tempo de vida da mensagem MCHDR na rede, equivalente ao número máximo de hops que a mensagem MCHDR pode atingir na área de atuação do Atuador.

Na fase de construção das árvores de saltos, os nós sensores gravam os parâmetros ID\_A e HOP em sua tabela de Roteamento. O algoritmo para a construção da árvore de saltos é baseado na inundação da rede, com um valor de HOP iniciado no Atuador, que é armazenado, incrementado e transmitido aos nós vizinhos (através de difusão). Os nós vizinhos, por sua vez, armazenam, incrementam e transmitem o valor de HOP recebido para seus nós vizinhos, e assim sucessivamente, até que toda a rede esteja configurada, como mostra a Figura 5.2.

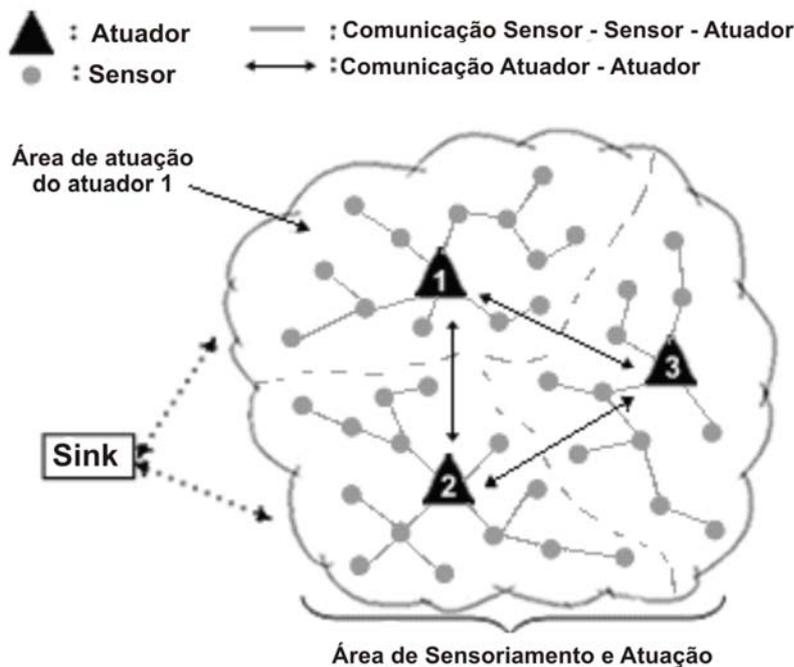


Figura 5.2 Construção das árvores de saltos e divisão em áreas de atuação.

Como a comunicação entre os nós da rede é realizada através da difusão de sinais de rádio (RF), todos os nós vizinhos recebem a transmissão. Dessa forma, um nó que acabou de transmitir uma mensagem, pode receber a mesma mensagem de seu vizinho, gerando um caminho fechado (*loop*). Para evitar essas transmissões inúteis e que geram gasto de energia, um conjunto de regras foi estabelecido como parte do algoritmo de difusão de *HOP*. Uma das regras locais estabelece que cada nó, ao receber uma transmissão com o *HOP*, compara o *HOP* recebido com o seu *HOP* local. Se o valor do *HOP* local for maior que o valor recebido, o nó atualiza seu *HOP*, incrementa seu valor e o retransmite para seus vizinhos. No caso do *HOP* armazenado no nó ser menor ou igual ao *HOP* recebido, o nó não atualiza seu *HOP* e não transmite, mas quando o *HOP* armazenado no nó for menor do que *HOP* recebido ele armazena o ID do nó que transmitiu a MCHDR como vizinho de nível de salto maior, para ser usado na segunda fase do algoritmo. A primeira fase termina quando o campo *HOP* tiver o mesmo valor que o campo *TLM* da mensagem MCHDR. Os nós sensores que receberem as mensagens MCHDR com os campos *TLM* e *HOP* de mesmo valor são chamados de nós folhas da área e são eles os responsáveis por iniciarem a segunda fase da configuração da rede.

### 5.3.2 Coleta de Informações da Rede

Os nós sensores responsáveis pela inicialização da segunda fase transmitem para seus vizinhos de nível de hop menor, da mesma área de atuação, uma Mensagem de Coleta de Informações de Rede (*MCIR*) mostrada na Figura 5.3 que tem os seguintes parâmetros:

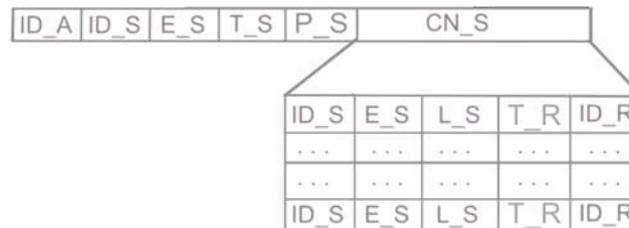


Figura 5.3 Formato da Mensagem *MCIR*.

Onde:

- ***ID\_A*** - Indica para qual Atuador será encaminhada à mensagem **MCIR**;
- ***ID\_S*** - Denota o Identificador do Sensor que transmitiu a **MCIR**;
- ***E\_S*** - Denota a Quantidade de Energia disponível no sensor que transmitiu a **MCIR**;
- ***T\_S*** - Denota o tempo em que a mensagem **MCIR** foi transmitida;
- ***P\_S*** - Denota a Quantidade de pacotes enviados para o sensor **ID\_R**;
- **CNs** - Conjunto de informações coletadas nas retransmissões anteriores das mensagens **MCIR**;
- ***L\_S*** - Denota o tempo decorrente entre o envio da **MCIR** pelo sensor transmissor até a recepção da mensagem pelo sensor receptor, o calculo é o Tempo Corrente menos o ***T\_S***;
- ***T\_R*** - Denota a Taxa de Recepção - o calculo é a divisão das mensagens recebidas pelo nó **ID\_R** pela quantidade de mensagens enviadas pelo nó **ID\_S** para o nó **ID\_R**;
- ***ID\_R*** - Denota o Identificador do Sensor que recebeu a **MCIR** do **ID\_S**.

Cada nó sensor, ao receber uma mensagem **MCIR** de seus vizinhos de nível de salto maior, monta um pacote de dados com as informações recebidas (no campo CNs). Após receber as **MCIR** de todos os vizinhos de nível de salto maior, o nó encaminha para

seus vizinhos de nível de salto menor uma nova mensagem **MCIR** com as informações coletadas nas retransmissões anteriores das mensagens **MCIR**. Esse processo é repetido até que as mensagens **MCIR** sejam entregues ao atuador da área correspondente, conforme mostrado na Figura 5.4.

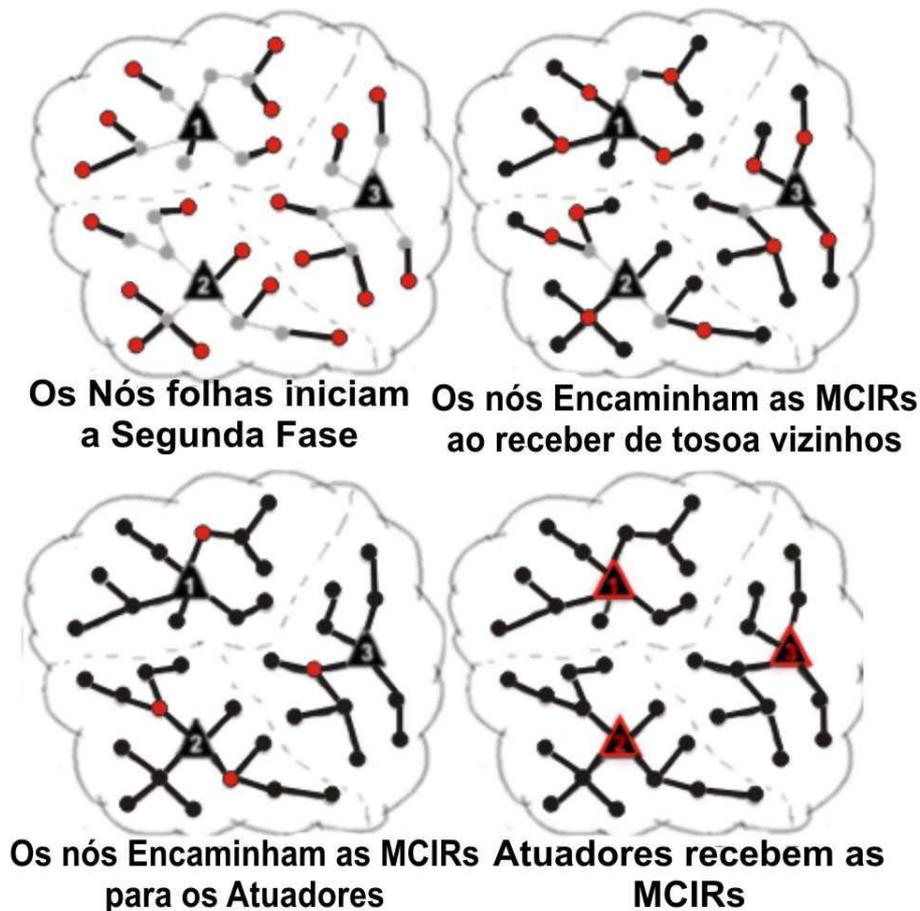


Figura 5.4 Exemplo da fase de coleta de informações da rede.

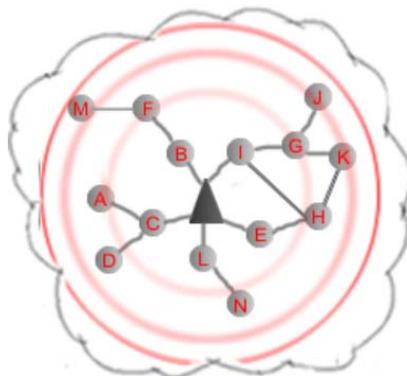
Após o recebimento das mensagens **MCIR** pelos atuadores, estes iniciam a terceira fase da configuração da rede, descrita a seguir.

### 5.3.3 Processamento das Informações Coletadas na Rede e Estabelecimento de Rotas

Após a segunda fase da configuração da rede os nós atuadores têm informações dos nós sensores que estão na sua área de atuação, tais como: nível de energia, taxa de recepção e latência entre os nós sensores que se comunicam entre si. Com esses parâmetros, os nós atuadores iniciam a primeira etapa da terceira fase que é a construção da matriz de

adjacências com os parâmetros coletados da segunda fase para representar a sub-rede computacionalmente - essa matriz representa um grafo da estrutura da sub-rede. O grafo é definido como  $G=(N,A)$  onde  $N$  corresponde aos nós da rede (vértices) e  $A$  corresponde às conexões entre dois nós (arestas).

Os grafos são representados através de uma matriz de adjacências armazenada nos atuadores. Assim, é possível para cada atuador, saber todas as rotas possíveis a partir de cada nó sensor da sua área de atuação até ele próprio. Com isso, os atuadores iniciam a segunda etapa da terceira fase, em que os nós atuadores executam um algoritmo de escolha de rotas. Esse algoritmo percorre a matriz que representa a sub-rede, analisando o nível de energia, latência e a taxa de recepção de cada trajeto. Após essa análise é gerado como resultado um pacote com a informação das melhores rotas para determinado tipo de tráfego. Os atuadores então, através de uma única mensagem, enviam o pacote na mensagem de estabelecimento de rotas (**MER**), conforme mostra a Figura 5.5. Os nós sensores da área de um atuador, ao receberem o pacote de estabelecimento de rotas, constroem suas tabelas de roteamento. Um exemplo de tabela de roteamento é mostrado na Tabela 1.



**Figura 5.5– Envio de Mensagem de Estabelecimento de rotas (MER)**

**Tabela 1 Exemplo de Tabela de Roteamento do Nó K da Figura 5.5**

Prioridade	Próximo Nó
1	H
2	G
...	...
...	...

Após a construção da tabela de rotas em cada nó sensor, a terceira fase é finalizada e a rede está pronta para a fase de disseminação de dados com QoS, descrita na próxima seção.

### 5.3.4 Entrega de Eventos aos Atuadores

Quando um evento é capturado do ambiente físico por um nó sensor, este verifica sua tabela de subscrições de interesses para determinar se existe algum interesse registrado para aquele evento. Em caso afirmativo, o nó monta um pacote de notificação e o envia para o atuador, através de rota selecionada na terceira fase de acordo com a prioridade do pacote, ou seja, de acordo com os requisitos exigidos para a entrega do evento detectado, conforme mostra a Figura 5.6.

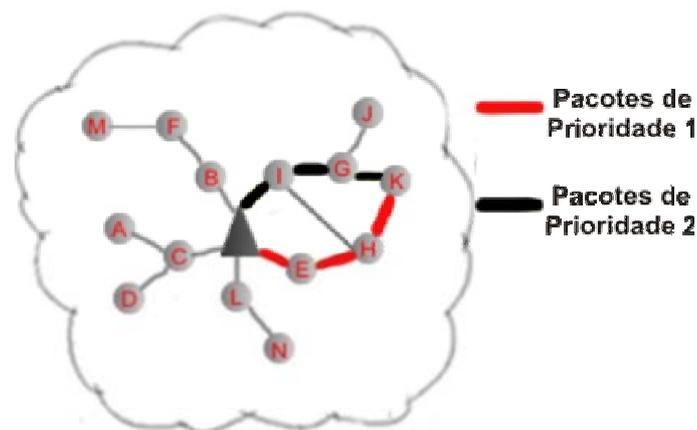


Figura 5.6 Exemplo de seleção de rotas

Juntamente com as informações de sensoriamento a mensagem de notificação tem um campo “informações da rede” onde são gravadas informações sobre o nível de energia, taxa de recepção e latência ocorridas entre cada nó sensor percorrido pela mensagem para a entrega da notificação ao atuador. Ao receber a mensagem de notificação, o atuador realiza interpretação de contexto para determinar se precisa atuar no ambiente. O atuador atualiza então a sua matriz de adjacências e encaminha a mensagem para o nó sorvedouro.

Os Atuadores estarão com sua matriz de adjacências sempre atualizada devido ao fato de que toda vez que os nós sensores forem usados para entregar uma mensagem de notificação ao atuador, esta mensagem trará no campo “informações da rede” os novos parâmetros da rede, por onde essa mensagem de notificação passou. Sempre que necessário, os nós atuadores executarão a segunda etapa da terceira fase para escolher

novas rotas, caso alguma rota que esteja sendo usada para a entrega de mensagens de notificação de um determinado tipo de prioridade não satisfizer mais o requisito exigido.

No caso de ocorrência de falhas nos nós que perfazem os trajetos, o nosso algoritmo usa a solução descrita em [BOU 06] para a seleção de um novo caminho temporário até que o atuador seja avisado que o nó falhou. O atuador saberá que o nó falhou assim que a mensagem de notificação chegar pelo caminho temporário e com isso o atuador retira o nó que falhou de sua matriz de adjacências e executa a segunda etapa da terceira fase do algoritmo para restabelecer as rotas.

## 5.4 Experimentos de Simulação

Esta Seção descreve a investigação da performance do QARP-CP através de um extenso conjunto de experimentos de simulação. Os resultados foram comparados com dois outros protocolos de roteamento baseados em QoS: o QARP [BOU 06], uma versão de nosso protocolo para RSASF ciente de QoS com processamento de rotas descentralizado, i.e., o processamento de rotas é realizado nos nós sensores; e com o PRIMAR [XIA 05], um protocolo que utiliza classificação de pacotes em prioridades com o objetivo de oferecer serviços diferenciados nas redes de sensores sem fio. Os objetivos principais dessa comparação são: avaliar o desempenho do QARP-CP em relação ao PRIMAR usando como métricas a Latência, Taxa de Perda de Pacotes e Custos (*Overhead*) de mensagens de controle; e avaliar o desempenho do QARP-CP em termos de escalabilidade e mostrar que o processamento das rotas de forma centralizada é mais eficiente do que a descentralizada em diferentes cenários de simulação.

### 5.4.1 Cenário de Simulação e Métricas

Para avaliar o desempenho do QARP-CP em relação ao PRIMAR e o QARP, o cenário de simulação é o mesmo usado em [XIA.05], e consiste de uma área de 200x200 metros, com 100 nós sensores, implantados aleatoriamente na área. Dez nós sensores foram escolhidos aleatoriamente como nós produtores de eventos com taxa de 1 pacote por segundo. Para testar o desempenho em diferentes condições de congestionamento, nós

escolhemos um outro nó qualquer, também aleatoriamente, com taxa de 1 pacote por segundo aumentando gradualmente a 100 pacotes por segundos.

A Tabela 2 contém os parâmetros utilizados na simulação.

O QARP-CP, o QARP e o PRIMAR foram simulados no simulador de redes NS-2 com os mesmos valores e cenários.

**Tabela 2 Parâmetros de simulação.**

Parâmetros	Valores
Número de nós Sensores	100
Numero de nós Produtores	10
Alcance do rádio do Sensor	40 m
Energia para transmissão	14.88 mW
Energia para recepção	12.50 mW
Energia em modo ocioso	12.36 mW
Energia em modo <i>Sleep</i>	0.016 mW
Largura de Banda	200Kb/s
Tamanho dos Pacotes	32 bytes

As seguintes métricas foram implementadas na simulação:

- **Custo de mensagens de controle:** define o número de mensagens de controle transmitidas para manter a rede atualizada;
- **Atraso Fim-a-Fim:** é definido como o tempo em que o pacote ficou na rede, desde o momento em que ele foi gerado até o momento em que ele foi entregue ao nó sorvedouro.
- **Taxa de perda de Pacotes:** É definido como a razão do número de pacotes perdidos antes de ser entregue ao nó *sink* pelo numero total de pacotes gerados por todos nós fontes.

## 5.4.2 Resultados Obtidos

### 5.4.2.1 Custos de Mensagens de Controle

Mensagens de controle são usadas para configurar a rede e para manter atualizada a tabela de roteamento dos nós sensores. A métrica “Custos de Mensagens de Controle” é

importante, pois existe uma relação com o custo de energia, latência e taxa de perda de pacotes. Essa métrica é usada para mostrar a eficiência do QARP-CP x PRIMAR x QARP em relação ao custo que cada algoritmo tem para manter as funcionalidades da rede. Esses custos são avaliados, através do número de mensagens de controle que são transmitidas para configurar a rede e manter atualizadas as tabelas de roteamento dos nós sensores. A Figura 5.7 mostra que o QARP-CP é quase três vezes mais eficiente que o PRIMAR e também que o QARP. A eficiência do QARP-CP é devida principalmente ao fato do QARP-CP fazer a seleção das rotas de modo centralizado no Atuador/Sorvedouro.

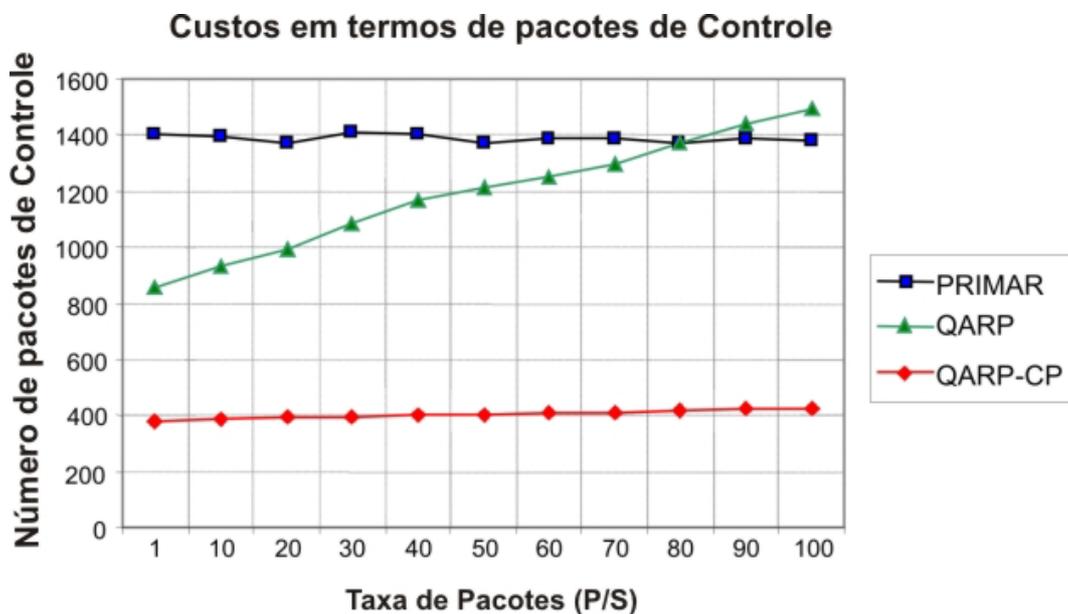


Figura 5.7 Custos de Controle: QARP-CP X QARP x PRIMAR.

A vantagem do QARP-CP ser quase três vezes mais eficiente que o PRIMAR e QARP, como mostrado na Figura 5.7, tem um impacto na longevidade da rede, pois a transmissão é o que consome mais energia de um nó sensor. Além disso, o impacto é sentido também na latência e na perda de pacotes, pois quanto menor for o número de mensagens de controle enviadas, menor será o tráfego na rede. A Figura 5.8 mostra a eficiência do QARP-CP em relação ao PRIMAR em termos de latência e a Figura 5.9 mostra a eficiência do QARP-CP em relação ao PRIMAR em termos de taxa de perda de pacotes.

#### 5.4.2.2 Atraso Fim-a-Fim

Esta métrica reflete o tempo que a RSSF necessita para informar o observador da ocorrência de um determinado fenômeno – no caso, o atuador da área monitorada. Algumas aplicações são sensíveis à latência e necessitam de tempos de resposta curtos (ex: monitoramento de *tsunamis*). Como mostra a Figura 5.8, o QARP-CP demonstra ter um melhor desempenho na entrega de mensagens em termos de latência. Isto se deve ao fato de que no PRIMAR, a transmissão de mensagens de controle é de quase três vezes mais do que no QARP-CP, e essas mensagens de controle aumentam o tráfego na rede, aumentando também o atraso fim-a-fim. Mais ainda, a escolha dos trajetos também impacta na latência.

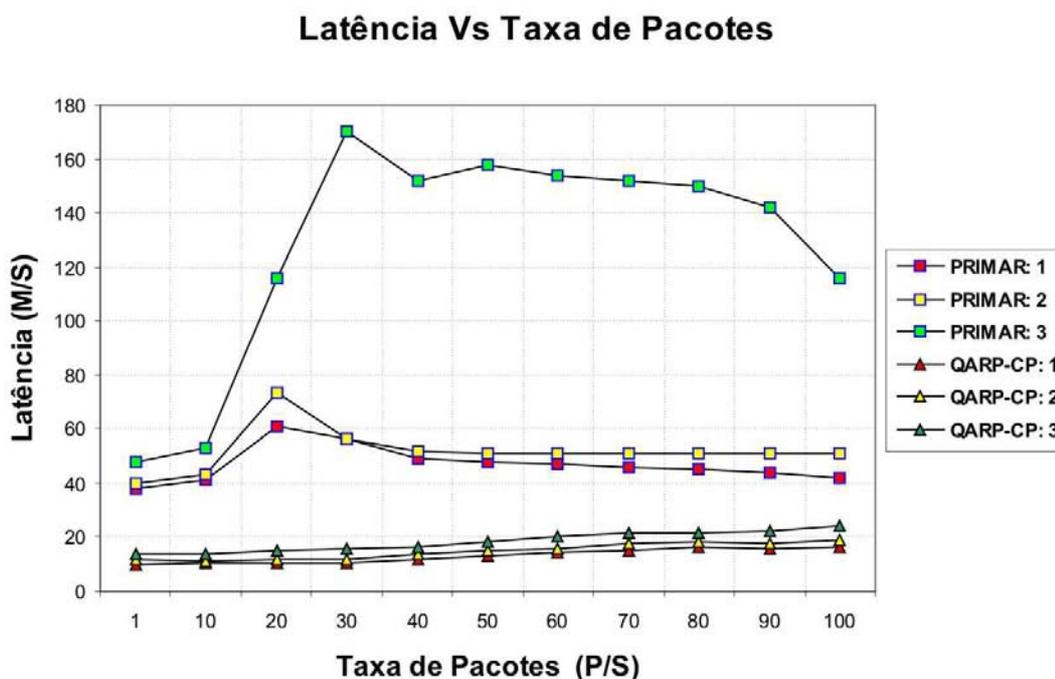


Figura 5.8 Atraso Fim-a-Fim: QARP-CP vs PRIMAR.

No QARP-CP, pacotes de prioridade 1 escolhem dentre todos os trajetos possíveis aquele de menor latência; pacotes de prioridade 2 escolhem dentre todos os trajetos possíveis o de maior taxa de recepção; e pacotes de prioridade 3 escolhem trajetos com o maior nível de energia.

### 5.4.2.3 Taxa de Perda de Pacotes

Essa métrica reflete a porcentagem de pacotes perdidos antes de alcançarem o *sink*. O QARP-CP mostra-se melhor que o PRIMAR em termos de taxa de perda de pacotes com carga de tráfego baixa e alta como mostra a Figura 5.9. A taxa de perda de pacotes no PRIMAR aumenta para quase 15% quando a carga do tráfego é aumentada para 30 Pacotes por segundos, enquanto que o QARP-CP tem uma taxa de perda de quase 2% para carga de tráfego de 30 Pacotes por segundos. O QARP-CP começa aumentar a sua taxa de perda de pacotes quando a carga de tráfego é maior que 60 pacotes por segundos, mas ele se mantém mais eficiente que o PRIMAR.

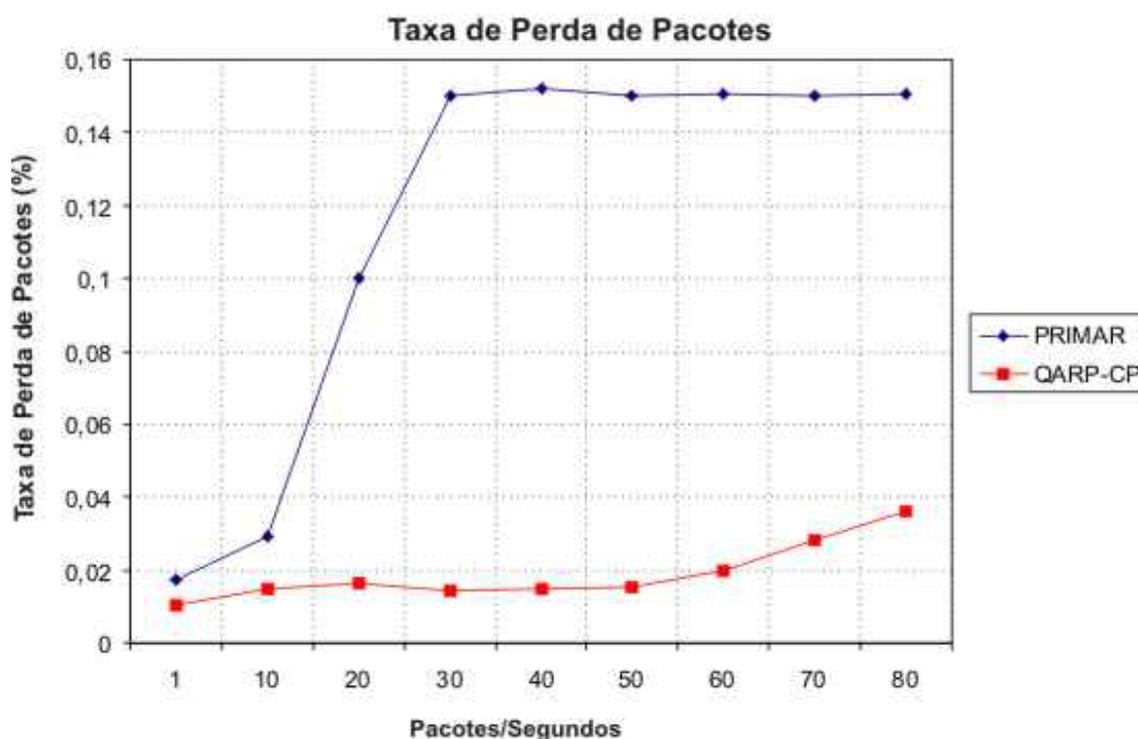


Figura 5.9 Taxa de perda de Pacotes: QARP-CP vs PRIMAR.

A média de perda de pacotes no PRIMAR para a carga de tráfego considerada, variando de 1 a 80 pacotes por segundos tem uma taxa de perda de aproximadamente de 11% enquanto que o QARPC tem uma taxa de perda de pacotes de aproximadamente 2% mostrando ser cinco vezes e meia mais eficiente que o PRIMAR.

Essa vantagem que o QARP-CP obteve em relação ao PRIMAR deve ser pelo fato de que no PRIMAR, a transmissão de mensagens de controle é de quase três vezes mais do que no QARP-CP, e essas mensagens de controle aumentam o tráfego na rede, aumentando também as colisões. Além disso, quando o tráfego na rede aumenta, as filas dos nós sensores aumentam resultando em perda de pacotes no enfileiramento devido ao fato do nó sensor não ter capacidade de armazenar o pacote na fila. Como o QARP-CP realiza balanceamento de carga, as rotas são recalculadas e atualizadas. Com isso, a taxa de perda de pacotes diminui.

### 5.3.3 Análise de Desempenho do QARP-CP

Nessa análise consideramos um cenário de 600x600 metros, variando o número de nós sensores de 400 a 800 nós, implantados aleatoriamente na área. Foram utilizados também quatro nós atuadores, sendo eles implantados nas posições (150,150), (450,150), (150,450), (450,450), além de um nó sorvedouro na posição (600,300). 40 nós foram escolhidos aleatoriamente como nós produtores de eventos com taxa variando de 5 a 20 pacotes por segundo, sendo 10 nós produtores de evento para cada atuador. Os parâmetros de energia, largura de banda e tamanho de pacote são os mesmos mostrados na tabela 2. Todos os experimentos foram executados em 10 simulações e foram calculados a média aritmética e o intervalo de confiança para 95%. Os gráficos desta seção incluem os valores médios e o intervalo de confiança representado por barras de erros.

As seguintes métricas foram usadas para avaliação:

- **Taxa de Entrega:** definida como a razão entre o número de pacotes recebidos e o número de pacotes enviados.
- **Latência:** definida como o tempo de permanência do pacote na rede: do momento em que ele foi gerado até o momento em que ele foi entregue ao nó atuador.
- **Gasto de energia na disseminação de dados:** dissipação de energia quando os nós difundem os dados diretamente para o sorvedouro e quando os nós difundem para o sorvedouro, através dos atuadores.

#### 5.4.2.4 Confiabilidade de entrega

Conforme mostrado na Figura 5.10, o QARP-CP tem um bom desempenho na taxa de entrega de pacotes e a sua eficiência aumenta quando a densidade dos nós aumenta no campo sendo monitorado. Isto ocorre porque a inserção de nós aumenta o número de trajetos entre o nó fonte e o nó destino. Como o QARP-CP utiliza os melhores trajetos possíveis entre fonte e destino, com o aumento de nós sensores aumentam os números de trajetos e também as chances de se ter trajetos melhores em maior quantidade.

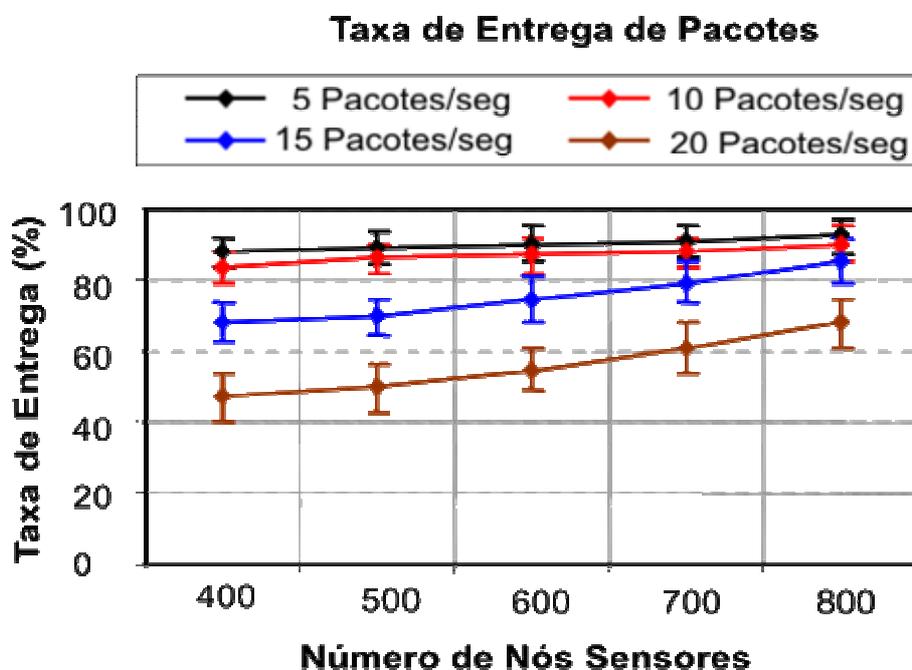


Figura 5.10 Taxa de Entrega.

Além disso, com o aumento do número de trajetos, há uma diminuição do número de pacotes perdidos por falta de espaço na fila de armazenamento de pacotes nos nós sensores quando de uma sobrecarga de tráfego – quando os nós começam a perder pacotes no enfileiramento por sobrecarga de tráfego, as rotas são recalculadas e atualizadas. Com isso, a taxa de entrega aumenta.

### 5.4.2.5 Latência

Podemos observar na Figura 5.11 que o QARP-CP se torna mais eficiente em termos de latência quando a densidade da rede aumenta, já que a inserção de nós sensores aumenta o número de trajetos entre fonte e destino e, por consequência, haverá um número maior de melhores trajetos em termos de latência.

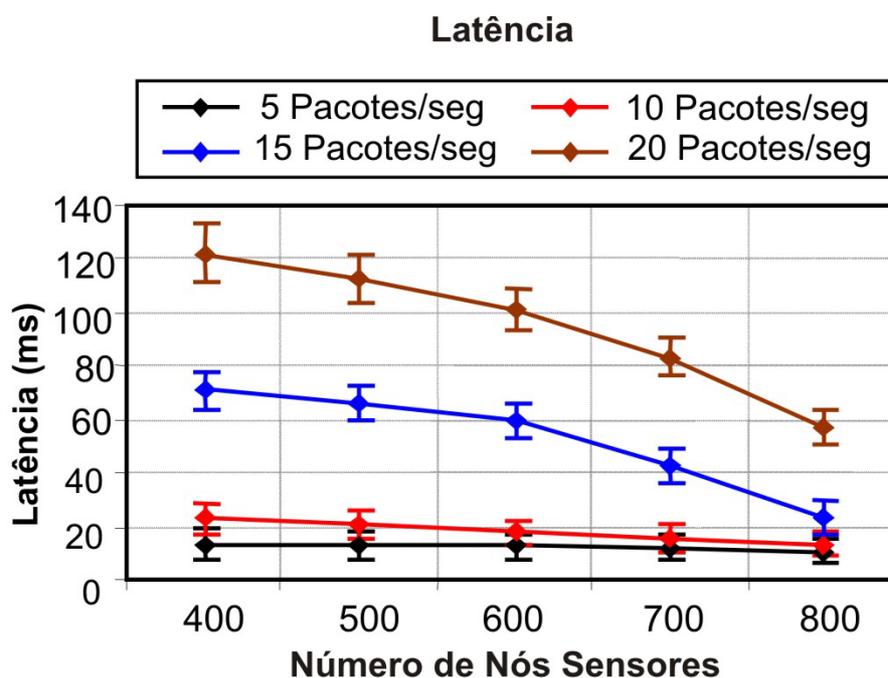


Figura 5.11 Latência.

Quando o tráfego na rede aumenta, os pacotes sofrem um atraso maior na fila resultando em uma latência maior. Como o QARP-CP realiza balanceamento de carga, se existir um número maior de sensores na área, esse atraso na fila vai ser menor, o que significa latência menor. Conforme mostra a Figura 5.11, com uma taxa de geração de 20 pacotes por segundos em uma rede com 400 nós, a latência é aproximadamente de 123 milissegundos. Com a mesma taxa de geração de pacotes, se a rede tiver 800 nós, a latência diminui para 57 milissegundos, ou seja, a latência diminui em aproximadamente 113%. Isso é conseguido devido ao balanceamento de tráfego que é realizado pelo QARP-CP que recalcula e atualiza as rotas quando a rede mostra sinais de sobrecarga.

#### 5.4.2.6 Gasto de Energia na Disseminação dos dados

Usamos essa métrica para mostrar que a inserção de atuadores na rede traz não só a vantagem de atuar no ambiente, mas também promove um tráfego mais equilibrado próximo do Sorvedouro. A energia restante nos nós sensores é medida ao longo de um determinado tempo de simulação e representada nas Figura 5.12 e Figura 5.13. O sorvedouro é colocado na coordenada (600,300), ou seja, no centro do lado direito da área a ser monitorada. 4 atuadores são colocados nas posições (150,150), (450,150), (150,450), (450,450).

A Figura 5.12 mostra a energia restante nas redes sem atuadores usando o algoritmo QARP-CP.

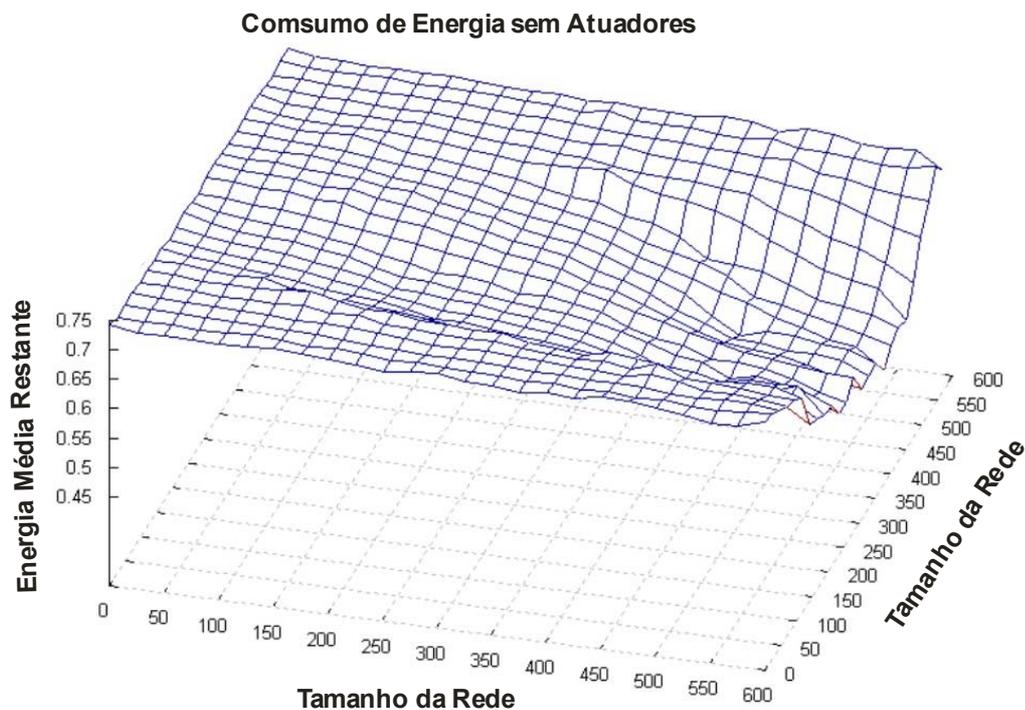
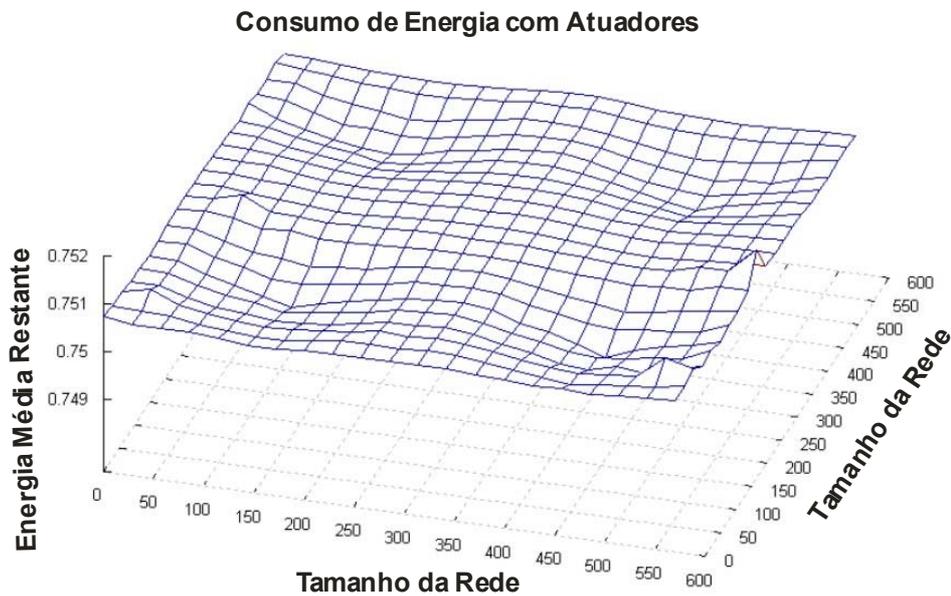


Figura 5.12 Rede sem Atuadores

Como esperado, os nós próximos do sorvedouro quase sempre morrem primeiro e separam a rede do sorvedouro. Em contraste, a energia restante dos nós sensores da rede com 4 atuadores, utilizando o algoritmo QARP-CP é quase uniforme, como mostra a Figura 5.13.



**Figura 5.13 Rede com Atuadores**

Os gráficos das Figura 5.12 e Figura 5.13 refletem a rede após a primeira morte de um nó sensor por falta de energia. Na rede com atuadores, o primeiro nó sensor a morrer por falta de energia será mais tarde do que na rede sem atuadores.

O uso de atuadores traz vantagens importantes no uso de ambientes de segurança crítica, como: (a) baixa latência, pois a informação sentida é encaminhada a atuadores que estão mais próximos do evento do que o *sink*; (b) longevidade maior da rede, pois dados não são roteados até o *sink*, evitando desgastar rapidamente os nós próximos ao *sink* como mostrado na Figura 5.132.

Igualmente, com o uso de atuadores, podemos imaginar um maior gasto dos nós próximos ao atuador. Entretanto, os atuadores são em maior número do que o *sink*, e estão inseridos dentro do ambiente, logo possuem mais nós próximos a ele. E ainda é muito mais provável que diferentes atuadores possam ser acionados para cada evento, implicando em um melhor balanceamento de gasto de energia na rede. Como resultado, a rede com atuadores tem um tempo de vida maior que a rede sem atuadores.

## 5.5 Considerações Finais

As Redes de sensores e atuadores sem fio podem aumentar muito a precisão em aplicações de monitoramento de ambientes físicos sujeitos às situações de emergência. Esta classe de aplicações impõe requisitos estritos de latência, tolerância a falhas e confiabilidade na entrega de eventos dentro de limites estabelecidos de tempo. O Protocolo de roteamento QARP-CP apresentado atende os requisitos mencionados, através de um mecanismo de Qualidade de Serviço, que utiliza os atuadores como catalisadores de informações de configuração de rede para a construção de rotas ótimas, com priorização de tráfego, que são passadas aos sensores para que estes as utilizem para a entrega dos eventos em tempo especificado pela aplicação.

O QARP-CP utiliza o paradigma de publicação/subscrição para promover a interação entre os nós sensores, atuadores e sorvedouro. O desempenho do QARP-CP em termos de Latência, Custos de mensagens de controle e taxa de perda de pacotes mostra-se superior quando comparado a dois outros protocolos: QARP, que faz o processamento de rotas de forma descentralizada nos nós sensores; e PRIMAR, um protocolo de roteamento para as RSSF, com diferenciação de serviço. Os resultados mostraram que o QARP-CP é mais eficiente quando comparado ao QARP e PRIMAR. O próximo capítulo tece as conclusões finais.

## 6 Conclusões

---

Este capítulo descreve as contribuições geradas com a realização deste trabalho, bem como trabalhos futuros e conclusões finais.

### 6.1 Contribuições Geradas

A especificação e implementação do protocolo QARP-CP, para redes de sensores e atuadores sem fio geraram contribuições relevantes para a continuidade dos trabalhos no LRVNet, na medida em que deverão servir como protocolo base para o desenvolvimento de aplicações em redes de sensores e atuadores sem fio. Além disso, o estudo do simulador de redes ns-2 e a implementação e simulação do protocolo, geraram uma base de conhecimentos que facilitará futuras avaliações de desempenho e validações de protocolos e aplicações para redes de sensores e atuadores sem fio.

#### 6.1.1 Artigos Publicados

As publicações obtidas até o momento foram:

- Boukerche, A., Araujo, R. B., Villas, L. A. “*QoS Based Routing protocol for Wireless Sensor networks*”. In: Local Computer Networks, Proceedings 2006 31st IEEE Conference on Performance Management of Wireless and Mobile Networks (P2MNet), Nov. 2006, p. 832-839, Digital Object Identifier: 10.1109/LCN.2006.322184.
- Araujo, R. B., Villas, L. A., Boukerche, A. “*Uma Solução de QoS com Processamento Centrado para Redes de sensores e atuadores sem fio*”. Artigo aceito para publicação nos Anais do 25º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, SBRC 2007, Belém, junho/2007.
- Boukerche, A., Araujo, R. B., Villas, L. A. “*A Novel QoS based routing protocol for Wireless Actor and Sensor Networks*”. In: IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM 2007) 23-30 Nov. 2007.

- Boukerche, A., Araujo, R. B., Villas, L. A. **“Optimal Route Selection for Highly Dynamic Wireless Sensor and Actor Networks Environment”**. In: The 10-th ACM/IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. October 22 - 26, 2007.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Como continuidade ao trabalho aqui iniciado, as seguintes atividades ainda deverão ser realizadas:

- Interpretação de contextos – eventos são coletados de sensores e interpretados nos nós atuadores. Como resultado dessa interpretação, ações são tomadas pelos atuadores com conseqüências nos ambientes físicos (ativação de *sprinklers*, ativação de sinalização de emergência, etc). A interpretação pode ser feita utilizando-se desde lógica simples até redes bayesianas;
- Utilização de modelos probabilísticos para a verificação de falhas em sensores e atuadores. A probabilidade de falha em nós sensores e atuadores serão levadas em consideração no processamento de rotas com Qualidade de Serviço;
- Aprimoramento do mecanismo de processamento de rotas (escalonamento de pacotes através de filas diferenciadas);
- Aplicação dos protocolos aqui desenvolvidos no monitoramento de aeronaves em situações de ensaio de vôo e solo (projeto Fapesp Proc. 2006/00741-7).

## 6.3 Conclusões Finais

As redes de sensores sem fio estão cada vez mais sendo usadas para o monitoramento contínuo e preciso para a detecção de situações de anormalidades e/ou emergências, nas mais diversas áreas de aplicação, tais como: saúde, transporte, militar, combate a incêndio, domiciliar etc. A utilização de redes de sensores e de atuadores sem fio na classe de aplicações de supervisão e controle de ambientes físicos sujeitos a situações de emergência é o foco deste trabalho. Um grande desafio para essas redes é oferecer um canal

rápido, confiável e tolerante a falhas para a difusão de dados em um ambiente hostil, e que satisfaça os requisitos dos diferentes cenários de aplicação (prevenção, combate e perícia).

Neste trabalho foram apresentados o QARP e sua versão melhorada, o QARP-CP, este último um protocolo de roteamento para RSASF ciente de QoS que leva em consideração métricas como latência, taxa de recepção e energia na escolha de rotas para atender as necessidades da aplicação. Importantes métricas foram avaliadas através da simulação em um conceituado simulador de redes, ns-2, e comparadas ao QARP [BOU 06] e PRIMAR [XIA 05]. Nos experimentos, o desempenho do QARP-CP foi superior ao QARP e PRIMAR, apresentando menores latências e melhor confiabilidade na entrega de eventos, tornando-se um bom candidato para satisfazer os rigorosos requisitos da entrega de pacotes em aplicações de monitoramento de situações de emergência, bem como em outras áreas de aplicação das redes de sensores. O resultado deste trabalho mostra que o QARP-CP pode ser uma solução em potencial para o monitoramento de ambientes físicos sujeitos as situações de emergência que possam colocar em risco vidas e patrimônio.

## 7 Referências Bibliográficas

---

- [AGR 00] Agre, J., Clare, L. “An Integrated Architecture for Cooperative Sensing Networks”. Computer - IEEE Computer Society Press, 33(5): p.106–108, Califórnia, EUA, 2000.
- [AKK 03] K. Akkaya and M. Younis, “An Energy-Aware QoS Routing Protocol for Wireless Sensor Networks,” in the *Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile and Wireless Networks (MWN 2003)*, Providence, Rhode Island, May 2003.
- [AKK 04] K. Akkaya and M. Younis, “A survey on routing protocols for wireless sensor networks”, to appear in the *Journal of Ad Hoc Networks*.
- [AKY 02] Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. “A Survey on Sensor Networks”. IEEE Communications Magazine, p. 102-114, Agosto de 2002.
- [AKY 04] Akyildiz, I.F; Kasimoglu, I.H. “Wireless sensor and actor networks: research challenges”. Ad Hoc Networks, Elsevier, Volume 2, Issue 4, p. 351-367. Outubro de 2004.
- [BOU 03] Boukerche, A. Cheng, X. And Linus, J. *Energy-Aware Data-Centric Routing in Microsensor Networks*. In MSWiM’03, September 19, 2003, San Diego, California, USA. (2003).
- [BOU 04] Boukerche, A. and I. Nikolettseas, "Protocols for Data Propagation in Wireless Sensor Networks", Chapter 2, in *Wireless Communications systems and networks*, Edt. M. Guizani, Kluwer Publ., pp. 23-51, 2004.
- [BOU 04a] Boukerche, A., Pazzi, R. W. N., Araujo, R. B. “*A Fast and Reliable Protocol for Wireless Sensor Networks in Critical Conditions Monitoring Applications*”, in The 7<sup>th</sup> ACM/IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM’04). Venice, Italy, October 4-6, 2004.
- [BOU 05] Boukerche, A., Pazzi, R. W. N., Araujo, R. B. “HPEQ A Hierarchical Periodic, Event-driven and Query-based Wireless Sensor Network Protocol” In: *Local Computer Networks, 2005. 30th Anniversary. The IEEE Conference on Publication Date: 15-17 Nov. 2005* On page(s): 560- 567.
- [BOU 06] Boukerche, A., Araujo, R. B., Villas, L. A. QoS Based Routing protocol for Wireless Sensor networks. In: *Local Computer Networks, Proceedings 2006 31st IEEE Conference on Performance Management of Wireless and Mobile Networks (P2MNet)*, Nov. 2006, p. 832-839, Digital Object Identifier: 10.1109/LCN.2006.322184.

- [BRA 02] Braginsky, D. and Estrin, D. "Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks," in the *Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA)*, Atlanta, GA, October 2002.
- [BRU 02] Brun, A., Vost, E. M. G., and Mendes, A. S., "Qos – Qualidade de Serviço em TCP/IP", Monografia disponível em <http://www.apostilando.com/download.php?cod416&categoria=Redes>, [Consulta: Janeiro de 2006].
- [BUC 98] Buczak, A. and Jamalabad, V. "Self-organization of a Heterogeneous Sensor Network by Genetic Algorithms," *Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks*, C.H. Dagli, et. (eds.), Vol. 8, pp. 259-264, ASME Press, New York, 1998.
- [BUL 01] Bulusu, N., Estrin, D., Girod, L., Heidemann, J. "Scalable coordination for wireless sensor networks: self-configuring localization systems". International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCTA 2001), Ambleside, UK, July 2001.
- [CAR 02] Carpenter, B. E., Nichols, K. (2002) "Differentiated services in the Internet". Proceedings of the IEEE Volume 90, Issue 9, Sep 2002 Page(s): 1479 - 1494 Digital Object Identifier 10.1109/JPROC.2002.802000.
- [CAY 05] Cayirci, E., Coplu, T. and Emiroglu, O., "Power aware many to many routing in wireless sensor and actuator networks", in Proc. of the Second European Workshop, pp. 236 – 245, 2005.
- [CER 01] Cerpa, A.; Elson, J.; Estrin, D.; Girod, L.; Hamilton, M.; Zhao, J. "Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology". Proceeding of ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications in Latin America and the Caribbean, 3-5, Costa Rica, 2001.
- [CHE 04] Chen, D. and Varshney, PK "QoS Support in Wireless Sensor Network: A Survey," Proc. of the 2004 International Conference on Wireless Networks, 2004.
- [CHI 01] C. Chien, I. Elgorriaga, C. McConaghy, Low-power directsequence spread-spectrum modem architecture for distributed wireless sensor networks, ISLPED'01, Huntington Beach, California, August 2001.

- [CHT 02] Chatzigiannakis, I., Nikolettseas, S. and Spirakis, P. *A Comparative Study of Protocols for Efficient Data Propagation in Smart Dust Networks*. In Proc. 2nd ACM Workshop on Principles of Mobile Computing – POMC'2002 (2002).
- [CIS 07] Cisco Systems “Documentation Cisco”, Disponível: [http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/cisintwk/ito\\_doc/qos.htm#wp1024961](http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/cisintwk/ito_doc/qos.htm#wp1024961), [consulta: Janeiro de 2007].
- [CHO 00] Cho, S. H.; Chandrakasan, A. “Energy efficient protocols for low duty cycle wireless microsensor networks”. “Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences”, Hawaii, Março de 2000.
- [CHU 02] Chu, M., Haussecker, H. and Zhao, F. "Scalable Information-Driven Sensor Querying and Routing for ad hoc Heterogeneous Sensor Networks," *The International Journal of High Performance Computing Applications*, Vol. 16, No. 3, August 2002.
- [ELS 01] J. Elson, D. Estrin, Random, ephemeral transaction identifiers in dynamic sensor networks, Proceedings 21st International Conference on Distributed Computing Systems, Mesa, AZ, April 2001, pp. 459–468. October 2000, pp. 60–61.
- [END 06] Endler, M. “Large scale body sensing for Infectious Disease Control”. Sentient Future Competition on European Workshop on Wireless Sensor Networks. Zurich, Suíça, Fevereiro de 2006
- [EST 99] Estrin, D., Govindan, R., Heidemann, J., Kumar, S. “Next Century challenges: Scalable Coordination in Sensor Network”. Proceeding of ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'99), 263-270, Washington, 1999.
- [EST 00] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, Embedding the Internet, Communication ACM 43 (2000) 38–41.
- [EST 02] Estrin, D., et. al., <http://nesl.ee.ucla.edu/tutorials/mobicom02> [Consulta Fevereiro 2006].
- [EUG 03] Eugster, P. T., Felber, P., Guerraoui, R. and Kermarrec, A. *The many faces of publish/subscribe*. ACM Comput. Surv. 35(2): 114-131 (2003).

- [FEN 02] Feng, J., Koushanfar, F., and Potkonjak, M. "System-architectures for sensor networks issues, alternatives, and directions". International Conference on Computer Design (ICCD 2002), Freiburg, Germany (setembro de 2002),112-121.
- [GIR 01] L. Girod, D. Estrin, Robust range estimation using acoustic and multimodal sensing, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2001), Maui, Hawaii, October 2001.
- [HAN 06] Han, P., Huafeng, W., Dilin, M., Chuanshan, G. "ELRS: an energy-efficient layered routing scheme for wireless sensor and actor networks", Advanced Information Networking and Applications. AINA 2006. 20th International Conference on Volume 2, pp. 18-20.
- [HED 02] Ye, W., Heidemann, J. and Estrin, D. "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", in the *Proceedings of IEEE Infocom 2002*, New York, NY, June 2002.
- [HEI 03] Heidman, J., Silva, F., Estrin, D. "Matching Data Dissemination Algorithms to Application Requirements", ISITR-571. Abril de 2003.
- [HEI 00] Heinzelman, W. R. et al., "Energy-Scalable algorithms and protocols for Wireless Sensor Networks", in the *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '00)*, Istanbul, Turkey, June 2000
- [HEI 00a] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks," in the *Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences*, Hawaii, January 2000.
- [HEI 99] Heinzelman, W., Kulik, J. and Balakrishnan, H. "Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks," in the *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '99)*, Seattle, WA, August 1999.
- [HOB 00] Hoblos, G., Staroswiecki, M., Aitouche, A. "Optimal design of fault tolerant sensor networks", IEEE International Conference on Control Applications, Anchorage, AK, September 2000, pp. 467-472.

- [HU 04] Hu, W., Jha, S. and Bulusu, N., "A communication paradigm for hybrid sensor/actuator networks," in Proc. Of the 15th IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Bcelona, Spain, 2004.
- [INT 00] Intanagonwiwat, C., R. Govindan and D. Estrin, "Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks", in the *Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00)*, Boston, MA, August 2000.
- [INT 03] Intanagonwiwat, C., Govindan, R., Estrin, D., Heidemann, J. and Silva, F. "Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking. IEEE Trans. on Networking", February 2003.
- [KAH 99] Kahn, J.; Katz, R.; Pister, K. "Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust". In Proceeding of ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (*MOBICOM'99*), Washington 1999; 271-278.
- [KIM 05] Kim, S. "Structural health monitoring of the golden gate bridge", Disponível: <http://www.cs.berkeley.edu/~binetude/> [consulta: Janeiro de 2006].
- [KIN 02] Kinawi, H.; Taha, M.M.; El-Sheimy, N. "Gpsr: greedy perimeter stateless routing for wireless networks". In 27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN'02), Florida, EUA, 2002.
- [LIC 97] Lin, C.R. and Gerla, M., "Adaptive Clustering for Mobile Wireless Networks," *IEEE Journal on Selected areas in Communications*, Vol. 15, No. 7, September 1997.
- [LIL 01] Li, L. and Halpern, J. Y "Minimum energy mobile wireless networks revisited," in the *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'01)*, Helsinki, Finland, June 2001.
- [LIN01] Lindsey, S. Raghavendra, C. S. and Sivalingam, K. "Data Gathering in Sensor Networks using the Energy\*Delay Metric", in the *Proceedings of the IPDPS Workshop on Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, San Francisco, CA, April 2001.
- [LIN 02] Lindsey, S. and Raghavendra, C. S. "PEGASIS: Power Efficient GATHERing in Sensor Information Systems," in the *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, Montana, March 2002.

- [LOP 06] Lopes, A. R., “Projeto de um ambiente 3d de Visualização e Reprodução de Eventos Capturados e Interpretados a Partir de Ambientes Físicos Cientes de Contexto para Aplicações de Preparação para Emergência”, Dissertação de Mestrado da UFSCar, Departamento de Computação, 2006.
- [MAI 02] Mainwaring, A.; Polastre, J.; Szewczyk, R.; Culler, D. Anderson. J. “Wireless sensor networks for habitat monitoring”. First ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. Setembro de 2002.
- [MAN 01] Manjeshwar, A. and Agrawal, D. P. “TEEN : A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks,” in the *Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, San Francisco, CA, April 2001.
- [MAN 02] Manjeshwar, A. and Agrawal, D. P. "APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks," in the *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile computing*, Ft. Lauderdale, FL, April 2002.
- [MAT 04] Mateus, G. R., Loureiro, A. A. F. “Segunda edição do livro Introdução à Computação Móvel” Disponível em: <http://www2.dcc.ufmg.br/~loureiro/cm-rssf.html> [consulta: Fevereiro de 2006].
- [MEL 01] Melo, E. T. L., “ Qualidade de Serviço em Redes IP com DiffServ: Avaliação através de Medições”, Dissertação de Mestrado da UFSC, Disponível em <http://www.lrg.ufsc.br/teses/Melo.pdf>, [Consulta: Fevereiro de 2006].
- [MHA 05] Mhatre, V. P., Rosenberg, C., Kofman, D., Mazumdar, R., Shroff, N. “A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint” *IEEE Transaction on Mobile Computing*, vol. 4, no. 1, 2005.
- [MIN 00] Min, R. et al., "An Architecture for a power aware distributed microsensor node", in the *Proceedings of the IEEE Workshop on signal processing systems (SIPS'00)*, October 2000.
- [MIN 01] Min, R., Bhardwaj, M., Cho, S., Sinha, A., Shih, E., Wang, A. and Chandrakasan, A. *Low-Power Wireless Sensor Networks*, VLSI Design 2001, January 2001.

- [MIN 02] Mini, R. A. F., Nath, B., and Loureiro, A. A. F. A probabilist approach to predict the energy consumption in wireless sensor networks. IV Workshop de Comunicação sem Fio e Computação Móvel, São Paulo, SP. Outubro de 2002.
- [MOK 06] Mokhoff, N. “Army tests wireless sensors as vehicle inspectors”, Disponível: <http://www.automotivedesignline.com/news/16940066> [consulta: Janeiro de 2006].
- [NAK 04] Nakaruma, F.G., Quintao, F. P., Menezes, G., Mateus, G. R., "Planejamento Dinâmico para Controle de Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores Sem Fio", Anais do VI Workshop de Comunicação sem Fio e Computação Móvel, 2004, Fortaleza, Brasil, v. 1. p. 182-191.
- [NS2 06] The Network Simulator ns-2. Disponível: [www.isi.edu/nsman/ns](http://www.isi.edu/nsman/ns) [consulta: Junho de 2006].
- [NAT 02] Nath, B. and Niculescu, D. “Routing on a curve,” in HOTNETS 1, Princeton, NJ, October 2002.
- [PEA 01] A. Perrig, R. Szewczyk, V. Wen, D. Culler, J.D. Tygar, SPINS: security protocols for sensor networks, Proceedings of ACM MobiCom’01, Rome, Italy, 2001, pp. 189– 199.
- [PER 00] Perkins, C. Ad Hoc Networks, Addison-Wesley, Reading, MA, 2000.
- [PIN 04] Pinto, A. J. G. “Mecanismo de Agregação de Dados Empregando Técnicas Paramétricas em Redes de Sensores”. Tese de Mestrado da UFRJ. Junho de 2004.
- [POT 00] Pottie, G. J., and Kaiser, W. J. “Wireless integrated network sensor (WINS). Communications of the ACM 43, p. 51-58. Maio de 2000.
- [RAG 02] Raghunathan, V., Schurgers, C., Park, S., and Srivastava, M. “Energy Aware Wireless Microsensor Networks”. IEEE Signal Processing Magazine 19, p. 40-50. Março de 2002.
- [RAP 96] Rappaport., T., “Wireless Communications: Principles and Practice”, Prentice-Hall, Englewood Clis, NJ, 1996.

- [RNP 07] Rede Nacional de Ensino e Pesquisa, “Qualidade de Serviço na Internet”, Disponível em <http://www.rnp.br/newsgen/9911/qos.html> [Consulta: Março 2007]
- [ROD 99] Rodoplu, V. and Ming, T.H. "Minimum energy mobile wireless networks," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, Vol. 17, No. 8, pp. 1333-1344, 1999.
- [RUI 03] Ruiz, L. B. “MANNA: Uma Arquitetura para Gerenciamento de Redes de Sensores Sem Fio. Tese de Doutorado do Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais”.
- [RUI 04a] Ruiz, L. B., Nogueira, J. M. S., and Loureiro, A. A. (2004). “Handbook of Sensor Network: Compact Wireless and Wired Sensing Systems”, volume 1, capítulo III: Sensor Network Management. CRCPress.
- [RUI 04b] Ruiz, L. B. and et al. “Arquitetura para Rede de Sensores Sem Fio”. Simpósio Brasileiro de Rede de Computadores. Gramado, Rio Grande do Sul. Maio de 2004.
- [SAD 03] N. Sadagopan et al., “The ACQUIRE mechanism for efficient querying in sensor networks,” in the *Proceedings of the First International Workshop on Sensor Network Protocol and Applications, Anchorage, Alaska, May 2003*.
- [SCH 01] Schurgers, C. and Srivastava, M.B. “Energy efficient routing in wireless sensor networks,” in the *MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force*, McLean, VA, 2001.
- [SHA 02] Shah, R. and Rabaey, J. "Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks", in the *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Orlando, FL, March 2002.
- [SHE 01] Shen, C., Srisathapornphat, C., Jaikaeo, C., “Sensor information networking architecture and applications”, *IEEE Personal Communications*, August 2001, pp. 52–59.
- [SHI 01] Shih, E., Cho, S.-H., Ickes, N., Min, R., Sinha, A., Wang, A., and Chandrakasan, A. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. The Seventh Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2001), Rome, Italy (julho de 2001).

- [SOH 00] Sohrabi, K., Gao, J., Ailawadhi, V., Pottie, G.J., "Protocols for self-organization of a wireless sensor network," *IEEE Personal Communications*, Vol. 7, No. 5, pp. 16-27, October 2000.
- [SUB 00] L. Subramanian and R. H. Katz, "An Architecture for Building Self Configurable Systems," in the *Proceedings of IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, Boston, MA, August 2000.
- [SUD 01] Bhatnagar, S., Deb, B. and Nath, B., "Service Differentiation in Sensor Networks", In *Proceedings of Fourth International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, September 2001.
- [TIL 02] Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N., Heinzelman, W. "A taxonomy of wireless micro-sensor network models", 2002.
- [TOS 06] <http://webs.cs.berkeley.edu/tos/index.html>.
- [WAR 01] Warneke, B.; Last, M.; Liebowitz, B.; Pister, K. S. J. "Smart dust: Communicating with a cubic-millimeter computer". *IEEE Computer*, 34(1):44–51, 2001.
- [WOO 01] Woo, A. and Culler, D. "A Transmission Control Scheme for Media Access in Sensor Networks," in the *Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom'01)*, Rome, Italy, July 2001, pp. 221–235.
- [WU 00] Wu, S., Tseng, Y., Sheu, J. "Intelligent Medium Access For Mobile Ad Hoc Networks With Busy Tones And Power Control", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, p.1647-1657. Setembro de 2000.
- [XIA 05] Xiaoxia H., Yuguang F. ,End-to-end delay differentiation by prioritized multipath routing in wireless sensor networks, *Military Communications Conference, 2005. MILCOM 2005. IEEE Vol. 2* , Issue , 17-20 Oct. 2005 Page(s): 1277 - 1283.
- [XUY 01] Xu, Y., Heidemann, J. and Estrin, D. "Geography-informed energy conservation for ad hoc routing," in the *Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'01)*, Rome, Italy, July 2001.
- [YAO 02] Y. Yao and J. Gehrke, "The cougar approach to in-network query processing in sensor networks," in *SIGMOD Record*, September 2002.

- [YAR 05] Yarvis, M., Kushalnagar, N., Singh, H., Rangarajan, A., Liu, Y. and Singh, S. "Exploiting Heterogeneity in Sensor Networks," in Proc. of IEEE Infocom 2005, Miami, FL, USA.
- [YOU 01] Youssef, M., Younis, M., and Arisha, K. "A constrained shortest-path energy-aware routing algorithm for wireless sensor networks", Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2002), Orlando, Florida, EUA (março de 2001).
- [YOU 02] M. Younis, M. Youssef and K. Arisha, "Energy-Aware Routing in Cluster-Based Sensor Networks", in the *Proceedings of the 10th IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS2002)*, Fort Worth, TX, October 2002.
- [YOU 04] Younis, M.; Akkaya, K.; Weltoweissy, M.; Wadaa, A. "On Handling QoS Traffic in Wireless Sensor Networks "Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'04), Track 9 - Volume 9, Page: 90292.1, 2004.