

FABRÍCIO AGUIAR SILVA

**AVALIAÇÃO DE ABORDAGENS DE GERENCIAMENTO
PARA REDES DE SENSORES SEM FIO**

Belo Horizonte
29 de agosto de 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**AVALIAÇÃO DE ABORDAGENS DE GERENCIAMENTO
PARA REDES DE SENSORES SEM FIO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

FABRÍCIO AGUIAR SILVA

Belo Horizonte
29 de agosto de 2006



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Avaliação de Abordagens de Gerenciamento
para Redes de Sensores Sem Fio

FABRÍCIO AGUIAR SILVA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída por:

Ph. D. JOSÉ MARCOS SILVA NOGUEIRA – Orientador
Universidade Federal de Minas Gerais

Ph. D. LINNYER BEATRYS RUIZ – Co-orientadora
Universidade Federal de Minas Gerais

Ph. D. LUCI PIRMEZ
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Ph. D. ANTONIO ALFREDO FERREIRA LOUREIRO
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, 29 de agosto de 2006

Resumo

Redes de sensores sem fio (RSSFs) são redes *ad hoc* sem fio que apresentam restrições de hardware e de reserva de energia. Em geral, esse tipo de rede é aplicado em larga escala e em ambientes de difícil acesso para seres humanos. O gerenciamento de redes de sensores sem fio visa controlar a utilização dos recursos para garantir a produtividade da mesma. Devido às características específicas das RSSFs como a grande quantidade de elementos, a sua aplicação em ambientes remotos e as restrições dos elementos que as compõem, dentre outras, pode-se perceber que as tarefas de gerenciamento podem ser importantes para que os objetivos da aplicação sejam satisfeitos.

Para se aplicar funcionalidades de gerenciamento nesse tipo de rede, é preciso escolher a abordagem que será utilizada para a coleta e o processamento das informações relacionadas com controle e supervisão. A escolha da abordagem adequada para uma determinada aplicação é uma tarefa importante para os projetistas de rede, já que influencia no funcionamento e desempenho da mesma. Neste trabalho, são avaliadas três abordagens de gerenciamento no contexto das RSSFs: baseada em agentes móveis, requisição/resposta e notificação de eventos. Fizemos a avaliação de desempenho e funcional das abordagens, com o intuito de avaliar a escalabilidade e o impacto das funcionalidades do gerenciamento e indicar a adequabilidade das abordagens em aplicações específicas. Como a abordagem baseada em agentes móveis é inovadora para esse tipo de rede, sua avaliação foi feita em mais detalhes.

Os resultados revelam que cada abordagem possui vantagens e desvantagens. A escolha da abordagem a ser empregada em uma aplicação deve considerar a escala da rede, a complexidade do gerenciamento, propensão a falhas de comunicação e a aplicação em si. Por exemplo, em geral a abordagem baseada em agentes móveis é mais adequada para aplicações mais elaboradas que necessitam de novas funcionalidades dinamicamente. Já as abordagens requisição/resposta e notificação de eventos podem ser empregadas em aplicações mais simples. Com relação à abordagem de agentes móveis, discutimos alguns aspectos que dificultam a sua utilização e propusemos alternativas para torná-la mais eficiente em RSSFs.

Abstract

Wireless Sensor Networks are ad hoc wireless networks that present hardware and energy reserve restrictions. In general, this kind of network is applied on large scale and at environments with hard access to human beings. Wireless sensor networks management aims to control resources usage in order to guarantee the network productivity. Given the WSNs specific characteristics like the huge amount of elements, their application at remote environments and the restrictions of the elements that composed them, among others, it can be noticed that management tasks may be important to satisfy the goals of the application.

In order to apply management functionalities in this kind of network, it is necessary to choose the approach that will be used to gather and process information related to control and supervision. The choice of an adequate approach to a specific application is an important task to the network designers once it influences the network functioning and performance. In this work three management approaches are evaluated in WSNs context: mobile agent based, request/response and event report. We have done performance and functional evaluation of the approaches with the intention of evaluate scalability and the impact of management functionalities and indicate the adequateness of the approaches in specific applications. Once the mobile agent based approach is innovative to this kind of network its evaluation has been performed in more details.

The results reveal that each approach has advantages and disadvantages. The choice of the approach to be used in an application must consider the network scale, management complexity, communication faults propensity and the application itself. For example, in general the mobile agents based approach is more adequate to more elaborated applications that need new functionalities dynamically. On the other hand, request/response and event report approaches can be used by simpler applications. Regarding the mobile agents based approach, we have discussed some aspects that make it more difficult to use and proposed alternatives to turn it more efficient in WSNs.

Agradecimentos

Agradeço à Deus por sempre me acompanhar e me proteger, me dando forças nos momentos difíceis da vida.

Agradeço muito aos meus pais por me darem a oportunidade de estudar. Sei que muitos gostariam de estar no meu lugar, mas não tiveram oportunidades como eu tive. Obrigado pelo apoio e pelos ótimos conselhos de vida, além do bom exemplo que são para mim.

Agradeço à Thais por participar de mais uma jornada a meu lado. Passamos por bons momentos e também por momentos difíceis durante o mestrado. Graças a ela, os momentos difíceis foram enfrentados com sabedoria e os bons momentos foram comemorados com muita alegria.

Um agradecimento especial à amiga e orientadora Bia por todo ensinamento acadêmico e de vida. Obrigado por ter confiado e investido seu tempo em mim. Valeu por sempre tentar melhorar o nosso ambiente de trabalho.

Agradeço ao meu orientador José Marcos por toda ajuda e dedicação durante esse período. Agradeço também ao Loureiro pelos incentivos e sugestões. Um agradecimento também à Luci, pelas ótimas sugestões e dicas para a melhoria da dissertação.

Agradeço ao Alyson e Mayara pela ajuda no desenvolvimento no trabalho. Eles foram muito importantes na reta final.

Agradeço ao Flávio, Cris, Maisa e Luísa pelos bons momentos que passamos. Agradeço à Isa, Ana, Helen, Carlos, Júlio e Jeferson pela ótima companhia de laboratório. Um agradecimento a todos da equipe Manna e Sensornet.

Sumário

1	Introdução	3
1.1	Motivações	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Contribuições	5
1.4	Organização da Dissertação	5
2	Conceitos Relacionados	7
2.1	Redes de Sensores Sem Fio	7
2.2	Restrições dos Nós Sensores Sem Fio	9
2.3	Gerenciamento de Redes	10
3	Trabalhos Relacionados	13
3.1	Gerenciamento de Redes de Sensores Sem Fio	13
3.2	Agentes Móveis em Redes de Sensores Sem Fio	15
3.2.1	Tecnologia	15
3.2.2	Aplicações	16
3.3	Agentes Móveis no Gerenciamento de Redes	18
3.4	Conclusão	20
4	Gerenciamento de Redes de Sensores Sem Fio	22
4.1	Arquitetura Manna	22
4.2	Estratégias de Gerenciamento	24
4.2.1	Gerenciamento Centralizado	24
4.2.2	Gerenciamento Descentralizado	25
4.3	Abordagens de Gerenciamento	28
4.3.1	Agentes Móveis	28
4.3.2	Requisição/Resposta	30
4.3.3	Notificação de Eventos	31
4.3.4	Outras Abordagens	31
4.4	Conclusão	33

5	Avaliação	34
5.1	Metodologia de avaliação	34
5.1.1	Objetivos	34
5.1.2	Métricas de Desempenho	35
5.1.3	Processo de Avaliação	36
5.2	Modelo de Avaliação	36
5.3	Aplicação do Modelo de Avaliação para o Ambiente de Simulação	40
5.3.1	Configuração geral	40
5.3.2	Configuração das abordagens	45
5.4	Aplicação do Modelo de Avaliação para o Ambiente Real	47
5.4.1	Experimentos em laboratório	49
5.4.2	Experimentos em ambiente semi-aberto	50
5.5	Conclusão	51
6	Resultados	53
6.1	Resultados de Desempenho	53
6.1.1	Consumo de Energia	53
6.1.2	Utilização da Largura de Banda	61
6.1.3	Pacotes Perdidos	63
6.1.4	Tempo de Resposta	64
6.1.5	Requisitos de Memória	67
6.1.6	Sumário	68
6.2	Resultados Funcionais	68
6.2.1	Função de Ajuste de Potência	68
6.2.2	Função de Controle de Densidade	69
6.3	Análise dos Resultados	70
6.3.1	Escalabilidade	70
6.3.2	Complexidade do Gerenciamento	71
6.3.3	Adequação das Abordagens para Aplicações Específicas	71
6.3.4	Eficiência de Agentes Móveis em RSSFs	74
6.3.5	Comentários sobre Outras Redes	76
6.4	Conclusão	76
7	Considerações Finais	78
7.1	Conclusões	78
7.2	Trabalhos Futuros	79
A	Publicações	81
A.1	Publicações Relacionadas com a Dissertação	81
A.2	Publicações de Trabalhos Paralelos	82
	Referências Bibliográficas	83

Lista de Figuras

2.1	Rede de sensores sem fio e nó sensor. O ponto de acesso (PA) permite a conexão da RSSF com outras redes, como por exemplo a Internet.	8
2.2	Plataforma de nó sensor MicaZ.	10
2.3	Plataforma de nó sensor WINS.	10
2.4	Estrutura básica do gerenciamento de redes.	11
4.1	Relacionamento entre serviços, funções e modelos na arquitetura Manna [Ruiz, 2003].	23
4.2	Estratégia de gerenciamento centralizado.	24
4.3	Estratégia de gerenciamento descentralizada hierárquica.	26
4.4	Estratégia de gerenciamento descentralizado distribuído.	27
4.5	Abordagem de gerenciamento baseada em agentes móveis.	29
4.6	Abordagem de gerenciamento baseada em requisição/resposta.	30
4.7	Abordagem de gerenciamento baseada em notificação de eventos.	31
5.1	Formato da PDU das mensagens da abordagem RR.	38
5.2	Formato da PDU da mensagem da abordagem NE.	38
5.3	Formato da PDU e tamanho dos campos das mensagens da abordagem RR.	43
5.4	Formato da PDU e tamanho dos campos da mensagem da abordagem NE.	43
5.5	Ambiente onde foram feitos os experimentos em laboratório.	49
5.6	<i>Cenário 1</i> de laboratório para avaliação da abordagem de AMs.	50
5.7	<i>Cenário 2</i> de laboratório para avaliação das abordagens RR e NE.	50
5.8	Ambiente semi-aberto onde foram realizados os experimentos.	51
5.9	<i>Cenário 3</i> de área semi-aberta para avaliação da abordagem de AMs.	51
6.1	Avaliação da escalabilidade considerando o consumo de energia com recepção.	54
6.2	Avaliação do impacto da quantidade de objetos gerenciados no consumo de energia com recepção.	55
6.3	Avaliação do impacto do tamanho do código na abordagem de AMs no consumo de energia com recepção.	56
6.4	Avaliação da escalabilidade das abordagens no consumo de energia com transmissão.	56
6.5	Avaliação do impacto da quantidade de objetos gerenciados no consumo de energia com transmissão.	57
6.6	Avaliação do tamanho do código da abordagem AMs no consumo com transmissão.	58

6.7	Avaliação da escalabilidade considerando a energia total consumida.	59
6.8	Avaliação do impacto da quantidade de objetos gerenciados no consumo de energia total.	60
6.9	Avaliação do impacto do tamanho do código na abordagem de AMs considerando o consumo de energia total.	60
6.10	Avaliação da escalabilidade considerando a utilização da banda.	61
6.11	Avaliação do impacto da quantidade de objetos gerenciados considerando a utilização da banda.	62
6.12	Avaliação do impacto do tamanho do código na abordagem de AMs.	62
6.13	Porcentagem de pacotes perdidos na rede para 10 objetos gerenciados.	64
6.14	Tempo de resposta.	65
6.15	Eficiência da função de ajuste de potência.	69
6.16	Eficiência da função de controle de densidade.	70

Lista de Tabelas

5.1	Características das configurações gerais das simulações.	45
6.1	Consumo de energia com processamento para os elementos de rede (ER) e para os gerentes (G). Os valores são apresentados em Joules.	59
6.2	Valores percentuais da distribuição da largura de banda utilizada pelos elementos de rede (ER) e gerentes (G).	63
6.3	Tempo de resposta medidos em segundos para experimentos em laboratório. No <i>cenário 1.1</i> , o agente se encaixa em um único pacote; no <i>cenário 1.2</i> , em dois pacotes e; no <i>cenário 1.3</i> em quatro pacotes.	66
6.4	Tempo de resposta medido em segundos para experimentos em ambiente aberto. No <i>cenário 3.1</i> , o agente se encaixa em um único pacote; no <i>cenário 3.2</i> , em dois pacotes e; no <i>cenário 3.3</i> em quatro pacotes.	67
6.5	Requisitos de memória em bytes.	68
6.6	Resumo geral dos resultados de desempenho. A ordem que as abordagens aparecem indica a quais são mais eficientes para cada métrica.	68
6.7	Resumo das recomendações de abordagens para aplicações específicas.	74

Lista de Abreviações

AM Agente Móvel

SNMP Simple Network Management Protocol

CMIP Common Management Information Protocol

RR Requisição/Resposta

NE Notificação de Eventos

ER Elemento de Rede

G Gerente

MC Mobilidade de Código

MV Máquina Virtual

RAM Random Access Memory

ROM Ready-Only Memory

ADC Conversor Analógico Digital

LAN Local Area Network

SLA Service Level Agreement

NS Network Simulator

LED Light Emitting Diode

MbD Management by Delegation

HTTP Hypertext Transfer Protocol

XML eXtensible Markup Language

PDU Protocol Data Unit

SO Sistema Operacional

MAC Medium Access Control

MIB *Management Information Base*

PA Ponto de Acesso

LCF Local Closest First

RSSF Rede de Sensores Sem Fio

Capítulo 1

Introdução

As redes de sensores sem fio (RSSFs) são redes *ad hoc* compostas por dispositivos de tamanho e custos limitados. Essa limitação restringe a capacidade do hardware e da reserva de energia desses elementos. Esse tipo de rede é aplicável em larga escala e em ambientes remotos ou de difícil acesso, dificultando ou mesmo impossibilitando a manutenção local dos elementos da rede. Com o intuito de controlar o uso dos recursos para melhorar a produtividade da rede, técnicas de gerenciamento podem ser adotadas. Porém, a abordagem de gerenciamento deve ser selecionada com cuidado para que os benefícios do gerenciamento não sejam anulados com o consumo extra de recursos. Esta dissertação avalia três abordagens de gerenciamento para RSSFs com o objetivo de compará-las e identificar suas vantagens e desvantagens, ajudando os projetistas de redes a escolherem a abordagem que melhor se adequa à sua aplicação.

A seguir, apresentamos as motivações para o desenvolvimento do trabalho na Seção 1.1. Os objetivos e contribuições da dissertação são apresentados na Seção 1.2 e na Seção 1.3, respectivamente. A organização do texto está na Seção 1.4.

1.1 Motivações

As RSSFs possuem características particulares que as diferenciam das redes de computadores tradicionais, tais como serem formadas por centenas a milhares de elementos com recursos de hardware e software restritos e utilizarem comunicação sem fio, serem aplicadas em ambientes que dificultam ou impossibilitam a manutenção por técnicos, apresentarem topologia dinâmica, não considerarem a ocorrência de falhas como exceções, dentre outras. Neste caso, seria interessante que os recursos dos elementos dessas redes fossem utilizados de maneira eficiente e controlada e ainda que determinados níveis de qualidade de serviço fossem provisionados. Isto seria possível com a aplicação de soluções de monitoração e controle, ou seja, gerenciamento. Em [Ruiz, 2003, Ruiz et al., 2003b], a área de gerenciamento em RSSFs é inaugurada com a proposta da arquitetura Manna, a qual estabelece um modelo tridimensional que considera as características específicas das RSSFs no gerenciamento como uma nova dimensão além das duas tradicionais, quais sejam áreas funcionais e níveis de gerenciamento. Essa arquitetura é descrita no Capítulo 4 e foi usada como referência nesta dissertação.

Em uma RSSF, o fluxo de dados sensorizados pode ser intenso mesmo sem serviços de gerenciamento implementados. Por exemplo, na aplicação apresentada em [Werner-Allen et al., 2005], 5 nós sensores coletando sinais infrassônicos por 54 horas contínuas geraram 1.7GBytes de informações. Em uma rede executando serviços de gerenciamento, além dos dados sensorizados, também haverá necessidade de comunicação e processamento dos dados de controle e supervisão. A necessidade de envio bidirecional de dados, isto é, dos nós em direção ao PA e vice-versa, aliada às restrições de recursos dos elementos de rede, aos problemas que o meio físico de comunicação utilizado pode apresentar e à necessidade de aderência aos objetivos da aplicação, fazem da implementação de uma solução de gerenciamento uma tarefa não trivial. Os serviços e funções de controle e supervisão podem ser executados em uma RSSF seguindo diferentes opções de abordagens de gerenciamento, tais como a baseada em agentes móveis, requisição/resposta e notificação de eventos. Cada uma dessas abordagens apresenta vantagens e desvantagens. A escolha da abordagem específica a ser adotada em uma RSSF deve ser realizada com cuidado para que os objetivos do gerenciamento sejam alcançados. Caso contrário, os benefícios do mesmo poderão ser anulados pelo consumo extra de recursos, tornando desfavorável a sua adoção.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar três abordagens de gerenciamento em RSSFs. Essas abordagens diferem na maneira com que as informações são coletadas pelos gerentes e o local de execução dos serviços de gerenciamento. As abordagens são descritas a seguir.

- Baseada em agentes móveis - é baseada no paradigma de mobilidade de código e utiliza agentes móveis (AMs) que migram para os elementos de rede com o código do gerenciamento. A recuperação dos valores da base de informação de gerenciamento, a execução das funções de gerenciamento com base nessas informações e a atribuição de valores de parâmetros são feitas localmente nos elementos de rede;
- Requisição/Resposta - os gerentes requisitam as informações aos elementos de rede, que enviam respostas com as informações solicitadas. Caso necessário, os gerentes enviam mensagens de atribuição para alterar parâmetros dos elementos gerenciados;
- Notificação de eventos - os elementos de rede enviam mensagens de notificação ao gerente caso algum evento ocorra na rede. Como na abordagem requisição/resposta, o gerente pode enviar mensagens de atribuição aos elementos gerenciados.

A escolha das abordagens requisição/resposta e notificação de eventos foi feita com base na simplicidade das duas, tornando-as aplicáveis em RSSFs. A abordagem de AMs foi escolhida com base nos potenciais benefícios que ela pode oferecer às RSSFs. Outras abordagens, como as relacionadas com a Web, não são aplicáveis em RSSFs. Mais detalhes sobre as abordagens são descritos na Seção 4.3.

Para avaliar as abordagens, um modelo de avaliação foi proposto e aplicado em ambientes de simulação e experimental. O principal objetivo da avaliação é identificar vantagens e

desvantagens das abordagens, ajudando projetistas de rede a verificar qual delas se enquadra melhor para uma determinada aplicação. Foram consideradas métricas de desempenho consideradas importantes para RSSFs, como consumo de energia, utilização da banda, perda de pacotes e tempo de resposta. A implementação em um ambiente real de RSSFs permitiu que os requisitos de memória de cada abordagem fosse identificado. Essa métrica é importante já que não adianta uma abordagem ser eficiente se ela não puder ser instalada em um nó sensor devido às restrições de memória. A experimentação também demonstrou o funcionamento das abordagens em um ambiente real.

Dos objetivos secundários da dissertação, podemos considerar como o principal o de avaliar o desempenho do uso de agentes móveis para o gerenciamento de RSSFs. Essa abordagem é inovadora para esse tipo de rede, sendo um tópico importante que deve ser cuidadosamente avaliado. Portanto, além da avaliação comparativa com as outras abordagens, também serão avaliados os aspectos do desenvolvimento de sistemas de agentes móveis para RSSFs.

1.3 Contribuições

As principais contribuições do trabalho são descritas a seguir.

1. Estudo de desempenho das abordagens de gerenciamento baseada em agentes móveis, requisição/resposta e notificação de eventos no contexto das RSSFs.
2. Análise comparativa das abordagens estudadas;
3. Proposta e avaliação do uso de agentes móveis para o gerenciamento de RSSFs. A abordagem de gerenciamento baseada em agentes móveis foi pouco explorada no contexto das RSSFs até o momento, sendo esse um objetivo secundário desta dissertação;
4. Levantamento de aspectos que devem ser considerados pelos projetistas de rede na escolha de uma abordagem. Esse levantamento conterà características da rede e da aplicação que devem ser analisados na hora de escolher a abordagem ideal para determinados casos;
5. Indicação de aplicações práticas que devem adotar uma abordagem específica. Com a avaliação feita na dissertação, algumas aplicações poderão ser indicadas a adotarem uma abordagem específica, facilitando assim o trabalho do projetista da RSSFs;
6. Identificação de dificuldades do uso de agentes móveis em RSSFs. Serão relacionados alguns pontos que devem ser melhorados para se ter uma maior eficiência no uso de AMs em RSSFs. Esses pontos poderão levar a diferentes trabalhos de pesquisa complementares a este.

1.4 Organização da Dissertação

No capítulo 3, são apresentados os principais trabalhos relacionados a esta dissertação. Os tópicos considerados são gerenciamento de RSSFs, uso de agentes móveis em RSSFs, abor-

dagens de gerenciamento de redes tradicionais e uso de agentes móveis no gerenciamento de redes tradicionais. Os trabalhos relacionados com agentes móveis foram mais comentados e estudados por esse ser um tema relativamente novo para RSSFs.

No capítulo 4, os principais conceitos de gerenciamento de redes de sensores sem fio são descritos. Primeiramente, a arquitetura Manna de gerenciamento de RSSFs é apresentada, seguida pela definição da sua arquitetura funcional de gerenciamento que prevê diferentes estratégias a serem utilizadas. Finalmente, as três abordagens avaliadas neste trabalho, baseada em agentes móveis, requisição/resposta e notificação de eventos, são detalhadas.

No capítulo 5, o modelo de avaliação do trabalho é proposto. Primeiramente, a metodologia adotada nas avaliações é descrita. Em seguida, um modelo genérico é definido como base da avaliação, considerando os objetivos da avaliação. A proposta do modelo considera o que se quer visualizar com os resultados. Por último, esse modelo foi instanciado para um ambiente de simulação e um ambiente experimental.

No capítulo 6, os resultados da aplicação do modelo de avaliação são apresentados. Os resultados são divididos em duas categorias: desempenho e funcional. Na primeira, as métricas de avaliação são consideradas. A segunda avalia a eficiência das abordagens considerando as funções de gerenciamento. Este capítulo é encerrado com uma análise dos resultados, considerando os objetivos do modelo de avaliação.

Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as considerações finais do trabalho. Além de comentários sobre o desenvolvimento e os objetivos alcançados, também são propostos novos trabalhos para serem desenvolvidos futuramente.

Capítulo 2

Conceitos Relacionados

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos relacionados com esta dissertação. Esta dissertação avalia abordagens de gerenciamento para RSSFs. A definição e as características desse tipo de rede são descritos na Seção 2.1. Para ilustrar o quão restritos são os componentes desse tipo de rede, a Seção 2.2 apresenta as características de duas plataformas de nós sensores. Por último, na Seção 2.3 são apresentados os principais conceitos de gerenciamento de redes.

2.1 Redes de Sensores Sem Fio

RSSFs são um tipo especial de redes *ad hoc* sem fio com características bastante específicas [Loureiro et al., 2002, Akyildiz et al., 2002]. Esse tipo de rede é composta por dispositivos, chamados nós sensores, que apresentam capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação sem fio. Os nós sensores são formados basicamente por um sistema computacional, transceptor sem fio, fonte de energia e dispositivos sensores. O sistema computacional é composto por um processador e um conjunto de memórias RAM e ROM. O transceptor possibilita a comunicação sem fio, que pode ser via infra-vermelho, rádio frequência ou laser. A fonte de energia provê energia para o nó sensor operar. Geralmente é uma bateria, mas estudos estão sendo desenvolvidos para se utilizar recursos da natureza para a geração de energia, como o sol e o vento [Roundy et al., 2004]. Os dispositivos sensores são os componentes que sensoriam o ambiente, podendo ser de diversos tipos como termistor, umidade, luminosidade, magnetômetro e acelerômetro. A figura 2.1 ilustra basicamente uma RSSF.

Uma RSSF pode ser organizada de forma plana ou hierárquica. Na primeira, todos os elementos da rede executam a mesma função, não havendo diferenças entre eles. Na rede hierárquica, os elementos são organizados em grupos e um nó de cada grupo é responsável por ser o líder do seu grupo, sendo esse um nó de hierarquia mais alta que os outros elementos do grupo. Dentro da hierarquia, os nós de nível mais baixo se comunicam com aqueles um nível acima. Os elementos do nível mais alto da hierarquia se comunicam com o ponto de acesso (PA) da rede, que é a interface entre a RSSF e outras redes externas. Numa rede plana, todos os elementos se comunicam diretamente com o PA. Uma rede, tanto a hierárquica quanto a plana, pode ser heterogênea ou homogênea. Na primeira, os elementos da rede apresentam

características de hardware diferentes. Na rede homogênea, todos elementos apresentam as mesmas configurações de hardware.

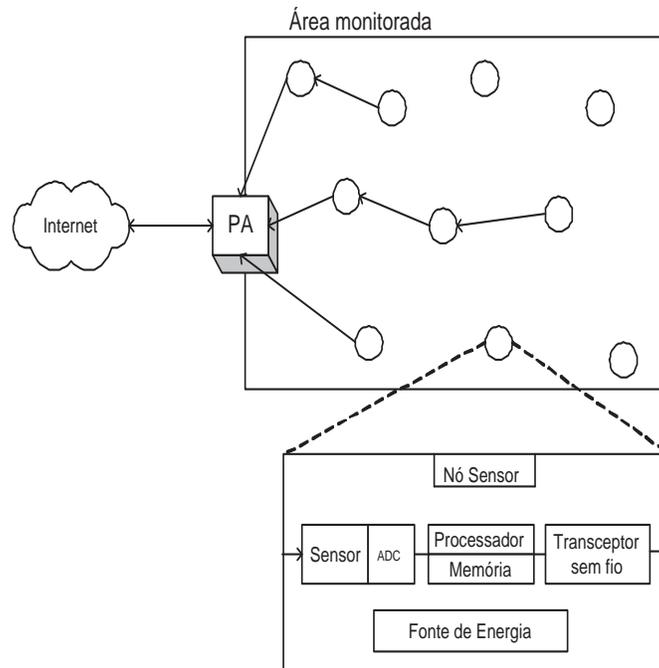


Figura 2.1: Rede de sensores sem fio e nó sensor. O ponto de acesso (PA) permite a conexão da RSSF com outras redes, como por exemplo a Internet.

Algumas das principais diferenças entre RSSFs e redes tradicionais são, com referência às primeiras, são descritas a seguir.

- Grande quantidade de nós sensores compõem as RSSFs, podendo chegar a centenas ou milhares, dependendo da aplicação;
- Os nós sensores possuem restrições de hardware e software. Por apresentarem tamanhos e custos reduzidos, os nós sensores possuem recursos limitados, como a fonte e reserva de energia. Mais detalhes são descritos na Seção 2.2;
- Os nós sensores são geralmente localizados em ambientes inóspitos ou de difícil acesso. As aplicações de RSSFs podem ser empregadas em locais onde é impossível ou muito caro de se explorar com outras tecnologias, como vulcões, desertos, florestas, dentre outros;
- As falhas não são exceções. Dadas as restrições dos nós sensores e os locais de aplicação das RSSFs, falhas podem ocorrer por diversos fatores, como os relacionados à exposição do hardware ao ambiente. Além disso, outros problemas podem ocorrer dependendo do local de aplicação, como por exemplo a danificação do nó por algum animal;

- A topologia da rede é dinâmica seja devido as falhas dos nós sensores, a remoção e a inserção de nós, a retirada de nós sensores de operação por razões de economia de energia ou pela mobilidade dos mesmos;
- A colaboração entre os diversos nós sensores, devido aos recursos escassos, é fundamental para que a RSSF atinja uma meta mais complexa.

O objetivo de uma RSSF é monitorar e eventualmente controlar determinado ambiente. Existem várias aplicações interessantes para as RSSFs, como monitoração de fauna e flora, monitoração ambiental, agricultura de precisão e controle de processos industriais. Além dessas, esse tipo de rede pode ser utilizada em aplicações militares, por exemplo detectando armas químicas ou biológicas, e também em aplicações médicas, por exemplo monitorando batimentos cardíacos e o nível de açúcar no sangue. Atualmente já existem algumas aplicações práticas sendo realizadas, como sensoriamento de abalos sísmicos próximos a um vulcão do Equador [Werner-Allen et al., 2005]¹, controle de vibração na ponte Golden Gate [Kim, 2004], monitoração de espécies de aves na ilha de Great Duck [Mainwaring et al., 2003, Mainwaring et al., 2002], dentre outras. Estudos sobre utilização de nós sensores para monitoração de aspectos do corpo humano também estão sendo feitos [Matt Welsh, 2005, Malan et al., 2004].

2.2 Restrições dos Nós Sensores Sem Fio

A expectativa é que os nós sensores apresentem tamanho e custos reduzidos, permitindo assim aplicações de larga escala das RSSFs. No entanto, devido a essas características, severas restrições de hardware são impostas a eles. Primeiramente, a fonte de energia é limitada e na maioria das vezes finita, como por exemplo baterias. O processador é de baixa frequência e com um conjunto restrito de instruções. As memórias RAM e ROM são restritas, limitando os programas que podem ser instalados e executados. O sistema de comunicação sem fio é restrito quanto à capacidade de transmissão de dados e quanto ao alcance. Todas essas restrições exigem que as soluções desenvolvidas especialmente para as RSSFs sejam compactas e eficientes, consumindo o mínimo de recursos possível.

Para ilustrar o quão severas são as restrições dos nós sensores, duas plataformas existentes e que foram adotadas na avaliação desta dissertação são caracterizadas a seguir. Uma dessas plataformas é a do nó sensor conhecido e comercializado mundialmente, o chamado Mica Motes Z, ou somente MicaZ [MicaZ, 2006]. Esse nó é comercializado pela empresa CrossBow Inc. [Crossbow, 2005], localizada nos Estados Unidos. Ele é composto por um micro-controlador de baixa potência Atmel Atmega128L de 4MHz que possui 128 Kbytes de memória flash de programa, onde se instala o sistema operacional e a aplicação, e 4 Kbytes de memória RAM. O micro-controlador possui integrado o chip Chipcon CC2420 para a comunicação sem fio. O rádio do MicaZ opera na frequência de 2.4 GHz, podendo chegar a uma taxa de 250kbps. O alcance da transmissão varia de 20 a 30 metros em ambientes fechados

¹Vulcanismo é um dos principais fatores que condicionam a formação de abalos sísmicos ou terremotos.

e de 75 a 100 metros em ambientes abertos. Porém, esses valores dependem, dentre outros fatores, das características do ambiente e da localização dos nós em relação a obstáculos. Todos os componentes são alimentados por 2 pilhas modelo AA. O tamanho desse nó é de $5,71\text{cm} \times 3,17\text{cm} \times 0,63\text{cm}$, ou aproximadamente 11cm^3 . O peso é de 18 gramas sem as pilhas. A figura 2.2 apresenta uma foto do nó sensor MicaZ.



Figura 2.2: Plataforma de nó sensor MicaZ.

A outra plataforma é a WINS [Pottie e Kaiser, 2000], composta por um processador Intel *StrongARM 1100* com frequência de 133MHz e cache de 16 Kbytes para instruções e 8 Kbytes para dados. Possui 1 Mbyte de memória flash de programa e 128 Kbytes de RAM. O modelo do rádio utilizado é o *Conexant RDSSS9M*. O seu alcance de transmissão pode ultrapassar os 100 metros a uma taxa de 100 Kbps. Como fonte de energia, o WINS utiliza duas baterias 9V. As suas dimensões são $6,98\text{cm} \times 6,66\text{cm} \times 8,89\text{cm}$, ou aproximadamente 413cm^3 . A figura 2.3 ilustra esse nó sensor.



Figura 2.3: Plataforma de nó sensor WINS.

2.3 Gerenciamento de Redes

O aumento da importância das redes de computadores para os negócios e para a sociedade tornou essa tecnologia indispensável nos últimos anos. Além disso, o crescimento das redes, suas aplicações e número de usuários tornaram as redes cada vez mais complexas, sujeitas portanto a mais falhas e, conseqüentemente, a indisponibilidade de algum serviço essencial. O gerenciamento de redes surgiu com o objetivo de auxiliar administradores de sistemas a monitorar e controlar a rede, seus serviços e seus recursos.

Na monitoração, o objetivo é coletar e analisar o estado e o comportamento da configuração e dos componentes da rede. Pode ser vista como uma função de "leitura". Já o controle é responsável por alterar parâmetros dos componentes, podendo ser visto como uma função de "escrita".

O modelo OSI de gerenciamento classifica os requisitos do gerenciamento em áreas funcionais, definidas como:

- gerenciamento de falhas - engloba basicamente funções de detecção, isolamento, diagnóstico e correção de falhas na rede;
- gerenciamento de contabilização - visa contabilizar e verificar os limites da utilização dos recursos da rede;
- gerenciamento de configuração - engloba a monitoração e manutenção de mudanças da estrutura física e lógica da rede;
- gerenciamento de desempenho - visa planejar a capacidade da rede e monitorar e analisar o desempenho da mesma;
- gerenciamento de segurança - engloba funções que visam proteger os elementos da rede, monitorando e detectando violações das políticas de segurança definidas.

A maioria dos sistemas de gerenciamento de rede usam a mesma estrutura básica, ilustrada pela figura 2.4. Os elementos gerenciados (computadores, sistemas, hubs ou outros dispositivos de rede) executam um software que permite o envio de alertas quando problemas são identificados. Ao receber essas mensagens de alerta, as entidades de gerenciamento executam uma ou mais ações com o objetivo de solucionar os problemas notificados.

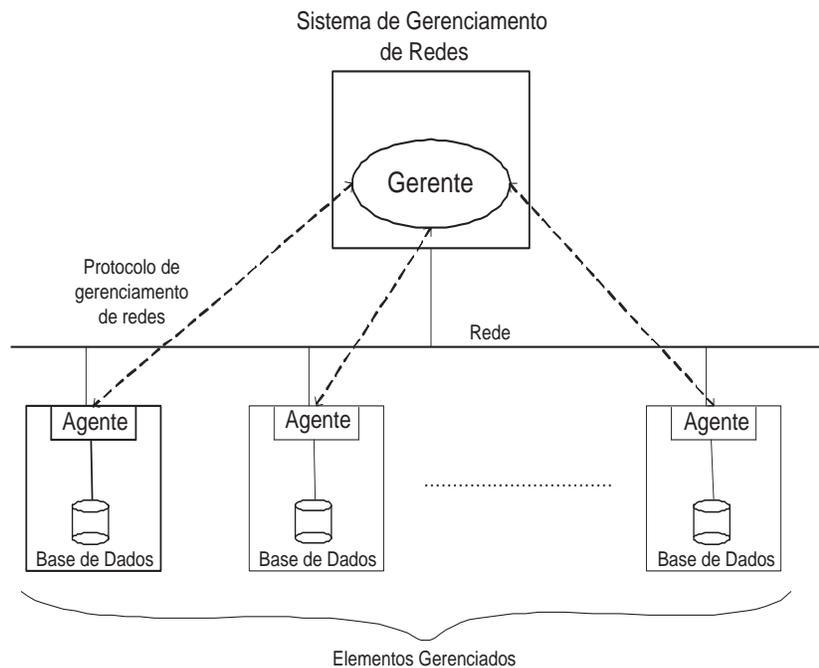


Figura 2.4: Estrutura básica do gerenciamento de redes.

Além disso, as entidades de gerenciamento podem requisitar valores de variáveis monitoradas aos elementos gerenciados. Para isso, os elementos gerenciados executam uma função

de agente. Agentes são módulos de software que compilam as informações sobre os elementos gerenciados nos quais residem, armazenando essas informações em uma base de dados de gerenciamento, para então fornecê-las às entidades de gerenciamento utilizando um protocolo de gerenciamento para a comunicação.

Em termos gerais, a entidade de gerenciamento é chamada de gerente e é a responsável por monitorar informações dos elementos gerenciados, executar as funções e serviços de gerenciamento sobre essas informações de gerenciamento (MIB) e controlar parâmetros da rede. O agente é o responsável por coletar as informações locais dos elementos gerenciados, armazená-las em uma base de informações, responder às solicitações de um ou mais gerentes e notificá-lo(s) em caso de eventos. Os elementos de rede ou elementos gerenciados são os dispositivos monitorados e controlados pelos gerentes. A comunicação entre gerentes e agentes é realizada com o uso de um protocolo de gerenciamento definido na camada de aplicação de uma arquitetura de gerenciamento e os recursos gerenciáveis são modelados computacionalmente em termos de objetos, e são chamados de objetos gerenciados.

Apesar de normalmente as abordagens adotadas no gerenciamento de redes serem requisição/resposta e notificação de alarmes (ou eventos), outras podem ser adotadas. Por exemplo, uma abordagem com potenciais benefícios é a de agentes móveis [Bieszczad et al., 1998]. Essa abordagem utiliza o mecanismo de mobilidade de código para enviar os serviços de gerenciamento para serem executados localmente nos elementos de rede. Outras abordagens também foram propostas ao longo do tempo, como por exemplo o gerenciamento baseado em Web [Ju et al., 2000] e baseado em *Web Services* [Pras et al., 2004].

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Este capítulo apresenta uma descrição dos principais trabalhos relacionados à esta dissertação. Como a dissertação se enquadra no tema de gerenciamento de RSSFs, os trabalhos com esse propósito são descritos na Seção 3.1. Como ainda não existem trabalhos na literatura que propõem o uso de agentes móveis para o gerenciamento de RSSFs, trabalhos que propõem novas tecnologias para o uso de agentes móveis nesse tipo de rede são introduzidos na Seção 3.2.1 e alguns trabalhos que aplicam agentes móveis com outros objetivos são apresentados na Seção 3.2.2. Vários trabalhos da literatura abordam o uso de agentes móveis para o gerenciamento de redes tradicionais, dos quais os principais encontrados são descritos na Seção 3.3.

3.1 Gerenciamento de Redes de Sensores Sem Fio

Até o momento, poucos trabalhos da literatura abordam o tema relacionado ao gerenciamento de RSSFs. A iniciativa de se adotar soluções de gerenciamento em RSSFs foi feita por Ruiz et al. na definição da arquitetura Manna [Ruiz et al., 2003b, Ruiz, 2003]. Essa arquitetura fornece soluções integradas de gerenciamento para diferentes aplicações de RSSFs. Dadas as características das RSSFs, os autores da arquitetura Manna sugerem que mecanismos de auto-gerenciamento sejam adotados. No auto-gerenciamento, os serviços e funções de gerenciamento são executados pelos próprios nós sensores, que tomam decisões sem necessidade de ajuda externa de administradores humanos. A arquitetura Manna [Ruiz, 2003] é a referência usada por essa dissertação nos aspectos de gerenciamento, e será descrita em mais detalhes no Capítulo 4.

Alguns trabalhos subsequentes à proposta da arquitetura Manna avaliaram os benefícios do auto-gerenciamento em RSSFs. Os trabalhos [Ruiz et al., 2003a, Ruiz et al., 2004a] realizaram simulações para avaliar o gerenciamento de serviços em RSSFs. Os resultados indicam que RSSFs com negociação de serviços tendem a prolongar o tempo de vida da rede e apresentar mais precisão nos dados sensorizados. Os trabalhos [Ruiz et al., 2004b, Ruiz et al., 2003c] avaliam o uso de estratégias de gerenciamento em diferentes configurações e organizações de RSSFs, adotando uma estratégia centralizada. Os resultados revelam que

o gerenciamento é importante não só para prover informações relevantes, mas também para promover o uso de recursos e prolongar o tempo de vida da rede. No entanto, uma estratégia centralizada pode não ser adequada para RSSFs de larga escala. Para se ter uma solução mais escalável, os trabalhos [Silva et al., 2004a, Silva et al., 2004b] propõem o uso de uma estratégia distribuída e hierárquica de gerenciamento, onde é associado um gerente por domínio de gerenciamento. O foco desses dois últimos trabalhos está na formação dos domínios de gerenciamento, que é feita com a colaboração entre os gerentes.

Para avaliar mais detalhadamente a negociação de serviços de gerenciamento, os trabalhos [Ruiz et al., 2005c, Ruiz et al., 2005b, Ruiz et al., 2005a, Ruiz et al., 2005d] verificam a eficiência do uso de políticas para realizar alterações nas configurações dos serviços de auto-gerenciamento desempenhados. Para essa avaliação, uma aplicação de detecção de incêndio foi proposta. Constatou-se que a RSSF que adotou soluções de auto-gerenciamento teve seu tempo de vida prolongado e, ainda assim, conseguiu aumentar a precisão da informação monitorada, permitindo que um eventual incêndio fosse detectado mais cedo e com mais eficácia.

Existem ainda outros trabalhos que propõem novos algoritmos e estratégias para a execução de funções específicas do gerenciamento de RSSFs. Por exemplo, o trabalho [Siqueira, 2006] avalia uma integração da função de controle de densidade (veja Seção 4.1) com um protocolo de roteamento.

Até o momento, não existem trabalhos que apliquem agentes móveis no gerenciamento de RSSFs. No entanto, o trabalho [Shen et al., 2003] adota mecanismos de migração de *scripts* para o gerenciamento de redes *ad hoc* sem fio. *Guerrilla* é uma arquitetura de gerenciamento para redes *ad hoc* sem fio em que cada nó da rede executa um agente SNMP [Stallings, 1998] e um protocolo de requisição/resposta. Além disso, alguns nós também executam um módulo de processamento de *scripts*, que permite que programas compactos migrem para eles e desempenhem localmente os serviços de gerenciamento. Essa arquitetura apresenta alguns pontos negativos que a impede de ser adotada em RSSFs. Algumas suposições feitas para o *Guerrilla* não são adequadas para RSSFs, como o uso do SNMP que foi mostrado ser ineficiente para a tecnologia de nós sensores em [Silva et al., 2005a, Silva et al., 2005b]. Além disso, a avaliação feita pelos autores do trabalho não considera o custo da migração dos *scripts* e a escalabilidade da rede, métricas essas importantes em RSSFs. Os *scripts* utilizados no *Guerrilla* não são agentes móveis autônomos. Eles são simples programas que migram e executam os serviços, sendo incapazes de tomar decisões estratégicas.

Por ser mais completa e aderente às características das RSSFs, a arquitetura Manna foi escolhida para ser adotada, já que utiliza protocolos específicos para RSSFs, prevê o uso de agentes móveis e integra as funcionalidades da aplicação da rede à solução de gerenciamento. As avaliações efetuadas nesse trabalho, diferente das efetuadas nos trabalhos [Ruiz et al., 2003a, Ruiz et al., 2004a, Silva et al., 2004a, Silva et al., 2004b, Ruiz et al., 2005c, Ruiz et al., 2005b, Ruiz et al., 2005a, Ruiz et al., 2005d] cujo objetivo é verificar a eficiência do uso do gerenciamento em RSSFs, visa avaliar e comparar diferentes abordagens de gerenciamento.

3.2 Agentes Móveis em Redes de Sensores Sem Fio

Nesta seção são apresentados os trabalhos que abordam o tema de agentes móveis em RSSFs, separados em duas partes: tecnologia e aplicações. Na primeira parte são apresentados os trabalhos que apresentaram propostas de desenvolvimento de tecnologias que permitem o uso de agentes móveis em RSSFs. Na segunda parte são descritas algumas aplicações práticas de agentes móveis em RSSFs.

3.2.1 Tecnologia

Até o momento, poucos trabalhos apresentam propostas de desenvolvimento de tecnologia para o uso de agentes móveis (AMs) em RSSFs. A teoria por trás de agentes móveis é a mobilidade de código [Fuggetta et al., 1998], cujo objetivo a migração do código para elementos remotos, sendo que uma das maneiras de se fazer isso é com o uso de agentes móveis. Em RSSFs, a maioria dos trabalhos de mobilidade de código está relacionada com reprogramação, isto é, alterar o código dos nós sensores remotamente via rádio de forma a atender a aplicação, sem precisar conectá-los ao computador diretamente. Existem trabalhos que abordam a reprogramação utilizando comunicação em único salto [Jeong et al., 2003, Jong e Culler, 2004] e em múltiplos saltos [Chlipala et al., 2003, Stathopoulos et al., 2003, Wang e Kulkarni, 2004]. Todas essas soluções visam alterar apenas o código binário da aplicação dos nós sensores da rede. Porém, com essas soluções não é possível prover o mecanismo de agentes móveis, que requer mais sofisticação na comunicação e no desenvolvimento do código do agente.

Uma ferramenta importante para permitir o uso de agentes móveis é uma linguagem de programação interpretada e o respectivo interpretador. Isso pode ser alcançado com uma máquina virtual (MV), que interpreta instruções virtuais de uma linguagem de alto nível, transformando-as em instruções reais do processador. Maté [Levis e Culler, 2002] é uma MV proposta para RSSFs, mais especificamente para o sistema operacional *TinyOS* [Levis et al., 2004]. A linguagem de programação proposta e utilizada pelo Maté é chamada de *tinyScript*. Uma das vantagens de se utilizar programas virtuais (interpretados apenas pela MV correspondente) é a capacidade para restringir os comandos que podem ser executados, fornecendo uma interface usuário/sistema operacional, ou seja, o usuário só pode fazer o que a MV permitir. Além disso, permite que diferentes plataformas de hardware executem o mesmo *script* e que programas sejam escritos e inseridos na rede com maior facilidade, já que não precisam ser compilados.

Para o envio dos *scripts* aos nós da rede com o uso do Maté, o código é quebrado em cápsulas de 24 instruções virtuais, sendo cada uma com 1 byte de tamanho. *Scripts* podem ser compostos por mais de uma cápsula. Cada cápsula se encaixa em um pacote do *TinyOS* e também contém um identificador e a versão do código. Os *scripts* enviados pela rede são distribuídos por inundação para todos os nós da mesma.

Como o Maté transmite instruções virtuais que podem encapsular mais de uma instrução binária, ele é eficiente na comunicação. No entanto, origina-se uma carga extra para a interpretação das instruções virtuais. Foram feitas medições do número de instruções executadas

por segundo e também de tamanhos de diferentes programas para verificar se a carga extra no processamento é compensada pela economia de energia na comunicação. Os resultados mostraram que, para um número pequeno de execuções, Maté é preferível à reprogramação binária, ou seja, a carga do processador é baixo se comparado com a economia de energia na comunicação. Porém, para códigos que irão permanecer por mais tempo nos nós sensores, a reprogramação binária é mais eficiente.

Maté adota um mecanismo de propagação epidêmica, onde todos os elementos da rede recebem as novas versões de *scripts*. Para permitir que agentes móveis sejam utilizados, Szumel et al. propuseram uma extensão do Maté, o Bombilla Agent [Szumel et al., 2005], que permite que o código seja propagado seletivamente, isto é, para elementos específicos e não para toda a rede. Com isso, AMs autônomos podem ser lançados na rede e tomar decisões de quando e para onde migrar de acordo com as características do ambiente.

Além do Maté e de sua extensão para permitir agentes móveis, o trabalho denominado Agilla [Fok et al., 2006, Fok et al., 2005] também permite o uso de agentes móveis para RSSFs. Agilla é um *middleware* para criação e execução de agentes móveis em RSSFs. Agilla, assim como o Bombilla Agent, é baseado no Maté. Ambas as soluções visam alterar o Maté para permitir o uso de agentes autônomos. Elas implementam mecanismos para que um agente saiba a lista de vizinhos do nó hospedeiro e também mecanismos de migração diferente da do Maté. Uma diferença entre as duas soluções é que o Agilla permite a alocação de mais de um agente simultaneamente em um mesmo nó.

No momento do desenvolvimento do trabalho, o Agilla ainda estava sendo desenvolvido, sendo que o código não estava disponível e pouca documentação podia ser encontrada. O Maté e sua extensão, o Bombilla Agent, são suficientes para o desenvolvimento dessa dissertação e são adotados para a avaliação da abordagem de agentes móveis no gerenciamento de RSSFs.

3.2.2 Aplicações

Em [Tseng et al., 2004] é apresentado um modelo de localização de alvos móveis em RSSFs utilizando AMs. A idéia é que o código do agente migre de acordo com a posição do alvo, cuja execução é feita sempre em um nó sensor próximo a esse. Assim que um alvo é detectado, um processo de eleição elege um mestre, que será o primeiro nó a executar o agente. O mestre então convida dois outros nós vizinhos, chamados de escravos, e envia uma cópia do AM para eles. Esses três nós cooperam para executar o algoritmo de triangulação e identificar a posição aproximada do alvo. À medida que o alvo se move, o processo se repete. Como os autores assumiram uma topologia triangular onde a posição dos nós formam diversos triângulos, é possível identificar quando o alvo sai de uma área e entra em outra de acordo com a força de sinal. Pequenos experimentos reais foram realizados apenas com o intuito de verificar se a solução realmente identifica o alvo, sem fazer nenhuma avaliação de desempenho e consumo de recursos. Foram utilizados até 12 *notebooks* como nós sensores e um como alvo. A força do sinal do alvo foi utilizada para a sua identificação. Os resultados demonstram que a foi possível identificar o trajeto do alvo perto do real.

Nos artigos [Qi et al., 2001a, Qi et al., 2001b] é proposta uma aplicação que usa AMs para realizar a integração de dados em RSSFs. Para isso, foi utilizado o algoritmo de multi-resolução, cuja idéia básica é construir funções simples a partir das leituras dos sensores em um grupo e resolver essas funções em escalas sucessivas. Na abordagem tradicional, os nós sensores enviam a leitura dos sensores para um elemento de processamento, que então realiza a integração de todos os dados. Já na abordagem de AMs, o código para integração migra por todos os nós, e a cada execução apresenta um resultado parcial da integração. Após percorrer todos os nós, o resultado final é identificado. Um modelo analítico foi desenvolvido para comparar as duas abordagens com relação ao tempo de resposta. Os resultados mostram que o uso de AMs pode salvar até 90% do tempo de transferência de dados. Porém, essa técnica gera uma carga extra (criar agente, lançar, etc.). Os autores concluem que o uso de AMs é interessante para RSSFs, principalmente se a quantidade de dados a ser transmitida for muito grande, pois ao invés de levar os dados ao código, leva o código aos dados.

O artigo [Qi e Wang, 2001] utiliza AMs para a fusão de dados em RSSFs. Os dados são mantidos nas origens, enquanto o código do processo de fusão migra para os nós como agentes móveis. Nesse trabalho é proposto um método de como determinar os itinerários dos AMs de forma a consumir o mínimo de recursos possível. Para tal, o AM verifica, a cada consulta, a precisão/confiabilidade dos dados desejados. Se essa precisão/confiabilidade atingir a meta, o AM pode retornar antes de ter percorrido todos os nós do itinerário. A lista ótima de nós a serem percorridos é determinada através de uma função objetivo que visa diminuir o tempo de computação e o consumo de energia relativo a essa computação. Os autores supõem que o tempo gasto na transmissão é muito menor que o tempo gasto no processamento, e portanto poderia ser ignorado. Não foram realizados experimentos ou simulações para demonstrar os benefícios da solução.

O trabalho descrito em [Qi et al., 2003] avalia o uso de AMs para o processamento de dados em RSSFs. Ao invés de os dados serem transmitidos para um elemento que faz o processamento geral, o código migra para os nós onde os dados estão. Foi proposto um modelo analítico para a avaliação do tempo de execução e do consumo de energia. Para verificar a carga extra de transmissão, foram feitas simulações utilizando o GlomoSim [Zeng et al., 1998]. Na avaliação, o número de nós variou de 2 até 30, mantendo-se sempre um único AM. Também foi variado o número de AMs de 1 até 50 para uma rede com tamanho igual a 100. Além disso, foram feitas alterações no tamanho dos agentes móveis. Os resultados mostram que a utilização de AMs é mais escalável que a centralizada, apresentando melhores tempos de resposta e consumo de energia. Porém, os parâmetros utilizados na avaliação desse trabalho não foram compatíveis com RSSFs reais, como por exemplo largura de banda de 2 Mbps e taxa de processamento de 100 Mbps.

No resumo apresentado em [Wang e Qi, 2004], é estudado o problema de detecção de múltiplos alvos em RSSFs. É apresentada uma abordagem descentralizada e progressiva de detecção, baseada no algoritmo de estimação Bayesiana de número de origem [Roberts, 1998]. O algoritmo clássico de estimação Bayesiana foi modificado para se ter uma abordagem progressiva de detecção, baseada na relação iterativa entre os nós sensores. O algoritmo tradi-

cional não é adequado para RSSFs de larga escala, já que todos os nós devem enviar os dados para uma unidade central, para que o processamento seja realizado. Os autores então propõem uma abordagem progressiva em que AMs migram entre os nós da rede e o processamento é executado localmente. Três experimentos foram realizados para avaliar a proposta, utilizando-se nós sensores Sensoria WINS NG 2.0 [Sensoria, 2005]. No primeiro, 10 sensores monitoram dois veículos que passam em direções opostas em linha reta. No segundo, os mesmos 10 sensores monitoram os dois veículos, agora se encontrando em uma junção. No terceiro experimento, 15 sensores monitoram dois veículos em uma área circular com diâmetro de 426 metros. A principal vantagem da abordagem progressiva é a diminuição do tráfego de dados na rede, por exemplo, apenas 8,4% (rede com 10 nós) e 12,14% (rede com 15 nós) do total de dados transmitidos na abordagem clássica são transmitidos nos experimentos realizados.

3.3 Agentes Móveis no Gerenciamento de Redes

O gerenciamento centralizado, apesar de permitir que o(s) administrador(es) controle(m) toda a rede de um único local, tende a gerar uma grande quantidade de tráfego na rede no sentido do gerente, e também um excessivo processamento nesse. Com as redes sendo compostas por grandes quantidades de elementos e sendo heterogêneas, o gerenciamento se tornou uma tarefa ainda mais complexa, surgindo então as estratégias descentralizadas de gerenciamento. O uso de agentes móveis é uma idéia promissora e com diversas vantagens potenciais para o gerenciamento de redes, como redução de tráfego de rede, flexibilidade, escalabilidade, expansibilidade, entre outras. Uma vantagem quanto ao uso de AMs no gerenciamento de redes é a compressão semântica de informações. Um pesquisa em uma tabela da MIB poderia ser executada localmente e somente o resultado final seria enviado pela rede. Nas abordagens centralizadas, talvez toda a tabela deveria ser enviada para o gerente, para que o processamento fosse realizado.

O uso de agentes móveis para o gerenciamento de redes foi proposto primeiramente pelos trabalhos que descrevem o paradigma de gerenciamento por delegação (*Management by Delegation*) [Goldszmidt et al., 1991, Germán Goldszmidt e Yemini, 1991]. A partir de então, alguns trabalhos como [Bieszczad et al., 1998, Baldi et al., 1997, Kahani e Beadle, 1997b] apresentam motivações e benefícios do uso de AMs no gerenciamento de redes. Com relação à utilização de AMs no gerenciamento de redes, alguns dos principais trabalhos são apresentados abaixo.

O trabalho [Arantes et al., 2002], que é parte da dissertação de mestrado encontrada em [da Silva Costa, 1999], apresenta um modelo analítico para comparar as abordagens centralizada (cliente/servidor) e descentralizada (agentes móveis) para o gerenciamento de redes tradicionais. A única métrica avaliada foi o tempo de resposta, que considera o atraso do enlace, tempo de transmissão e tempo de leitura de variáveis na MIB. No modelo centralizado, o gerente envia requisições e recebe respostas de todos os elementos individualmente. No modelo de AMs, o gerente envia um AM para o primeiro elemento da lista, e esse percorre todos os outros elementos. Em cada elemento, o AM é executado, recuperando as informações da MIB.

Os autores utilizam o modelo em três estudos de caso: gerência remota em uma LAN, gerência de uma rede local e gerência de uma rede de topologia genérica. Para validar o modelo, eles compararam os resultados obtidos no trabalho com os resultados de experimentos de outros artigos, observando que os valores de ambos os resultados foram parecidos. Os resultados mostram que a melhor técnica de gerenciamento depende da topologia da rede e também de variáveis como atraso da rede, quantidade de recursos a serem gerenciados e tarefas a serem executadas.

No trabalho [Kona e Xu, 2002], os autores propõem um *framework* para o gerenciamento de redes baseado em agentes móveis. Esse *framework* é híbrido, pois permite ao gerente escolher entre o uso de agentes móveis e de SNMP, dependendo das atividades a serem realizadas. Quando o gerente necessita de dados de um elemento gerenciado, ele envia um AM para esse elemento. O AM executa as tarefas desejadas pelo gerente e retorna ao final da execução com os resultados. O envio de AMs pode ser por *broadcast* (todos elementos) ou por itinerário (lista de elementos). Resultados experimentais mostram que, à medida que se aumenta a quantidade de objetos gerenciados da MIB, a utilização de AMs é mais adequada no quesito atraso do que de SNMP. Em resumo, quando o gerente precisa de poucos dados de poucos elementos, SNMP é mais adequado. Porém, para uma grande quantidade de dados de muitos elementos, AMs se tornam mais eficientes. Esses resultados ilustram a característica de que AMs é uma técnica mais escalável que o modelo centralizado.

O artigo [Stephan et al., 2004] apresenta uma nova plataforma de gerenciamento baseada em agentes móveis que consiste em alguns agentes fixos inteligentes coordenando um conjunto de AMs para alcançar uma infraestrutura de gerenciamento flexível e escalável. Essa plataforma é composta por cinco componentes principais, além de quatro tipos diferentes de agentes móveis, sendo eles *monitoring*, *segmentation*, *SLA* e *managing*, em que o último tem como tarefa o gerenciamento dos outros agentes. Para avaliar a plataforma, foram feitos experimentos comparando-a com a estratégia centralizada SNMP. Com relação ao tamanho dos agentes, os autores verificaram que esses são até 100 vezes maiores que pacotes SNMP, resultando em um maior consumo de banda. Porém, a estratégia de AMs se apresentou mais escalável, sendo que a utilização da largura de banda cresce mais lentamente com o crescimento do número de nós do que a estratégia SNMP. Além disso, o processamento ficou distribuído entre os vários elementos de rede, enquanto que 100% deste foi realizado no gerente central na estratégia SNMP. O mesmo se pode dizer quanto à distribuição da utilização da largura de banda.

O trabalho [Simões et al., 2002] apresenta experimentos de avaliação de diferentes abordagens de recuperação e processamento de informações de gerenciamento em redes tradicionais. O principal objetivo é verificar o impacto da localidade e da distribuição na execução das tarefas de gerenciamento. Cinco modelos com variações de esquemas de mobilidade de AMs foram propostos e avaliados. Localmente, o AM recupera dados da MIB. Experimentos foram realizados em redes LAN para avaliar o tempo de resposta e o tráfego gerado. Em geral, os autores concluíram que o desempenho é dado principalmente pela distribuição e não pela localidade. Os estudos mostram que AMs, quando associados a modelos de distribuição apro-

priados, são bastante eficientes. Além disso, possibilitam outras características, como por exemplo, flexibilidade. Um resultado também importante é que, com a escassez da largura de banda, a compressão dos dados passa a ser um fator importante no desempenho, já que diminui o consumo de banda da rede por diminuir o tamanho dos agentes móveis.

O artigo [Liotta et al., 1999] propõe um modelo analítico para avaliar a eficiência e escalabilidade de sistemas de monitoração, sendo eles o centralizado tradicional e outro baseado em AMs. As métricas avaliadas foram tráfego na rede e atraso. Os resultados analíticos mostram que AMs se apresentam mais eficientes considerando o tráfego na rede, mas nem sempre em escalabilidade. Resultados de atraso mostram que soluções de AMs melhoram tanto a escalabilidade quanto a eficiência. Não foram feitas nem simulações nem experimentos para validar o modelo.

Além dos descritos acima, os trabalhos [Zapf et al., 1999, Gavalas et al., 2000] avaliam o uso de AMs no gerenciamento de redes através de modelos analíticos e simulações. Com relação a experimentações, também existem os trabalhos [Bohoris et al., 2000, Gray et al., 2001, Rubinstein et al., 2000, Sahai e Morin, 1998, Pinheiro et al., 1999].

As avaliações apresentadas nos trabalhos descritos acima não podem ser consideradas para RSSFs, pois foram realizadas sem considerar restrições de processamento, comunicação e energia. Além disso, não foram feitas avaliações de consumo de energia e perda de pacotes, que são métricas importantes para RSSFs e que podem ser fundamentais no desempenho das mesmas.

3.4 Conclusão

Este capítulo apresentou os principais trabalhos relacionados com esta dissertação. Primeiramente, foram apresentados os trabalhos que envolvem o gerenciamento de RSSFs, que é o principal tema da dissertação. Foram descritos os trabalhos que avaliam o uso de soluções de gerenciamento para este tipo de rede. Esses trabalhos estão relacionados com a arquitetura de gerenciamento Manna, utilizada como base para a dissertação, e mostram que o gerenciamento tende a prolongar o tempo de vida da rede e ainda assim prover eficácia nos resultados da aplicação.

Por esta dissertação também estar envolvida com o uso de agentes móveis em RSSFs e esse ser um tema pouco explorado até o momento, também foram apresentados trabalhos envolvidos nessa área. Inicialmente, as principais tecnologias existentes para se ter mobilidade de código em RSSFs foram apresentadas. Os principais trabalhos desta área visam a reprogramação dos nós sensores, não permitindo o uso de agentes móveis. Porém, dois trabalhos desenvolvem tecnologias para o uso de agentes móveis em RSSFs, chamados de *Maté* e *Bombilla Agent*. O primeiro propõe uma máquina virtual que permite o envio de *scripts* pela rede. Já o segundo é uma extensão do primeiro que inclui mais funcionalidades nas instruções virtuais, permitindo que agentes móveis sejam desenvolvidos. Além das tecnologias, também foram apresentados os trabalhos que aplicam agentes móveis em outros contextos de RSSFs, como para a localização de alvos móveis e para o processamento de dados.

Ainda não existem trabalhos que envolvam o uso de agentes móveis para o gerenciamento de RSSFs. Foram apresentados alguns dos principais trabalhos que adotam agentes móveis para o gerenciamento de redes tradicionais. Esses trabalhos consideram que a abordagem de AMs para o gerenciamento é muito interessante, apresentando resultados positivos a seu favor. Porém, devido às RSSFs diferirem bastante das redes tradicionais, esses resultados não podem ser considerados para tais redes.

Capítulo 4

Gerenciamento de Redes de Sensores Sem Fio

Neste capítulo, os conceitos relacionados com o gerenciamento de RSSFs são apresentados. A Seção 4.1 apresenta as características da arquitetura Manna, composta por um conjunto de modelos específicos para o gerenciamento de RSSFs. Na Seção 4.2, diferentes estratégias de gerenciamento para RSSFs são apresentadas, como a centralizada, hierárquica e distribuída. Para cada estratégia, existem algumas abordagens que podem ser adotadas. A Seção 4.3 apresenta detalhes das abordagens que foram avaliadas neste trabalho, além de outras existentes.

4.1 Arquitetura Manna

O gerenciamento de RSSFs é um tema que somente a pouco tempo começou a ser investigado pela comunidade científica. O trabalho pioneiro nesse tema foi desenvolvido por Ruiz et al. com a proposta da arquitetura de gerenciamento de RSSFs chamada Manna [Ruiz et al., 2003b, Ruiz, 2003].

A arquitetura Manna tem como objetivo principal oferecer soluções integradas de gerenciamento para diversas aplicações de RSSFs. Para isso, além de englobar todas as áreas funcionais de gerenciamento definidos no modelo OSI (veja Seção 2.3) e os diferentes níveis de gerenciamento (negócios, serviços, rede e elemento de rede), o Manna propõe um novo nível de abstração que considera as funcionalidades das RSSFs, sendo elas configuração, manutenção, sensoriamento, processamento e comunicação. Essa arquitetura provê uma lista de serviços e funções de gerenciamento independentes da tecnologia adotada pela rede. Definir um serviço de gerenciamento requer a identificação de quais funções deverão ser executadas, quando e com quais informações. Os serviços são compostos por funções, sendo essas as menores partes de um serviço. As condições para a execução de um serviço ou função são obtidas por modelos ou mapas, os quais representam o estado da rede e servem como referência para o gerenciamento. Por exemplo, o mapa de topologia indica a posição dos nós na rede, e o mapa de energia indica a energia residual dos nós. Os serviços compartilham funções e as funções compartilham os mapas. É pela escolha e execução de um conjunto de serviços, específicos

para a aplicação em questão, que o gerenciamento consegue monitorar, controlar e promover a produtividade da rede. A figura 4.1 ilustra essa relação.

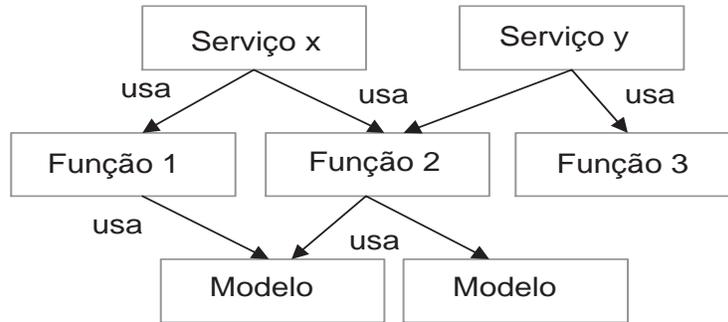


Figura 4.1: Relacionamento entre serviços, funções e modelos na arquitetura Manna [Ruiz, 2003].

A escolha de um conjunto de serviços define o ambiente de gerenciamento para uma determinada aplicação. Dos serviços oferecidos pelo Manna, os principais relacionados a esta dissertação são auto-configuração e auto-manutenção. Esses serviços e as funções descritas abaixo foram implementadas nas abordagens de gerenciamento avaliadas.

O objetivo do serviço de auto-configuração é alterar dinamicamente parâmetros de configuração dos elementos de acordo com a necessidade. Das várias funções relacionadas a esse serviço, pode-se citar o controle de potência dos nós sensores, que foi implementada na avaliação deste trabalho. Essa função visa alterar a potência de transmissão dos nós sensores de acordo com a necessidade de alcance. Por exemplo, se um nó está próximo 10 metros do nó destino de suas mensagens, ele irá utilizar uma potência suficiente para alcançá-lo. Essa configuração visa reduzir o consumo de energia e problemas de comunicação como colisões e perdas.

O serviço de auto-manutenção permite aos elementos de rede monitorarem suas partes constituintes e ajustá-las de acordo com a necessidade. Uma função desse serviço é o controle de densidade, que altera o estado administrativo dos nós sensores. Basicamente, o nó sensor pode operar em três estados administrativos: ativo, em espera e desligado. No estado *ativo*, todos seus componentes estão ligados e em operação. No estado *em espera*, alguns componentes estão desligados e outros em estado ocioso. Por exemplo, pode-se desligar o processador e os sensores, deixando o rádio em um estado que permite a recepção de mensagens. No estado *desligado*, todos os componentes estão fora de operação.

Os benefícios do gerenciamento proposto pela arquitetura Manna foram avaliados em alguns trabalhos como [Ruiz et al., 2003a, Ruiz et al., 2004b, Ruiz et al., 2005c]. Mais detalhes sobre esses trabalhos podem ser encontrados na Seção 3.1 do Capítulo 3.

A arquitetura Manna prevê a utilização de diferentes estratégias de gerenciamento como a centralizada, a distribuída e a hierárquica. Além disso, sua arquitetura funcional permite diferentes localizações para as entidades de gerenciamento (gerentes e agentes), escolhidas de

acordo com as áreas funcionais, níveis de gerenciamento e funcionalidades das RSSFs consideradas. A troca de informações entre agentes e gerentes é realizada através de uma interface que inclui um modelo de informação de gerência e um protocolo de gerenciamento proposto especificamente para RSSFs, chamado MannaNMP [Silva et al., 2005a, Silva et al., 2005b]. A seguir serão descritas as estratégias de gerenciamento permitidas.

4.2 Estratégias de Gerenciamento

A estratégia de gerenciamento define os locais onde as entidades de gerenciamento executarão na rede. Esta seção descreve as estratégias centralizada, hierárquica e distribuída.

4.2.1 Gerenciamento Centralizado

O que caracteriza o gerenciamento centralizado é a existência de um único gerente que controla toda a rede, como ilustra a figura 4.2. Geralmente o gerente é uma máquina com maior poder computacional capaz de executar tarefas complexas e armazenar uma grande quantidade de dados.

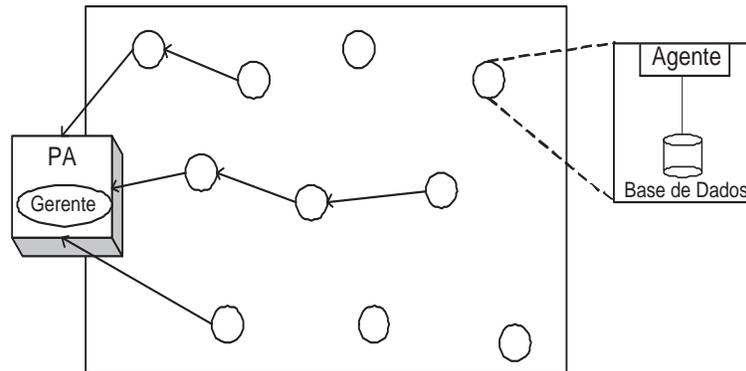


Figura 4.2: Estratégia de gerenciamento centralizado.

Uma das vantagens dessa estratégia é que o gerente centralizado tem uma visão global da rede, o que pode ajudar nas tomadas de decisão. Porém, a estratégia centralizada apresenta algumas desvantagens, que são descritas a seguir.

- sobrecarga de processamento no gerente - em uma rede com grandes quantidades de elementos gerenciados, também é grande a quantidade de dados que o gerente deverá processar para atingir os objetivos de gerenciamento;
- sobrecarga de comunicação no gerente - pelo mesmo motivo do item anterior, também será grande a quantidade de dados que serão enviados e recebidos pelo gerente. A cada requisição enviada pelo gerente, todos os elementos gerenciados enviarão respostas com os dados requisitados, podendo causar sobrecarga nos enlaces próximos ao gerente;

- problemas na comunicação - com um fluxo de dados predominantemente direcionado ao gerente, podem ocorrer problemas na rede, como congestionamento, colisão e perda de pacotes. Em redes sem fio, esses problemas são ainda mais críticos, dadas as condições mais restritas das mesmas;
- atraso nas tomadas de decisão - devido a problemas de comunicação e sobrecarga no gerente, as tomadas de decisões podem ter um atraso muitas vezes inaceitável;
- tolerância a falhas - se o gerente centralizado falhar por algum motivo, toda a rede ficará sem as funcionalidades de monitoração e controle. Além disso, se algum elemento da rede falhar e particionar a rede, deixando uma parte sem comunicação com o gerente, a parte isolada ficaria sem as funções de gerenciamento.

Considerando RSSFs, a estratégia centralizada de gerenciamento já foi utilizada em alguns trabalhos de avaliação do Manna, como por exemplo [Ruiz et al., 2004b, Ruiz et al., 2003a]. Nesses trabalhos, o gerente é único e localizado no ponto de acesso da rede, como ilustra a figura 4.2. Foram feitas avaliações em relação à escalabilidade, demonstrando que ao aumentar a quantidade de elementos gerenciados da rede, o tempo de vida da mesma diminui e a quantidade de dados perdidos por problemas de comunicação aumentam.

Como os nós sensores apresentam restrições de hardware e energia, uma vantagem de se utilizar essa estratégia em RSSFs é quando se tem um elemento sem restrições computacionais e de energia, no caso o ponto de acesso, para executar as tarefas complexas de gerenciamento. Como desvantagens, tem-se os problemas de comunicação como congestionamento, colisão e perdas de pacotes, de sobrecarga de processamento no gerente, resultando em morte prematura dos nós sensores localizados ao redor do gerente, além de não ser tolerante a falhas. Como falhas são freqüentes nesse tipo de rede, uma falha de rota pode deixar parte da rede ou mesmo toda a rede sem gerenciamento.

4.2.2 Gerenciamento Descentralizado

Problemas da centralização, como escalabilidade, tolerância a falhas, desempenho e sobrecarga tanto de processamento como de comunicação nos gerentes trouxeram a necessidade de outras estratégias de gerenciamento [Kahani e Beadle, 1997a]. Surgiram então as estratégias descentralizadas hierárquica e distribuída.

As principais vantagens dessas estratégias são a escalabilidade e a tolerância a falhas. Como desvantagens da descentralização, podemos citar a maior dificuldade de projeto, desenvolvimento, implementação e testes. Essa característica é comum em praticamente todos sistemas descentralizados.

4.2.2.1 Gerenciamento Hierárquico

A estratégia hierárquica utiliza o modelo *gerente de gerentes* (do inglês *Manager of Managers* ou somente MoM) e a divisão da rede em domínios de gerenciamento (paradigma de gerentes por domínio). Cada gerente de domínio é responsável somente pelo seu domínio, não estando

ciente de acontecimentos de outros domínios. O gerente de gerentes situa-se em um nível mais alto da hierarquia e é o responsável por monitorar e controlar os gerentes de domínio. O gerente de gerentes está ciente da rede como um todo, enquanto os gerentes de domínio somente possuem uma visão do próprio domínio. Nessa estratégia, cada domínio é gerenciado paralelamente e não existe comunicação direta entre gerentes de domínio.

Uma das vantagens da estratégia hierárquica é a escalabilidade, já que as tarefas de gerenciamento da rede são divididas entre vários gerentes. A carga excessiva de processamento e de comunicação em um único gerente deixa de ser um problema. Além disso, à medida que a rede cresce, pode-se adicionar outros gerentes de gerentes para se ter uma hierarquia com múltiplos níveis.

Considerando as RSSFs, não foram encontrados trabalhos que avaliam essa estratégia. Como ilustração, pode-se pensar na figura 4.3 como uma opção. O ponto de acesso implementaria o gerente de gerentes. A rede seria dividida em domínios de gerenciamento com um gerente para cada domínio. Haveria a comunicação entre os gerentes de domínio e os elementos gerenciados do domínio correspondente, e também entre o gerente de gerentes e os gerentes de domínio.

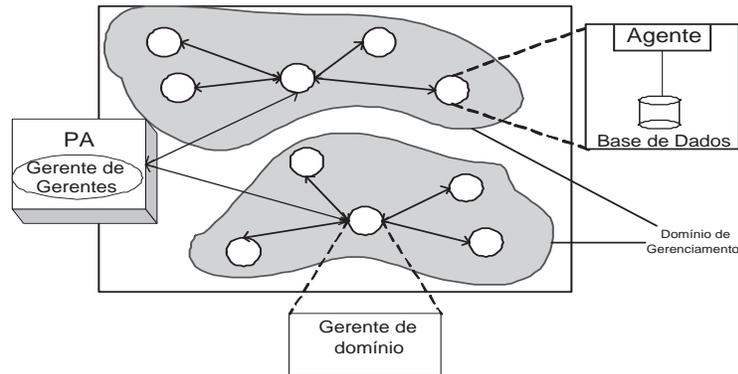


Figura 4.3: Estratégia de gerenciamento descentralizada hierárquica.

Uma vantagem dessa estratégia em RSSFs é a tolerância a falhas e escalabilidade. Um problema é que os gerentes de domínio deverão executar tarefas de gerenciamento que podem ser complexas, consumindo tempo de processamento e energia. Com isso, os nós sensores que executam a função de gerente iriam esgotar mais rapidamente a energia. Uma solução para esse problema é adotar um algoritmo de escalonamento de gerentes de domínio. Com esse algoritmo, os elementos de um domínio se revezam nas atividades de gerentes do domínio. Assim, o consumo de recursos seria balanceado entre todos os elementos. No entanto, essa solução aumentaria a complexidade do gerenciamento.

4.2.2.2 Gerenciamento Distribuído

Na estratégia distribuída ilustrada na figura 4.4, também se utiliza o paradigma de gerentes por domínio, onde cada gerente é responsável por um domínio de gerenciamento. Além disso, os gerentes de diferentes domínios comunicam entre si quando necessário. Sempre que

informações de outros domínios são requisitadas, o gerente correspondente é contactado e as informações são recuperadas. Dessa maneira, os gerentes colaboram para tomarem as melhores decisões para a rede como um todo.

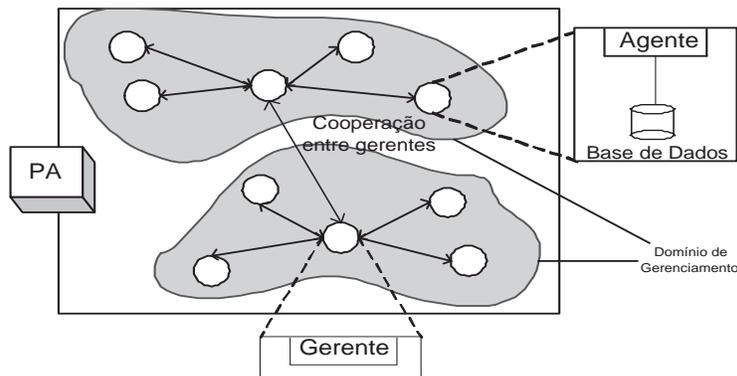


Figura 4.4: Estratégia de gerenciamento descentralizado distribuído.

Como principais vantagens do gerenciamento distribuído, pode-se citar tolerância a falhas e paralelismo, além da escalabilidade. Como o gerenciamento é distribuído entre vários gerentes, um gerente pode "adotar" os elementos de outro domínio caso algum gerente falhe. Isto é, nenhum elemento ficará sem controle, mesmo se algum gerente falhar. Com a realização dos serviços em paralelo, ganha-se em tempo de tomada de decisão. Por último, à medida que a rede cresce, novos gerentes podem ser inseridos na rede para balancear a carga dos gerentes.

Como desvantagens dessa estratégia, pode-se citar o esgotamento de energia mais rapidamente dos nós gerentes. Uma solução para esse problema, além da descrita na sub-seção anterior e relacionada ao escalonamento dos gerentes de domínio, é colocar nós com maior poder computacional e reserva de energia para serem os gerentes, formando uma rede heterogênea. Porém essa solução apresenta algumas dificuldades. Primeiramente, esses gerentes devem ser posicionados em locais estratégicos. Entretanto, tal posicionamento pode ser difícil dependendo do local de aplicação da rede. Por exemplo, em um local remoto nós sensores podem ser lançados de um avião, caindo em posições não planejadas. Outra questão é o custo dos nós mais potentes. Deve ser feita uma análise para verificar se compensa financeiramente ter nós mais potentes que custam mais caro do que ter mais nós menos potentes se revezando.

Alguns trabalhos da literatura abordam o gerenciamento distribuído para RSSFs. No trabalho [Silva et al., 2004a] é proposto um algoritmo distribuído para formar domínios de gerenciamento dinamicamente. Os gerentes colaboram e negociam utilizando políticas e regras bem definidas para decidir quais elementos participarão de quais domínios. Além desse trabalho, os trabalhos de [Ruiz et al., 2005c, Ruiz et al., 2005a] avaliam uma aplicação de detecção de incêndio em que os gerentes são distribuídos na rede. Cada gerente é responsável por um domínio de gerenciamento. Os resultados foram satisfatórios para que a aplicação alcançasse seus objetivos com mais eficiência.

4.3 Abordagens de Gerenciamento

Independente da estratégia de gerenciamento adotada, o(s) gerente(s) da rede precisa(m) recuperar as informações dos elementos gerenciados para poder executar as funções de gerenciamento. Para isso, diversas abordagens podem ser adotadas, como por exemplo as tradicionais requisição/resposta, a notificação de eventos e o uso de agentes móveis. Nessa última estratégia, as funções do gerenciamento podem migrar para serem executadas localmente nos elementos gerenciados. Essas três abordagens são detalhadas a seguir e foram avaliadas no contexto das RSSFs neste trabalho. Além dessas, outras abordagens existentes (gerenciamento por delegação, gerenciamento baseado em Web e gerenciamento baseado em *Web Services*, e as dificuldades de as implementarem em RSSFs são descritas na Seção 4.3.4.

4.3.1 Agentes Móveis

4.3.1.1 Definições

Uma das maneiras de se aplicar o gerenciamento distribuído é através de agentes móveis [Bieszczad et al., 1998, Du et al., 2003], um mecanismo bastante conhecido de mobilidade de código [Fuggetta et al., 1998]. O termo "agentes de software" pode ser definido como "programas que auxiliam o usuário a realizar tarefas, agindo em seu interesse". Esse conceito foi introduzido por pesquisadores da área de inteligência artificial [Hewitt, 1977]. Se um agente de software pode ser transportado para ser executado em um nó remoto, ele é chamado de agente móvel (AM). A grande diferença entre o AM e o agente estático é a capacidade do primeiro de transferir suas funções para execução em elementos remotos. É importante ressaltar que o termo "agente" utilizado no contexto de agentes móveis não possui nenhuma relação com o "agente" da arquitetura de gerenciamento.

Com o uso dessa tecnologia, as tarefas de gerenciamento podem ser migradas para os elementos de rede, ou seja, para onde as informações de gerenciamento estão localizadas. O conceito de mobilidade de código e de agentes móveis é uma opção promissora para o gerenciamento de redes, em especial as RSSFs. Existem diversas potenciais vantagens de se adotar AMs como abordagem de gerenciamento, como por exemplo:

- flexibilidade - novas funcionalidades de gerenciamento podem ser inseridas com facilidade na rede, criando-se novos agentes móveis de acordo com a necessidade;
- tolerância a falhas - a falha de elementos de rede ou de gerentes podem ser superadas com a criação de agentes móveis para substituir funcionalidades eventualmente perdidas;
- operação em ambientes heterogêneos - por geralmente serem escritos em linguagens interpretadas, os agentes móveis podem operar em diferentes plataformas de hardware;
- distribuição regular do processamento - o processamento de tarefas de gerenciamento são executadas nos diversos elementos da rede, balanceando a carga pela rede;

- distribuição da comunicação - o fluxo de dados não sobrecarrega um único elemento, mas é distribuído entre vários elementos da rede;
- escalabilidade - com as tarefas divididas, o acréscimo de mais elementos gerenciados pode ser feito com mais eficiência;
- execução assíncrona - agentes móveis podem recuperar de falhas na comunicação, já que não requerem conectividade contínua entre os elementos.

As principais desvantagens dessa abordagem são a complexidade no desenvolvimento e testes, além da carga extra no processamento. Além disso, o tamanho do agente móvel pode impactar negativamente os resultados, principalmente em se tratando de redes sem fio.

Vários trabalhos já avaliaram e aplicaram AMs no gerenciamento de redes tradicionais, como por exemplo [Arantes et al., 2002, Puliafito et al., 1999, Kona e Xu, 2002] e [Stephan et al., 2004, Bohoris et al., 2000, Simões et al., 2002] (mais detalhes no Capítulo 3). A comunidade de pesquisa vem, nos últimos anos, aplicando cada vez mais AMs em sistemas distribuídos. É notado que os resultados variam de caso para caso, fazendo com que alguns pesquisadores até recriminem o uso de AMs, como por exemplo o trabalho apresentado em [Vigna, 2004], em que os autores apresentam dez razões que dificultam o uso de AMs. Portanto, antes de se aplicar essa técnica, é preciso fazer uma avaliação de desempenho para determinar se ela realmente será eficiente, principalmente em redes com severas restrições como as RSSFs.

4.3.1.2 Funcionamento

Na abordagem de agentes móveis (AMs), ilustrada na figura 4.5, o código do gerenciamento migra embutido em um agente móvel para ser executado localmente nos elementos gerenciados. O AM, além das funções de gerenciamento, carrega também os mapas e uma base de informações para serem atualizados à medida que se percorre a rede.

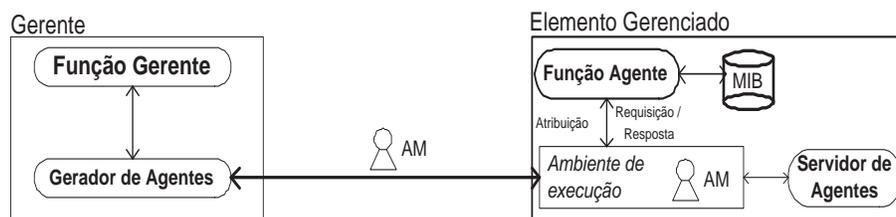


Figura 4.5: Abordagem de gerenciamento baseada em agentes móveis.

Para viabilizar o uso dessa abordagem, é preciso ter instalados dois módulos na rede: o gerador de agentes e o servidor de agentes [Gavalas et al., 1999]. O gerador de agentes é responsável por criar, instruir, disparar e monitorar os agentes. O servidor de agentes é responsável por organizar o ambiente de execução no hospedeiro para receber, executar e transferir os agentes. O local onde esses módulos são executados depende principalmente da estratégia de gerenciamento adotada.

O gerador de agentes, ao criar um agente móvel, agrega o código das funções que deverão ser executadas e um itinerário que o agente deverá percorrer. O agente móvel deve ser capaz de resolver problemas de itinerário dinamicamente. Seguindo o itinerário pré-estabelecido, o agente migra para os elementos gerenciados um a um. Ao chegar em um elemento, o servidor de agentes desse elemento prepara o ambiente de execução para o agente, alocando os recursos necessários para o mesmo. O agente é instalado seguindo regras de segurança e autenticação e, em seguida, seu código é executado localmente. Para executar as funções de gerenciamento, ele acessa as variáveis de gerenciamento do elemento de rede para coletar seus valores, utilizando como interface o agente de gerenciamento instalado a priori no elemento de rede. Com essas informações coletadas, o agente móvel atualiza sua base de informação e executa as funções de gerenciamento, alterando os valores das variáveis caso necessário. Ao finalizar sua execução, o agente é desinstalado e os recursos alocados são liberados, finalizando o ambiente de execução. O agente então migra para o próximo elemento do itinerário, com as informações atualizadas.

4.3.2 Requisição/Resposta

A abordagem requisição/resposta (RR), ilustrada na figura 4.6, é utilizada nas principais arquiteturas de gerenciamento de redes de computadores e telecomunicações, como o SNMP [Stallings, 1998] e CMIP [ISO/IEC 9596, 1991]. Nessa abordagem, a função de gerente envia mensagens de requisição aos elementos gerenciados periodicamente. Ao receber uma mensagem de requisição, o elemento gerenciado acessa a sua base de informações de gerenciamento e recupera os valores das variáveis requisitadas. Esses valores são embutidos em uma mensagem de resposta, que é enviada para o gerente. Ao receber as respostas, o gerente executa os serviços de gerenciamento utilizando os valores das variáveis dos elementos gerenciados como parâmetros. Se necessário, o gerente envia mensagens de atribuição para mudar algum estado ou parâmetro de configuração de um ou mais elementos gerenciados.

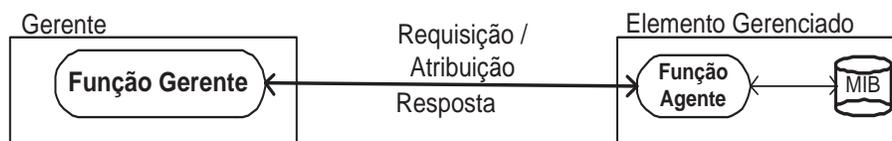


Figura 4.6: Abordagem de gerenciamento baseada em requisição/resposta.

A vantagem dessa abordagem está principalmente na simplicidade, tanto do processo do elemento gerenciado quanto do protocolo de comunicação. Como desvantagem, tem-se um grande volume de dados na rede periodicamente, no momento das requisições e respostas, principalmente nas proximidades do(s) gerente(s). Outro problema é que mesmo valores que não foram modificados ou foram pouco modificados serão enviados para o gerente, consumindo recursos e, no entanto, trazendo poucas ou nenhuma informação útil para o gerenciamento.

4.3.3 Notificação de Eventos

Também utilizada nas principais arquiteturas de gerenciamento em conjunto com a abordagem RR, a abordagem de notificação de eventos (NE) visa alertar ao gerente caso algum problema ocorra na rede. A figura 4.7 ilustra a estrutura básica dessa abordagem. Primeiramente, no início de operação da rede todos os elementos gerenciados enviam mensagens para o gerente informando o estado inicial e os valores dos objetos gerenciados. A partir daí, os elementos gerenciados avaliam os valores dos objetos gerenciados periodicamente. Se algum valor ultrapassar um limite estabelecido, comparando-se com o último valor enviado ao gerente, uma mensagem de notificação é enviada ao gerente para informá-lo desse evento. Como na abordagem RR, o gerente utiliza as informações recebidas para executar os serviços de gerenciamento. Caso necessário, mensagens de atribuição são enviadas a um ou mais elementos gerenciados para alterar seu estado.

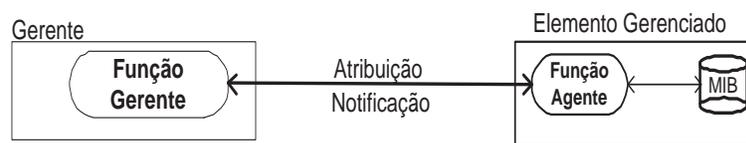


Figura 4.7: Abordagem de gerenciamento baseada em notificação de eventos.

Como principal vantagem da abordagem NE, tem-se que mensagens somente serão enviadas quando realmente necessário, ou seja, na ocorrência de algum evento. Isso economiza recursos da rede, tanto em processamento quanto em comunicação e, conseqüentemente, em energia. Por outro lado, se uma mensagem de notificação enviada é perdida por problemas de comunicação, o gerente nunca saberá da existência do evento relacionado à essa mensagem. Em outras palavras, não é possível saber se uma mensagem não foi recebida pelo gerente porque ela foi perdida ou porque ela nunca foi enviada. Além disso, o desempenho dessa abordagem depende da frequência com que eventos ocorrem na rede. Em redes muito dinâmicas, vários elementos podem tentar notificar eventos ao gerente simultaneamente, podendo causar congestionamento na rede.

4.3.4 Outras Abordagens

As três abordagens descritas anteriormente foram avaliadas neste trabalho em ambientes de simulação e experimental. A escolha das abordagens a serem avaliadas foi feita com base na simplicidade das abordagens RR e NE e nos potenciais benefícios que AMs podem trazer para RSSFs. Além dessas, outras abordagens não avaliadas no trabalho são descritas abaixo.

4.3.4.1 Gerenciamento por Delegação

O gerenciamento por delegação (*Management by Delegation* ou somente MbD) foi criado por Goldszmidt como proposta de descentralização do gerenciamento [Goldszmidt, 1996, Goldszmidt et al., 1991, Germán Goldszmidt e Yemini, 1991]. Essa abordagem utiliza agentes

de delegação, que são programas aptos a serem executados sob controle local ou remoto. As funções de gerenciamento podem ser distribuídas dinamicamente aos elementos gerenciados utilizando os agentes de delegação. Os elementos gerenciados possuem um "processo elástico" que pode inserir as funções trazidas pelos agentes de delegação dinamicamente, e apagá-las depois que forem executadas. O gerente é a entidade delegadora, que envia os agentes de delegação aos elementos gerenciados. Os agentes de delegação podem ser enviados aos elementos para que esses assumam responsabilidade para tratar de potenciais falhas, diminuindo o risco de comunicação em momentos de "stress".

Essa abordagem tem como vantagem a inserção de funções de gerenciamento dinamicamente, somente quando forem necessárias. Além disso, a carga de processamento é distribuído na rede. Como principal desvantagem, tem-se a complexidade do sistema. A implementação de processos elásticos não é uma tarefa trivial, além de ser uma técnica custosa em termos de processamento. A sua adoção é justificável em casos onde se deseja diminuir o tempo de resposta para as tomadas de decisão. Devido à complexidade, essa abordagem não será avaliada no contexto de RSSFs neste trabalho.

4.3.4.2 Gerenciamento baseado em Web

O gerenciamento baseado em Web tem como base a utilização de navegadores Web, como por exemplo o *Mozilla* ou *Internet Explorer*, e do protocolo HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) para administrar a rede [Ju et al., 2000]. Os administradores visualizam o estado da rede e enviam comandos para a mesma por uma interface gráfica desenvolvida para um ambiente Web. Essa característica tem como vantagem a disponibilidade da ferramenta de gerenciamento independente da localização física do administrador, já que navegadores Web são ferramentas básicas existentes em praticamente todo computador.

Nessa abordagem, duas opções de gerenciamento podem ser utilizadas. Na primeira, todos os elementos gerenciados possuem servidores Web instalados para serem acessados pela aplicação de gerenciamento pelo protocolo HTTP. Na segunda, um agente procurador executa o servidor Web e algum outro protocolo padrão de gerenciamento, como por exemplo o SNMP ou CMIP. Para comunicar com os elementos gerenciados, o agente procurador utiliza o protocolo de gerenciamento, e para comunicar com a aplicação de gerenciamento, é utilizado o protocolo HTTP.

Considerando as RSSFs, a primeira opção é inviável de ser implementada, já que servidores Web são aplicativos custosos e ocupam muita memória, sendo improvável a sua instalação em nós sensores sem fio. O que poderia ser feito é uma interface Web para o administrador operar. Para isso, seria preciso ter um agente procurador que comunique com a RSSF. Esse segundo caso não aborda mecanismos de monitoração e controle, não sendo importantes para este trabalho.

4.3.4.3 Gerenciamento baseado em *Web Services*

O gerenciamento baseado em web services é uma abordagem que surgiu recentemente e que vem ganhando atenção da comunidade científica. Essa abordagem utiliza *Web Services*, uma tecnologia que usa XML (*eXtensible Markup Language*) e é suportada por diferentes plataformas. Basicamente, *Web Services* são componentes de aplicação que são publicados na Web e podem ser encontrados e executados por outras aplicações. A idéia básica no gerenciamento baseado nessa tecnologia é publicar serviços de gerenciamento para serem utilizados pelas aplicações.

Alguns trabalhos já avaliaram essa abordagem para redes tradicionais, como [Pras et al., 2004, Fioreze et al., 2005], mostrando que *Web Services* podem diminuir a banda utilizada quando utiliza-se mecanismos de compressão. Porém, essa abordagem consome relativamente mais tempo de CPU que o gerenciamento tradicional utilizando SNMP. XML é uma linguagem de marcação de dados utilizada para descrever dados estruturados em forma de texto legível pelo ser humano. Por esse motivo, mensagens baseadas nessa linguagem requerem mais recursos para serem enviadas pela rede. Como *Web Services* utiliza protocolos baseados em XML na comunicação, estudos devem ser feitos para verificar se é viável a sua implantação em redes com restrições de hardware, como as RSSFs. Se algum mecanismo de compressão for adotado, ou mesmo o XML binário [W3C, 2006], a carga extra no processamento pode ser compensada pela economia de recursos na comunicação. Estudos sobre a utilização deste mecanismo para RSSFs foram feitos, por exemplo, nos trabalhos apresentados em [Delicato et al., 2003, Delicato et al., 2005].

4.4 Conclusão

Este capítulo apresentou os principais conceitos do gerenciamento de RSSFs. Primeiramente, a arquitetura de gerenciamento de RSSFs chamada Manna, base desta dissertação, foi introduzida. O Manna permite que diversas estratégias de gerenciamento sejam utilizadas, como a centralizada, hierárquica e distribuída. As características destas estratégias, suas vantagens e desvantagens também foram apresentadas neste capítulo. Estes conceitos são importantes para ajudar na definição do modelo de avaliação do trabalho.

Além disso, diversas abordagens podem se empregadas para uma determinada estratégia. Uma abordagem de gerenciamento indica como as informações de gerenciamento necessárias para a execução das funções são recuperadas pelo gerente. As três abordagens avaliadas neste trabalho (baseada em agentes móveis, requisição/resposta e notificação) foram descritas. Outras abordagens de gerenciamento, como o gerenciamento baseado em Web e em *Web Services*, foram introduzidas. Porém, essas abordagens podem não ser adequadas para RSSFs e, portanto, não foram avaliadas.

Capítulo 5

Avaliação

Este capítulo apresenta os detalhes das avaliações feitas neste trabalho para comparar as abordagens de gerenciamento baseada em agentes móveis, requisição/resposta e notificação de eventos. A Seção 5.1 descreve a metodologia adotada nas avaliações, incluindo os objetivos que desejamos alcançar, as métricas consideradas para se alcançar os objetivos e o processo de avaliação. Em seguida, na Seção 5.2 é apresentado o modelo de avaliação contendo as principais características consideradas na avaliação. Esse modelo genérico foi instanciado para um ambiente de simulação na Seção 5.3 e para um ambiente real na Seção 5.4.

5.1 Metodologia de avaliação

5.1.1 Objetivos

Neste trabalho, os principais objetivos do modelo de avaliação são descritos a seguir.

1. avaliar a escalabilidade do gerenciamento de RSSFs segundo as diferentes abordagens. Como esse tipo de rede tende a ser composta por uma grande quantidade de elementos, o desempenho das abordagens em redes de larga escala é um fator considerado importante;
2. avaliar o impacto da complexidade do gerenciamento nas diferentes abordagens. A complexidade do gerenciamento a ser adotado em uma RSSF irá variar de aplicação para aplicação. Portanto, é importante saber o desempenho das abordagens dependendo das funcionalidades do gerenciamento. A complexidade será avaliada em termos do tamanho do código e da quantidade de objetos gerenciados considerada;
3. identificar a adequabilidade das abordagens de gerenciamento para aplicações específicas de RSSFs. É esperado que não se tenha uma abordagem ideal a ser adotada em qualquer tipo de rede e aplicação. Portanto, é interessante identificar para quais tipos de aplicação uma determinada abordagem será mais eficiente;
4. verificar a viabilidade e eficiência do gerenciamento de redes segundo a abordagem de agentes móveis para RSSFs. O gerenciamento baseado em AMs ainda não foi explorado

no contexto das RSSFs, não sendo possível saber se essa tecnologia é viável de ser implementada em redes com severas restrições;

5. identificar e relacionar quais aspectos podem ser melhorados para tornar a abordagem de AMs mais eficiente em RSSFs. Com a avaliação da abordagem de AMs, pretendemos identificar alguns pontos fracos das tecnologias existentes até o momento e propor melhorias para proporcionar um melhor desempenho em RSSFs.

5.1.2 Métricas de Desempenho

Para se alcançar os objetivos quanto a avaliação deste trabalho, foram escolhidas as métricas consumo de energia, utilização da largura de banda, perda de pacotes, tempo de resposta e requisitos de memória.

Energia é um recurso importante para as RSSFs, já que todo componente depende dela para operar. Além disso, devido às características das RSSFs como a grande quantidade de elementos e sua aplicação em ambientes remotos, pode ser difícil ou mesmo impossível a recarga ou substituição de baterias. Portanto, o consumo de energia deve ser eficiente para prolongar o tempo de vida da rede. Neste trabalho, o consumo de energia será desmembrado por atividade, sendo consideradas as atividades de transmissão e recepção de dados e processamento.

Outra métrica considerada é a utilização da largura de banda, que indica a quantidade de dados de gerenciamento transmitidos pelas entidades da rede. Além da utilização, também será apresentado a sua distribuição. Com isso é possível identificar quais entidades são responsáveis pelo envio da maior quantidade de dados na rede, ou seja, onde se concentra o maior uso da banda.

Além destas duas, também serão avaliados a perda de pacotes e o tempo de resposta. A primeira permite a identificação do impacto na comunicação de cada abordagem. Em redes sem fio, a perda de pacotes ocorre, entre outros fatores, por colisão quando mais de um elemento tenta transmitir simultaneamente dentro de uma região. Essa métrica é importante pois, em determinadas aplicações, as perdas de pacotes são consideradas inaceitáveis.

O tempo de resposta significa o tempo gasto para que as funções de gerenciamento sejam executadas uma única vez. Na abordagem RR, o tempo de resposta significa quanto tempo leva para o gerente enviar mensagens de requisição para todos os elementos de rede do seu domínio e receber as respectivas respostas. Na abordagem de AMs, o tempo de resposta denota quanto tempo um agente móvel leva para percorrer todos os elementos de rede de um domínio e retornar ao gerente. Na abordagem de notificação essa métrica não é avaliada, já que nem sempre as mensagens de notificação são enviadas.

Como os nós sensores apresentam restrições de hardware, é interessante também saber quanto de memória cada abordagem requer para operar. Este resultado pode ser fundamental para a decisão de adotar uma determinada abordagem. Não adianta uma abordagem ser eficiente se ela requer mais memória do que a disponível nos nós sensores. Neste trabalho será avaliado tanto o consumo com memória ROM quanto com memória RAM.

5.1.3 Processo de Avaliação

Pode-se dividir a avaliação deste trabalho em duas partes: avaliação de desempenho e avaliação funcional. Na primeira, tem-se como objetivo a comparação das abordagens de acordo com o desempenho considerando as métricas apresentadas (Seção 5.1.2). O objetivo da avaliação funcional é comparar as abordagens de acordo com o funcionamento, ou seja, se executaram as funções de gerenciamento a elas atribuídas.

Existem três maneiras de se avaliar soluções propostas para RSSFs: avaliação analítica, avaliação por simulação e avaliação experimental. Considerando a avaliação analítica, a principal desvantagem é a dificuldade de se modelar detalhadamente o comportamento físico da rede sem fio, como por exemplo, mecanismos de controle de acesso ao meio. Em um modelo analítico simplificado, os resultados podem não ser condizentes com uma aplicação real. Como vantagens, obtém-se resultados com poucos recursos e em um curto espaço de tempo.

A simulação tem como desvantagem o menor nível de detalhes se comparada com o experimento, mas dependendo da modelagem do sistema e da ferramenta adotada, obtém-se resultados confiáveis. Outra desvantagem é a complexidade das ferramentas existentes, que são difíceis de serem utilizadas e requerem muitos recursos computacionais. Como vantagens, esse mecanismo permite a coleta de métricas de desempenho importantes e a avaliação da escalabilidade.

Considerando a avaliação experimental, pode-se citar duas dificuldades principais. Primeiramente, os nós sensores ainda são relativamente caros, dificultando a formação de uma rede de larga escala. Como a tendência é que RSSFs sejam compostas por centenas a milhares de elementos, esse tipo de avaliação é importante para validar uma solução. Em segundo lugar, apesar de uma rede real apresentar mais detalhes ao modelo de avaliação, ainda é difícil coletar métricas consideradas importantes para RSSFs, como por exemplo o consumo de energia dos nós. A principal vantagem da experimentação é a avaliação em um ambiente real com as restrições de hardware e as propriedades do meio físico.

Atualmente, a técnica mais adequada para se avaliar soluções para RSSFs é a simulação. Porém, a métrica de consumo de memória de cada abordagem para uma plataforma real não pode ser medida em um ambiente de simulação. Por esses motivos, são avaliadas as abordagens de gerenciamento por simulação e por experimentação. Com o primeiro mecanismo, é possível avaliar as métricas de desempenho e a escalabilidade das abordagens. Com a experimentação é possível avaliar o consumo de memória, o tempo de resposta e o funcionamento de cada abordagem em uma plataforma real.

5.2 Modelo de Avaliação

Esse modelo de avaliação descreve as características relacionadas com a RSSF e também com o seu gerenciamento com o intuito de avaliar diferentes abordagens de gerenciamento, podendo ser adotado em simulações, modelos analíticos ou experimentos reais. Os aspectos considerados nesse modelo são: organização e composição da rede, modelo funcional de geren-

ciamento, tamanho e formato das mensagens utilizadas na comunicação, mecanismo utilizado para permitir agentes móveis em RSSFs e aplicação de sensoriamento.

Organização e Composição da Rede: uma RSSF pode ser organizada de maneira plana ou hierárquica. Na primeira, tem-se somente um nível de hierarquia e todos os elementos da rede estão neste nível. Na segunda, tem-se mais de um nível de hierarquia, sendo que os nós de nível mais alto são responsáveis por receber as mensagens dos nós de nível mais baixo. Diz-se que a rede está organizada em grupos, onde cada grupo possui pelo menos um líder e os outros elementos são chamados de nós comuns. No artigo apresentado em [Duarte-Melo e Liu, 2003], os autores mostraram matematicamente que uma rede organizada em grupos apresenta uma vazão maior que uma rede plana.

Considerando a composição, a rede pode ser homogênea ou heterogênea. Na primeira, todos os elementos apresentam as mesmas características de hardware. Na segunda, os elementos podem diferir quanto às capacidades de hardware, apresentando nós sensores com maior poder computacional, por exemplo. Considerando o gerenciamento de RSSFs, os artigos [Ruiz et al., 2003a, Ruiz et al., 2004b] mostraram que uma rede adotando serviços de gerenciamento é mais eficiente quando está organizada em grupos e os líderes dos grupos apresentam um maior poder computacional.

Apesar de apresentar um desempenho mais eficiente, uma rede hierárquica heterogênea em que os líderes dos grupos possuem maior poder computacional requer maior atenção no seu projeto e na sua implantação (deposição dos nós e configuração inicial). Para balancear o tamanho dos grupos, é preciso posicionar os nós líderes em locais estratégicos. Se vários líderes são posicionados relativamente perto uns dos outros, a rede poderá apresentar vários grupos com poucos elementos e alguns poucos grupos com muitos elementos. Além disso, o custo financeiro poderá ser maior, já que nós com maior poder computacional são mais caros.

No modelo de avaliação deste trabalho, é considerado uma rede hierárquica heterogênea em que os líderes dos grupos apresentam maior poder computacional. Assume-se que as dificuldades listadas acima podem ser contornadas.

Modelo Funcional de Gerenciamento: O modelo funcional de uma arquitetura de gerenciamento define em quais elementos as entidades de gerenciamento serão executadas. Neste trabalho, estamos considerando uma estratégia de gerenciamento distribuída em que os gerentes executarão nos líderes dos grupos. Cada gerente será responsável por um domínio de gerenciamento, composto por todos os nós comuns que fazem parte do seu grupo. Os nós comuns, chamados de elementos gerenciados, compõem um domínio e são gerenciados pelo gerente do seu grupo. Em outras palavras, um grupo na visão da aplicação é um domínio de gerenciamento na visão do gerenciamento.

Tamanho das Mensagens: O tamanho das mensagens de cada abordagem é um parâmetro que impacta os resultados, já que está relacionado à comunicação e processamento dos elementos da rede. Por isso, a definição desse parâmetro é importante para o modelo de avaliação.

O tamanho das mensagens da abordagem de AMs, chamado de S_{MA} , é definido como

$$S_{MA} = S_{header} + S_{Code} + S_{variable_bindings},$$

onde S_{header} é o tamanho do cabeçalho, S_{code} é o tamanho do código do AM e $S_{variable_bindings}$ é o tamanho ocupado pelos identificadores e valores dos objetos gerenciados.

O tamanho das mensagens da abordagem RR, chamado de S_{RR} , difere de S_{MA} pela substituição de S_{Code} por S_{PDU} , que é o tamanho da PDU (*Protocol Data Unit*) definida pelo protocolo MannaNMP [Silva et al., 2005a] e que contém o tipo da mensagem, a identificação do nó, o estado de erro, dentre outros campos. Então,

$$S_{RR} = S_{header} + S_{PDU} + S_{variable_bindings}.$$

O tamanho das mensagens da abordagem de notificação de eventos é definido como

$$S_{NE} = S_{header} + S_{PDU} + S_{variable_bindings}.$$

Os formatos da PDU das abordagens RR e NE são ilustrados nas figuras 5.1 e 5.2, respectivamente. O campo *Tipo* indica o tipo da mensagem, por exemplo, *Requisição*, *Atribuição*, *Resposta* ou *Notificação*. O campo *Id. Requisição* armazena o identificador da mensagem, para controle do gerente. O campo *Id. Agente* é o identificador do agente que o gerente tem interesse em requisitar dados ou atribuir valores. Na mensagem de resposta, o campo *Estado Erro* indica o resultado do processamento e o campo *Índice Erro* contém mais informações sobre algum erro que ocorreu durante o processamento. Na PDU da abordagem NE, o campo *Info. Notificação* contém informações sobre a notificação, indicando o motivo que levou o agente a enviar a notificação. Por exemplo, pode-se ter uma notificação de energia.

Tipo	Id. Requisição	Id. Agente	Variable Bindings
------	----------------	------------	-------------------

a) Mensagem de requisição e atribuição

Tipo	Id. Requisição	Estado Erro	Índice Erro	Variable Bindings
------	----------------	-------------	-------------	-------------------

b) Mensagem de resposta

Figura 5.1: Formato da PDU das mensagens da abordagem RR.

Tipo	Id. Agente	Info. Notificação	Variable Bindings
------	------------	-------------------	-------------------

Figura 5.2: Formato da PDU da mensagem da abordagem NE.

Para todas as abordagens, o tamanho do campo $S_{variable_bindings}$ é calculado pela fórmula

$$S_{variable_bindings} = N_{objects} \times (S_{object} + S_{OID}),$$

onde $N_{objects}$ é a quantidade de objetos gerenciados, S_{object} é o tamanho do valor de cada objeto e S_{OID} é o espaço ocupado pelo identificador do objeto, que é dado por $\lceil \log(N_{objects}) \rceil$ bits.

Suporte a agentes móveis O sistema operacional (SO) para RSSFs mais adotado atualmente é o TinyOS [Levis et al., 2004], o qual já oferece mecanismos de mobilidade de código. Um destes mecanismos é o Maté [Levis e Culler, 2002], uma máquina virtual do TinyOS que permite o desenvolvimento de *scripts* que podem ser enviados via rádio para os nós sensores e executados localmente. Uma extensão do Maté chamada *Bombilla Agent* [Szumel et al., 2005] contém mecanismos para a utilização de agentes móveis em RSSFs. Essa extensão agrega funcionalidades na máquina virtual do Maté, permitindo que os *scripts* tenham mais autonomia. Por exemplo, no Maté básico todos os *scripts* são enviados por inundação para todos os nós da rede. Já no *Bombilla Agent*, os *scripts* podem decidir para onde migrar, sendo possível a migração para nós individuais. Até o momento do desenvolvimento da dissertação, esse foi o único mecanismo de agentes móveis para RSSFs encontrado e portanto será adotado na avaliação deste trabalho.

Aplicação de Gerenciamento: As três abordagens realizam as mesmas funções de gerenciamento. O que muda entre elas é a maneira como as funções são desempenhadas. A escolha e a configuração das funções variam de acordo com a necessidade da aplicação, podendo variar de uma simples monitoração a complexos serviços de controle.

Cada abordagem realiza um ciclo das atividades de gerenciamento com determinado intervalo. Esse ciclo possui um significado diferente para cada uma. Para a abordagem de AMs, significa o intervalo de tempo entre disparos (*dispatch*) de um AM pelos gerentes. Para a abordagem RR, significa o intervalo de tempo entre duas requisições feitas pelo gerente. Já para a abordagem NE, significa o intervalo entre duas verificações que os elementos gerenciados fazem para avaliar possíveis alterações nos valores de seus objetos gerenciados.

Aplicação de sensoriamento Além da aplicação de gerenciamento definida para cada abordagem, a RSSF também executa uma aplicação de sensoriamento. Nessa aplicação, os nós sensores são responsáveis por coletar dados do ambiente com o uso dos sensores e disseminar estes dados ao líder do seu grupo, que então dissemina todos os dados coletados pelo grupo ao ponto de acesso da rede.

5.3 Aplicação do Modelo de Avaliação para o Ambiente de Simulação

Para avaliar as abordagens, é criada uma instância do modelo de avaliação definido anteriormente para um ambiente de simulação. Essa instância atribui valores ao modelo de avaliação, como por exemplo, quantidade de nós, tamanho da área da rede, funcionalidades do gerenciamento e da aplicação de sensoriamento, dentre outros.

5.3.1 Configuração geral

Ferramenta de Simulação Existem diversos simuladores para redes de computadores, como por exemplo Jist [Barr et al., 2005], GlomoSim [Zeng et al., 1998] e NS [Network Simulator, 1999]. O *Network Simulator* (NS) é uma ferramenta livre de código aberto utilizada amplamente pela comunidade científica para simulações de redes tanto cabeadas quanto sem fio. Esse simulador já possui vários protocolos de diversas camadas da pilha, como enlace, rede e aplicação. Especificamente para RSSFs, o NS contém a implementação do protocolo MAC 802.15.4 [ZigBee, 2006] (conhecido também por ZigBee), que está sendo adotado pelos fabricantes de nós sensores como a CrossBow [Crossbow, 2005] e a MoteIv [Moteiv, 2005]. Além disso, uma extensão do NS chamada MannaSim [Braga et al., 2004, Lopes et al., 2006] oferece um conjunto de classes base que podem ser personalizadas de acordo com a necessidade, permitindo que RSSFs sejam simuladas com maior facilidade. Outra característica do NS é a realização das simulações em um nível de detalhes muito alto, tornando os resultados relativos à comunicação confiáveis. Outra vantagem desta ferramenta é a escalabilidade, já que redes com centenas de elementos podem ser simuladas num tempo razoável em servidores de média capacidade. Pelas características do NS e a sua adequação ao modelo de avaliação deste trabalho, resolvemos adotá-la como ferramenta de simulação.

Para a avaliação desse trabalho, um esforço significativo foi preciso para implementar o modelo na ferramenta NS. Todas as três abordagens consideradas foram detalhadamente implementadas, de forma a manter sempre um nível de detalhes aceitável para que os resultados fossem confiáveis. Em particular, a abordagem baseada em agentes móveis requisitou um esforço maior, por ser uma abordagem inovadora para as RSSFs.

Tempo de Simulação: O NS é uma ferramenta que adota o modelo de simulação de eventos discretos. Ela possui uma estrutura de *tempo virtual*, em que mantém e atualiza uma representação interna do tempo. Nesse modelo, um relógio virtual é atualizado (incremento do tempo) formando uma linha do tempo virtual. Durante a simulação, ocorrem eventos relacionados com instantes de tempo na linha do tempo virtual. Estes eventos são tratados por tratadores de eventos específicos. Basicamente, a simulação se baseia em determinar quais e quando os eventos serão lançados, e associar cada evento a um tratador correspondente. O NS pode levar muito tempo de processamento para realizar uma simulação. Por exemplo, 40 minutos de tempo virtual podem levar até 6 horas de tempo real para serem simulados.

Neste trabalho, foi feito um mapeamento do tempo real em tempo virtual. As simulações foram configuradas considerando que a RSSF operará por um dia inteiro (24 horas). Estamos considerando que 4.000 segundos em tempo de simulação (virtual) correspondem a 24 horas em tempo real. Assim sendo, um intervalo de um segundo no ambiente de simulação corresponde a 21,6 segundos no tempo real. Foi utilizado um computador Pentium IV 2.4 GHz com 1 GB de memória RAM e 80 GB de disco rígido para a execução das simulações. Foram necessárias aproximadamente 160 horas para que todos os resultados fossem obtidos.

Número de Repetições: Para se ter uma confiabilidade maior nos resultados, cada simulação foi desempenhada 33 vezes. Nos gráficos que apresentam os resultados no Capítulo 6, são mostrados a média destas repetições e os respectivos desvios padrão. Para métricas onde os valores das amostras coletadas diferiram significadamente, é apresentado também o 1º e o 99º percentil. O n -ésimo percentil de um conjunto de amostragem indica que n por cento das amostras estão abaixo deste valor.

Plataformas Simuladas: Na rede hierárquica heterogênea adotada, duas plataformas de hardware devem ser consideradas: uma para os nós comuns e outra para os líderes dos grupos.

Para os nós comuns (elementos gerenciados), a plataforma MicaZ [MicaZ, 2006] foi adotada. Os nós sensores desta plataforma são fabricados e comercializados pela empresa Cross-Bow [Crossbow, 2005]. O MicaZ é composto por um micro-controlador Atmel Atmega128L integrado com o Chipcon CC2420 para a comunicação via rádio. Como protocolo de acesso ao meio, este nó sensor implementa o protocolo IEEE 802.15.4, desenvolvido pela aliança ZigBee [ZigBee, 2006]. Esse protocolo foi desenvolvido para aplicações de baixo consumo de energia e curto alcance. Com relação ao consumo de energia, as seguintes potências são utilizadas: *Potência de Processamento:* 0.024 Watts; *Potência de Transmissão:* 0.052 Watts; *Potência de Recepção:* 0.059 Watts; *Potência de Sensoriamento:* 0.015 Watts. A taxa de transmissão pode chegar a 250Kbps teoricamente. Neste trabalho, é considerada a taxa de 100Kbps. Nesta plataforma, o alcance de transmissão é ajustável de acordo com a necessidade. De acordo com as especificações do fabricante, o alcance do MicaZ pode chegar a 30 metros em um ambiente fechado. A memória disponível é de 128 KBytes de memória de programa e 4 KBytes de RAM.

Para os líderes dos grupos (gerentes), é considerado uma plataforma similar à WINS [Pottie e Kaiser, 2000]. Essa plataforma utiliza um processador Intel StrongARM 1100 de 133 MHz com 16 Kbytes de cache. O WINS ainda possui 128KBytes de RAM e 1 MByte de memória *flash*. O alcance de transmissão pode chegar, teoricamente, a 100 metros e neste trabalho foi definido em 55 metros. A sua taxa de transmissão é de 100Kbps. Com relação ao consumo de energia, as seguintes potências são utilizadas: *Potência de Processamento:* 0.360 Watts; *Potência de Transmissão:* 0.600 Watts; *Potência de Recepção:* 0.300 Watts.

Apesar destas duas plataformas serem de diferentes fabricantes, foi assumido que é possível haver uma comunicação entre elas.

Número de Nós e Área: Com o objetivo de avaliar a escalabilidade de cada abordagem, serão desempenhadas simulações utilizando 100, 150, 200, 250 e 300 nós sensores. O valor máximo de 300 foi definido considerando as restrições computacionais, já que quanto maior a quantidade de nós simulados, maior o consumo de processamento e memória e, conseqüentemente, maior o tempo gasto para a realização das simulações. Como já mencionado, o tempo de processamento gasto em todas as simulações excederam 150 horas. Apesar do alcance do MicaZ poder chegar a 30 metros em condições ideais em um ambiente fechado, foi considerado um máximo de 15 metros com o intuito de manter a conectividade da rede. Assim sendo, para calcular a área máxima da aplicação quando se tem 300 nós sensores, dividiu-se uma área quadrada em $\sqrt{300}$ sub-áreas, obtendo um arranjo de 17×17 nós. Como o alcance de cada nó foi limitado a 15 metros, obtemos uma área de 17×15 , ou de aproximadamente $250m \times 250m$.

Como dito anteriormente, o alcance dos gerentes foi limitado a 55 metros. Tem-se então que cada gerente será responsável por uma sub-área de aproximadamente $55m \times 55m$, ou $3025m^2$. Considerando a área de $250m \times 250m$ ou $62500m^2$, deve-se ter 20 gerentes para cobrir toda a área.

Tanto os gerentes quanto os elementos de rede são posicionados aleatoriamente na área monitorada com uma distribuição uniforme.

Domínios de gerenciamento: Como já descrito no modelo de avaliação, a rede avaliada é hierárquica heterogênea com os nós líderes dos grupos apresentando maior poder computacional. No modelo funcional de gerenciamento, cada grupo da rede hierárquica equivale a um domínio de gerenciamento. Então, um líder na visão da RSSF é um gerente na visão do gerenciamento. A formação de grupos em RSSFs é um problema por si só, e está fora do escopo deste trabalho. Portanto, foi adotado um algoritmo simples de formação de grupos em que um nó comum (elemento de rede) é alocado a um grupo (domínio de gerenciamento) de acordo com a proximidade desse nó ao líder do grupo (gerente).

Aplicação de Sensoriamento: Para todas as abordagens, uma aplicação de sensoriamento de temperatura foi implementada em conjunto com a aplicação de gerenciamento. Estamos considerando uma aplicação de monitoração da temperatura de um depósito fechado que ocupa uma área quadrada de $250m \times 250m$. O tamanho da área foi definido de acordo com o raciocínio apresentado no tópico *Número de Nós e Área*. Todos os nós comuns sensoriam e enviam os dados para o seu líder em um intervalo de 30 segundos de tempo de simulação, que correspondem a 10,8 minutos no tempo real. Esse intervalo é razoável em uma aplicação que durará 24 horas, pois permite que variações da temperatura sejam detectadas com um atraso aceitável.

Quantidade de Objetos Gerenciados: O número de objetos gerenciados depende de quais aspectos da rede serão monitorados e controlados. Esse valor é específico para cada necessidade da aplicação. Pode-se ter aplicações onde poucas (até mesmo uma ou duas)

variáveis são suficientes e outras mais complexas onde um grande número de variáveis são necessárias.

Para avaliar o impacto do número de objetos gerenciados em cada abordagem, foram realizadas simulações com diferentes valores. O objetivo é abranger o maior número possível de potenciais aplicações. Os valores adotados foram 10, 30 e 60 objetos. O número máximo de objetos gerenciados foi obtido de [Silva et al., 2005a], onde uma base de informações de gerenciamento (MIB) específica para RSSFs foi definida contendo 62 objetos.

Tamanho das Mensagens: Os valores usados nas simulações foram: $S_{header} = 6 \text{ bytes}$ (cabeçalho do TinyOS), $S_{PDU} = 2 \text{ bytes}$, $S_{Code} = \{100, 150, 200\} \text{ bytes}$, $N_{objects} = \{10, 30, 60\}$ e $S_{object} = 1 \text{ byte}$. O tamanho da PDU das abordagens RR e abordagem NE são ilustrados nas figuras 5.3 e 5.4, respectivamente.

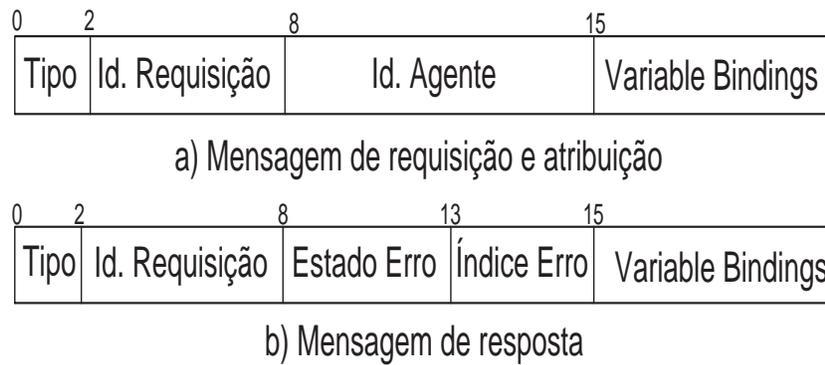


Figura 5.3: Formato da PDU e tamanho dos campos das mensagens da abordagem RR.



Figura 5.4: Formato da PDU e tamanho dos campos da mensagem da abordagem NE.

Os desenvolvedores da máquina virtual Maté sugerem que programas complexos, como um protocolo de roteamento *ad hoc*, podem ser representados com menos de 100 bytes na linguagem de *script* adotada pelo Maté. Os tamanhos do código dos AMs utilizados nas simulações ($S_{Code} = \{100, 150, 200\} \text{ bytes}$) foram escolhidos com base no Maté. O tamanho do agente móvel depende das funcionalidades que ele carrega para serem executadas. Apesar de não se alterar as funcionalidades do gerenciamento, o tamanho do código do agente móvel foi variado nas simulações para permitir a avaliação do desempenho da abordagem de AMs para diferentes funcionalidades de gerenciamento. Foi considerado que estes valores são adequados para a implementação de tarefas de gerenciamento em RSSFs reais.

Serviços de Gerenciamento: Com o objetivo de avaliar as abordagens, foram escolhidos dois serviços de gerenciamento para serem implementados: auto-configuração e auto-manutenção. Das funções relacionadas a esses serviços, foram escolhidas duas: ajuste do controle de potência e manutenção da área de cobertura. Estes serviços e funções foram propostos pela arquitetura de gerenciamento Manna [Ruiz et al., 2003b]. Essas duas funções foram implementados neste trabalho nas três abordagens avaliadas. Para a execução dessas funções, é assumido que os nós são capazes de obter suas coordenadas. Descobrir a localização dos nós sensores é um problema por si só e está fora do escopo desta dissertação.

O objetivo da função de controle de potência é ajustar a potência de transmissão do rádio dos nós com o intuito de economizar energia e evitar colisões e perdas de dados. O gerente calcula o máximo de alcance necessário para cada nó utilizando a topologia da rede e as coordenadas dos nós. O gerente então altera a potência de transmissão dos nós de acordo com o cálculo realizado.

A função de manutenção da área de cobertura tem como objetivo manter a rede com o mínimo possível de nós em operação sem interferir nos objetivos da mesma, mantendo toda a área monitorada coberta. Para isso, o gerente identifica e retira temporariamente de operação nós que são considerados redundantes. Neste trabalho, um nó é considerado redundante se ele está a menos de 5 metros de distância de outro nó, significando que dois nós estão cobrindo praticamente a mesma área e gerando dados redundantes. Durante a vida da rede, algum nó pode falhar por esgotamento de energia ou devido a outros fatores, fazendo com que parte da área fique descoberta (sem sensoriamento). Neste caso, o gerente procura por algum nó redundante que possa substituir o nó que falhou e, conseqüentemente, cobrir novamente a área até então descoberta. Note que, quando um nó está fora de operação, ele não é capaz de receber mensagens pelo rádio. Assim, não será possível que o gerente acione um nó redundante para que ele entre em operação novamente. Para que isso seja possível, periodicamente os nós redundantes ligam o rádio e verificam com o gerente se eles podem voltar para a operação. O gerente responde *sim* ou *não*, dependendo da necessidade. Se a resposta for *sim*, o nó volta para operação. Caso contrário ele desliga novamente seus componentes, ficando fora de operação até o próximo ciclo de verificação.

Freqüência da Notificação: Com relação à abordagem de notificação, é preciso estabelecer uma regra para definir quando os nós sensores deverão enviar a mensagem de notificação aos respectivos gerentes. Para isso, neste trabalho foi adotado um mecanismo de probabilidades. Nesse mecanismo, os nós sensores enviarão a notificação com uma probabilidade P pré-estabelecida. O valor de P indica qual a probabilidade de ocorrência de eventos em determinado ciclo do gerenciamento. Como P irá impactar os resultados, já que quanto maior seu valor mais mensagens de notificação serão enviadas, resolvemos adotar quatro valores diferentes para avaliar quatro tipos de redes: $P = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$. Com isso, tanto redes bastante dinâmicas, em que os valores dos objetos gerenciados mudam constantemente, quanto redes mais estáticas são consideradas.

Configuração da Rede e do Gerenciamento	Configuração da Simulação
<p><i>Número de Gerentes:</i> 20; <i>Número de Elementos de Rede:</i> 100, 150, 200, 250, 300; <i>Protocolo MAC:</i> IEEE 802.15.4; <i>Número de Objetos Gerenciados:</i> 10, 30, 60; <i>Tamanho dos AMs:</i> 100, 150, 200 bytes; <i>Serviços de Gerenciamento:</i> Controle de densidade e ajuste da potência; <i>Deposição dos Nós:</i> Aleatória com distribuição uniforme;</p>	<p><i>Tempo de Simulação:</i> 4000 segundos; <i>Número de Simulações:</i> 33; <i>Área Simulada:</i> 250m x 250m; <i>Intervalo de Confiança do NS-2:</i> 95%;</p>
Configuração dos Gerentes	Configuração dos Elementos de Rede
<p><i>Alcance de Transmissão:</i> 55 metros; <i>Potência de Processamento:</i> 0.360W; <i>Potência de Transmissão:</i> 0.6W; <i>Potência de Recepção:</i> 0.3W; <i>Potência de Sensoriamento:</i> não se aplica; <i>Tipo de Disseminação:</i> programada; <i>Capacidade da Bateria:</i> 100J; <i>Taxa de Transmissão:</i> 100kbps; <i>Dispositivos Sensores:</i> não se aplica; <i>Alcance de Sensoriamento:</i> não se aplica; <i>Tipo de Sensoriamento:</i> não se aplica; <i>Intervalo de Sensoriamento:</i> não se aplica;</p>	<p><i>Alcance de Transmissão:</i> Ajustável (máximo de 15 metros); <i>Potência de Processamento:</i> 0.024W; <i>Potência de Transmissão:</i> 0.052W; <i>Potência de Recepção:</i> 0.059W; <i>Potência de Sensoriamento:</i> 0.015W; <i>Tipo de Disseminação:</i> Contínua; <i>Capacidade da Bateria:</i> 10J; <i>Taxa de Transmissão:</i> 100kbps; <i>Dispositivos Sensores:</i> Temperatura; <i>Alcance de Sensoriamento:</i> 10 metros; <i>Tipo de Sensoriamento:</i> Programada; <i>Intervalo de Sensoriamento:</i> 30 segundos;</p>

Tabela 5.1: Características das configurações gerais das simulações.

Resumo: A tabela 5.1 apresenta um resumo das principais configurações da aplicação do modelo de avaliação no ambiente de simulação.

5.3.2 Configuração das abordagens

Abordagem AM: Na abordagem AM, a função do *gerador de agentes* responsável por criar, instruir e disparar os agentes móveis é desempenhada na mesma entidade que roda o gerente, os líderes dos grupos. O *servidor de agentes* é executado nos elementos gerenciados, possibilitando que eles recebam e executem os agentes móveis. Periodicamente, o gerente dispara um AM para ser executado por todo elemento gerenciado do seu domínio. Neste caso, o AM se transporta de nó a nó do domínio até voltar ao gerente, quando finaliza sua jornada. O AM carrega o código do gerenciamento para ser executado localmente nos elementos gerenciados.

As atividades dos AMs são divididas em duas fases: *setup* e *operação*. A fase de *setup* é composta por dois ciclos e o AM cobre todos os nós de determinado domínio. No primeiro

ciclo, depois de desempenhar tarefas de instalação, o AM recupera a posição (coordenadas X e Y) e a energia residual de cada nó e verifica se um nó é redundante ou não. Essa verificação é feita com base na topologia conhecida até o momento. O AM verifica se, dentre a lista de nós já percorridos, algum que não foi identificado como redundante está próximo até 5 metros do nó atual. Caso afirmativo, o nó atual é considerado redundante. No segundo ciclo, a principal tarefa a ser executada é o ajuste de potência de transmissão dos nó. Este serviço é feito no segundo ciclo pois é necessário que o gerente tenha conhecimento da topologia completa da rede. Isso é necessário pois ainda não é possível saber a distância do próximo nó do itinerário ao nó atual, já que o próximo nó ainda não foi percorrido pelo AM e portanto não se sabe a sua posição.

Na fase de *operação*, o AM coleta os valores dos objetos gerenciados dos nós sensores de um domínio. A estratégia usada para o cálculo do itinerário do AM é baseada no algoritmo LCF (*Local Closest First*) [Qi e Wang, 2001], que indica o próximo nó para o qual o agente móvel irá migrar como sendo aquele mais próximo do nó atual (que o agente está) e que contenha energia suficiente para receber e executar o agente móvel.

Abordagem RR: Nesta abordagem, primeiramente os gerentes requisitam informações de localização (coordenadas X e Y) e energia dos elementos gerenciados. Com essas informações, os mapas de topologia e energia da rede são construídos. Em seguida, cada gerente calcula a potência máxima de transmissão necessária para todos os elementos do seu domínio e envia mensagens de *atribuição* individuais para os nós, alterando a potência de transmissão de cada um deles. Os gerentes também executam a função de manutenção da área de cobertura, identificando quais nós são redundantes e enviando mensagens de *atribuição* para desligar temporariamente esses nós. Periodicamente, os gerentes enviam requisições dos valores de todos objetos gerenciados para os elementos do respectivo domínio. Os elementos gerenciados, ao receberem as requisições, processam-na e enviam respostas contendo os valores requisitados. Ao receber as respostas, os gerentes avaliam os valores de energia residual dos nós. Se algum dos elementos está com a energia residual se esgotando, o gerente verifica se existe algum nó redundante, que foi desligado anteriormente, que possa substituir esse elemento. Caso exista, na próxima vez que aquele nó redundante verificar com o gerente se ele pode voltar às atividades, o gerente irá autorizá-lo.

Abordagem NE: Na abordagem de notificação de eventos, no início da operação da rede todos os elementos gerenciados enviam mensagens de notificação contendo os valores iniciais dos objetos gerenciados para os respectivos gerentes. Cada gerente executa as funções de gerenciamento similarmente à abordagem RR, enviando mensagens de *atribuição* para alterar a potência de transmissão dos elementos e para desligar temporariamente os nós identificados como redundantes. Durante o tempo de operação da rede, os elementos gerenciados avaliam periodicamente os valores dos objetos gerenciados. O valor de um objeto é comparado com o último valor do mesmo objeto que foi enviado para o gerente. Se a diferença entre os valores

ultrapassar um limite pré-estabelecido, o elemento de rede envia uma notificação de eventos com o valor atualizado para o gerente.

Para avaliar o comportamento das notificações, fizemos uma modelagem baseada na probabilidade. Assumimos que os valores dos objetos mudam consideravelmente com uma probabilidade (P). Assim, no modelo de avaliação, os elementos gerenciados irão enviar mensagens de notificação com a probabilidade (P). Quanto maior a probabilidade de ocorrência de eventos, mais elementos irão enviar notificações em um dado momento. Os valores de P adotados foram 0.2, 0.4, 0.6 e 0.8.

5.4 Aplicação do Modelo de Avaliação para o Ambiente Real

O uso de experimentação para avaliar soluções propostas para RSSFs apresenta vantagens e desvantagens. Como vantagens, tem-se que é possível validar a solução para uma plataforma de nós sensores reais, já que todas as restrições de hardware serão realmente consideradas. Além disso, permite a avaliação de uma importante métrica de desempenho, o consumo de memória, que não pode ser medida em ambiente de simulação tradicional. Como desvantagens, pode-se citar o preço dos nós sensores e a dificuldade da realização dos experimentos em uma área adequada e condições de comunicação controlada, impossibilitando o uso de uma quantidade de nós considerável para que seja possível avaliar a escalabilidade. Além disso, outras métricas são difíceis de serem obtidas, como por exemplo o consumo de energia.

Neste trabalho, além da avaliação em um ambiente de simulação, também foram realizados experimentos reais. Pelas dificuldades listadas acima, esses experimentos são mais restritos que as simulações, tanto em quantidade de nós sensores quanto em métricas coletadas. Além do consumo de memória de cada abordagem e da verificação do funcionamento, também será medido o tempo de resposta das operações de gerenciamento.

As abordagens foram implementadas utilizando o sistema operacional TinyOS [Levis et al., 2004, Hill et al., 2000]. O TinyOS é um sistema operacional de código aberto desenvolvido pela universidade da Califórnia em Berkeley especificamente para RSSFs. Atualmente, ele é empregado em diversas plataformas de nós sensores desenvolvidos pela empresa CrossBow [Crossbow, 2005], como a família Mica (Mica2, MicaDot e MicaZ) e o Telos. Esse sistema operacional utiliza uma arquitetura baseada em componentes que permite implementação rápida e também diminui o tamanho do código. Nessa arquitetura, somente os módulos utilizados pela aplicação são compilados e implantados nos nós sensores, economizando memória. O TinyOS é implementado em uma linguagem de desenvolvimento similar à linguagem C, chamada de NesC [Gay et al., 2003]. Os pacotes de comunicação do TinyOS contêm um cabeçalho de 6 bytes e 29 bytes de conteúdo.

O projeto de pesquisa SensorNet [SensorNet, 2004], realizado na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em parceria com a Universidade Federal do Pernambuco (UFPE), adquiriu alguns kits de nós sensores da família Mica fabricados pela empresa CrossBow. O projeto possui os nós MicaDot, Mica2 e MicaZ, sendo o último os nós do modelo mais recente da família Mica. A princípio, a idéia era realizar os experimentos utilizando os nós MicaZ.

Porém, depois de vários testes, não foi obtido sucesso na implantação do Maté (MV utilizada na abordagem de AMs) nessa plataforma. Ao que parece, o Maté ainda não tem suporte a essa plataforma. Por esse motivo, resolvemos utilizar os nós sensores Mica2.

A configuração do Mica2 é praticamente a mesma do MicaZ, diferenciando apenas no rádio. Ele é composto por um micro-controlador Atmel Atmega128L integrado com o chip CC1000 [Corporation, 2006] para a comunicação sem fio. Possui também 128Kbytes de memória de programa e 4Kbytes de memória RAM.

Abaixo seguem as configurações utilizadas nas abordagens.

Configuração da Abordagem AM: Para implementar a abordagem de AMs, foi utilizado a máquina virtual do Maté [Levis e Culler, 2002]. Até o presente momento do trabalho, a única possibilidade de se adotar agentes móveis em RSSFs foi usando a extensão do Maté chamada de *Bombilla Agent* [Szumel et al., 2005].

O Maté provê algumas instruções virtuais que podem ser inseridas em *scripts* e transmitidas pela rede para serem executadas localmente nos nós sensores. Devido às restrições das instruções virtuais do Maté, não é possível implementar um agente com funções de gerenciamento mais elaboradas. Esse é um dos problemas que ainda dificultam o uso de AMs em RSSFs, conforme discutido na Seção 6.3.4 do Capítulo 6.

Por esse motivo, um agente simples foi implementado para a avaliação. Esse agente somente faz uma leitura do sensor de luz e acende alguns LEDs para permitir a visualização do seu percurso. Para avaliar o impacto do aumento do código nos resultados, avaliamos três tamanhos de agentes. O primeiro se encaixa em um único pacote do TinyOS, o segundo em dois e o terceiro em quatro pacotes. Para aumentar o tamanho do agente, funções que fazem a leitura do identificador dos nós sensores foram inseridas no seu código. O agente é lançado pelo nó conectado ao computador e percorre todos os nós da rede.

Configuração da Abordagem RR: Na abordagem RR, o gerente executa uma aplicação que envia temporariamente mensagens de requisição para os nós sensores. A aplicação que é executada nos outros nós recebe a mensagem de requisição, faz uma leitura no sensor de luz e envia o valor sensoriado para o gerente. A medida do sensor de luz, e não de outra variável do hardware, foi utilizada por motivo de simplicidade, já que satisfaz as demandas da avaliação do trabalho.

Configuração da Abordagem NE: Na abordagem NE, os nós sensores executam uma aplicação que envia uma mensagem de notificação quando algum evento ocorre. Nos experimentos, foi considerado que periodicamente todos os nós identificam um evento e enviam a notificação que contém o valor do sensor de luz.

A experimentação foi dividida em duas partes: em ambiente de laboratório fechado e em ambiente semi-aberto. Abaixo seguem as características desses experimentos, como a topologia, a quantidade de nós e uma descrição do local.

5.4.1 Experimentos em laboratório

Os experimentos foram realizados dentro do laboratório de redes de computadores e sistemas distribuídos da UFMG. O laboratório possui uma área de aproximadamente $10.0m \times 12.0m$, doze computadores PC, seis servidores, três armários, uma impressora e 16 cadeiras. A Figura 5.5 ilustra uma visão desse ambiente. Todos os experimentos foram realizados durante as tardes do mês de julho. O laboratório continha duas pessoas e o ar condicionado estava ligado, com a temperatura entre $15^{\circ}C$ e $20^{\circ}C$. Para todas as amostras coletadas, as pessoas e os objetos do laboratório permaneceram no mesmo local, para tentar manter fixo a maioria das variáveis do ambiente. A quantidade de nós disponível funcionando no momento da realização dos experimentos foi de cinco. O sexto nó que estava disponível não funcionava e o sétimo estava com o rádio muito deteriorado. Para não interferir nos resultados, utilizou-se somente cinco nós mais confiáveis. Essa quantidade é considerada pequena para uma RSSF real. Porém, para os objetivos do trabalho, é suficiente e pode ser considerado como um domínio de gerenciamento com cinco nós.

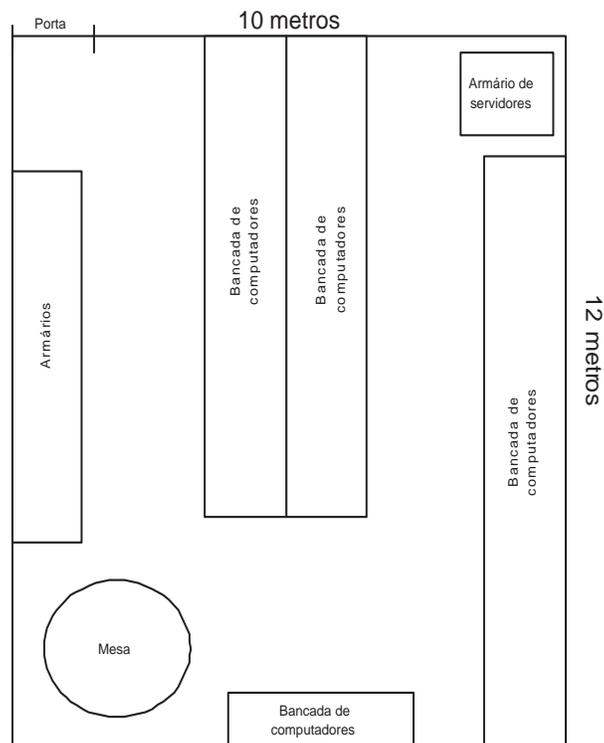


Figura 5.5: Ambiente onde foram feitos os experimentos em laboratório.

Antes da realização dos experimentos, todos os nós foram testados e avaliados quanto a qualidade do rádio em diferentes posições. Foram feitos testes com todos os nós individualmente e em grupos menores. Alguns nós apresentaram uma maior qualidade na comunicação, como por exemplo, um nó obteve um alcance de $2.10m$, enquanto outro de somente $0.80m$. A topologia dos cenários foi escolhida de acordo com a qualidade do rádio dos nós sensores, para manter a conectividade da rede.

Para esses experimentos em laboratório foram planejados dois cenários, chamados de *cenário 1* e *cenário 2*. O objetivo do *cenário 1* (Figura 5.6) é avaliar a abordagem de AMs. Os nós nesse cenário foram posicionados sequencialmente para permitir uma maior distância entre eles, de acordo com o alcance de cada um. Para a definição desse cenário, os testes feitos no rádio dos nós sensores foram considerados. Os nós foram posicionados de acordo com o alcance na comunicação medido a priori. Para ilustrar melhor os resultados, consideramos como *cenário 1.1* aquele em que o tamanho do agente se encaixa em um pacote do tinyOS, *cenário 1.2* quando o agente se encaixa em dois pacotes e *cenário 1.3* quando se encaixa em quatro pacotes.

Já o *cenário 2* (Figura 5.7) foi elaborado para se avaliar as abordagens RR e NE. Nessa topologia, o gerente alcança simultaneamente todos os nós, que estão posicionados à sua volta. A distância de $0.80m$ foi escolhida de acordo com as medidas feitas, já que esse foi o menor alcance obtido.

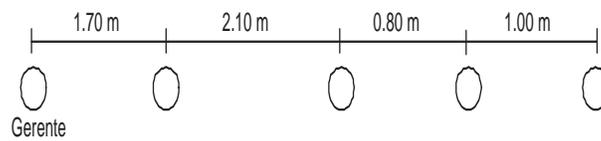


Figura 5.6: *Cenário 1* de laboratório para avaliação da abordagem de AMs.

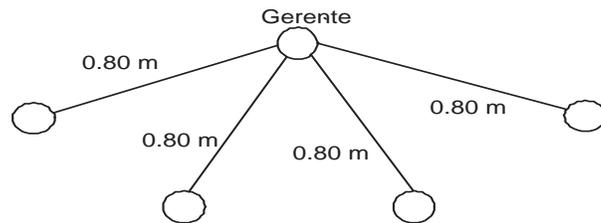


Figura 5.7: *Cenário 2* de laboratório para avaliação das abordagens RR e NE.

5.4.2 Experimentos em ambiente semi-aberto

Além dos experimentos dentro de um laboratório, também foram realizados experimentos em um ambiente semi-aberto, localizado no terceiro andar do prédio do Instituto de Ciências Exatas (ICEx) da UFMG. As dimensões da área são de aproximadamente $12m \times 17m$. Do lado esquerdo e direito, existe uma pequena mureta semi-aberta de aproximadamente $1m$ de altura. Nos outros dois lados existem corredores, paredes, abertura para escada e vidros, conforme ilustra a Figura 5.8. Todos os experimentos foram realizados no período da tarde do mês de julho, com uma temperatura ambiente entre $16^{\circ}C$ e $22^{\circ}C$. Os nós estavam protegidos da luz do sol e o vento percebido foi considerado de velocidade baixa. Para todas as amostras coletadas, a maioria das variáveis foi mantida constante. Em alguns casos houveram interrupções por outras pessoas que passavam no local. Nesse caso, as medidas não foram consideradas.

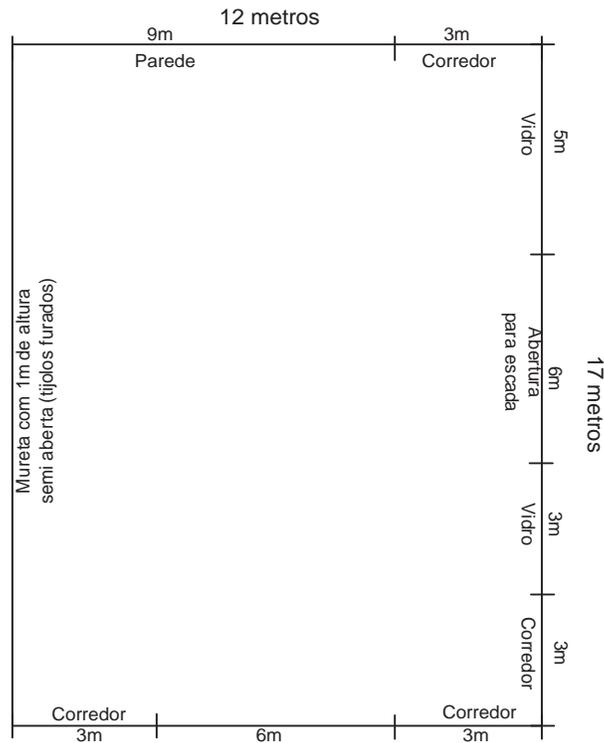


Figura 5.8: Ambiente semi-aberto onde foram realizados os experimentos.

Antes da realização dos experimentos, os nós foram novamente testados no ambiente aberto. Foi feita uma avaliação da qualidade do rádio de cada nó, para que a topologia formada fosse ideal. Para esses experimentos, foi definido apenas um cenário, que chamamos de *cenário 3* (Figura 5.9). Esse cenário foi utilizado somente para avaliar a abordagem de AMs. Novamente, foram utilizados três tamanhos de agentes. No *cenário 3.1*, o código do agente se encaixa em um pacote; no *cenário 3.2*, o agente se encaixa em dois pacotes, e; no *cenário 3.3* o agente se encaixa em quatro pacotes.

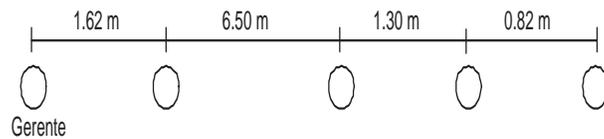


Figura 5.9: *Cenário 3* de área semi-aberta para avaliação da abordagem de AMs.

5.5 Conclusão

Este capítulo apresentou as principais considerações relacionadas com a avaliação feita no trabalho. Primeiramente, uma metodologia foi elaborada contendo os objetivos, métricas e processo de avaliação. Em seguida, baseando-se nessa metodologia, um modelo de avaliação foi definido. Esse modelo indica as características da rede e do gerenciamento, como organização

e composição da rede, modelo funcional de gerenciamento, tamanho e formato das mensagens utilizadas na comunicação, mecanismo utilizado para permitir agentes móveis em RSSFs e aplicação de sensoriamento.

Esse modelo foi em seguida instanciado para dois ambientes: simulação e experimentação. A avaliação por simulação tem como principais objetivos coletar as métricas de desempenho de consumo de energia, perda de pacotes, utilização da largura de banda e tempo de resposta. Porém, no ambiente de simulação não é possível avaliar os requisitos de memória de cada abordagem. Por esse motivo, o modelo também foi empregado em um ambiente real. Além de permitir a avaliação do consumo de memória das abordagens, a experimentação também será útil para verificarmos o funcionamento das abordagens e coletar o tempo de resposta onde as propriedades ambientais são consideradas.

Capítulo 6

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do modelo de avaliação definido no Capítulo 5. Os resultados são apresentados em duas partes: desempenho e funcional. A primeira parte é apresentada na Seção 6.1 e descreve os resultados considerando as métricas de desempenho avaliadas. Para as métricas de consumo de energia, utilização da largura de banda e pacotes perdidos, o modelo de simulação foi utilizado. Para a métrica de tempo de resposta, tanto o modelo de simulação quanto o experimental foram utilizados. Para a métrica de requisitos de memória, somente o modelo de experimentação foi utilizado. Os resultados funcionais, apresentados na Seção 6.2, mostram a eficiência da execução das funções de gerenciamento para as abordagens. Em seguida, uma análise dos resultados baseada nos objetivos da avaliação é apresentada na Seção 6.3.

6.1 Resultados de Desempenho

Esta seção apresenta os resultados considerando as métricas de desempenho de consumo de energia, utilização da largura de banda, perda de pacotes, tempo de resposta e requisitos de memória.

6.1.1 Consumo de Energia

Essa seção apresenta o consumo de energia separadamente para recepção, transmissão e processamento. Os valores de consumo apresentados são relativos à toda a rede, incluindo os gerentes e os elementos gerenciados.

6.1.1.1 Consumo de energia com recepção

O gráfico 6.1 apresenta os resultados para o consumo de energia com recepção com o intuito de se avaliar a escalabilidade das abordagens. Para isso, a quantidade de elementos gerenciados (eixo-X) variou de 100 a 300 com incrementos de 50 nós. Para esse gráfico, o número de objetos gerenciados e o tamanho dos agentes móveis foram fixados em 10 objetos e 100 bytes, respectivamente.

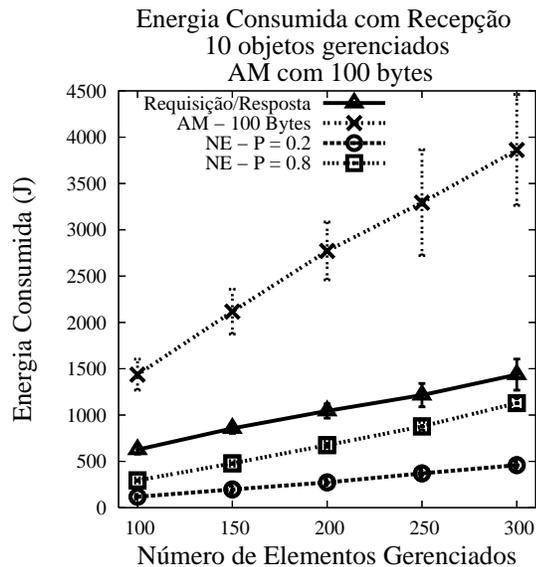


Figura 6.1: Avaliação da escalabilidade considerando o consumo de energia com recepção.

Pode-se perceber que a abordagem de AMs consome uma quantidade razoável a mais de energia com recepção se comparada às outras abordagens. Além disso, à medida que o número de elementos gerenciados aumenta, o impacto é mais acentuado para a abordagem de AMs. Considerando a abordagem NE, a maior probabilidade de eventos implica em um maior consumo e o impacto do aumento do número de elementos gerenciados é mais significativo nesse caso, visto pela inclinação da curva no gráfico. A abordagem RR apresentou um consumo um pouco superior ao da abordagem NE com probabilidade 0.8, sendo que o comportamento das duas é similar quando o número de elementos de rede aumenta.

O consumo maior da abordagem de AMs se deve ao fato da comunicação ser sem fio. Quando um nó envia um pacote pela rede, todos os nós que estão ao seu alcance o recebem até um determinado nível da pilha de protocolos, mesmo não sendo o destino final do pacote, antes de descartá-lo. O descarte de um pacote só pode ser feito se o seu endereço de destino for avaliado. E para isso ocorrer, é preciso que a mensagem seja recebida, o que consome energia. Como os agentes móveis apresentam tamanhos maiores que as mensagens das abordagens RR e NE, o consumo de energia com recepção é mais significativo nessa abordagem.

A figura 6.2 apresenta o impacto do aumento do número de objetos gerenciados nas abordagens. Para este resultado, manteve-se constante o número de elementos gerenciados e o tamanho dos agentes móveis em 300 nós e 100 bytes, respectivamente. A quantidade de objetos variou entre 10, 30 e 60. O aumento da quantidade de objetos gerenciados implica em um aumento no tamanho das mensagens das abordagens.

Conforme esperado, para todas as abordagens, quanto maior a quantidade de objetos gerenciados, maior o consumo de energia com recepção. Novamente, a abordagem de AMs se mostrou menos eficiente que as outras em valores absolutos. A abordagem que melhor se adequou ao aumento da quantidade de objetos gerenciados foi a NE com probabilidade de 0.2,

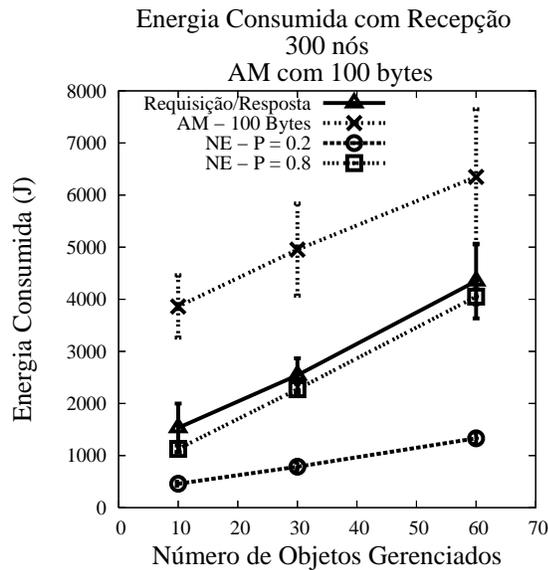


Figura 6.2: Avaliação do impacto da quantidade de objetos gerenciados no consumo de energia com recepção.

pois envia uma menor quantidade de mensagens de notificação, sofrendo um impacto menos significativo quando se aumenta o tamanho das mensagens. O comportamento da abordagem RR foi similar ao da NE com probabilidade 0.8. É importante notar que, ao aumentar a quantidade de objetos gerenciados de 10 para 60, a abordagem de AMs aumentou o consumo em aproximadamente 2.000 Joules, enquanto as abordagens RR e NE com probabilidade 0.8 aumentaram aproximadamente 3.000 Joules.

O gráfico 6.3 apresenta o impacto do tamanho dos agentes móveis na abordagem de AMs. Pode-se perceber pelo gráfico que, quanto maior o código do agente móvel, maior o consumo de energia. Além disso, o impacto do aumento do agente é mais significativo em redes com um maior número de elementos gerenciados devido ao aumento da densidade. Por exemplo, para a rede com 100 nós, a diferença no consumo é pequena entre os três tamanhos de agentes móveis. Porém, na rede com 300 nós, a diferença é mais significativa.

6.1.1.2 Consumo de energia com transmissão

O gráfico da figura 6.4 apresenta o impacto do aumento do número de elementos gerenciados no consumo de energia quanto a transmissão de dados quanto as diferentes abordagens. Para estes resultados, a quantidade de objetos gerenciados e o tamanho dos agentes móveis foram fixados em 10 objetos e 100 bytes, respectivamente. É interessante notar que, diferentemente do consumo de energia com recepção, o consumo com transmissão da abordagem de AMs é praticamente constante. Por outro lado, a abordagem RR se mostra menos escalável para esta métrica, apresentando um consumo crescente quando o número de elementos gerenciados aumenta. A abordagem NE apresentou resultados similares para as redes com probabilidade 0.2 e 0.8, com pequenas diferenças não percebidas devido à escala do gráfico, já que os valores

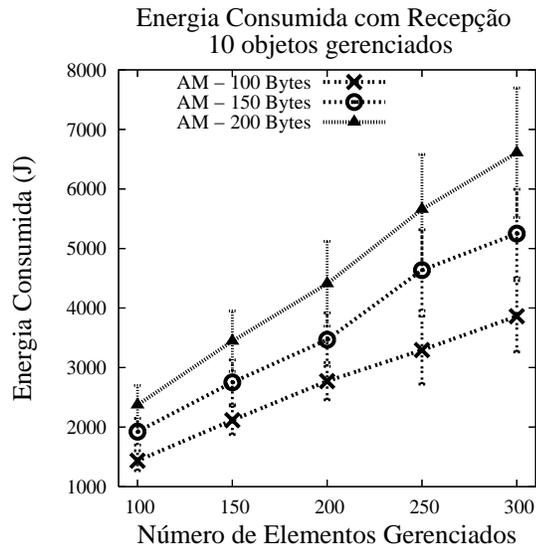


Figura 6.3: Avaliação do impacto do tamanho do código na abordagem de AMs no consumo de energia com recepção.

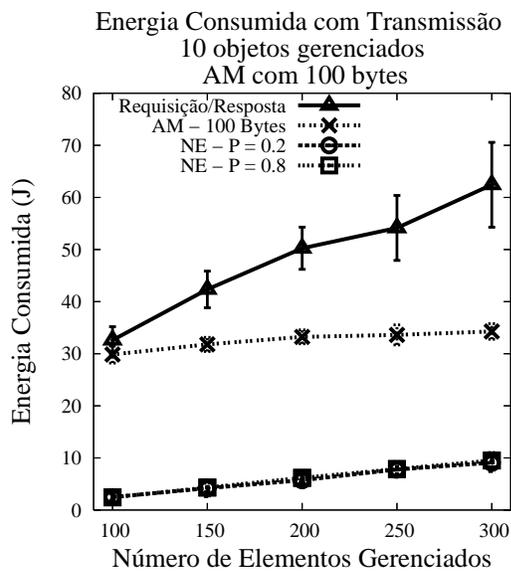


Figura 6.4: Avaliação da escalabilidade das abordagens no consumo de energia com transmissão.

absolutos para esta abordagem foram significativamente inferiores aos das abordagens RR e de AMs.

A diferença no comportamento entre o consumo com recepção e transmissão ocorre porque na transmissão somente o nó que está transmitindo consome energia enquanto na recepção todos os nós dentro da área de alcance do transmissor a consomem ao escutarem o meio de

comunicação.

A diferença entre as abordagens RR e NE para essa métrica é devido ao envio das requisições pelos gerentes na abordagem RR. Na abordagem NE, os gerentes somente enviam mensagens de *atribuição* quando necessário. Na abordagem RR, os gerentes enviam, além das mensagens de *atribuição* quando necessário, mensagens de requisição periodicamente a cada ciclo de gerenciamento.

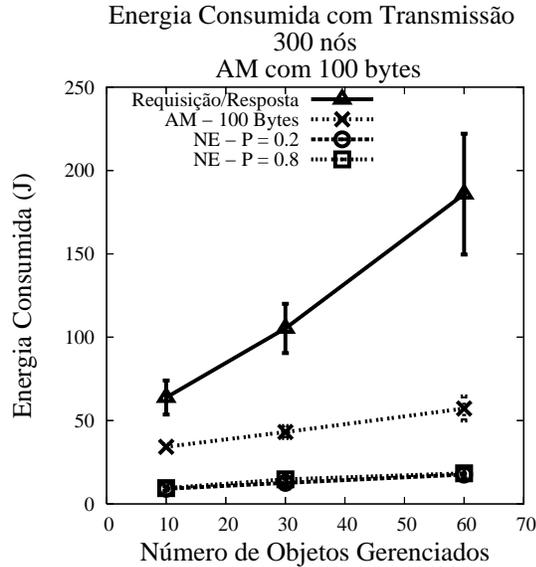


Figura 6.5: Avaliação do impacto da quantidade de objetos gerenciados no consumo de energia com transmissão.

A figura 6.5 ilustra os resultados da avaliação do impacto do número de objetos gerenciados no consumo de energia quanto a transmissão de dados frente as diferentes abordagens. O número de elementos de rede e o tamanho dos agentes móveis foi fixado em 300 nós e 100 bytes, respectivamente. Pode-se perceber que este impacto é pequeno nas abordagens de AMs e NE, que tiveram o comportamento parecido. No entanto, para a abordagem RR, o impacto é muito significativo. Novamente, isso ocorre devido às requisições feitas periodicamente pelos gerentes a todos elementos de rede.

O gráfico da figura 6.6 ilustra o impacto do tamanho dos agentes móveis no consumo de energia quanto a transmissão de dados para a abordagem de AMs. Para estes resultados, a quantidade de objetos gerenciados foi fixada em 10. Similar ao comportamento do consumo com recepção, quanto maior o tamanho dos agentes móveis mais alto o consumo de energia com transmissão. Quanto maior o agente, maiores são as mensagens enviadas na abordagem de AMs e, conseqüentemente, maior é o consumo. Porém, para esse métrica, o impacto do número de elementos gerenciados é muito pequeno e, mesmo com 100 nós, a diferença para os três tamanhos de agentes móveis é significativa, diferentemente do consumo com recepção.

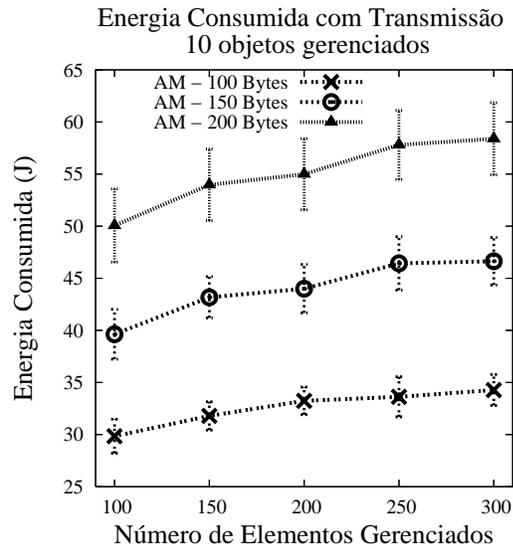


Figura 6.6: Avaliação do tamanho do código da abordagem AMs no consumo com transmissão.

6.1.1.3 Consumo de energia com processamento

Considerando o consumo de energia com processamento, a Tabela 6.1 apresenta as médias obtidas separadamente para os elementos de rede (ER) e gerentes (G). Para a obtenção destes resultados, o número de objetos gerenciados foi fixado em 10 e o tamanho dos agentes móveis em 100 bytes. Como podemos perceber, a abordagem de AMs consome significativamente mais energia com processamento que as abordagens RR e NE. O principal motivo desse consumo é que o Maté [Levis e Culler, 2002], utilizado como mecanismo de suporte para agentes móveis no modelo de avaliação, é um interpretador de código virtual que requer mais tempo de processamento para executar as instruções. Enquanto o processador do MicaZ é capaz de executar aproximadamente 8×10^6 instruções por segundo, Maté somente é capaz de executar 1×10^4 . Essa diferença é devido ao tempo extra gasto para a interpretação das instruções virtuais pela máquina virtual.

Uma vez que os agentes móveis são executados nos elementos de rede, o consumo desses para a abordagem de AMs é superior ao das outras abordagens, que somente realizam um processamento básico. Com relação aos gerentes, o consumo superior da abordagem de AMs é devido à criação, instrução e disparo dos agentes móveis.

Para a abordagem NE, quanto maior a probabilidade de ocorrência de eventos, maior o consumo com processamento pois mais mensagens precisarão ser processadas para serem enviadas pelos elementos de rede e quando essas forem recebidas pelos gerentes.

6.1.1.4 Consumo de energia total

O consumo de energia total reflete o consumo com recepção, transmissão e processamento. A figura 6.7 apresenta a avaliação da escalabilidade, com a quantidade de objetos gerenciados e o

# de Nós	Tipo do Nó	RR	AM 100 bytes	NE P = 0.2	NE P = 0.8
100	ER	0.000046	0.022250	0.000018	0.000049
	G	0.000220	0.644820	0.000065	0.000192
150	ER	0.000040	0.021545	0.000019	0.000051
	G	0.000260	0.664280	0.000099	0.000291
200	ER	0.000037	0.020810	0.000019	0.000051
	G	0.000300	0.659630	0.000135	0.000399
250	ER	0.000032	0.017700	0.000021	0.000052
	G	0.000310	0.630510	0.000175	0.000489
300	ER	0.000030	0.017990	0.000020	0.000052
	G	0.000340	0.638250	0.000208	0.000580

Tabela 6.1: Consumo de energia com processamento para os elementos de rede (ER) e para os gerentes (G). Os valores são apresentados em Joules.

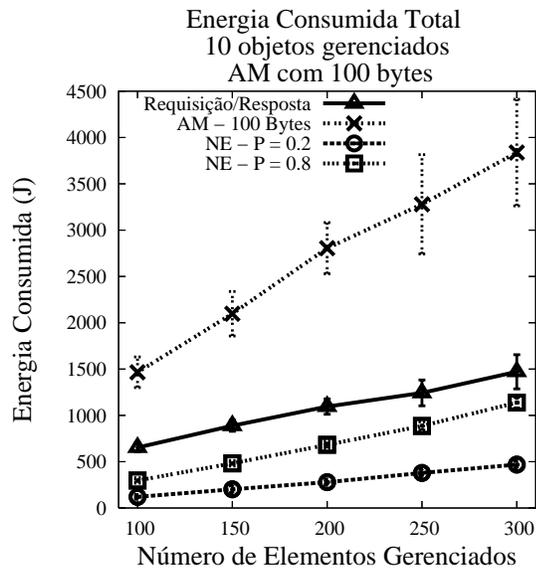


Figura 6.7: Avaliação da escalabilidade considerando a energia total consumida.

tamanho dos agentes móveis fixados em 10 objetos e 100 bytes, respectivamente. Constata-se que o consumo de energia total é influenciado principalmente pelo consumo com recepção, que é significativamente superior aos outros consumos.

O mesmo comportamento pode ser observado para a avaliação do impacto da quantidade de objetos gerenciados e do tamanho dos agentes móveis, como ilustram os gráficos 6.8 e 6.9, respectivamente. Estes resultados também são influenciados pelo consumo de energia com recepção.

O principal motivo do consumo com recepção ser significadamente mais acentuado que o com transmissão é o modelo de comunicação sem fio, em que todos os pacotes transmitidos

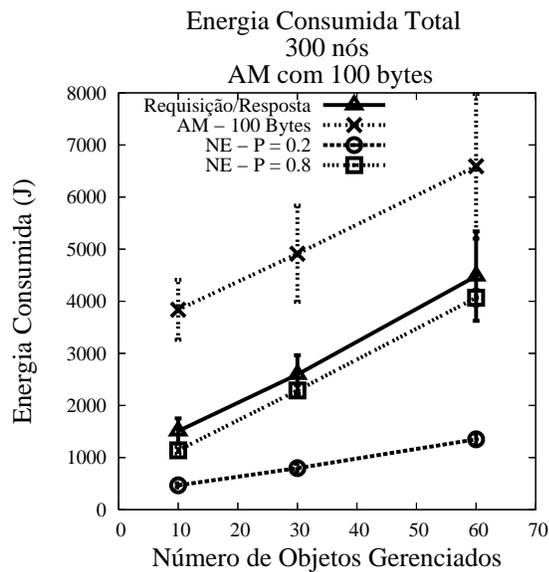


Figura 6.8: Avaliação do impacto da quantidade de objetos gerenciados no consumo de energia total.

por algum nó é escutado pelos outros nós dentro do seu alcance. Nesse caso, quando um único nó transmite um pacote de dados, vários recebem esse pacote e, conseqüentemente, consomem energia.

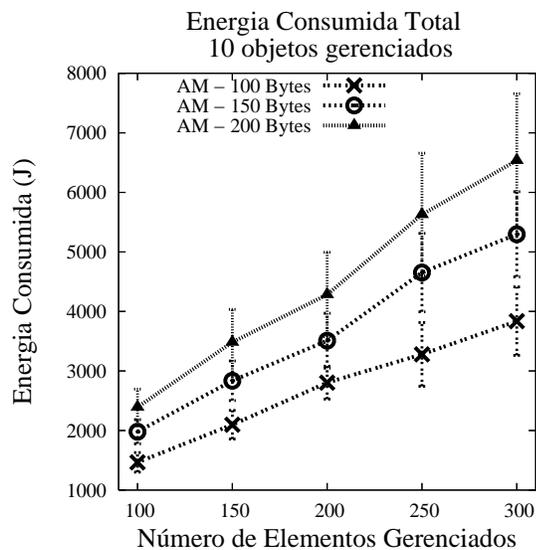


Figura 6.9: Avaliação do impacto do tamanho do código na abordagem de AMs considerando o consumo de energia total.

6.1.2 Utilização da Largura de Banda

A utilização da largura de banda indica a quantidade de bytes transmitidos pelas entidades da rede durante o período de operação da rede. Os valores apresentados nesta seção contabilizam somente os dados de gerenciamento.

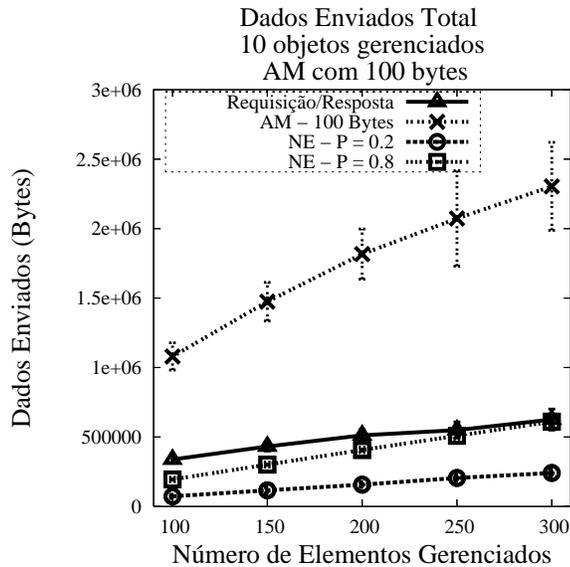


Figura 6.10: Avaliação da escalabilidade considerando a utilização da banda.

A figura 6.10 apresenta a utilização da largura de banda variando-se a quantidade de elementos gerenciados da rede. A quantidade de objetos gerenciados e o tamanho dos agentes móveis foram fixados em 10 objetos e 100 bytes, respectivamente. Pode-se perceber um consumo superior do uso da banda pela abordagem de AMs, contrastando com o resultado obtido de consumo de energia com transmissão, onde a abordagem RR obteve um consumo superior ao da abordagem de AMs (ver Seção 6.1.1.2). Para verificar porque isso ocorria, o consumo de energia na camada MAC da rede foi coletado e avaliado separadamente. Verificou-se que na abordagem RR existe um consumo superior nesta camada, que se deve ao maior número de mensagens de controle para acesso ao meio. Por esse motivo, mesmo enviando uma menor quantidade de dados de gerenciamento, a abordagem RR consome mais energia com transmissão. Considerando a abordagem NE, o impacto do aumento do número de elementos gerenciados é mais significativo para a probabilidade mais alta.

O gráfico da figura 6.11 apresenta a avaliação da quantidade de objetos gerenciados no desempenho das abordagens para a métrica de utilização da banda. Para esta métrica, o número de elementos gerenciados e o tamanho dos agentes móveis foram fixados em 300 nós e 100 bytes, respectivamente. Para todas as abordagens, quanto mais objetos gerenciados, maior a utilização da banda. O impacto do aumento da quantidade de objetos foi similar para todas as abordagens, pois o tamanho das mensagens mudará proporcionalmente para todas, de acordo com o formato do campo *variable bindings* das mesmas (Veja Seção 5.2).

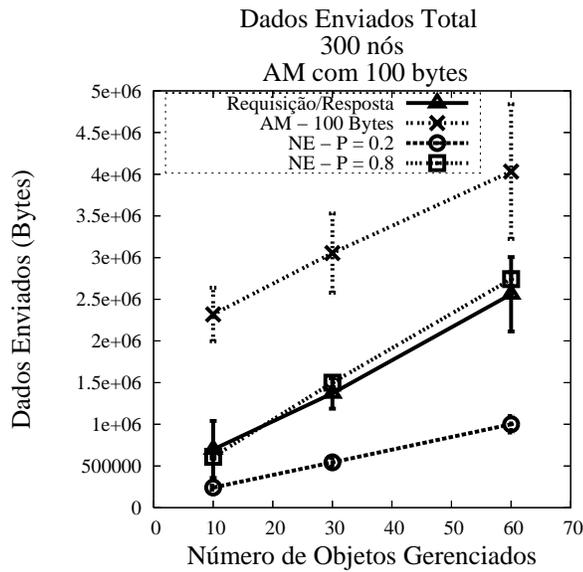


Figura 6.11: Avaliação do impacto da quantidade de objetos gerenciados considerando a utilização da banda.

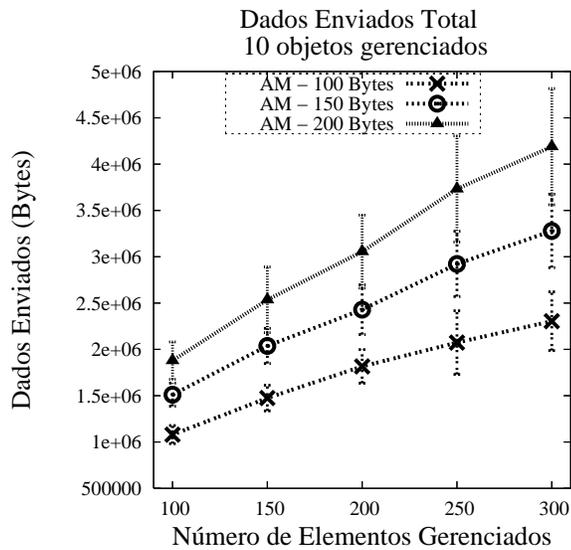


Figura 6.12: Avaliação do impacto do tamanho do código na abordagem de AMs.

Para avaliar o impacto do aumento do tamanho dos agentes móveis na abordagem de AMs, variamos o código do agente móvel entre 100, 150 e 200 bytes, conforme ilustra o gráfico 6.12. Neste caso, o número de objetos gerenciados foi fixado em 10. Como esperado, o aumento do uso da banda é proporcional ao tamanho dos agentes móveis.

Além da utilização da largura de banda, outra métrica importante é a distribuição dessa entre os nós da rede. A distribuição da utilização da largura de banda indica a porcentagem da

# de Nós	Tipo do Nó	RR	AM 100 bytes	NE P = 0.2	NE P = 0.8
100	ER	49.933	80.693	85.979	94.665
	G	50.066	19.306	14.020	5.334
150	ER	49.884	85.775	85.387	93.767
	G	50.115	14.224	14.612	6.232
200	ER	49.846	88.176	84.666	93.475
	G	50.153	11.823	15.333	6.524
250	ER	49.782	89.547	83.925	93.451
	G	50.217	10.452	16.074	6.548
300	ER	49.754	90.614	84.277	93.483
	G	50.245	9.385	15.722	6.516

Tabela 6.2: Valores percentuais da distribuição da largura de banda utilizada pelos elementos de rede (ER) e gerentes (G).

utilização referente a cada entidade, neste caso, elementos de rede e gerentes. Os resultados apresentados na Tabela 6.2 foram obtidos considerando 10 objetos gerenciados. Podemos notar que aproximadamente 50% da banda utilizada é distribuída entre os 20 gerentes na abordagem RR. Por outro lado, somente uma pequena parte (9-19%) é distribuída entre os gerentes na abordagem de AMs, sendo que esta distribuição diminui quando o número de nós aumenta. Considerando os elementos de rede, a abordagem RR distribui os 50% restantes da utilização da banda entre todos os elementos de rede (100, 150, 200, 250 ou 300). Por outro lado, na abordagem de AMs, a maioria da banda (80-90%) é distribuída entre os elementos de rede, sendo que esta distribuição diminui com o crescimento da rede. Na abordagem NE, o gerente envia mensagens somente de atribuição. Por isso, a maioria da banda utilizada é distribuída entre os elementos gerenciados (83-94%), enquanto a minoria foi distribuída entre os gerentes (5-15%).

6.1.3 Pacotes Perdidos

Em um sistema de comunicação, o envio de pacotes de uma origem a um destino pode não ser bem sucedida, ocasionando a perda de pacotes. A perda ocorre por diversos motivos. Em redes sem fio, como as RSSFs, o principal motivo da perda de pacotes é a colisão que ocorre quando mais de um elemento tenta transmitir simultaneamente dentro de uma mesmo raio. Protocolos da camada MAC específicos para esse tipo de rede tentam amenizar esse problema. Porém, perdas ainda ocorrem com uma certa frequência.

A Figura 6.13 apresenta a porcentagem de pacotes perdidos considerando uma rede com 10 objetos gerenciados e agentes móveis com 200 bytes. Esse gráfico apresenta o valor médio, o 1º e o 99º percentil, como o ponto inferior e superior dos gráficos, respectivamente. Esses valores são apresentados porque a amostras coletadas não seguiram um padrão. Podemos notar que nas abordagens RR e NE a perda de pacotes cresce com o crescimento da rede. Este comportamento se deve ao fato de que, quanto mais nós disputando o meio para

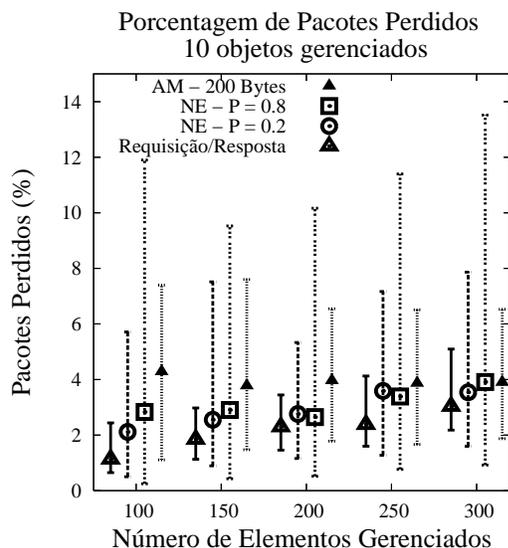


Figura 6.13: Porcentagem de pacotes perdidos na rede para 10 objetos gerenciados.

transmitir, maior a probabilidade de congestionamento, colisão e conseqüentemente perda de dados. Estes resultados enfatizam que o protocolo MAC 802.15.4 impacta negativamente no modelo de comunicação destas abordagens. Considerando a abordagem de AMs, os resultados apresentam poucas variações quando o número de elementos de rede cresce.

A diferença entre o 1^o e o 99^o percentis é menor para a abordagem RR, o que indica que os valores da amostragem são mais próximos uns dos outros. No caso da abordagem NE com probabilidade 0.8, a diferença entre o 1^o e o 99^o é mais significativa, indicando que os valores das amostras diferem mais entre si. Isso ocorre pois em determinados ciclos, muitos elementos podem enviar notificações simultaneamente, enquanto em outros apenas alguns elementos enviam.

6.1.4 Tempo de Resposta

Para esta métrica, serão apresentados os resultados obtidos no ambiente de simulação e também os obtidos no ambiente experimental.

6.1.4.1 Simulação

Basicamente, para as abordagens RR e de AMs, o tempo de resposta significa o tempo gasto para que as funções de gerenciamento sejam executadas uma única vez. Na abordagem RR, o tempo de resposta significa quanto tempo leva para o gerente enviar requisição para todos os elementos de rede do seu domínio e receber as respectivas respostas. Na abordagem de AMs, o tempo de resposta denota quanto tempo um AM leva para percorrer todos os elementos de rede de um domínio e retornar ao gerente. Para uma melhor visualização, os gráficos apresentados nesta seção usam escala logarítmica no eixo Y. Na abordagem de notificação

não é possível identificar um tempo de resposta, pois a cada intervalo a quantidade de nós sensores que notificarão ao gerente é variável, bem como quais nós enviarão a notificação. Por isso, esta métrica foi avaliada somente para as abordagens RR e de AMs.

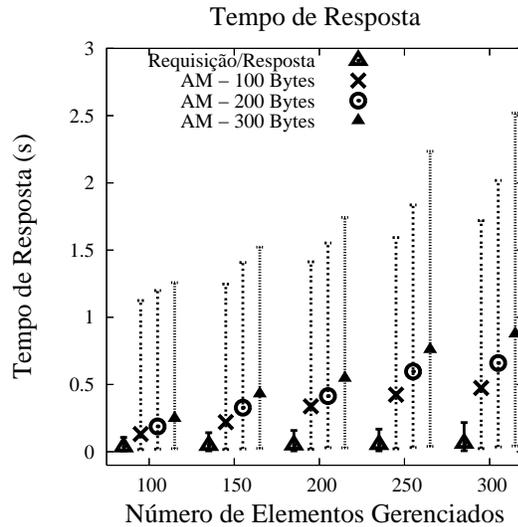


Figura 6.14: Tempo de resposta.

A Figura 6.14 apresenta a média e o 1º e o 99º percentis para o tempo de resposta medido. Pode-se perceber que a abordagem RR apresenta resultados melhores para essa métrica. Este resultado se deve ao fato de a abordagem de AMs não utilizar mecanismos de paralelismo dentro de um domínio. Na abordagem de AMs, o AM é executado em todo nó de um domínio, um de cada vez. Já na abordagem RR, as requisições são feitas paralelamente para todos os nós comuns do domínio, o que ajuda nesta métrica. Os resultados apresentados consideram a rede com 10 objetos gerenciados e um agente móvel com tamanho de 100 Bytes para a abordagem de AMs.

6.1.4.2 Experimentação

Com a avaliação experimental, foi possível avaliar o tempo de resposta de cada abordagem. A tabela 6.3 e a tabela 6.4 apresentam as amostras medidas para o tempo de resposta da abordagem de AMs para os experimentos realizados em laboratório e em ambiente fechado, respectivamente. Uma primeira observação é com relação ao impacto do tamanho do código do agente. Quanto maior o código, maior o tempo de resposta, como esperado. Como mais pacotes deverão ser transmitidos, maior será o tempo de transmissão do agente completo. Outra observação importante é a diferença entre o tempo de resposta da simulação (Figura 6.14) e o tempo obtido nos experimentos. Nos resultados de simulação, esse tempo foi significadamente inferior que nos resultados experimentais. Isso ocorre por dois principais motivos. Primeiramente, o ambiente de simulação não representa todas as variáveis de um ambiente real como

Experimento	Tempo de Resposta (s)		
	<i>Cenário 1.1</i>	<i>Cenário 1.2</i>	<i>Cenário 1.3</i>
1	16,96	9,60	39,91
2	12,47	18,57	25,60
3	13,59	19,26	20,81
4	5,56	20,22	14,02
5	20,20	25,85	22,80
6	4,83	24,96	24,05
7	7,88	10,43	19,13
8	13,93	38,27	24,46
9	11,07	10,37	28,65
10	6,78	11,00	31,01
11	13,88	13,27	21,77
12	10,9	24,83	17,30
13	6,77	21,19	37,54
14	5,15	17,24	26,97
15	18,76	14,16	28,62
Média	11,07	18,77	24,46
Desvio Padrão	5,02	8,19	7,02

Tabela 6.3: Tempo de resposta medidos em segundos para experimentos em laboratório. No *cenário 1.1*, o agente se encaixa em um único pacote; no *cenário 1.2*, em dois pacotes e; no *cenário 1.3* em quatro pacotes.

temperatura, obstáculos e interferência externa, tornando a comunicação menos suscetível a erros e a atrasos. Por outro lado, em um ambiente experimental, todas as variáveis são consideradas, dificultando o processo de comunicação sem fio. Outro motivo é a qualidade do rádio e das antenas dos nós sensores que foram utilizados, que já estão um pouco desgastadas devido ao uso. Esse desgaste faz com que os nós sensores tenham mais dificuldade para se comunicarem, dado que o sinal não será transmitido com boa qualidade, causando atraso no recebimento dos pacotes.

Comparando-se os resultados obtidos em laboratório com os obtidos em ambiente aberto, pode-se perceber que, mesmo os cenários em laboratório tendo uma dimensão menor, os resultados médios foram parecidos com os cenários do ambiente aberto. Isto se deve principalmente aos obstáculos dentro do laboratório. Em um ambiente menor e fechado, a reflexão das ondas transmitidas pelo rádio em objetos e nas paredes interfere na comunicação. No entanto, devido à esses mesmos motivos, as amostras variaram mais nos experimentos em laboratório, como indicado pelo desvio padrão.

Considerando as abordagens RR e NE, o tempo de resposta foi sempre menor que um segundo, impossibilitando a medida exata a "olho nu". Vários experimentos foram rodados para verificar esse resultado. Porém, as medidas não foram coletadas.

Experimento	Tempo de Resposta (s)		
	<i>Cenário 3.1</i>	<i>Cenário 3.2</i>	<i>Cenário 3.3</i>
1	11,24	24,27	33,55
2	13,38	21,55	34,59
3	15,62	16,49	33,29
4	11,47	22,53	34,95
5	8,34	17,48	31,78
6	11,34	20,44	35,82
7	13,16	17,48	34,19
8	12,4	17,18	28,03
9	13,2	19,07	36,53
10	11,08	20,77	35,18
11	10,54	16,08	29,23
12	10,04	22,91	34,86
13	14,1	16,68	29,49
14	10,97	18,25	29,15
15	10,11	21,21	33,71
16	11,19	19,84	34,37
17	14,21	18,69	33,33
18	13,04	19,4	32,59
19	12,09	16,79	35,74
20	10,49	18,75	36,83
21	11,73	22,66	33,49
22	13,31	18,72	32,07
23	15,08	21,18	33,38
24	11,43	20,7	35,76
25	10,18	22,05	36,65
Média	11,47	19,4	33,71
Desvio Padrão	1,74	2,3	2,45

Tabela 6.4: Tempo de resposta medido em segundos para experimentos em ambiente aberto. No *cenário 3.1*, o agente se encaixa em um único pacote; no *cenário 3.2*, em dois pacotes e; no *cenário 3.3* em quatro pacotes.

6.1.5 Requisitos de Memória

Os nós sensores apresentam restrições de hardware, incluindo a quantidade de memória disponível. Portanto, uma métrica importante para RSSFs é o requisito de memória para uma determinada solução. Não adianta uma abordagem apresentar um desempenho satisfatório se ela requer mais memória que a disponível nos equipamentos. Para avaliar o consumo de memória de cada abordagem, elas foram implementadas no sistema operacional TinyOS [Levis et al., 2004].

A tabela 6.1.5 apresenta o consumo de memória RAM e ROM das abordagens. A memória RAM armazena os dados que estão sendo utilizados pelo processador durante a execução da aplicação, podendo variar dinamicamente. A quantidade de memória RAM indicada na tabela significa o total que seria preciso para armazenar todos os dados necessários para a aplicação

Tipo de Memória	RR	NE	AM
RAM	911.640	909.624	2.611.496
ROM	52.728	52.476	125.560

Tabela 6.5: Requisitos de memória em bytes.

continuamente na memória, sem a necessidade de se fazer trocas. Constata-se que a abordagem de AMs necessita significativamente mais de memória RAM que as outras abordagens. Tal fato ocorre pois essa abordagem utiliza *scripts* interpretados por uma máquina virtual.

O consumo significativamente superior de memória ROM da abordagem de AMs é devido à máquina virtual que deve ser instalada nos nós sensores para que os agentes móveis sejam executados.

6.1.6 Sumário

A tabela 6.6 apresenta um resumo geral de qual abordagem foi mais eficiente para as métricas de desempenho avaliadas.

Métrica	Ordem de eficiência
Energia Recepção	NE-P=0,2; NE-P=0,8; RR; AMs.
Energia Transmissão	NE-P=0,2; NE-P=0,8; AMs; RR.
Energia Processamento - ER	NE-P=0,2; RR; NE-P=0,8; AMs.
Energia Processamento - G	NE-P=0,2; RR; NE-P=0,8; AMs.
Utilização da Banda	NE-P=0,2; RR; NE-P=0,8; AMs.
Distribuição da Utilização da Banda	AMs; NE-P=0,8; NE-P=0,2; RR.
Perda de Pacotes	AMs; NE-P=0,2; NE-P=0,8; RR.
Tempo de Resposta	RR; AMs.
Consumo de Memória	NE; RR; AMs.

Tabela 6.6: Resumo geral dos resultados de desempenho. A ordem que as abordagens aparecem indica a quais são mais eficientes para cada métrica.

6.2 Resultados Funcionais

Além das métricas de desempenho avaliadas anteriormente, também foi avaliada a eficiência das funções de gerenciamento em cada uma das abordagens. A eficiência do gerenciamento indica o sucesso da execução das funções, ou seja, se os seus objetivos descritos na Seção 5.1 do Capítulo 5 foram alcançadas satisfatoriamente.

6.2.1 Função de Ajuste de Potência

O serviço de auto-configuração implementado nas abordagens avaliadas executa a função de ajuste de potência de transmissão dos nós. A execução dessa função implica na modificação

da potência de transmissão de todos os elementos de rede, de acordo com o alcance mínimo necessário para transmitir. A medida de eficiência dessa função pode ser feita de acordo com a quantidade de elementos de rede que necessitavam dessa mudança e que realmente tiveram sua potência alterada. Essa eficiência é ilustrada na figura 6.15.

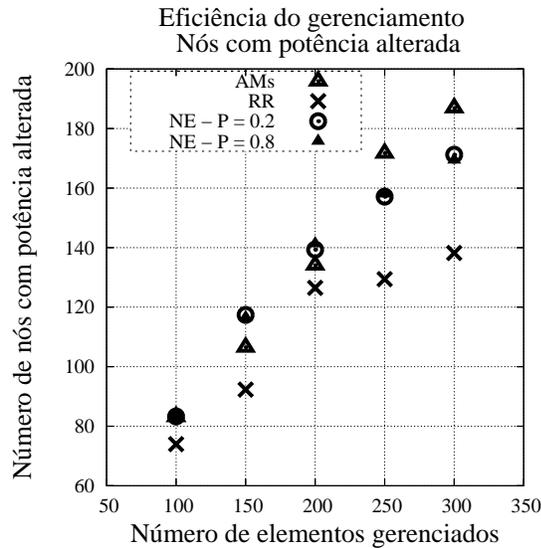


Figura 6.15: Eficiência da função de ajuste de potência.

Avaliando esse gráfico, percebe-se que a abordagem RR se mostrou menos eficiente para executar essa função para todos tamanhos de rede. Além disso, o desempenho dessa abordagem se deteriora quando a rede passa de 200 para 250 ou 300 elementos. Nessa abordagem, as perdas de mensagens de requisição enviadas pelo gerente, de respostas enviadas pelos elementos de rede e também de mensagens de atribuição enviadas pelo gerente podem impactar na eficiência dessa função. Quanto maior a rede, maiores os problemas de congestionamento e perda de pacotes (veja seção 6.1.3).

As abordagens NE e AMs apresentaram resultados similares. Nas redes com 250 e 300 elementos, a abordagem AMs se mostrou um pouco mais eficiente. Na abordagem de AMs, a perda de um agente pode impactar a eficiência dessa função. No caso da abordagem NE, o impacto pode ser ocasionado pela perda de mensagens de notificação ou de atribuição.

6.2.2 Função de Controle de Densidade

O serviço de auto-manutenção adotado implementa a função de controle de densidade da rede. Essa função visa identificar nós redundantes e retirá-los de operação temporariamente. Na aplicação do modelo de avaliação deste trabalho, o posicionamento dos nós na área da rede é feita com uma distribuição uniforme para todas as abordagens. Assim, dados uma área de tamanho fixo e um número fixo de elementos, as topologias dos cenários das simulações serão similares em todas as rodadas e para todas as abordagens. Sendo assim, espera-se

que para uma certa quantidade de nós da rede, a quantidade total de nós redundantes seja praticamente a mesma para as três abordagens. Portanto, pode-se comparar a eficiência da função de controle de densidade pela quantidade de nós redundantes desligados na rede, conforme ilustra a figura 6.16.

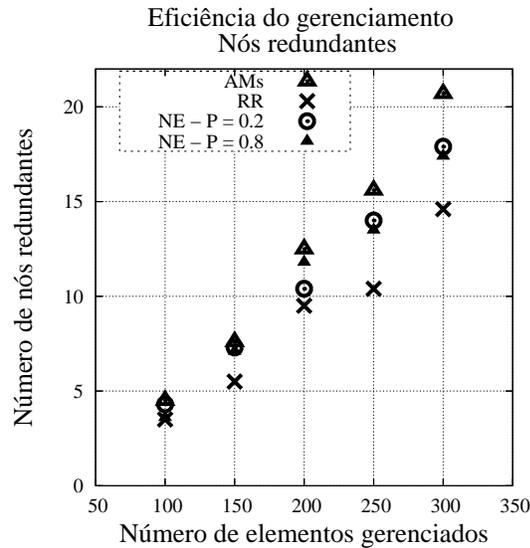


Figura 6.16: Eficiência da função de controle de densidade.

Pode-se perceber um mesmo comportamento obtido para a função de ajuste de potência. À medida que se aumenta o número de nós, a abordagem de AMs se destaca.

6.3 Análise dos Resultados

Com os resultados apresentados anteriormente e com base em conhecimentos teóricos, é possível analisar as abordagens de acordo com os objetivos da avaliação deste trabalho relacionados com escalabilidade, impacto da complexidade do gerenciamento, adequação das abordagens para aplicações específicas e eficiência da tecnologia de agentes móveis em RSSFs.

6.3.1 Escalabilidade

A avaliação da escalabilidade visa identificar o impacto do crescimento do número de elementos gerenciados no gerenciamento segundo as diferentes abordagens. Considerando o consumo de energia com recepção e a utilização da largura de banda, a abordagem de AMs se mostrou menos escalável, seguida pela NE com probabilidade de 0.8, NE com probabilidade de 0.2 e RR. Como o consumo com recepção é maior que os consumos com transmissão e processamento, o consumo de energia total para a abordagem de AMs foi maior, mesmo consumindo menos energia com transmissão que a abordagem RR.

Considerando pacotes perdidos, a abordagem de AMs escalou melhor que as outras, que sofrem impacto maior devido ao protocolo 802.15.4 da camada MAC. A maior quantidade de mensagens enviadas paralelamente impacta mais esse métrica para as abordagens RR e NE. Apesar de os valores absolutos coletados para essa métrica serem piores para a abordagem de AMs, a expectativa é que para redes maiores essa abordagem se sobressaia, já que a porcentagem de pacotes perdidos ficou praticamente a mesma, independente da quantidade de elementos gerenciados. Para as outras abordagens, o aumento da quantidade de elementos gerenciados ocasionou em uma maior perda de pacotes. Para a métrica tempo de resposta, o aumento do número de elementos impactou levemente tanto para a abordagem de AMs quanto para a RR.

Pode se perceber que a decisão de qual abordagem adotar, considerando o tamanho da rede, deve ser feita com base nos objetivos da aplicação. Se o objetivo principal é manter a rede ativa o maior tempo possível, o gerenciamento usando a abordagem de AMs pode não ser a mais adequada. Porém, se a rede possuir uma grande quantidade de elementos e a perda de pacotes impactar negativamente a eficácia da aplicação, essa abordagem pode ser eficiente.

6.3.2 Complexidade do Gerenciamento

Neste trabalho, a quantidade de objetos gerenciados e as funcionalidades de gerenciamento indicam a complexidade da solução de gerenciamento adotada. Na abordagem de AMs, as funcionalidades do gerenciamento impactam o tamanho do código dos agentes móveis. De acordo com os resultados, quanto maior o tamanho dos agentes móveis, maior o consumo de recursos da rede, tanto de processamento quanto de comunicação. A outra variável da complexidade do gerenciamento é a quantidade de objetos gerenciados. Com exceção da abordagem NE com probabilidade 0.2, todas as outras sofreram impacto significativo com o aumento da quantidade de objetos gerenciados.

Isso mostra que a escolha das funcionalidades de gerenciamento é uma tarefa importante para os projetistas de rede. Deve-se selecionar os serviços a serem executados e as variáveis a serem monitoradas de acordo com as necessidades e objetivos da aplicação, para evitar um consumo desnecessário de recursos da rede.

6.3.3 Adequação das Abordagens para Aplicações Específicas

Existem diversas aplicações para RSSFs. Com base em conhecimentos teóricos e na análise dos resultados, percebe-se que não existe uma abordagem de gerenciamento que seja adequada a todas as aplicações, sem restrições. No entanto, existem abordagens que se adequam melhor a determinadas aplicações, de acordo com as características das mesmas. Nesta seção, são apresentadas algumas aplicações específicas que tendem a ser mais eficientes se adotarem uma determinada abordagem.

Abordagem de AMs: geralmente, a abordagem de AMs será interessante principalmente em aplicações que demandam novas funcionalidades dinamicamente. Em aplicações de longo

período, pode ser maior a necessidade de novas funcionalidades, já que é difícil prever o comportamento da rede. Além destas aplicações, existem também algumas que, mesmo sendo por um curto período de operação, demandam novas funcionalidades dinamicamente.

Pode-se pensar que, se não for preciso que novas funcionalidades sejam implantadas na rede dinamicamente, ou seja, todas as possibilidades de eventos e falhas foram previamente previstas pelos projetistas, então a solução mais eficiente é implementar a priori todo o código de gerenciamento nos nós sensores. Porém, com o uso de agentes móveis que percorrem vários nós da rede, a função gerente teria uma visão global da rede. Se o código for a priori inserido nos nós, eles teriam somente uma visão local. Com uma visão local, a maioria dos serviços de gerenciamento, como controle de densidade e ajuste da potência, não podem ser executados ou seriam incompletos. Seria necessário um esquema de troca de informações entre todos os nós sensores, o que leva a uma rede em que todos nós requisitam e recebem respostas de todos os outros, o que pode não ser eficiente. Portanto, agentes móveis podem ser adotados mesmo que não haja necessidade de novas funcionalidades dinamicamente.

Abaixo seguem algumas aplicações que se beneficiariam das características dos agentes móveis, principalmente pensando na possibilidade de inserir novas funcionalidades dinamicamente na rede:

- **Aplicações médicas:** nesse tipo de aplicação, sensores sem fio são implantados no corpo humano para monitoração de pacientes e até mesmo para controle de medicamentos e tratamentos. Por exemplo, sensores podem ser implantados para monitorar o nível de açúcar no sangue de diabéticos e liberar insulina na medida exata quando necessário. Em aplicações com sensores implantados em seres humanos, é caro para os pacientes e trabalhoso para os médicos recolher os sensores para implantação de novas funcionalidades. Além disso, é provável que algum comportamento do corpo humano monitorado não seja previsto a priori. Caso isso ocorra, é interessante enviar novas funcionalidades para monitorar esse novo comportamento. Outra necessidade é a inovação da monitoração e tratamento do pacientes. Se novas descobertas forem feitas, o tratamento dado a um paciente pode ficar ultrapassado. A tecnologia de agentes móveis permite que novas opções de tratamento sejam incorporadas ao sistema, sem precisar recolher os sensores e implantá-los novamente. Um exemplo de proposta de aplicações médicas para RSSFs pode ser encontrado em [Matt Welsh, 2005].
- **Monitoração de animais:** a presença de humanos para a monitoração de animais em seu habitat natural pode interferir no comportamento dos animais. O uso de RSSFs permite que o comportamento dos mesmos seja conhecido sem que o ser humano esteja presente. Por exemplo, na ilha de *Great Duck* [Mainwaring et al., 2002, Mainwaring et al., 2003], depois que uma RSSF foi implantada para a monitoração de pássaros, os pesquisadores perceberam que o comportamento dos pássaros, antes monitorados por seres humanos, estava sendo influenciado pela presença dos pesquisadores. Nesse tipo de aplicação, o comportamentos dos animais poderá requisitar algum processamento específico, não identificado a priori. Este novo processamento pode ser in-

corporado na rede com agentes móveis. Além disso, outros animais da fauna antes não conhecidos ou não detectados naquele ambiente podem ser encontrados, o que também pode requisitar novas funcionalidades dinamicamente para a rede.

- **Aplicações militares:** existem várias aplicações militares para RSSFs, como por exemplo, identificação de inimigos em campo de batalha, monitoração de minas terrestres e monitoração de armas biológicas, químicas e nucleares. Nesse último caso, se algum elemento químico ou biológico não previsto for identificado, pode ser preciso um novo código para que o processamento da rede seja eficiente na detecção de perigo. Agentes móveis com novas funções poderiam ser usados nesse caso.
- **Exploração espacial:** para explorar as características de outros planetas, uma RSSF pode ser lançada por foguete e instalada para a monitoração. Como essa aplicação é de longo período e o local de monitoração é desconhecido, podem surgir necessidades de novas funcionalidades, de acordo com as descobertas. Com agentes móveis, essas funcionalidades poderiam ser inseridas dinamicamente na rede, com o uso da comunicação via satélite.
- **Casa inteligente:** em uma casa inteligente, sensores seriam espalhados pela casa e embutidos nos objetos (televisão, sofá, microondas, geladeira, dentre outros.) com o objetivo de facilitar o dia-a-dia dos moradores. Esses objetos podem interagir entre si para atender às demandas dos usuários da casa. Se novos objetos fossem inseridos, novas funcionalidades seriam requisitadas. Além disso, os usuários podem mudar de comportamento com o tempo, requisitando novas funcionalidades. Com agentes móveis, essas funcionalidades poderiam ser criadas e a inteligência da casa atualizada de acordo com a demanda.

Abordagens RR e NE: tanto a abordagem RR quanto a NE seriam interessantes em aplicações mais simples, onde o código de gerenciamento é previamente instalado nos nós sensores e esses dificilmente teriam necessidades de novas funcionalidades. Existem várias aplicações desse tipo, como monitoração de temperatura de ambientes abertos ou fechados, monitoração da qualidade do ar e da água, detecção de incêndios, ajuda em resgates de desastres, aplicações militares mais simples (monitoração de inimigos e detecção de minas terrestres), monitoração agrícola (controle de irrigação, monitoração de pragas), dentre outras.

Com posse dos resultados da avaliação e das características das abordagens, deve ser considerado para se efetuar a escolha entre as duas abordagens o objetivo da aplicação e as características do meio físico onde se encontra a rede. Se o meio físico é propício a falhas na comunicação e perda de pacotes, mensagens de notificação da abordagem NE podem ser perdidas e eventos importantes não serão notificados ao gerente. Isso pode atrapalhar o correto funcionamento do gerenciamento e, conseqüentemente, da aplicação. Com a abordagem RR, a perda de uma resposta pode ser percebida pelo gerente, que poderá tomar providências para identificar o motivo da perda.

Por outro lado, se a aplicação não sofrer impacto com perdas de alguns eventos, a abordagem NE pode ser mais interessante. Já nos casos em que o gerente sempre necessita das informações da rede deve-se adotar a abordagem RR, para garantir a coleta das mesmas.

Resumo: a tabela 6.3.3 apresenta um resumo das recomendações feitas.

Demanda por novas funcionalidades	Prazo	Propensão a falhas	Exemplos	Recomendação
Sim	Longo	Independente	médicas, casa inteligente, monitoração espacial	AMs
Sim	Curto	Independente	médicas, militares, monitoração de animais	AMs
Não	Independente	Sim	monitoração de temperatura, qualidade do ar e qualidade da água, militares, detecção de incêndios, resgates e monitoração agrícola	RR
Não	Independente	Não	monitoração de temperatura, qualidade do ar e qualidade da água, militares, detecção de incêndios, resgates e monitoração agrícola	NE

Tabela 6.7: Resumo das recomendações de abordagens para aplicações específicas.

6.3.4 Eficiência de Agentes Móveis em RSSFs

A abordagem de AMs é uma proposta nova para o gerenciamento de RSSFs. Por esse motivo, são consideradas mais detalhadamente os seus resultados, para identificar vantagens e desvantagens dessa abordagem.

Avaliando os requisitos de memória necessários para o gerenciamento usando as diferentes abordagens, percebe-se que a abordagem de AMs ainda não é completamente viável para nós sensores sem fio produzidos atualmente. Por exemplo, a família de sensores Mica composta principalmente pelos nós sensores Mica2 e MicaZ que são produzidos e comercializados

mundialmente pela CrossBow Inc. [Crossbow, 2005], contém 128Kbytes de memória ROM e 4Kbytes de memória RAM. Verificando o consumo de memória necessário quando é usado a abordagem de AMs (Tabela 6.1.5), o consumo de memória RAM é muito superior ao oferecido pelos nós, o que ocasiona uma necessidade de muitas trocas de dados da memória e conseqüentemente, maior consumo de energia e tempo de processamento. Com relação à memória ROM, o consumo de aproximadamente 125KB resultando no uso de apenas 3KB para outras funcionalidades, o que pode não ser suficiente. Ou seja, se a abordagem de AMs for adotada, outras aplicações podem ser impossibilitadas de serem implantadas.

Além do consumo de memória, o desempenho da abordagem de AMs foi comprometido pelo consumo de energia, principalmente no que diz respeito ao consumo com recepção (Figura 6.7). O tamanho dos agentes móveis e o fato da rede ser sem fio impactam significativamente os resultados de comunicação. Esse comportamento é decorrente da rede ser sem fio, o que faz com que nós sensores que não são o destino do agente o recebam e consumam energia. Quanto ao consumo com processamento, a execução do agente resulta em um consumo muito superior do que o das outras abordagens. Esse resultado se deve ao fato de a tecnologia de AMs utilizar uma máquina virtual, que interpreta instruções virtuais. Essa interpretação é mais custosa que a execução de instruções de máquina.

Outra dificuldade em se implementar soluções que usam esta tecnologia para RSSFs é a restrição da máquina virtual existente. Até o momento, somente instruções mais simples são permitidas, como por exemplo a manipulação de LEDs, leitura de sensor e verificação do identificador dos nós. Com essas instruções, não é possível realizar tarefas de gerenciamento mais avançadas.

Considerando o tempo de resposta, os resultados experimentais mostraram que esse ainda é muito alto, mesmo para redes com poucos nós sensores (Tabelas 6.3 e 6.4). Esse tempo de resposta alto pode impactar na eficácia da aplicação

Para tornar o uso de agentes móveis mais aplicável em RSSFs, é preciso realizar algumas melhorias, como por exemplo:

- O Maté é a máquina virtual base das duas tecnologias de agentes móveis existentes para RSSFs atualmente, o *Bombilla Agent* e o *Agilla*. Para diminuir o consumo de memória, é preciso tornar essa MV mais adequada às restrições dos nós sensores.
- Para se reduzir o consumo de energia com processamento, é preciso que a interpretação das instruções virtuais seja mais eficiente no quesito de tempo de processamento.
- Para se reduzir o consumo de energia com recepção, é interessante se implementar um protocolo para controlar a migração dos AMs. Por exemplo, dentro de um domínio, os nós que não forem receber o AM poderiam ter o rádio desligado para não consumirem energia com recepção.

Apesar do avanço das tecnologias de nós sensores tornar essas restrições irrelevantes, é importante que melhorias sejam feitas no sistema para agentes móveis desenvolvido para

RSSFs, para que os benefícios oferecidos por essa tecnologia não sejam anulados pela eficiência do sistema.

6.3.5 Comentários sobre Outras Redes

Neste trabalho, avaliamos as abordagens de gerenciamento baseada em agentes móveis, requisição/resposta e de notificação de eventos para redes hierárquicas heterogêneas. Mas como seria o comportamento dessas abordagens em redes planas homogêneas ou em redes hierárquicas homogêneas? Apesar dessa avaliação não ter sido realizada, é possível tirar algumas conclusões a respeito com base teórica e nos resultados para as redes hierárquicas heterogêneas.

De uma maneira simplificada, pode-se avaliar uma rede plana como tendo um único domínio de gerenciamento da rede hierárquica heterogênea, em que o gerente do domínio seria o ponto de acesso da rede plana. Com base nos resultados, percebe-se que com o aumento do tamanho dos domínios, aumenta o consumo de recursos em todas as abordagens, e aumenta a perda de pacotes nas abordagens RR e NE. Em uma rede plana com centenas de nós, a abordagem NE seria a mais adequada, pois somente quando vários eventos ocorressem simultaneamente a rede seria congestionada. Nesse caso, seria interessante adotar um mecanismo de controle de notificações, onde cada nó transmitiria a notificação depois de uma espera de tempo aleatória. Assim, a probabilidade de colisões pode ser diminuída. Esse mecanismo é conhecido como atraso orquestrado e foi definido em [Shen et al., 2001].

A diferença de uma rede hierárquica homogênea para a heterogênea é que, na primeira, os gerentes teriam as mesmas capacidades computacionais que os elementos de rede. Nesse caso, é interessante distribuir as funções de gerenciamento entre os elementos de rede, para que os gerentes não sejam sobrecarregados e consumam toda sua energia bem antes dos outros nós. A abordagem de AMs pode ser interessante nesse caso, já que o processo do gerenciamento é executado localmente em todos os nós. Para todas as abordagens, seria importante ter um mecanismo de rodízio de gerentes com o objetivo de balancear o consumo de recursos.

6.4 Conclusão

Este capítulo apresentou os resultados de simulação e experimentação para comparar as abordagens de gerenciamento consideradas. Foram apresentados resultados de consumo de energia com recepção, transmissão e processamento. A abordagem de AMs se mostrou menos eficiente neste caso, devido principalmente ao consumo com recepção. Também foram apresentados os resultados de utilização da largura de banda. Novamente a abordagem de AMs se mostrou menos eficiente, em geral. Porém, ao olharmos para a distribuição da largura de banda, essa abordagem consegue distribuí-la de forma mais homogênea entre os vários nós da rede. Considerando pacotes perdidos, a abordagem de AMs se mostrou mais escalável, mantendo praticamente a mesma perda independente da quantidade de nós. Além desses resultados, também foram apresentados aqueles relacionados ao tempo de resposta coletado nos ambientes de simulação e experimental.

Foi feita uma análise dos resultados com base nos objetivos da avaliação. Como não existe uma abordagem ideal para todos os tipos de aplicações, foram identificadas algumas aplicações que se beneficiariam com alguma abordagem específica. Também foram apresentados neste capítulo sugestões de melhoria dos sistemas de AMs para RSSFs, para que essa abordagem seja mais eficiente em um ambiente real. Por fim, alguns comentários sobre como seria o comportamento das abordagens em redes planas e homogêneas foram feitos.

Capítulo 7

Considerações Finais

Este capítulo apresenta as considerações finais do trabalho. Primeiramente, na Seção 7.1 são apresentadas as conclusões do trabalho. O desenvolvimento desta dissertação abriu um leque de oportunidades de novos trabalhos, dos quais os mais promissores são apresentados na Seção 7.2.

7.1 Conclusões

O gerenciamento de RSSFs, uma área de pesquisa recente, visa garantir a produtividade da rede com o uso eficiente dos recursos. Para se gerenciar uma RSSF, deve-se adotar alguma abordagem para recuperar as informações de gerenciamento dos elementos da rede e executar os serviços de gerenciamento baseados nessas informações. Essa abordagem deve ser escolhida com cuidado, para que os benefícios do gerenciamento não sejam anulados pelo consumo extra de recursos. Para isso, é importante se fazer avaliações para identificar vantagens e desvantagens de diferentes abordagens.

Este trabalho avaliou três abordagens de gerenciamento para RSSFs:

- agentes móveis - é baseada no paradigma de mobilidade de código e utiliza agentes móveis (AMs) que migram para os elementos de rede com o código do gerenciamento;
- requisição/resposta - os gerentes requisitam as informações aos elementos de rede, que enviam respostas com as informações solicitadas;
- notificação de eventos - os elementos de rede enviam mensagens de notificação ao gerente caso algum evento ocorra na rede.

Essas abordagens foram modeladas para simulação e também instanciadas para experimentação em campo. A modelagem em ambiente de simulação permitiu que as métricas de desempenho de consumo de energia, utilização da largura de banda, perda de pacotes e tempo de resposta fossem coletadas e avaliadas. Além disso, uma avaliação funcional da eficiência das abordagens também foi feita nesse ambiente. Na experimentação, foi possível avaliar as métricas consumo de memória e tempo de resposta. Outra parte importante da

experimentação foi a verificação do funcionamento da abordagem de AMs em um ambiente real.

Com a avaliação dos resultados, foi possível fazer uma análise das abordagens considerando a escalabilidade e o impacto do gerenciamento nos resultados. Além disso, foi possível identificar aplicações específicas que seriam mais eficientes ao adotar uma determinada abordagem. Por fim, uma análise da tecnologia existente atualmente para se aplicar agentes móveis em RSSFs foi feita. Essa análise é importante pois a aplicação de AMs nesse tipo de rede é ainda uma área de pesquisa incipiente, mas com resultados promissores.

Em resumo, pode-se concluir que não existe abordagem de gerenciamento ideal para todas as aplicações. Todas as abordagens avaliadas possuem vantagens e desvantagens. Em geral, a abordagem de AMs seria mais adequada quando novas funcionalidades pudessem ser requeridas ao longo da operação da rede, como por exemplo em aplicações médicas. Já as abordagens RR e NE seriam mais eficientes em aplicações mais simples e menos dinâmicas, como monitoração de temperatura ou qualidade do ar. Considerando as métricas de desempenho avaliadas, a abordagem de AMs foi menos eficiente no consumo de energia. Porém, se apresentou-se mais escalável na perda de pacotes.

Considerando a tecnologia de agentes móveis para RSSFs, ainda há muito o que melhorar. Primeiramente, muita memória é requisitada para se instalar a máquina virtual existente nos nós sensores, impossibilitando o uso de outras aplicações em conjunto. Em segundo lugar, as instruções virtuais ainda são bem restritas, impossibilitando a criação de agentes complexos. Por último, o tempo de percurso de um agente em uma rede real ainda é muito alto, assim como o consumo de energia.

7.2 Trabalhos Futuros

O desenvolvimento dessa dissertação apontou alguns trabalhos futuros, principalmente envolvendo o uso de agentes móveis em RSSFs, que são listados a seguir.

- Tornar a máquina virtual mais compacta - os nós sensores apresentam restrições de hardware, incluindo de memória. A máquina virtual existente para RSSFs ocupa muita memória dos nós sensores. Praticamente toda a memória de programa ficou ocupada com a máquina virtual para os nós sensores Mica2 e Micaz, dificultando o desenvolvimento de aplicações;
- Desenvolver instruções virtuais mais elaboradas - as instruções virtuais existentes atualmente são bastante simples, como leitura de um sensor, manipulação de *leds* e verificação do identificador do nó. Para o desenvolvimento de aplicações mais elaboradas, seria preciso que novas instruções fossem desenvolvidas, como uma instrução única para alteração da potência do rádio;
- Desenvolver e avaliar algoritmos de compressão para RSSFs - o uso de agentes móveis gerou um alto consumo de energia, principalmente com o da recepção. Para tentar

diminuir esse consumo, pode ser interessante adotar mecanismos de compressão. Assim, apesar de requerer um processamento extra para realizar a compressão e descompressão, poderia haver um ganho na diminuição do consumo de energia com transmissão e recepção;

- Desenvolver um protocolo para transmissão de agentes móveis - quando um agente móvel migra de um nó a outro, todos os nós da vizinhança recebem o agente móvel até determinado nível. Só é possível saber se o agente tem algum nó como destino depois que ele já foi recebido pelo nó, resultando no consumo de energia com recepção de todos os nós dentro do alcance do nó transmissor. Para tentar diminuir esse consumo, seria interessante propor um protocolo que desliga os nós da vizinhança antes da transmissão de um agente móvel, casos os nós não fossem o destino.

Apêndice A

Publicações

Durante o desenvolvimento do mestrado, publicamos trabalhos diretamente relacionadas com esta dissertação além de outros oriundos de atividades paralelas realizadas.

A.1 Publicações Relacionadas com a Dissertação

1. SILVA, F. A., RUIZ, L. B., NOGUEIRA, J. M. S., BRAGA, T. R. M. *Mobilité de code dans les réseaux de capteurs sans fil*. LABIOD Houda editor. Réseaux mobiles ad hoc et réseaux de capteurs. Hermers Science, 2006, p. 281-310.
2. SILVA, F. A., RUIZ, L. B., BRAGA, T. R. M., NOGUEIRA, J. M. S. *"Avaliação de Abordagens de Coleta e Processamento de Dados em Redes de Sensores Sem Fio"*. XI Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços, Maio-Junho 2006, Curitiba, Brasil.
3. BRAGA, T. R. M., SILVA, F. A., RUIZ, L. B., NOGUEIRA, J. M. S., LOUREIRO, A. A. F. *"A Comparative Study of Distributed Self-management Approaches for Wireless Sensor Networks"*. IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Abril 2006, Vancouver, Canadá.
4. SILVA, F. A., RUIZ, L. B., BRAGA, T. R. M., NOGUEIRA, J. M. S., LOUREIRO, A. A. F. *"Defining a Wireless Sensor Network Management Protocol"*. Latin American Network Operations and Management Symposium (IV LANOMS 2005), p. 39–50. Agosto 2005, Porto Alegre, Brasil.
5. BRAGA, T. R. M., SILVA, F. A., RUIZ, L. B., NOGUEIRA, J. M. S., LOUREIRO, A. A. F., VIANA JUNIOR, M. A. *"Avaliação de Abordagens para o Gerenciamento Distribuído em Redes de Sensores Sem Fio"*. X Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços, Maio 2005, Fortaleza, Brasil.
6. BRAGA, T. R. M., SILVA, F. A., RUIZ, L. B., NOGUEIRA, J. M. S., LOUREIRO, A. A. F. *"MannaNMP: Um Protocolo de Gerenciamento para Redes de Sensores Sem Fio"*. IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Abril 2006, Vancouver, Canadá.

Fio". X Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços, Maio 2005, Fortaleza, Brasil.

A.2 Publicações de Trabalhos Paralelos

1. BRAGA, T. R. M., SILVA, F. A., RUIZ, L. B., LOUREIRO, A. A. F., NOGUEIRA, J. M. S. "*Design and Evaluation of an Autonomic Sensor Element*". The Latin American Autonomic Computing Symposium (LAACS), Julho 2006, Campo Grande, Brasil. (*Selecionado como o melhor artigo da conferência*).
2. BRAGA, T. R. M., SILVA, F. A., ASSUNCAO, H. P., RUIZ, L. B. "*Redes Autônomicas*". Minicurso do XXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores. Maio-Junho 2006, Curitiba, Brasil.
3. BRAGA, T. R. M., SILVA, F. A., RUIZ, L. B., LOUREIRO, A. A. F., NOGUEIRA, J. M. S. "*Um Elemento Autônomico para Redes de Sensores Sem Fio*". XXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Maio-Junho 2006, Curitiba, Brasil.
4. RUIZ, L. B., BRAGA, T. R. M., SILVA, F. A., ASSUNÇÃO, H. P., NOGUEIRA, J. M. S., LOUREIRO, A. A. F. "*On the Design of a Self-Managed Wireless Sensor Network*". IEEE Communications Magazine, p. 95–102, 43(8). Agosto 2005.
5. RUIZ, L. B., BRAGA, T. R. M., SILVA, F. A., ASSUNÇÃO, H. P., NOGUEIRA, J. M. S., LOUREIRO, A. A. F., AGOULMINE, N. "*Conception d'une application d'auto gestion pour des réseaux de capteurs sans fils*". Gestion de REseaux et de Services (VI GRES 2005), ISBN 2-9520326-5-3, p.129-142, Março 2005, Luchon, França. (*em francês*)
6. RUIZ, L. B., BRAGA, T. R. M., SILVA, F. A., NOGUEIRA, J. M. S., LOUREIRO, A. A. F. "*Self-Managed Wireless Sensor Networks: A Study Case*". IFIP/IEE International Symposium on Integrated Network Management, Abril 2005, Nice, França.

Referências Bibliográficas

- [Akyildiz et al., 2002] Akyildiz, I.; Su, W.; Sankarasubramaniam, Y. e Cayirci, E. (2002). A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communication Magazine*, 40(8):102–114.
- [Arantes et al., 2002] Arantes, J. A.; Westphall, C. B. e Custódio, R. F. (2002). Modelo Analítico para Avaliar Plataformas Cliente/Servidor e Agentes Móveis Aplicado à Gerência de Redes. In *XX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, volume II, pp. 424–439, Búzios, RJ, Brasil.
- [Baldi et al., 1997] Baldi, M.; Gai, S. e Picco, G. P. (1997). Exploiting code mobility in decentralized and flexible network management. In *Proceedings of the First International Workshop on Mobile Agents*, pp. 13–26, Berlim, Alemanha.
- [Barr et al., 2005] Barr, R.; Haas, Z. J. e van Renesse, R. (2005). Jist: an efficient approach to simulation using virtual machines: Research articles. *Softw. Pract. Exper.*, 35(6):539–576.
- [Bieszczad et al., 1998] Bieszczad, A.; Pagurek, B. e White, T. (1998). Mobile Agents for Network Management. *IEEE Communications Surveys*, 1(1):2–9. .
- [Bohoris et al., 2000] Bohoris, C.; Pavlou, G. e Cruickshank, H. (2000). Using Mobile Agents for Network Performance Management. In *IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS 2000)*, pp. 637–653, Honolulu, Havaí, EUA.
- [Braga et al., 2004] Braga, T. R. M.; Silva, F.; Ruiz, L. B. e Nogueira, J. M. S. (2004). MannaSim: a framework to the simulation of wireless sensors networks (in portuguese). *Revista Eletrônica de Iniciação Científica da Sociedade Brasileira de Computação (REIC)*.
- [Chlipala et al., 2003] Chlipala, A.; Hui, J. e Tolle, G. (2003). Deluge: Data Dissemination for Network Reprogramming at Scale. CS262/CS294-1 - Class Project.
- [Corporation, 2006] Corporation, C. (2006). Cc1000 single chip very low power rf transceiver datasheet. Disponível em <http://www.chipcom.com>.
- [Crossbow, 2005] Crossbow (2005). Crossbow Technology. Disponível em <http://www.xbow.com>.
- [da Silva Costa, 1999] da Silva Costa, T. F. (1999). Avaliação analítica do uso de agentes móveis na gerência de redes. Master’s thesis, Departamento de Informática e de Estatística da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

- [Delicato et al., 2003] Delicato, F. C.; Pires, P. F.; Pirmez, L. e da Costa Carmo, L. F. R. (2003). A flexible web service based architecture for wireless sensor networks. *International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW'03)*, 00:730.
- [Delicato et al., 2005] Delicato, F. C.; Pires, P. F.; Rust, L.; Pirmez, L. e de Rezende, J. F. (2005). Reflective middleware for wireless sensor networks. In *SAC '05: Proceedings of the 2005 ACM symposium on Applied computing*, pp. 1155–1159, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Du et al., 2003] Du, T. C.; Li, E. Y. e Chang, A.-P. (2003). Mobile Agents in Distributed Network Management. *Communications of the ACM*, 46(7):127–132.
- [Duarte-Melo e Liu, 2003] Duarte-Melo, E. J. e Liu, M. (2003). Data-gathering wireless sensor networks: organization and capacity. *Computer Networks*, 43(4):519–537.
- [Fioreze et al., 2005] Fioreze, T.; Granville, L. Z.; Almeida, M. J. B. e Tarouco, L. M. R. (2005). Comparing web services with snmp in a management by delegation environment. In *IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM 2005)*, pp. 601–614.
- [Fok et al., 2005] Fok, C.-L.; Roman, G.-C. e Lu, C. (2005). Rapid development and flexible deployment of adaptive wireless sensor network applications. In *Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'05)*, pp. 653–662. IEEE.
- [Fok et al., 2006] Fok, C.-L.; Roman, G.-C. e Lu, C. (2006). Agilla: A mobile agent middleware for sensor networks. Technical Report WUCSE-2006-16, Washington University in St. Louis Department of Computer Science and Engineering.
- [Fuggetta et al., 1998] Fuggetta, A.; Picco, G. P. e Vigna, G. (1998). Understanding Code Mobility. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 24(5):342–361.
- [Gavalas et al., 2000] Gavalas, D.; Ghanbari, M.; Oapos Mahony, M. e Greenwood, D. (2000). Enabling mobile agent technology for intelligent bulk management data filtering. In *IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS 2000)*, pp. 623–636, Honolulu, Havaí, EUA.
- [Gavalas et al., 1999] Gavalas, D.; Greenwood, D.; Ghanbari, M. e O'Mahony, M. (1999). An infrastructure for distributed and dynamic network management based on mobile agent technology. In *IEEE International Conference on Communications (ICC99)*, pp. 1362–1366.
- [Gay et al., 2003] Gay, D.; Levis, P.; von Behren, R.; Welsh, M.; Brewer, E. e Culler, D. (2003). The nesC language: A holistic approach to networked embedded systems. In *ACM Conference on Programming Language Design and Implementation, (SIGPLAN 2003)*, pp. 1–11, Nova York, EUA.

- [Germán Goldszmidt e Yemini, 1991] Germán Goldszmidt, Y. Y. e Yemini, S. (1991). Network Management by Delegation. In *The Second International Symposium on Integrated Network Management*, pp. 95–107, Washington, EUA.
- [Goldszmidt, 1996] Goldszmidt, G. (1996). *Distributed management by delegation*. PhD thesis, Columbia University.
- [Goldszmidt et al., 1991] Goldszmidt, G.; Yemini, Y. e Yemini, S. (1991). Network management by delegation: the mad approach. In *Conference of the Centre for Advanced Studies on Collaborative Research (CASCON 91)*, pp. 347–361. IBM Press.
- [Gray et al., 2001] Gray, R. S.; Kotz, D.; Peterson, R. A.; Barton, J.; Chacón, D.; Gerken, P.; Hoffman, M.; Bradshaw, J.; Breedy, M.; Jeffers, R. e Suri, N. (2001). Mobile-agent versus client/server performance: Scalability in an information-retrieval task. In *Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Mobile Agents (MA 2001)*, Atlanta, Georgia, EUA.
- [Hewitt, 1977] Hewitt, C. (1977). Viewing Control Structures as Patterns of Passing Messages. *Journal of Artificial Intelligence*, 8(3):323–364. .
- [Hill et al., 2000] Hill, J.; Szewczyk, R.; Woo, A.; Hollar, S.; Culler, D. e Pister, K. (2000). System architecture directions for network sensors. In *International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS) 2000*.
- [ISO/IEC 9596, 1991] ISO/IEC 9596 (1991). Common Management Information Protocol Specification. Available at <http://www.moteiv.com>.
- [Jeong et al., 2003] Jeong, J.; Kim, S. e Broad, A. (2003). Network Reprogramming. Disponível em <http://webs.cs.berkeley.edu/tos/tinyos-1.x/doc/NetworkReprogramming.pdf>.
- [Jong e Culler, 2004] Jong, J. e Culler, D. (2004). Incremental Network Programming for Wireless Sensors. In *First IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (IEEE SECON)*, .
- [Ju et al., 2000] Ju, H.-T.; Choi, M.-J. e Hong, J. W. (2000). An efficient and lightweight embedded web server for web-based network element management. *Int. J. Netw. Manag.*, 10(5):261–275. ISSN: 1099-1190.
- [Kahani e Beadle, 1997a] Kahani, M. e Beadle, H. (1997a). Decentralised approaches for network management. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 27(3).
- [Kahani e Beadle, 1997b] Kahani, M. e Beadle, P. (1997b). Decentralised approaches for network management. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 27(3):36–47.
- [Kim, 2004] Kim, S. (2004). Structural Health Monitoring of the Golden Gate Bridge.

- [Kona e Xu, 2002] Kona, M. e Xu, C.-Z. (2002). A Framework for Network Management Using Mobile Agents. In *IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, pp. 225–233, Fort Lauderdale, Flórida, EUA.
- [Levis e Culler, 2002] Levis, P. e Culler, D. (2002). Maté: A Tiny Virtual Machine for Sensor Networks. In *10th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS X)*, pp. 85–95, San Jose, California. ACM.
- [Levis et al., 2004] Levis, P.; Madden, S.; Polastre, J.; Szewczyk, R.; Whitehouse, K.; Woo, A.; Gay, D.; Hill, J.; Welsh, M.; Brewer, E. e Culler, D. (2004). *TinyOS: An Operating System for Wireless Sensor Networks*. Springer-Verlag, New York. (Capítulo de livro).
- [Liotta et al., 1999] Liotta, A.; Knight, G. e Pavlou, G. (1999). On the performance and scalability of decentralized monitoring using mobile agents. In *DSOM '99: Proceedings of the 10th IFIP/IEEE International Workshop on Distributed Systems: Operations and Management*, pp. 3–18, Zurique, Suíça. Springer-Verlag.
- [Lopes et al., 2006] Lopes, C.; Melo, J.; Assunção, H.; Braga, T.; Silva, F.; Ruiz, L.; Loureiro, A. e Nogueira, J. (2006). Mannasim: Simulando redes de sensores sem fio. Salão de Ferramentas.
- [Loureiro et al., 2002] Loureiro, A. A.; Ruiz, L. B.; Mini, R. A. e Nogueira, J. M. S. (2002). Rede de sensores sem fio. In *Jornada de Atualização de Informática*. Simpósio Brasileiro de Computação, Florianópolis, SC, Brasil.
- [Mainwaring et al., 2002] Mainwaring, A.; Polastre, J.; Szewczyk, R.; Culler, D. e Anderson, J. (2002). Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *First ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, Atlanta, EUA.
- [Mainwaring et al., 2003] Mainwaring, A.; Szewczyk, R.; Anderson, J. e Polastre, J. (2003). Habitat monitoring on great duck island.
- [Malan et al., 2004] Malan, D.; Fulford-Jones, T.; Welsh, M. e Moulton, S. (2004). CodeBlue: An Ad Hoc Sensor Network Infrastructure for Emergency Medical Care. In *International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, .
- [Matt Welsh, 2005] Matt Welsh, Gu-Yeon Wei, S. M. (2005). CodeBlue: Wireless Sensor Networks for Medical Care.
- [MicaZ, 2006] MicaZ (2006). MICAZ Series. Disponível em <http://www.xbow.com/Products/>.
- [Moteiv, 2005] Moteiv (2005). Moteiv Corporation. Available at <http://www.moteiv.com>.
- [Network Simulator, 1999] Network Simulator (1999). UCB/LBNL/VINT Network Simulator (ns-2). Disponível em <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.

- [Pineiro et al., 1999] Pineiro, R.; Poylisher, A. e Caldwell, H. (1999). Mobile agents for aggregation of network management data. In *ASAMA '99: Proceedings of the First International Symposium on Agent Systems and Applications Third International Symposium on Mobile Agents*, p. 130, Washington, DC, EUA. IEEE Computer Society.
- [Pottie e Kaiser, 2000] Pottie, G. J. e Kaiser, W. J. (2000). Wireless Integrated Network Sensors. *Communications of the ACM*, 43(5):51–58. ISSN: 0001-0782.
- [Pras et al., 2004] Pras, A.; Drevers, T.; Meent, R. e Quartel, D. (2004). Comparing the Performance of SNMP and Web Services-Based Management. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 1(2).
- [Puliafito et al., 1999] Puliafito, A.; Riccobene, S. e Scarpa, M. (1999). An Analytical Comparison Of The Client-Server, Remote Evaluation And Mobile Agents Paradigms. In *Third International Symposium on Mobile Agents*, pp. 278–, Palm Spring, California, EUA. ISBN: 0-7695-0340-3.
- [Qi et al., 2001a] Qi, H.; Iyengar, S. S. e Chakrabarty, K. (2001a). Multiresolution Data Integration Using Mobile Agents in Distributed Sensor Networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 31:383–391.
- [Qi e Wang, 2001] Qi, H. e Wang, F. (2001). Optimal Itinerary Analysis for Mobile Agents in Ad Hoc Wireless Sensor Networks. In *13th International Conference on Wireless Communications*, volume 1, pp. 147–153, Calgary, Canadá.
- [Qi et al., 2001b] Qi, H.; Wang, X.; Iyengar, S. S. e Chakrabarty, K. (2001b). Multisensor Data Fusion in Distributed Sensor Networks Using Mobile Agents. *International Conference on Information Fusion*, pp. 11–16.
- [Qi et al., 2003] Qi, H.; Xu, Y. e Wang, X. (2003). Mobile-Agent-Based Collaborative Signal And Information Processing In Sensor Networks. In *Proceedings of The IEEE*, volume 91, pp. 1172–1183, .
- [Roberts, 1998] Roberts, S. (1998). Independent Component Analysis: Source Assessment, and Separation, a Bayesian Approach.
- [Roundy et al., 2004] Roundy, S.; Steingart, D.; Frechette, L.; Wright, P. K. e Rabaey, J. M. (2004). Power sources for wireless sensor networks. In *European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2004)*, pp. 1–17.
- [Rubinstein et al., 2000] Rubinstein, M. G.; Duarte, O. C. M. B. e Pujolle, G. (2000). Evaluating the Network Performance Management based on Mobile Agents. *Second International Workshop on Mobile Agents for Telecommunication Applications (MATA '00)*, pp. 95–102. Springer-Verlag.
- [Ruiz, 2003] Ruiz, L. B. (2003). *MANÁ: Uma Arquitetura de Gerenciamento para Redes de Sensores Sem Fio*. PhD thesis, Departamento de Ciência da Computação - UFMG.

- [Ruiz et al., 2005a] Ruiz, L. B.; Braga, T. R. M.; Silva, F.; ao, H. P. A.; Nogueira, J. M. S. e Loureiro, A. A. F. (2005a). Self-managed wireless sensor networks: A study case. In *Proceedings of the 9th IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM'05)*, Nice, França. Resumo extendido.
- [Ruiz et al., 2005b] Ruiz, L. B.; Braga, T. R. M.; Silva, F. A.; Assunção, H. P.; Nogueira, J. M. S. e Loureiro, A. A. F. (2005b). Dessin d'une application d'auto gestion pour des réseaux de capteurs sans fils. In *Proceedings of the 6th French Conference on Networks and Services Management (GRES'05)*, pp. 129–141, Luchon, França. ISBN: 2-9520326-5-3.
- [Ruiz et al., 2005c] Ruiz, L. B.; Braga, T. R. M.; Silva, F. A.; Assunção, H. P.; Nogueira, J. M. S. e Loureiro, A. A. F. (2005c). On the design of a self-managed wireless sensor network. *IEEE Communications Magazine*, 43(8):95–102.
- [Ruiz et al., 2005d] Ruiz, L. B.; Braga, T. R. M.; Silva, F. A.; Assunção, H. P.; Nogueira, J. M. S. e Loureiro, A. A. F. (2005d). Uma abordagem de auto-gerenciamento para redes de sensores sem fio. In *Proceedings of 23th Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'06)*, Fortaleza, Ceará, Brasil.
- [Ruiz et al., 2003a] Ruiz, L. B.; Braga, T. R. M.; Silva, F. A.; Nogueira, J. M. S. e Loureiro, A. A. F. (2003a). Service Management for Wireless Sensor Networks. In *IEEE Latin American Network Operation and Management Symposium (LANOMS 2003)*, pp. 55–62, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. ISBN: 85-902104-2-1.
- [Ruiz et al., 2003b] Ruiz, L. B.; Nogueira, J. M. S. e Loureiro, A. A. F. (2003b). MANNA: a management architecture for wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 41(2):116–125. ISSN 0163-6804.
- [Ruiz et al., 2003c] Ruiz, L. B.; Silva, F.; Braga, T. R. M.; Nogueira, J. M. S. e Loureiro, A. A. F. (2003c). Sobre o impacto do gerenciamento no desempenho de redes de sensores sem fio. In *Proceedings of the 5th Wireless Communication and Mobile Computing Workshop (WCSF'03)*, pp. 199–210, São Lourenço, MG, Brasil.
- [Ruiz et al., 2004a] Ruiz, L. B.; Silva, F.; Braga, T. R. M.; Nogueira, J. M. S. e Loureiro, A. A. F. (2004a). Negociação de Serviços em Redes de Sensores Sem Fio. In *Workshop de Comunicação Sem Fio (WCSF'04)*, pp. 27–36, Fortaleza, CE, Brasil.
- [Ruiz et al., 2004b] Ruiz, L. B.; Silva, F. A.; Braga, T. R. M.; Nogueira, J. M. S. e Loureiro, A. A. F. (2004b). On Impact of Management on Wireless Sensors Networks. In *IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS 2004)*, pp. 657–670, Seul, Coréia do Sul. ISBN: 0-7803-8230-7.
- [Sahai e Morin, 1998] Sahai, A. e Morin, C. (1998). Enabling a mobile network manager (MNM) through mobile agents. *Lecture Notes in Computer Science*, 1477.
- [Sensoria, 2005] Sensoria (2005). Sensoria Wins. Available at <http://www.sensoria.com>.

- [SensorNet, 2004] SensorNet (2004). Grupo de Pesquisa em RSSFs - DCC/UFMG. Disponível em <http://www.sensornet.dcc.ufmg.br>.
- [Shen et al., 2001] Shen, C.-C.; Srisathapornphat, C. e Jaikaeo, C. (2001). Sensor information networking architecture and applications. *IEEE Personel Communication Magazine*, 8(4):52–59.
- [Shen et al., 2003] Shen, C.-C.; Srisathapornphat, C. e Jaikaeo, C. (2003). An Adaptive Management Architecture for ad hoc Networks. *IEEE Communications Magazine*, 41(2):108–115.
- [Silva et al., 2004a] Silva, F.; Ruiz, L. B.; Braga, T. R.; Nogueira, J. M. S. e Loureiro, A. A. F. (2004a). Designing a self-organizing wireless sensor network. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Mobility Aware Technologies and Applications (MATA'04)*, pp. 186–195, Florianópolis, SC, Brasil. Springer-Verlag v.3284.
- [Silva et al., 2004b] Silva, F.; Ruiz, L. B.; Braga, T. R. M.; Nogueira, J. M. S. e Loureiro, A. A. F. (2004b). Um Serviço de Auto-Organização para Redes de Sensores Sem Fio Autônomicas. In *Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS'04)*, pp. 91–102, Gramado, RS, Brasil. ISBN 85-88442-83-3.
- [Silva et al., 2005a] Silva, F. A.; Ruiz, L. B.; Braga, T. R. M.; Nogueira, J. M. S. e Loureiro, A. A. F. (2005a). Defining a Wireless Sensor Network Management Protocol. In *4th Latin American Network Operations and Management Symposium*, pp. 39–50, Porto Alegre, RS, Brasil.
- [Silva et al., 2005b] Silva, F. A.; Ruiz, L. B.; Braga, T. R. M.; Nogueira, J. M. S. e Loureiro, A. A. F. (2005b). MannaNMP: Um Protocolo de Gerenciamento para Redes de Sensores Sem Fio. In *Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS'05)*, Fortaleza, Brasil.
- [Simões et al., 2002] Simões, P.; Rodrigues, J.; Silva, L. M. e Boavida, F. (2002). Distributed Retrieval of Management Information: Is it About Mobility, Locality or Distribution? In *IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS 2002)*, pp. 79–94, Florença, Itália.
- [Siqueira, 2006] Siqueira, I. G. (2006). Projeto integrado de controle de densidade em roteamento em redes de sensores sem fio. Master's thesis, Departamento de Ciência da Computação - UFMG.
- [Stallings, 1998] Stallings, W. (1998). *SNMP, SNMPv2, SNMPv3, and RMON 1 and 2*. Addison-Wesley.
- [Stathopoulos et al., 2003] Stathopoulos, T.; Heidemann, J. e Estrin, D. (2003). A Remote Code Update Mechanism for Wireless Sensor Networks. Technical Report CENS-TR-30, Department of Computer Science, UCLA.

- [Stephan et al., 2004] Stephan, R.; Ray, P. e Paramesh, N. (2004). Network Management Plataform Based on Mobile Agents. *International Journal of Network Management*, 14(5):59–73. ISSN: 1099-1190.
- [Szumel et al., 2005] Szumel, L.; LeBrun, J. e Owens, J. D. (2005). Towards a Mobile Agent Framework for Sensor Networks. In *Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors*, pp. 79–88, Sydney, Australia.
- [Tseng et al., 2004] Tseng, Y.-C.; Kuo, S.-P.; Lee, H.-W. e Huang, C.-F. (2004). Location Tracking in a Wireless Sensor Network by Mobile Agents. *The Computer Journal*, 47:448–460.
- [Vigna, 2004] Vigna, G. (2004). Mobile Agents: Ten Reasons For Failure. In *IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM'04)*, pp. 298–299, Berkeley, California, EUA. Position Paper.
- [W3C, 2006] W3C (2006). Wap binary xml content format. Disponível em <http://www.w3.org/TR/wbxml/>.
- [Wang e Kulkarni, 2004] Wang, L. e Kulkarni, S. S. (2004). MNP: Multihop Network Reprogramming Service for Sensor Networks. In *SenSys '04: Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 285–286, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Wang e Qi, 2004] Wang, X. e Qi, H. (2004). Mobile agent based progressive multiple target detection in sensor networks. In *IEEE International Conference on Acoustic, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 17–21, Montreal, Quebec, Canadá.
- [Werner-Allen et al., 2005] Werner-Allen, G.; Welsh, M.; Ruiz, M.; Johnson, J. e Lees, J. (2005). Monitoring Volcanic Eruptions with a Wireless Sensor Network.
- [Zapf et al., 1999] Zapf, M.; Herrmann, K.; Geihs, K. e Wolfgang, J. (1999). Decentralized snmp management with mobile agents. In *Proceedings of the VI IFIP/IEEE Conference on Network Management (IM)*, p. 623.
- [Zeng et al., 1998] Zeng, X.; Bagrodia, R. e Gerla, M. (1998). Glomosim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks. *SIGSIM Simul. Dig.*, 28(1):154–161.
- [ZigBee, 2006] ZigBee (2006). IEEE 802.15.4 - zigbee alliance. Disponível em <http://www.zigbee.com>.