FÁBIO HENRIQUE CABRINI

**Caracterização e análise de desempenho de uma
rede de sensores sem fio**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia**

São Paulo

2006

FÁBIO HENRIQUE CABRINI

**Caracterização e análise de desempenho de uma
rede de sensores sem fio**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia**

Área de Concentração: Sistemas Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Sergio Takeo Kofuji

São Paulo

2006

Resumo

As redes de sensores sem fio (RSSF) ganham maior visibilidade a cada ano, e a sua utilização é cada vez mais imprescindível no sensoramento dos mais diversos ambientes. Estas redes podem ser instaladas em praticamente todos os tipos de ambientes, graças ao seu tamanho reduzido, sua facilidade de comunicação e seu baixo custo. Esta tecnologia permite transportar os dados através de nós que utilizam algoritmos de roteamento oferecendo resistência a falhas. O conhecimento das principais arquiteturas e dos protocolos envolvidos na comunicação, bem como do comportamento destas redes em ambientes reais, é de extrema importância para a compreensão do funcionamento da rede e dos fenômenos que afetam o seu desempenho. Este trabalho apresenta a utilização de uma RSSF baseada no dispositivo Mica2dot, desenvolvido pela Universidade de Berkeley, no monitoramento de parâmetros ambientais de uma sala limpa utilizada na construção de dispositivos semicondutores. Apresentamos a caracterização dos dispositivos e do ambiente em questão; também avaliamos dois protocolos de roteamento neste ambiente e fatores que afetam o funcionamento do sistema de rádio, como a variação do RSSI (*Receive Signal Strength Indicator*). Os protocolos de roteamento escolhidos para esta avaliação foram o TOSB (*TinyOs Beaconing*), que é o protocolo padrão do sistema operacional TinyOS, e o PROC (*Proactive ROuting with Coordination*), que apresenta características de pró-atividade. Os protocolos foram avaliados segundo as métricas de consumo de energia e taxa média de entrega de pacotes.

Palavras Chave: RSSF, Ambientes Controlados, Caracterização e Desempenho.

Abstract

Wireless sensor networks (WSNs) are growing year after year, and its use is being more and more indispensable in sensing the most varied environments. These networks can be installed in almost all kinds of environments, thanks to its reduced size, its easiness of communication and its low cost. One of the main characteristics of this technology is the capacity of transporting data through the nodes that use router algorithms, offering a good resistance to failures. The knowledge of the main architectures and of the protocols involved in communication, as well the behavior of these networks in real environments, is of extreme importance to the understanding of the working conditions of the network and of the phenomena that affect its performance. This piece of work aims to present a study related to the use of a WSN based on the Mica2dot device developed by the University of Berkeley, in the monitoring of the environmental parameters of a clean room used to the construction of semiconductor devices. This work presents the characterization of the devices and of the environment in question, as well evaluates some factors that affect the working of the radio system and evaluates two router protocols in this environment. The chosen router protocols for this evaluation were TOSB (TinyOs Beaconing) that is the standard protocol of the operational system TinyOS, and PROC (Proactive Routing with Coordination), that presents some pro-active characteristics. The protocols were evaluated according to the measurement of the energy consumption and average rate of deliver of packages.

Keywords: WSN, Controlled Environments, Characterization, Performance.

Dedicatória

Dedico este trabalho em primeiro lugar a Deus, a meus pais Wilson e Nair (in memoriam), que cuidaram com muito carinho e amor da minha educação. De forma especial a minha esposa, que foi o grande pilar de sustentação, compreensão e amor. Aos meus pequenos anjos Larissa (in memoriam) e Henrique (in memoriam), que foram protagonistas de momentos muito especiais durante esta jornada, e a meus filhos Victor, Livia e Luigi, que durante a elaboração deste trabalho encheram a minha vida de alegria.

Agradecimentos

Agradeço a Deus e à minha família por todo o apoio e paciência; de forma especial à minha esposa Elaine, que acreditou em mim, mesmo nos momentos de desânimo, e que teve muita compreensão.

Um agradecimento especial ao Centro Educacional de Pedreira, que acreditou no meu potencial e forneceu todos os recursos necessários para que eu estivesse na USP durante o meu horário de trabalho.

Ao meu orientador, Dr. Sergio Takeo Kofuji, que foi o meu grande mestre.

À equipe do grupo de computação pervasiva e de alto desempenho da USP.

À equipe do HumanLab e, de forma especial, ao grande amigo Ivan, que por diversas vezes foi meu braço direito.

À equipe da sala limpa do LSI, em especial ao Dr. Luis da Silva Zambom e ao Dr. Nilton Itiro Morimoto.

Ao Dr. João Antônio Zuffo, pela confiança e ajuda financeira.

À Dra. Roseli de Deus Lopes, por acreditar em nosso trabalho.

Ao Dr. Carlos A. Alonso Sanches, pelas diversas contribuições e correções.

Ao Dr. Mário Minami pelos inúmeros conselhos.

Aos professores Dr. Plínio F. dos Santos Rodrigues e Dr. Antonio Fischer de Toledo, pelos esclarecimentos.

Aos professores Carlos Alberto, Paulo Hardt e Railson, pelas inúmeras colaborações.

À equipe do SensorNet da UFMG e, de forma especial, ao Daniel Macedo, que me auxiliou na utilização do protocolo PROC.

E a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram na elaboração desta dissertação.

“Tudo é do Pai, toda honra e toda a glória, é Dele a vitória alcançada em minha vida...”.

Frederico Cruz

Sumário

Introdução	1
1.1 Objetivos.....	5
1.2 Justificativas	6
1.3 Contribuições.....	7
1.4 Organização do Texto.....	8
Estrutura de Camadas	9
2.1 Camada Física	9
2.1.1 Problemas que afetam a transmissão	11
2.1.2 Zona de Fresnel	13
2.1.3 Reflexões em ambiente interno	15
2.1.4 Aspectos relacionados com o corpo humano	16
2.1.5 Resumo	17
2.2 Camada de Enlace	18
2.2.1 Introdução à camada de Enlace	18
2.2.2 B-MAC	20
2.2.3 Resumo	23
2.3 Camada de Rede	24
2.3.1 Protocolos de roteamento para RSSF	26
2.3.1.1 TinyOS Beaconing	26
2.3.1.2 PROC.....	27
2.3.2 Resumo	29
2.4 Sistema Operacional	30
2.4.1 TinyOS	31

2.4.2 Resumo	32
Arquitetura de Nós Sensores	34
3.1 Mica2 e Mica2dot.....	34
3.2 Micaz	36
3.3 TmoteSky e TelosB	38
3.4 Outros projetos	40
3.5 Resumo	42
Caracterização	43
4.1 Metodologia e Materiais.....	44
4.2 Bancada de Testes	45
4.3 Caracterização da Sala Limpa	47
4.4 Caracterização da RSSF	50
4.4.1 Nós Sensores	51
4.4.1.1 Microcontrolador e Memória	51
4.4.1.2 O Sistema de Rádio	52
4.4.1.3 Dimensões Físicas	56
4.4.1.4 Sensores.....	57
4.4.1.5 <i>Kit</i> de Desenvolvimento	58
4.4.2 Modificações	59
4.4.3 Topologia Física	61
4.4.4 Protocolos	63
4.4.5 Aplicações	64
4.5 Conclusões.....	67
Avaliação de Desempenho	69
5.1 Avaliação dos efeitos da primeira zona de Fresnel	69

5.2 Monitoramento da sala limpa	76
5.2.1 Monitoramento do RSSI em função do número de pacotes	76
5.2.2 Monitoramento da temperatura ambiente da sala limpa.....	78
5.2.3 Variação do número de pacotes recebidos	79
5.2.4 Duração das baterias	80
5.3 Avaliação dos protocolos de roteamento TOSB e PROC	81
5.3.1 Número de pacotes recebidos	81
5.3.2 Consumo de energia	83
5.4 Discussão dos resultados	84
Conclusões	86
6.1 Contribuições.....	88
6.2 Trabalhos Futuros	89
Referências Bibliográficas	90
Apêndice A	101
Lista de Publicações	101
Anexo	102
Regras para a correta utilização dos nós sensores	102

Lista de Figuras

FIGURA 1. MONITORAMENTO DE ERUPÇÕES VULCÂNICAS	2
FIGURA 2. RSSF UTILIZADA EM APLICAÇÕES SUBAQUÁTICAS	3
FIGURA 3. SALA LIMPA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP	4
FIGURA 4. DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DE UMA ANTENA ISOTRÓPICA IDEAL	10
FIGURA 5. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA PRIMEIRA ZONA DE FRESNEL	13
FIGURA 6. LÓBULOS DE ABSORÇÃO DE UM SER HUMANO NA FREQUÊNCIA DE 825MHZ	16
FIGURA 7. TOPOLOGIA EM ÁRVORE CRIADA PELO TINYOS BEACONING	27
FIGURA 8. ARQUITETURA DO PROTOCOLO PROC	28
FIGURA 9. ESTRUTURA DE MÓDULOS E INTERFACES DO PROTOCOLO PROC	29
FIGURA 10. MÓDULOS DA APLICAÇÃO BLINK	32
FIGURA 11. VISUALIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS MICA2 (A) E MICA2DOT (B)	35
FIGURA 12. DIAGRAMA DE BLOCOS DOS DISPOSITIVOS MICA2 (A) E MICA2DOT (B)	35
FIGURA 13. DIAGRAMA DE BLOCOS DO MICA2	37
FIGURA 14. VISUALIZAÇÃO DO MÓDULO MICA2	37
FIGURA 15. VISUALIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS (A) TMOTESKY E (B) TELOS2	39
FIGURA 16. DIAGRAMA DE BLOCOS DO TMOTESKY	39
FIGURA 17. IMAGEM DE UM MÓDULO SMART DUST	41
FIGURA 18. TESTES REALIZADOS COM O SENSORWEB NA ANTÁRTICA	41
FIGURA 19. BANCADA DE TESTES LOCALIZADA NO LABORATÓRIO HUMANLAB	46
FIGURA 20. DISPOSIÇÃO DOS NÓS NA PLANTA DA SALA LIMPA DO LSI/USP	48
FIGURA 21. ANTENA <i>WHIP</i> OMNIDIRECIONAL	52
FIGURA 22. ESQUEMA ELÉTRICO DO SISTEMA DE RÁDIO CC1000 NO MICA2DOT	56
FIGURA 23. PLACAS DE EXPANSÃO MTS310CA E MDA500CA	58
FIGURA 24. KIT DE DESENVOLVIMENTO	59
FIGURA 25. MPR500 E <i>PROTOBOARD</i> APÓS AS MODIFICAÇÕES PROPOSTAS.	60
FIGURA 26. TESTE EM AMBIENTE INTERNO NA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO	62
FIGURA 27. PONTO DE ACESSO UTILIZADO NO MONITORAMENTO DA SALA LIMPA	63
FIGURA 28. APLICAÇÃO DE VISUALIZAÇÃO OSCILLOSCOPERF	65

FIGURA 29. INTERFACE DE VISUALIZAÇÃO DO SURGEVIEW	66
FIGURA 30. INTERFACE DE VISUALIZAÇÃO PROC	67
FIGURA 31. SINAL AMOSTRADO NO PINO RSSI/IF DO CHIP CC1000	71
FIGURA 32. REPRESENTAÇÃO DO POSICIONAMENTO DOS NÓS MICA2DOT	71

Lista de Gráficos

GRÁFICO 1. RSSI E A HEURÍSTICA CCA.	21
GRÁFICO 2. LATÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DOS PROTOCOLOS B-MAC E S-MAC	23
GRÁFICO 3. RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO E O NÍVEL RSSI.....	55
GRÁFICO 4. PERDA DE PACOTES EM FUNÇÃO DA ALTURA DOS NÓS EM RELAÇÃO AO SOLO....	73
GRÁFICO 5. AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA ZONA DE FRESNEL EM AMBIENTE INTERNO	74
GRÁFICO 6. INFLUÊNCIA DA ZONA DE FRESNEL EM AMBIENTE EXTERNO.	75
GRÁFICO 7. PACOTES RECEBIDOS PELO PA COM A MOVIMENTAÇÃO DE PESSOAS.....	78
GRÁFICO 8. VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NOS AMBIENTES DA SALA LIMPA	79
GRÁFICO 9. NÚMERO DE PACOTES RECEBIDOS POR NÓ SENSOR DURANTE 24 HORAS	80
GRÁFICO 10. TEMPO DE VIDA DA BATERIA PARA UM DUTY CYCLES DE 1%	81
GRÁFICO 11. COMPARAÇÃO ENTRE OS PROTOCOLOS TOSB E PROC.....	82
GRÁFICO 12. CONSUMO DE ENERGIA ENTRE OS PROTOCOLOS TOSB E PROC	83

Lista de Tabelas

TABELA 1 - RAO DA PRIMEIRA ZONA DE FRESNEL COM A VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA	14
TABELA 2 - REGIÃO DA ZONA DE FRESNEL QUE NÃO PODE SER OBSTRUÍDA.....	15
TABELA 3 - COMPARAÇÃO ENTRE OS QUADROS DOS PROTOCOLOS B-MAC E S-MAC	22
TABELA 4 - QUADRO COMPARATIVO ENTRE OS DISPOSITIVOS MICA2 E MICA2DOT	36
TABELA 5 - ALTURA E DISTÂNCIA DOS NÓS SENSORES	49
TABELA 6 - PRINCIPAIS RECURSOS DO MICROCONTROLADOR ATMEGA 128L.....	51
TABELA 7 - COMPRIMENTO DA ANTENA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO.....	53
TABELA 8 - MASSA DOS DISPOSITIVOS MICA2 E MICA2DOT	57
TABELA 9 - DADOS TÉCNICOS DO TERMISTOR YSI44006	60
TABELA 10 - VARIAÇÃO DO RSSI EM FUNÇÃO DA ALTURA DOS NÓS SENSORES	72
TABELA 11 - VALOR DO RSSI PARA CADA LOCALIDADE DA SALA LIMPA	77

Lista de Símbolos

P_{loss}	Perda no espaço livre
λ	Comprimento de onda
d	Distância
f	Frequência
h_t	Altura da antena do transmissor em relação ao solo
h_r	Altura da antena do receptor em relação ao solo
P_{Rx}	Nível do sinal no receptor
P_{Tx}	Nível do sinal no transmissor
$G_{\text{Tx-Ant}}$	Ganho da antena do transmissor
$G_{\text{Rx-Ant}}$	Ganho da antena do receptor
$G_{\text{Rx-Amp}}$	Ganho do amplificador do receptor
SNR_{db}	Relação sinal ruído
P_{sinal}	Potência do sinal
$P_{\text{ruído}}$	Potência do ruído
V_{RSSI}	Tensão RSSI parametrizada
V_{ref}	Tensão de referência
V_{bateria}	Tensão da bateria
T	Temperatura em °C
R_{th}	Resistência <i>threshold</i>
R	Raio da primeira zona de Fresnel
R_1	60% de R

Lista de Abreviações

ACK	Acknowledgement
ADC	Conversor Analógico Digital
AM	Active Message
ARC	Adaptive Rate Control
ASK	Amplitude-Shift keying
BER	Bit Error Rate
B-MAC	Berkeley MAC
CCA	Clear Channel Assessment
CDMA	Code Division Multiple Access
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS	Clear To Send
DE-MAC	Distributed Energy aware MAC
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EAD	Energy-Aware Distributed routing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FIFO	First In First Out
FSK	Frequency-Shift keying
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization
ISM	Industrial, Scientific and Medical
JPL	Jet Propulsion Laboratory
JTAG	Joint Test Action Group

LED	Light Emitting Diode
LOS	Line Of Sight
LPL	Low Power Listening
LQI	Link Quality Indicator
MAC	Medium Access Control
MACAW	Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless
MANET	Mobile <i>Ad hoc</i> NETworks
MDA	Mote Data Acquisition Board
MIB	Mote Interface Board
MIG	Message Interface Generator
MPR	Mote Processor Radio Board
MTS	Mote Sensor Board
NRZ	Non Return to Zero
NS-2	Network Simulator Version 2.0
NSF	National Science Foundation
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OMS	Organização Mundial da Saúde
O-QPSK	Offset-Quadrature Phase-Shift Keying
OSI	Open Systems Interconnect
PA	Ponto de Acesso
PROC	Proactive Routing with Coordination
RAM	Random Access Memory
RISC	Reduced Instruction Set Computer
ROM	Read-Only Memory
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio

RSSI	Receive Signal Strength Indicator
RTC	Real Time Counter
RTS	Request To Send
SAR	Specific Absorption Rate
S-MAC	Sensor-MAC
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SRD	Short Range Device
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
T-MAC	Time-out-MAC
TOSB	TinyOS Beaconing
TRAMA	Traffic Adaptive Multiple Access
UHF	Ultra High Frequency
ULA	Unidade Lógica Aritmética
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

Capítulo 1

Introdução

As redes de computadores ganham cada vez mais espaço em nossas vidas e tornam-se necessárias nas mais diversas atividades do cotidiano. Podemos nos comunicar com pessoas em qualquer lugar do Planeta e até mesmo fora dele. Este fato é possível devido à grande evolução tecnológica dos meios de comunicação.

Através de sinais de fumaça ou de ondas eletromagnéticas, os homens sempre tiveram necessidade de se comunicar uns com os outros, pois vivem em sociedade. Nos últimos anos, a Internet permitiu que a troca de informações fosse realizada com uma rapidez sem precedentes na história da humanidade. Fatos ocorridos em lugares distantes podem ser noticiados ou acompanhados em tempo real através dos atuais meios de comunicação.

Após o lançamento do primeiro padrão de redes sem fio, na segunda metade da década de noventa, pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), vem ocorrendo uma revolução na maneira de se utilizar as redes de computadores [1]. As redes sem fio ganham espaço e adeptos a cada dia e muitos grupos de trabalho foram criados devido à diversidade e complexidade das tecnologias que permeiam o funcionamento destas redes. Neste cenário, surgiram também as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), que proporcionam uma interação das atuais redes de computadores com o mundo em que vivemos. Essas redes trabalham com baixas taxas de transmissão e são constituídas por pequenos nós que contêm unidade de processamento, memória, transmissor de rádio, sensores e fonte de energia. Esses pequenos módulos trocam informações a respeito do ambiente com o auxílio de protocolos de roteamento, possibilitando que grandes áreas geográficas sejam cobertas através de uma estrutura de múltiplos saltos na rede. Por sua vez, os protocolos de roteamento são outros grandes aliados, pois

permitem o bom funcionamento da rede mesmo quando esta, por uma série de fatores externos, venha a sofrer a perda de algumas de suas áreas.

Os sistemas operacionais que regem o funcionamento destes dispositivos são otimizados com o objetivo de garantir um bom alinhamento com dois compromissos principais: baixo consumo de energia e severas restrições de *hardware*.

As RSSF podem ser utilizadas nos mais variados tipos de aplicação, como por exemplo: no monitoramento de sinais vitais de pacientes, onde os nós recebem sensores específicos e podem monitorar parâmetros como a taxa de oxigênio do sangue e a frequência cardíaca [2][3]; no monitoramento de processos de produção industrial [4], auxiliando as tomadas de decisão; na agricultura [5] e pecuária de precisão [6], através do monitoramento de parâmetros como a umidade relativa do ar, a temperatura ambiente e a luminosidade em algumas culturas especiais; em estudos ambientais [7] e no monitoramento de *habitats* [8]; no sensoriamento de ambientes nocivos aos seres humanos, como o monitoramento de erupções vulcânicas [9], que pode ser visualizado através da Figura 1.

Extraído da referência [9]

Figura 1. Monitoramento de erupções vulcânicas

A construção civil também é beneficiada com a utilização das RSSF, que podem garantir a segurança das pessoas através do monitoramento das estruturas com o auxílio de acelerômetros bidimensionais [10].

Estas redes também podem ser utilizadas no monitoramento de regiões oceânicas de grande profundidade. Para tanto, faz-se necessário a substituição do sistema de rádio por outro que utilize transmissões sonoras [11][12][13], como apresentado na Figura 2.

Extraído da referência [11]

Figura 2. RSSF utilizada em aplicações subaquáticas

Este trabalho apresenta uma aplicação para as RSSF: trata-se do monitoramento de ambientes controlados. O caso de estudo escolhido neste trabalho foi a análise da variação da temperatura dos ambientes que compõem a Sala Limpa utilizada nos processos de fabricação de microeletrônica da Universidade de São Paulo, como pode ser visto na Figura 3. Estes ambientes apresentam regiões distintas e manifestam variações nos parâmetros ambientais [14]. O monitoramento instantâneo da temperatura, da umidade relativa do ar, da luminosida-

de e do número de partículas em suspensão são de grande interesse para uma melhor reprodutibilidade dos processos realizados nestes ambientes.

Foto do dia 28/7/2006

Figura 3. Sala Limpa da Escola Politécnica da USP

A NSF (*National Science Foundation*) identificou as RSSF como sendo um dos grandes desafios na área de redes de computadores [15]. Deste modo, torna-se relevante o estudo desta tecnologia, que tem o potencial de agregar valores às mais diversas áreas do conhecimento, e, principalmente, por se tratar de uma tecnologia nova, que está em pleno desenvolvimento em diversos centros de pesquisa espalhados pelo mundo.

Este estudo possibilitará o futuro desenvolvimento e aperfeiçoamento de sensores dos mais variados tipos, que poderão ser utilizados no monitoramento de parâmetros ambientais e de processos em ambientes industriais controlados. Como exemplo, podemos citar as salas limpas presentes nas indústrias de semicondutores [14].

1.1 Objetivos

O objetivo central desta dissertação é caracterizar e compreender o funcionamento de uma RSSF no monitoramento de uma sala limpa.

O primeiro objetivo é caracterizar o ambiente a ser monitorado, os nós sensores, os tipos de sensores, o regime de funcionamento da rede, os protocolos das camadas de enlace e rede, o sistema operacional e as aplicações, apresentando os principais aspectos a respeito do seu funcionamento em um ambiente desta natureza.

Em seguida, procurar-se-á analisar o desempenho da rede através de testes experimentais, com o objetivo de se conhecer o seu comportamento, analisando a taxa de entrega de pacotes e as variações da intensidade do sinal em ambientes internos e externos.

Pretende-se analisar, de forma experimental, o comportamento dos protocolos de roteamento TOSB (*TinyOs Beaconing*) e PROC (*Proactive Routing with Coordination*) na plataforma Mica2dot no ambiente proposto, através da análise da taxa de entrega de pacotes e do consumo de energia.

Finalmente, apresentamos os principais fatores que afetam o funcionamento da rede, evidenciando as principais limitações e vantagens desta tecnologia.

1.2 Justificativas

Os objetivos deste trabalho foram escolhidos por serem aspectos significativos para estimar o desempenho de uma RSSF que será utilizada no monitoramento de uma sala limpa.

A conclusão do primeiro objetivo é caracterizar a aplicação e extrair os requisitos de monitoramento.

O segundo objetivo engloba o estudo do comportamento do sistema de rádio, que avaliará os principais fatores que afetam a transmissão dos dados em ambiente externo perante a variação da altura e da distância, sem a presença de obstáculos. Será realizada uma avaliação do sistema de rádio em ambiente interno, com a finalidade de se conhecer os principais fatores que degradam a transmissão de dados neste tipo de ambiente.

O uso de protocolos de roteamento vem de encontro à necessidade de se promover uma maior confiabilidade e resistência a falhas da rede perante as variações do ambiente em questão. A comparação entre o protocolo de roteamento padrão e o protocolo PROC permitirá determinar o protocolo que esteja melhor adequado às características da sala limpa.

Deste modo, este trabalho pode se tornar um guia de passos iniciais para a construção de uma rede de sensores em ambientes controlados.

1.3 Contribuições

A caracterização e a análise de desempenho de uma RSSF trazem as seguintes contribuições:

- Caracterização de uma RSSF utilizada no monitoramento de temperatura em um ambiente controlado;
- Apresentação das melhores práticas empregadas na elaboração e na execução dos testes experimentais com a RSSF;
- Caracterização do ambiente em que a RSSF será instalada;
- Análise do nível de sinal recebido em ambientes internos e externos;
- Avaliação experimental da taxa de entrega de pacotes e do consumo de energia da rede, quando submetida aos protocolos de roteamento TOSB e PROC.

Com relação a trabalhos anteriores, esta dissertação apresenta as seguintes contribuições:

- Um estudo mais ampliado a respeito da taxa de recebimento de pacotes em ambiente interno e externo, através de testes que avaliaram a influência da primeira zona de Fresnel na transmissão dos dados através da variação da distância e da altura, complementando o trabalho apresentado na referência [18] e a avaliação da variação da intensidade de sinal recebido devido ao deslocamento de pessoas no interior da sala limpa.
- Foi feita uma avaliação experimental do protocolo PROC na plataforma Mica2dot, com a finalidade de complementar os estudos iniciados nas referências [17][18][19].

1.4 Organização do Texto

A seguir, será apresentada a organização deste texto. A seção 2 aborda a camada física, de enlace, de rede e aplicação, apresentando alguns desafios. A seção 3 apresenta uma visão das principais arquiteturas existentes para RSSF, onde são apresentadas as características das plataformas desenvolvidas pela Universidade de Berkeley. A seção 4 apresenta a caracterização dos dispositivos e do ambiente em questão, descrevendo também as topologias, os protocolos e as aplicações utilizadas na parte experimental. A seção 5 apresenta os experimentos de forma detalhada. Finalmente, a seção 6 apresenta as considerações finais, as principais contribuições deste trabalho e os principais desafios para o futuro.

Capítulo 2

Estrutura de Camadas

As redes de computadores têm sua estrutura dividida em camadas, seguindo a orientação dada pelo modelo de referência OSI (*Open Systems Interconnection*) que foi desenvolvido pelo ISO¹ (*International Organization for Standardization*). Esta divisão propicia o desenvolvimento paralelo das camadas de uma maneira ordenada. As modificações efetuadas numa determinada camada podem afetar o desempenho de todo o conjunto de forma a contribuir para o bom funcionamento da rede, desde que sejam respeitadas as interfaces de comunicação que permitem a interação entre as camadas.

Este capítulo segue a divisão em camadas com a intenção de manter a compatibilidade com o modelo de referência e proporcionar ao leitor uma estrutura organizada que permita o conhecimento das principais camadas envolvidas neste tipo de rede.

2.1 Camada Física

A camada física de uma RSSF pode ser constituída por transmissão de ondas de rádio, luz infravermelha, laser e ondas sonoras. Em alguns casos, onde o tamanho do sensor é muito reduzido, o tamanho da antena passa a ser um fator limitante, ao exemplo do Smart Dust [20][21]. Os dispositivos que utilizam feixes de luz para a transmissão dos dados necessitam de uma linha de visada direta. Este fato implica diretamente na inviabilização destes dispositivos em aplicações que exijam mobilidade. Os dispositivos baseados em transmissão sonora apresentam vantagens para determinados tipos de ambientes (como aplicações subaquáticas)

¹ A sigla ISO não é um acrônimo, pois nesse caso deveria ser IOS. Na verdade, ISO deriva do grego *isos*, que significa *igualdade*.

[11][12][13]. Grande parte das RSSF baseadas em transceptores de rádio, necessitam de antenas que tenham características omnidirecionais. Estas antenas apresentam um diagrama de radiação com características muito próximas de uma antena isotrópica ideal, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4. Diagrama de radiação de uma antena isotrópica ideal.

O ganho de uma antena é dado em dBi^2 e está relacionado com o ganho de potência do sinal numa determinada direção em relação à antena isotrópica ideal [22].

A antena comumente utilizada em RSSF é do tipo monopolo de quarto de onda, também conhecida como Marconi, e tem diversas aplicações devido à sua simplicidade e custo. Este tipo de antena pode ser encontrado em aplicações veiculares, sistemas de comunicação móveis e dispositivos de pequeno tamanho. A antena isotrópica é definida como uma antena que apresenta ganho 1 (um) [22].

De modo geral, os dispositivos utilizados em RSSF utilizam sistemas de rádio que operam na faixa de frequência conhecida como UHF (*Ultra High Frequency*), que podem variar entre 300MHz e 3GHz, ou seja, corresponde a um comprimento de onda de 1m a 0,1m, respectivamente [23].

² Unidade usada para expressar o ganho, em decibel, relativo à antena isotrópica.

Os dispositivos utilizados neste trabalho operam na frequência de 915MHz, e podem ser utilizados em aplicações industriais, científicas e médicas, por estarem de acordo com a faixa ISM³ [24].

2.1.1 Problemas que afetam a transmissão

O monitoramento de ambientes industriais controlados, como o proposto neste trabalho, apresenta uma característica particular: os nós não apresentam mobilidade. Conseqüentemente, o comportamento da rede é mais estável se comparada a uma rede onde os nós estão em movimento.

Nestas condições, os fenômenos mais importantes que acabam contribuindo no processo de degeneração do sinal são: atenuação, ruído, absorção atmosférica e múltiplos caminhos [22].

O sinal transmitido pode sofrer atenuação devido à distância e à altura entre o transmissor e o receptor, que no espaço livre decai com o quadrado da distância. Esta degradação do sinal transmitido pode gerar problemas na interpretação dos dados quando o mesmo atingir o receptor. O sinal pode ser confundido com o ruído se a atenuação for muito forte, inviabilizando a recepção do mesmo. A perda da potência irradiada no ambiente é conhecida como *Free Space Loss*, sendo uma relação entre a potência do sinal transmitido e a potência do sinal recebido [22].

A perda de potência no espaço livre para um sistema baseado numa antena isotrópica ideal pode ser calculada através da equação 1:

$$P_{loss} = -20 \log_{10}(\lambda) + 20 \log_{10}(d) + 21,98 \quad (1)$$

³ ISM (*Industrial, Scientific and Medical*)

Onde:

P_{loss} = é a perda no espaço livre (dB)

λ = comprimento de onda da portadora (metros)

d = distância entre o transmissor e o receptor (metros)

A equação 2 é a representação do modelo proposto na referência [51], que apresenta um ajuste devido à frequência utilizada pela portadora. Esta modificação complementa o modelo apresentado por Lee [25], que leva em consideração a altura das antenas em relação ao solo.

$$P_{loss} = 40 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 20 \log_{10}(h_t \times h_r) \quad (2)$$

Onde:

f = Frequência em (GHz)

h_t e h_r = Altura das antenas em relação ao solo (metros)

O nível de sinal no receptor pode variar segundo a potência de transmissão, a perda no espaço livre, o ganho dado pela escolha da antena do transmissor e do receptor e o ganho oferecido pelo amplificador localizado no receptor [26]. Esta relação pode ser vista através da equação 3:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx-Ant} - P_{loss} + G_{Rx-Ant} + G_{Rx-Amp} \quad (3)$$

Onde:

P_{Rx} = Nível do sinal no receptor (dBm)

P_{Tx} = Nível do sinal do transmissor (dBm)

G_{Tx-Ant} = Ganho da antena do transmissor (dBi)

P_{loss} = Perda no espaço livre (dB)

G_{Rx-Ant} = Ganho da antena do receptor (dBi)

G_{Rx-Amp} = Ganho do amplificador do receptor (dB)

Para que o sinal possa ser interpretado, o nível do sinal de entrada deve ser maior do que o ruído de entrada. Esta relação é conhecida como SNR (Signal-to-Noise Ratio), e pode ser calculada através da equação 4:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \right) \quad (4)$$

O desempenho de um sistema de rádio também é afetado pelo ruído que pode ser dividido em quatro categorias: ruído térmico, ruído de intermodulação, *crosstalk* e ruído impulsivo [22].

2.1.2 Zona de Fresnel

A escolha da altura e da distância entre os nós é um passo importante na caracterização e análise de desempenho de uma RSSF. O desempenho do sistema de rádio também pode ser afetado devido aos efeitos da primeira zona de Fresnel, que está relacionada com o comprimento de onda, a distância e a altura dos nós sensores, como apresentado por Anastasi et al. [27]

Figura 5. Representação gráfica da primeira zona de Fresnel

A zona de Fresnel é uma região definida entre as antenas quando existe uma linha de visada direta ou LOS (*Line Of Sight*), como visto na Figura 5.

As dimensões desta região são determinadas pelo comprimento da onda e a distância entre as antenas.

As ondas de rádio podem sofrer difração, caso algum objeto esteja dentro dos limites desta região. Isto pode causar atenuação do sinal que está sendo transmitido, prejudicando a comunicação.

O raio da primeira Zona de Fresnel é calculado a partir da equação 5, apresentada na referência [22].

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda \times d} \quad (5)$$

Onde:

λ = comprimento da onda (m)

d = distância entre as antenas (m)

A atenuação do sinal pode ser reduzida se for garantido 60% do raio da primeira zona de Fresnel; caso contrário, se algum objeto ou até mesmo o solo ocupar parte desta região, o sinal sofrerá uma atenuação significativa [22].

A Tabela 1 apresenta os valores do raio da primeira zona de Fresnel para a frequência de 915MHz, com a distância variando entre 5, 10, 15 e 20 metros.

Tabela 1 - Raio da primeira Zona de Fresnel com a variação da distância

Distância (m)	Raio da 1ª. Zona de Fresnel (m)
5	0,639
10	0,904
15	1,107
20	1,278

Os valores do raio R1 calculados para as distâncias de 5, 10, 15 e 20m podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 - Região da zona de Fresnel que não pode ser obstruída

Distância (m)	R1 60% do Raio da 1ª. Zona de Fresnel (m)
5	0,383
10	0,542
15	0,664
20	0,776

Como exemplo, é possível dizer que, se as antenas estiverem a uma distância de dez metros, deverão estar a uma altura de aproximadamente 0,55m em relação ao solo, para assim garantir que sessenta por cento do raio da primeira zona de Fresnel não esteja em contato com o solo, minimizando desta forma os efeitos provocados pela obstrução desta região.

2.1.3 Reflexões em ambiente interno

As aplicações de RSSF em ambientes internos devem levar em consideração o desvanecimento do sinal devido aos efeitos dos múltiplos caminhos que o sinal pode percorrer até o receptor. Este fenômeno pode deteriorar o sinal transmitido, devido aos obstáculos encontrados no trajeto do sinal, como as paredes, o teto, o piso, e até mesmo, a movimentação de pessoas no ambiente [28].

Os múltiplos caminhos ocorrem devido ao fenômeno da reflexão, difração e espalhamento [22]. Devido a estes fenômenos, o sinal que atinge o receptor pode sofrer distorções que podem ser caracterizadas como: desvanecimento de faixa estreita que ocorre quando os caminhos apresentam um mesmo atraso, este tipo apresenta variações na fase do sinal, ocasionando amplificação ou atenuação. O desvanecimento de faixa larga ocorre quando os cami-

nhos apresentam diferentes atrasos, tendo como resultado o eco e a interferência intersimbólica [28]. Devido as características destes ambientes, dois modelos probabilísticos são utilizados para modelar o comportamento do canal de comunicação. A distribuição de Rayleigh é aceita em situações onde não exista a visada direta entre o transmissor e o receptor. A distribuição de Rice pode ser utilizada em situações onde exista visada direta [29].

2.1.4 Aspectos relacionados com o corpo humano

A movimentação de pessoas no ambiente da sala limpa pode provocar a degradação no nível do sinal eletromagnético que é recebido pelos nós sensores. Este fato se dá pela grande complexidade existente nos elementos que constituem o corpo humano. Os fluídos que circulam no organismo de um ser vivo apresentam grande condutividade iônica e eletrônica. Alguns exemplos: as redes de neurônios, os fluídos sanguíneos e o líquido cerebral, como apresentado na referência [30].

Algumas dessas regiões do corpo apresentam o comportamento de antenas receptoras que absorvem a radiação eletromagnética oriunda das fontes posicionadas no ambiente. Os lóbulos de absorção num corpo humano adulto podem ser vistos na Figura 6.

Extraído da referência [30]

Figura 6. Lóbulos de absorção de um ser humano na frequência de 825MHz

A absorção depende das dimensões físicas do corpo e do comprimento de onda λ da radiação emitida.

As dimensões do corpo humano apresentam diferenças para cada tipo de indivíduo, sendo muito complexa a determinação da influência de cada pessoa dentro de um ambiente. É possível dizer que algumas regiões do corpo apresentam características que se assemelham ao comprimento de onda utilizado, que para este trabalho apresenta um comprimento de 0,327m. A referência [30] menciona o fato de que algumas regiões do corpo, como a caixa craniana e a barreira hematoencefálica de pessoas adultas, entram em ressonância com as ondas eletromagnéticas transmitidas, ocasionando a absorção da radiação eletromagnética não ionizante.

A reflexão das ondas eletromagnéticas no corpo humano também afeta a transmissão, sendo um fenômeno presente e de difícil controle, pois a determinação do número de pessoas que podem ocupar o ambiente e a característica aleatória da sua movimentação apresenta grandes desafios na utilização de RSSF em ambientes fechados.

Outro aspecto importante, e que deve ser observado, é a taxa de absorção específica (SAR – *Specific Absorption Rate*), que deve ser calculada nas mais variadas regiões do organismo e não podem exceder os valores determinados pela OMS (Organização Mundial da Saúde)[30].

2.1.5 Resumo

Esta seção teve como objetivo a apresentação de alguns dos principais aspectos relacionados com a camada física de uma RSSF baseada na transmissão por rádio. Foi possível observar a relação entre o sinal e o ruído, a perda da intensidade do sinal no espaço livre, e um

estudo a respeito dos principais motivos que podem degradar a transmissão de dados no meio sem fio.

Foi possível conhecer alguns aspectos relacionados à primeira zona de Fresnel, que apresenta a relação entre a altura, a distância e a frequência utilizada na comunicação entre dois nós que tenham visada direta entre suas antenas.

Outro aspecto importante está relacionado com a degradação do sinal transmitido, devido à ocorrência de múltiplos caminhos por ocasião da reflexão do sinal nos objetos e pessoas que circulam no ambiente. É possível dizer que o nível do sinal sofre variações mesmo em redes que têm os seus nós fixos, devido à natureza aleatória do comportamento das pessoas e ao deslocamento de objetos no ambiente.

2.2 Camada de Enlace

A camada de enlace tem grande importância no funcionamento das RSSF devido à sua capacidade de controlar o acesso ao meio físico, como também prover mecanismos que permitam uma maior economia de energia de acordo com o tipo de rede utilizada. Devido às características particulares de cada tipo de rede, a escolha do conjunto de protocolos que regem o funcionamento desta camada passa a ser de grande importância para o bom desempenho da rede.

2.2.1 Introdução à camada de Enlace

As RSSF são redes muito semelhantes às tradicionais WLAN (*Wireless Local Area Network*), pois utilizam o ar como meio físico. Devido a essa natureza, herdam algumas características, principalmente no que diz respeito à camada de enlace.

As redes sem fio podem ser configuradas com alocação de canal dinâmica ou estática. Neste último caso, a camada MAC (*Medium Access Control*) deve ter a capacidade de trabalhar com multiplexação através das técnicas TDMA (*Time Division Multiple Access*), FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), CDMA (*Code Division Multiple Access*) ou OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Existem alguns protocolos que utilizam algumas destas técnicas, como é o caso do DE-MAC (*Distributed Energy aware MAC*) [31] e do TRAMA (*Traffic Adaptive Multiple Access*) [32].

Grande parte dos protocolos MAC desenvolvidos para RSSF utilizam alocação dinâmica de canal, ou seja, algum método de disputa do meio físico. O CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) é o método de acesso utilizado tradicionalmente pelas WLAN, também conhecido por MACAW (*Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless*) proposto na referência [33]. No entanto, as RSSF têm grandes limitações de *hardware* e *software*, e acabam por utilizar protocolos específicos para cada tipo de aplicação.

Por se tratar do compartilhamento de um único canal de rádio, a comunicação é feita no modo *Half-Duplex*, garantindo a bidirecionalidade do fluxo de informações. Os protocolos baseados em contenção mais difundidos para RSSF são: B-MAC (*Berkeley MAC*) [34], S-MAC (*Sensor-MAC*) [35], T-MAC (*Time-out-MAC*) [36] e ARC (*Adaptive Rate Control*) [37].

2.2.2 B-MAC

O protocolo B-MAC é um método de acesso desenvolvido especialmente para as RSSF. De acordo com Polastre et al. [34], um protocolo de camada de enlace para RSSF deve apresentar as seguintes características:

- Baixo consumo de energia e contenção de colisão;
- Fácil implementação;
- Código de tamanho reduzido;
- Eficiência no uso do canal de comunicação;
- Capacidade de reconfiguração pelo protocolo de rede;
- Escalabilidade.

Este protocolo foi concebido para permitir que a camada de enlace seja reconfigurada conforme a carga de trabalho, podendo em alguns casos estender o tempo de vida da rede em até cinquenta por cento [34].

Uma característica importante deste protocolo é que o mesmo foi desenvolvido para aplicações de monitoramento que necessitam na maioria dos casos de uma rede que tenha um tempo de vida longo.

A maneira encontrada para verificar a existência de atividade no canal foi através da heurística conhecida por CCA (*Clear Channel Assessment*) e pacotes de *backoff*⁴, com a finalidade de controlar o canal. Este protocolo utiliza quadros de confirmação para aumentar a confiabilidade do enlace e emprega a técnica conhecida como LPL (*Low Power Listening*) para detectar o sinal de rádio.

O Gráfico 1 apresenta a intensidade do sinal no receptor, que equivale ao recebimento de um quadro no intervalo de tempo entre 22 e 54ms, este sinal também é conhecido como

⁴ Os pacotes de *backoff* são utilizados para auxiliar o sincronismo da rede.

RSSI (*Receive Signal Strength Indicator*). O gráfico inferior apresenta a saída do sinal após o ajuste realizado pelo algoritmo CCA, o nível 1 (um) indica que o canal está livre e o nível 0 (zero) indica que o canal está ocupado.

Extraído da referência [34]

Gráfico 1. RSSI e a heurística CCA.

A maneira encontrada para se obter uma contenção de colisões efetiva foi através da utilização do CCA. Através desta técnica, é possível verificar se o canal está livre ou ocupado.

Outra característica importante é que o protocolo implementa uma interface que permite que a aplicação ou camadas superiores ajustem os parâmetros de controle do B-MAC, como o CCA, quadros de confirmação, *backoffs* e os sistema LPL. Isso agrega um controle mais efetivo sobre o consumo de energia, o *throughput*, a latência e a confiabilidade.

O B-MAC não fornece mecanismos para múltiplos pacotes, como suporte a terminais escondidos ou fragmentação de pacotes, nem apresenta uma política de economia de energia [34].

Este protocolo, se comparado a outros, apresenta um quadro de tamanho reduzido. Os campos presentes nos quadros são: preâmbulo, bits de sincronização, cabeçalho e controle de erros, totalizando 46Bytes.

Os desenvolvedores do protocolo criaram um mecanismo RTS-CTS⁵ e um serviço de fragmentação de pacotes através das interfaces de controle do B-MAC.

Por se tratar de um protocolo simples, ocupa pouca memória ROM e RAM, quando comparado a outros protocolos de enlace. O protocolo B-MAC, em sua versão mais completa, composta pelos mecanismos LPL, ACK e RTS-CTS, ocupa 4616Bytes de memória ROM e 277Bytes de memória RAM [34].

A Tabela 3 apresenta uma comparação apresentada por Polastre et al. [34], entre o quadro de dados do B-MAC em relação ao quadro do protocolo S-MAC [35].

Tabela 3 - Comparação entre os quadros dos protocolos B-MAC e S-MAC

Comprimento em Bytes	B-MAC	S-MAC
Preâmbulo	8	18
Bits de Sincronização	2	2
Cabeçalho	5	9
CRC	2	2
Dados	29	29
Total	46	60

O protocolo B-MAC também apresenta uma latência baixa, podendo variar de acordo com os mecanismos implementados.

O Gráfico 2 apresenta a comparação dos protocolos B-MAC e S-MAC numa rede composta por dez saltos ou *hops*⁶.

É possível observar que o protocolo em sua configuração mais simples apresenta uma latência muito baixa se comparado aos demais modos de operação. Destaca-se também do protocolo S-MAC, que na mesma configuração apresenta uma latência maior.

⁵ RTS/CTS: mecanismo utilizado para controlar o uso do canal de comunicação.

⁶ A palavra *hops* pode ser traduzida como saltos.

Extraído da referência [34]

Gráfico 2. Latência na utilização dos protocolos B-MAC e S-MAC

Desta forma, ficam evidentes as principais características deste protocolo, sendo o mesmo escolhido como protocolo padrão da camada de enlace pelas principais aplicações desenvolvidas para o sistema operacional TinyOS [38].

2.2.3 Resumo

O protocolo B-MAC, que apresenta um bom desempenho devido à sua simplicidade, foi incorporado como protocolo padrão no sistema operacional TinyOS. Fica evidente que a confiabilidade dos enlaces de rádio é aprimorada com a utilização deste protocolo, auxiliando também o funcionamento das demais camadas, principalmente o roteamento que também interage com esta camada.

A sua arquitetura favorece aplicações onde o regime de funcionamento é baseado na disseminação contínua de dados, tendo uma menor latência se comparado com o protocolo S-MAC [35]. Por estes motivos, o protocolo B-MAC foi mantido nas aplicações utilizadas na elaboração deste trabalho.

2.3 Camada de Rede

As RSSF podem ser consideradas como uma subclasse das redes *ad-hoc*⁷ ou MANET (*Mobile Ad hoc NETWORKS*), devido a alguns aspectos peculiares desta tecnologia [16]. Um aspecto importante está relacionado diretamente com a durabilidade das fontes de energia, pois se trata de um recurso finito, visto que estas redes têm um tempo de vida que pode ser pré-determinado. Outro aspecto é o fato de que os dispositivos podem ser colocados em ambientes externos, ficando expostos a diversos fenômenos ambientais prejudiciais ao seu funcionamento. Ações de vandalismo também se tornam um problema para os nós expostos ao ambiente, prejudicando a comunicação dos dados. A grande parte das aplicações que utilizam RSSF está norteadas para configurações com características estacionárias, diferenciando estas redes das tradicionais redes *ad hoc*.

O roteamento pode ser centrado em endereços ou em dados. A última abordagem, que é mais recente, aponta para o fato de que a agregação ou a fusão de dados reduz a quantidade de pacotes na rede, reduzindo o consumo de energia [16].

As RSSF baseadas no sistema operacional TinyOS não utilizam um esquema de endereçamento completo, como é o caso das tradicionais redes *ad hoc*, baseadas no protocolo IP (*Internet Protocol*). A escassez de recursos numa RSSF reforça a necessidade de um esquema de endereçamento simplificado, que tenha como finalidade a redução dos pacotes enviados pela rede. A quantidade de memória RAM necessária para armazenar as informações de roteamento também é considerada crítica. Na grande maioria das aplicações, os nós sensores são configurados com identificadores únicos, tendo como raiz o ponto de acesso (PA).

A entrega de dados pode ser classificada como contínua, por eventos, iniciada remotamente ou pode apresentar uma abordagem híbrida.

⁷ O termo latino *ad-hoc* é utilizado para nomear as redes sem fio que possibilitam uma mobilidade total.

Estes modelos estão relacionados com a comunicação dos nós sensores em relação ao PA. Os principais tipos de fluxo de dados utilizados em RSSF são: *flooding*, *unicast*, *multicast* e *convergecast* [19].

De acordo com Ruiz et al. [16], o roteamento pode ser dividido em três categorias: *roteamento plano*, onde os nós pertencem à mesma hierarquia; *roteamento hierárquico*, que apresenta nós responsáveis pela coleta de dados e nós responsáveis pela fusão e reenvio das informações; *roteamento geográfico*, que utiliza informações a respeito da localização geográfica dos nós sensores.

O sistema operacional TinyOS [38] disponibiliza uma arquitetura simplificada de roteamento que pode receber implementações dos mais variados tipos de protocolos.

A estrutura responsável pelo roteamento é composta por dois módulos:

- a) MultiHopSend, que interage com a aplicação, faz o gerenciamento dos pacotes e permite o crescimento da rede;
- b) MultiHopRoute, que implementa o algoritmo de roteamento, o controle da tabela de roteamento e o estabelecimento de rotas.

Esta estrutura é responsável por garantir a construção de diversos protocolos de roteamento para RSSF [19].

Na maioria dos protocolos de roteamento existentes, as únicas alterações realizadas pelos desenvolvedores ocorrem no módulo MultiHopRoute (o módulo MultiHopSend é sempre o mesmo).

De acordo com a referência [19], os protocolos de roteamento fornecem três tipos de interfaces: SEND, RECEIVE e INTERCEPT, que são responsáveis pelo envio, recebimento e modificação dos pacotes em trânsito na rede, respectivamente.

As mensagens de roteamento são do tipo `AM_MULTIHOPMSG`, enviadas para o módulo `MultiHopRoute` pela camada `AM` (*Active Message*), responsável pelo repasse das mensagens a seus módulos de destino [19].

2.3.1 Protocolos de roteamento para RSSF

Nas próximas subseções, serão apresentados alguns detalhes a respeito do funcionamento dos protocolos avaliados neste trabalho.

2.3.1.1 TinyOS Beaconing

De acordo com Levis et al. [38], o protocolo de roteamento TOSB (*TinyOs Beaconing*) é utilizado como padrão nas aplicações que acompanham o sistema operacional TinyOS. Um exemplo de aplicação que utiliza este protocolo é o Surge⁸. Esta aplicação captura os dados gerados pelo foto sensor e os envia para o ponto de acesso, através de um caminho que pode ser composto por múltiplos saltos. Estes dados são recebidos pelo ponto de acesso e enviados para processamento externo através da UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*).

O TOSB constrói periodicamente uma estrutura de roteamento baseada no menor caminho, criando rotas que partem dos nós sensores em direção ao nó raiz, como pode ser observada na Figura 7. O protocolo envia os pacotes utilizando o processo de inundação, também conhecido por *flooding* [39].

⁸ A aplicação Surge é utilizada na visualização da estrutura de múltiplos saltos, construída a partir do protocolo de roteamento TOSB.

Figura 7. Topologia em árvore criada pelo TinyOS Beaconing

O nó raiz envia através da rede um pacote de *broadcast* denominado *beacon*. Os nós sensores utilizam este pacote para determinar a sua distância em relação ao nó raiz.

Os vizinhos diretos do nó raiz, ao receberem o pacote *beacon*, são identificados como nós a um salto de distância. Ao repassarem seus pacotes, adicionam sua identificação e distância em relação ao nó raiz.

Os nós que recebem estes pacotes utilizam as informações para enviar os dados ao nó raiz. Através deste processo, os pacotes *beacon* atingem todos os destinos da rede. O TOSB seleciona as rotas levando em conta o número de pacotes enviados com sucessos pelos seus vizinhos diretos, como apresentado por Levis et al. [39].

2.3.1.2 PROC

O PROC (*Proactive Routing with Coordination*) [19] é um protocolo de roteamento utilizado em redes de disseminação contínua de dados, que apresenta características de proatividade. Trata-se de um protocolo que permite a interação entre a aplicação e o protocolo de roteamento, melhorando o seu desempenho em comparação a outros protocolos de roteamento que pertencem à mesma categoria.

Figura 8. Arquitetura do protocolo PROC

O ponto de acesso é denominado nó-raiz, os nós coordenadores são vistos como a junção dos galhos e, por fim, os nós-folhas estão posicionados na periferia da rede, a topologia no formato de árvore pode ser visualizada na Figura 8. Os dados que são coletados pelos nós sensores são enviados para o nó-raiz através do *backbone*⁹. Para construir o *backbone*, os nós utilizam informações obtidas de seus vizinhos através das mensagens de controle do roteamento, que contêm o estado do nó emissor.

A construção do *backbone* é feita em duas etapas. Na primeira etapa, chamada de eleição dos coordenadores, cada nó executa uma rotina para verificar se atuarão como coordenador ou não. Na segunda etapa, chamada de complementação do *backbone*, os nós coordenadores podem indicar outros nós para se integrarem ao *backbone*, caso este não esteja completamente formado. Este processo é executado periodicamente, o que permite a reconstrução do *backbone*, podendo haver revezamento de coordenadores. Durante as atualizações dos nós coordenadores, são realizadas atualizações das tabelas de roteamento, com o objetivo de adequar a rede às mudanças da topologia. O intervalo entre a reconstrução do *backbone* é chamado de tempo de ciclo, como apresentado em [18].

⁹ O *backbone* é o caminho por onde as informações coletadas de vários nós passam em direção ao PA.

Extraído da referência [19]

Figura 9. Estrutura de módulos e interfaces do protocolo PROC

Este protocolo foi projetado para ser portátil¹⁰, sendo possível implementá-lo em aplicações desenvolvidas para o TinyOS, pois o mesmo mantém a mesma estrutura e interfaces do protocolo de roteamento padrão utilizado na maioria das aplicações desenvolvidas para RSSF, como pode ser visto na Figura 8.

2.3.2 Resumo

A camada de rede de uma RSSF tem grande importância devido a questões de gerenciamento de energia, confiabilidade e alcance. Há um grande esforço nesta área por causa da sua importância, e diversos algoritmos estão em pleno desenvolvimento.

Outro fato importante, que não pode ser esquecido, é que as RSSF são redes ímpares e apresentam um comportamento diferenciado para cada aplicação. A escolha do protocolo de roteamento passa a ser um ponto chave para o seu bom funcionamento.

¹⁰ O termo *portável*, neste caso, significa que o protocolo pode ser utilizado por diversas aplicações baseadas no sistema operacional TinyOS.

Os protocolos que permitem uma abordagem pró-ativa, através de regras de aplicação, estão se tornando uma tendência, pois permitem que a rede se adapte às mudanças de topologia ou apresente um comportamento diferenciado de acordo com a aplicação, aumentando desta forma a sua confiabilidade.

O estudo dos protocolos de roteamento para redes *ad hoc* e redes de sensores apresenta grandes desafios tecnológicos, tornando-se uma área de grande interesse para viabilizar redes cada vez mais eficientes.

2.4 Sistema Operacional

O estudo dos sistemas operacionais em RSSF tem grande importância por se tratar de sistemas com características muito particulares. As RSSF são constituídas por dispositivos sujeitos as severas limitações de *hardware*, devido à sua miniaturização e principalmente à redução do consumo de energia.

Nesta situação, o sistema operacional passa a ter um papel importante, pois deverá gerenciar todo o funcionamento lógico desses dispositivos. Por isso, todas as camadas que compõem o sistema devem se comunicar, garantindo um bom desempenho e uma boa confiabilidade para as diversas aplicações das RSSF.

Existem muitos sistemas operacionais para as variadas plataformas de redes de sensores. Podemos citar como exemplos: TinyOS, da Universidade de Berkeley [38]; Contiki, do Instituto de Ciências de Computação da Suécia [40]; Mantis, da Universidade do Colorado [41]; Yatos, da Universidade Federal de Minas Gerais [42].

Neste capítulo, apresentaremos um estudo a respeito do sistema operacional TinyOs, que foi utilizado na elaboração deste trabalho, por ser o sistema padrão da plataforma Mica desenvolvida pela Universidade de Berkeley.

2.4.1 TinyOS

O sistema operacional TinyOs [38] teve sua origem na Universidade de Berkeley, e foi apresentado por Jason Hill em 2000 ao Departamento de Engenharia Elétrica e Ciência da Computação da Universidade da Califórnia [16].

Recentemente foi disponibilizada a segunda versão deste sistema, que, por adotar uma política baseada em *software* livre, tem sido desenvolvido e aprimorado por diversos pesquisadores em todo o mundo.

Este sistema foi desenvolvido especialmente para aplicações em RSSF, onde o consumo de energia e o espaço na memória devem ser mínimos.

A linguagem de programação utilizada no seu desenvolvimento é o NesC [43], derivada do C ANSI¹¹.

Este sistema é baseado em eventos e tem uma arquitetura simples e compacta, que permite boa interação com os recursos de *hardware* e modificações em seus componentes, proporcionando uma maior modularidade.

Como uma RSSF tem por objetivo monitorar diversas grandezas físicas, é natural que múltiplos eventos ocorram simultaneamente. Para garantir o atendimento desses eventos e a qualidade dos dados coletados, o sistema conta com um escalonador desenvolvido para concorrência intensiva do tipo FIFO (*First In First Out*), pois não possui fila de prioridades [16].

A estrutura do TinyOs permite a construção de aplicações a partir de componentes ou módulos; para que eles se comuniquem entre si, basta manter a compatibilidade com as interfaces, que definem comandos e eventos entre os módulos [19].

¹¹ Linguagem de programação criada na década de setenta por Dennis Ritchie e Ken Thompson.

A Figura 10 apresenta o relacionamento entre os módulos e as interfaces. Como exemplo, podemos observar o módulo BlinkM utilizar comandos da interface Leds para requisitar determinados serviços ao módulo LedsC.

Figura 10. Módulos da aplicação Blink

O núcleo do TinyOS foi projetado para trabalhar com eventos e tarefas. Eventos são interrupções que podem ser geradas pelos sensores acoplados às interfaces ADC e pelo relógio, e têm prioridade sobre as tarefas que estejam sendo realizadas. Por sua vez, as tarefas, que não são críticas em relação ao tempo de execução, consomem o tempo do processador e são executadas até o seu término. Esta característica permite a utilização de uma única pilha de execução [38].

2.4.2 Resumo

Neste capítulo, apresentamos algumas das características mais marcantes a respeito dos requisitos para os sistemas operacionais de RSSF, e alguns dos principais exemplos conhecidos. Colocamos em evidência o TinyOs, por se tratar de um dos objetos de estudo deste trabalho. Apresentamos também as características mais marcantes deste sistema, que apresenta uma grande flexibilidade devido à sua estrutura simples e por se basear na política de *soft-*

ware livre. Foi atualizado recentemente e apresenta um grande número de aplicações e conhecimento a seu respeito, tornando-se um objeto de estudo de grande interesse por parte da comunidade científica, que vem desenvolvendo dispositivos cada vez menores e que necessitam de sistemas operacionais simples e robustos.

Capítulo 3

Arquitetura de Nós Sensores

Serão apresentados neste capítulo a arquitetura e os detalhes técnicos dos dispositivos mais utilizados em RSSF e que podem ser encontrados comercialmente, devido principalmente, à grande variedade de dispositivos experimentais existentes. A Universidade de Harvard e a Universidade de Berkeley utilizam estas tecnologias em redes através de testes denominados *testbed*¹², que são realizados pela Internet. Estas redes pertencem aos projetos MoteLab [44] e Mirage [45], respectivamente.

Serão vistos em detalhes os dispositivos Mica2 e Mica2dot, por serem os objetos de estudo deste trabalho.

3.1 Mica2 e Mica2dot

Os dispositivos Mica2 e Mica2dot pertencem à família Mica Motes, desenvolvida pela Universidade de Berkeley [24]. Atualmente são fabricados e distribuídos comercialmente pela Crossbow Technology Inc., e podem ser visualizados na Figura 11.

Os diagramas de bloco dos dispositivos Mica2 e Mica2dot podem ser vistos na Figura 12. Nestes diagramas é possível visualizar a arquitetura dos nós, constituídos por uma unidade de processamento, memória *flash*, sistema de rádio, antena, indicadores luminosos, conector de expansão e fonte de alimentação.

¹² O *testbed* é um tipo de teste onde a aplicação é executada diretamente na plataforma de interesse.

Figura 11. Visualização dos dispositivos Mica2 (a) e Mica2dot (b)

Estes dispositivos trabalham com o microcontrolador Atmega128L, fabricado e comercializado pela Atmel, e operam com o sistema de rádio CC1000 da Chipcon, que utiliza modulação FSK (*Frequency-Shift Keying*) e trabalha na faixa ISM (*Industrial, Scientific and Medical*).

Extraído da referência [24]

Figura 12. Diagrama de blocos dos dispositivos Mica2 (a) e Mica2dot (b)

Quando comparado ao Mica2, o Mica2dot possui limitações devido ao seu tamanho reduzido, como a ausência de espaço físico para acomodar uma grande variedade de sensores.

Desta forma, o nó tem capacidade de monitorar uma quantidade reduzida de grandezas físicas.

Algumas diferenças entre estas plataformas podem ser observadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Quadro comparativo entre os dispositivos Mica2 e Mica2dot

Plataforma	Mica2	Mica2dot
Modelos	MPR 400, 410 e 420	MPR 500, 510 e 520
10 Bits ADC	✓	✓
UART	2	1
LED	3	1
Rádio CC1000 FSK	✓	✓
Frequências de Rádio	916, 433 e 315	916, 433 e 315
Memória Flash	✓	✓
Antena	<i>Omni Whip</i>	<i>Omni Whip</i>
Fonte de Alimentação	2 pilhas AA	1 bateria CR2354
Capacidade	2000 mAh	560 mAh

Contudo, em aplicações que exijam mobilidade, o tamanho reduzido passa a ser a sua maior vantagem em relação ao Mica2. A seção 4.4.1 apresentará maiores detalhes que cercam o funcionamento destes dispositivos.

3.2 Micaz

O Micaz é uma plataforma de transição que utiliza em sua arquitetura o mesmo micro-controlador utilizado nas plataformas Mica2 e Mica2dot [24]. Trabalha com o sistema de rádio CC2420, desenvolvido pela Chipcon, que é compatível com o padrão IEEE 802.15.4¹³. Esse sistema de rádio trabalha com espalhamento espectral do tipo DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), que oferece uma capacidade máxima de canal de 250Kbps. O diagrama de blocos dos componentes que compõem o dispositivo podem ser vistos na Figura 13.

¹³ Popularmente conhecido como ZigBee

Extraído da referência [24]

Figura 13. Diagrama de Blocos do Micaz

Este dispositivo também é compatível com o sistema operacional TinyOs e com a maioria das aplicações desenvolvidas para a plataforma Mica2 e Mica2dot. Para que as aplicações funcionem nesta plataforma, é necessário realizar um pequeno ajuste nas configurações do sistema de rádio durante o processo de compilação da aplicação. O dispositivo pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14. Visualização do módulo Micaz.

Para se obter uma maior resistência à interferência ou aumentar o número de redes que coexistam em um mesmo ambiente, o sistema de rádio pode ser ajustado para trabalhar entre

os canais 11 (2.405GHz) e 26 (2.480GHz), com uma separação de 5MHz entre eles, garantindo assim que os sinais não se sobreponham.

O canal pode ser alterado em tempo de execução através de uma chamada realizada pelo sistema operacional.

A antena utilizada pelo Micaz é menor em relação às antenas utilizadas no Mica2 e no Mica2dot. Isso se deve à frequência de operação do sistema de rádio, que neste dispositivo opera a 2.4GHz, permitindo o uso de uma antena de aproximadamente três centímetros de comprimento.

O controle de potência também pode ser ajustado através de pequenas modificações nos módulos que compõem a pilha de rádio do TinyOS. O sistema de rádio também implementa um novo parâmetro de avaliação da qualidade do enlace de rádio, chamado LQI (*Link Quality Indicator*). Este parâmetro vem sendo utilizado por alguns protocolos de roteamento, como é o caso do MultiHopLQI [46].

Por se tratar de uma tecnologia transitória, o mesmo vem sendo substituído pelas novas gerações, que serão apresentadas na próxima seção.

3.3 TmoteSky e TelosB

O TmoteSky é a última versão dos Motes de Berkeley, sendo compatível com o TelosB desenvolvido pela Crossbow Inc [47]. Os dispositivos utilizam o *chip* CC2420 desenvolvido pela Chipcon, que trabalha com a modulação O-QPSK¹⁴ (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*) através do DSSS.

Devido à frequência do sistema de rádio, os nós utilizam um tipo de antena especial denominada F invertido, que proporciona um alcance de aproximadamente 50m em ambientes

¹⁴ Modulação QPSK na qual dois bits que formam o sinal QPSK são defasados por um período de meio bit.

internos e 125m em ambientes externos. Esta antena apresenta um diagrama de irradiação com comportamento próximo ao de uma antena omnidirecional.

Uma outra evolução desta plataforma foi a utilização da interface USB (*Universal Serial Bus*), que facilita a programação dos dispositivos e a troca de informações com o ponto de acesso, ou diretamente na interface USB do microcomputador, os dispositivos podem ser vistos na Figura 15.

Figura 15. Visualização dos dispositivos (a) TmoteSky e (b) TelosB

Os microcontroladores escolhidos para equipar as duas plataformas foram os da família MSP430x1xx, fabricados pela Texas Instruments: são de 16 bits e operam na frequência de 8MHz. O diagrama funcional do módulo TmoteSky pode ser visualizado na Figura 16.

Extraído da referência [47]

Figura 16. Diagrama de blocos do TmoteSky

O TmoteSky tem um módulo de memória *flash* que comporta um total de 1024KBytes, que representa o dobro de espaço disponibilizado no Mica2 e Mica2dot.

Os dois dispositivos em questão já foram desenvolvidos de forma a possibilitarem a conexão de sensores de temperatura, luminosidade e umidade, que são recomendados pelos fabricantes.

Estes sensores permitem que o nó seja utilizado sem a necessidade de módulos externos, embora os dispositivos permitam a expansão através de conectores criados para esta finalidade.

A única diferença entre o *hardware* do TmoteSKy e do TelosB é que o dispositivo fabricado pela Moteiv Incorporation pode utilizar a energia proveniente da interface USB para alimentar uma possível fonte de energia recarregável, quando o mesmo estiver conectado ao microcomputador [48].

3.4 Outros projetos

Em todo o mundo estão sendo desenvolvidos diversos tipos de nós sensores para atender uma demanda surpreendente de aplicações. Devido à sua natureza multidisciplinar, a construção dos dispositivos torna-se muitas vezes específica para uma determinada aplicação. Existem casos em que a transmissão por rádio passa a ser proibitiva, como o caso do projeto Smart Dust da Universidade de Berkeley [20]. Como este dispositivo tem dimensões próximas a de um grão de areia, a solução é a comunicação óptica, devido principalmente ao consumo de energia e às dimensões de uma possível antena. A Figura 17 apresenta a imagem de um módulo Smart Dust extraída através da utilização de um microscópio eletrônico.

Extraído da referência [20]

Figura 17. Imagem de um módulo Smart Dust

A construção de um dispositivo com dimensões microscópicas torna-se possível principalmente pelas técnicas avançadas de construção de semicondutores e os avanços da nanotecnologia¹⁵.

Outro projeto de grande destaque é o SensorWeb, desenvolvido pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) da NASA [49]. Este nó sensor opera na faixa de frequência de 916MHz, e está sendo utilizado em diversas pesquisas promovidas pela NASA. A Figura 18 apresenta um teste de monitoramento ambiental realizado na Antártica [50].

Extraído da referência [50]

Figura 18. Testes realizados com o SensorWeb na Antártica

¹⁵ A nanotecnologia permite a construção de dispositivos na escala de nanômetros.

3.5 Resumo

As RSSF estão se tornando uma grande realidade, devido principalmente às inúmeras aplicações desta tecnologia. Atualmente existe uma corrida para se tentar atingir dispositivos de tamanho reduzido, que gastem pouquíssima energia e que tenham grande poder de processamento e comunicação. Esta corrida vem gerando novos protótipos e até produtos comerciais, como os apresentados neste capítulo.

O desenvolvimento dos nós sensores também abre novos horizontes para as pesquisas relacionadas com o seu encapsulamento, novos tipos de sensores, nanotecnologia e a busca por novas fontes de energia que possam ser mais duráveis.

Uma tendência neste campo é o desenvolvimento de módulos capazes de interagir diretamente com microcomputador sem a necessidade de uma base especial, como é o caso do TmoteSky e TelosB, que podem ser acoplados diretamente através da interface USB. Esta característica também favorece a conexão de uma RSSF a uma rede de dados tradicional.

Capítulo 4

Caracterização

Nesta seção, foram vistos os pontos importantes no processo de caracterização de uma RSSF aplicada a um ambiente controlado.

O processo de caracterização foi dividido em quatro etapas:

- *Caracterização da Sala Limpa.* Esta etapa foi realizada através do estudo das normas técnicas que apresentam as principais características destes ambientes, do estudo dos processos, e do dimensionamento das grandezas físicas a serem monitoradas. Algumas informações foram coletadas através de reuniões com membros da equipe responsável pela manutenção e operação da Sala Limpa.
- *Caracterização dos dispositivos.* Foi realizado um estudo a respeito dos detalhes técnicos do dispositivo Mica2dot. Também foram realizados testes para se obter o conhecimento necessário para a correta operação dos dispositivos com as aplicações desejadas.
- *Caracterização dos protocolos.* Esta etapa permitiu a escolha dos protocolos da camada de enlace e da camada de rede através de artigos científicos que apresentavam comparativos a respeito dos protocolos que pudessem ser compatíveis com a aplicação desejada.
- *Caracterização das aplicações.* Foi realizada uma pesquisa acerca das aplicações que pudessem contribuir para a execução dos testes e que pudessem ser utilizadas em conjunto com os protocolos escolhidos no item anterior.

Esta sistematização possibilitou a construção de uma estrutura completa, onde foram definidos o tipo de nó, o sensor, os protocolos de comunicação, o sistema operacional e as aplicações necessárias para o funcionamento da rede.

4.1 Metodologia e Materiais

O primeiro passo foi a classificação da RSSF a ser utilizada no monitoramento de temperatura da sala de processos do Laboratório de Sistemas Integráveis da USP. A classificação é importante para indicar os principais elementos que constituem a rede e definir os tipos de protocolos a serem utilizados, de forma a respeitar o regime de funcionamento e garantir os objetivos da rede.

Como guia no processo de caracterização das RSSF, utilizamos o trabalho realizado pelo grupo de sensores da Universidade Federal de Minas Gerais, que apresenta um quadro com as principais características das redes de sensores sem fio [16]. Desta forma, foi possível estabelecer o tipo de nó sensor (processador, memória, dispositivos sensores, fonte de energia, transceptor), a quantidade de nós que compõem a rede, a distribuição dos nós no ambiente, a escolha dos protocolos da pilha de comunicação, o tipo de dado que será tratado e o tipo de serviço que será provido pela rede.

A avaliação dos aspectos relacionados com a transmissão dos dados no nível físico foi guiada por um trabalho realizado na Universidade de Pisa na Itália [27], que apresenta uma metodologia para a análise da taxa de transmissão em relação à distância, e uma abordagem que avalia a influência da altura entre os nós na taxa de transmissão, devido à zona de Fresnel.

Outro texto que auxiliou o processo de caracterização e análise de desempenho da camada física foi o trabalho realizado na Universidade Monmouth nos Estados Unidos, que apresentou um modelo de propagação para redes *ad hoc* 802.11 [51].

Foi observada a metodologia utilizada no modelamento do sistema de transmissão de rádio apresentada pela Universidade de Cartagena na Espanha [52], e também a metodologia apresentada no relatório técnico da Universidade da Califórnia [53].

A definição do protocolo da camada de enlace foi realizada através da comparação dos protocolos B-MAC e S-MAC apresentada por Polastre et al. [34], que posicionou o protocolo

B-MAC, como sendo um protocolo adequado para aplicações que trabalham com disseminação contínua de dados.

Para o estudo da camada de rede, foram escolhidos dois protocolos destinados a redes de disseminação contínua: o TOSB e o PROC. O protocolo PROC, proposto pela Universidade Federal de Minas Gerais, apresenta uma série de recursos para garantir uma maior economia de energia e uma resistência maior a falhas [19]. Por outro lado, o protocolo TOSB foi escolhido por se tratar do protocolo de roteamento padrão utilizado pelo TinyOS.

Foram realizados experimentos com a finalidade de avaliar os dois protocolos no ambiente proposto, com a finalidade de avaliar aquele que melhor atendesse as necessidades da aplicação em questão.

A caracterização do ambiente e a análise de desempenho, atrelada a uma metodologia de trabalho, tornam-se um passo importante para obter um bom conhecimento de grande parte das variáveis envolvidas na aplicação proposta.

Os tópicos deste capítulo apresentam os pontos mais importantes do processo de caracterização da RSSF escolhida.

4.2 Bancada de Testes

Foi necessária a criação de uma bancada de testes composta por duas RSSF baseadas nos dispositivos MICA2 e Mica2dot para atingir o primeiro objetivo deste trabalho, que consiste na caracterização dos principais elementos que compõem a RSSF. Um microcomputador com os *softwares* necessários para a compilação e instalação das aplicações foi instalado, conforme indicado na Figura 19. Foi construído um *kit* móvel composto por um *notebook* e uma base MIB500 para as atividades externas e uma estação de trabalho para os simuladores TOSSIM [54] e NS-2 [55].

Figura 19. Bancada de testes localizada no laboratório HumanLab¹⁶

Foi elaborado um roteiro com o procedimento que deve ser seguido para evitar que os nós sejam danificados durante o processo de gravação. Este roteiro foi criado devido a perda de alguns nós no início dos trabalhos com a RSSF. Esse problema ocorria devido à estrutura da placa MIB500, que, mesmo com a fonte de alimentação desligada, continuava conectada ao microcomputador através da interface serial e paralela. O problema parou de ocorrer a partir do momento em que a conexão e a desconexão dos nós à base MIB500 passou a ser realizada com todos os cabos desconectados.

Um outro procedimento importante foi a utilização de uma pulseira anti-estática durante a manipulação dos nós no procedimento de conexão com a placa MIB500, ou em qualquer outro procedimento que tivesse algum tipo de acoplamento.

A criação desta infra-estrutura foi um grande passo, pois permitiu que diversos trabalhos fossem realizados em paralelo por outros pesquisadores, gerando diversos artigos científicos.

¹⁶ HumanLab – Laboratório de computação pervasiva vinculado ao grupo PAD do LSI/USP.

4.3 Caracterização da Sala Limpa

De acordo com a norma *U. S. Federal Standard 209e* [14], uma sala limpa é um local com controle de concentração de partículas transportadas pelo ar e que contenha uma ou mais zonas limpas. Uma zona limpa é um espaço definido em que a concentração de partículas transportadas pelo ar é determinada pelo número máximo de partículas em suspensão encontradas em 1 (um) pé cúbico de ar.

A sala em questão possui uma área útil de 70m^2 , onde o número de particulados em suspensão está próximo a 10.000 partículas por pé cúbico.

O posicionamento dos nós foi escolhido de tal forma que pudessem monitorar a temperatura dos quatro ambientes de interesse. Os ambientes escolhidos para os testes foram: a sala de litografia óptica¹⁷; a região próxima aos fornos utilizados no processo de dopagem das lâminas de Silício; a região de eletrodeposição; por fim, a região próxima ao reator utilizado no processo de corrosão por plasma (também conhecida como área de caracterização). Os nós não foram posicionados nas proximidades dos dutos de ar que resfriam a sala limpa, pois poderiam gerar dados falsos a respeito da temperatura ambiente. Na sala também havia alguns equipamentos que poderiam interferir na medida da temperatura.

A Figura 20 ilustra o posicionamento dos nós sensores na sala limpa, e também a distância em relação ao ponto de acesso localizado na entrada da sala limpa.

¹⁷ Processo utilizado em microeletrônica para a definição dos padrões no substrato de Si.

Planta fornecida pela equipe que gerencia a sala limpa do LSI/USP

Figura 20. Disposição dos nós na planta da sala limpa do LSI/USP

Os nós sensores também estavam sujeitos a barreiras físicas, como as divisórias e equipamentos dispostos em toda a extensão da sala. Estes elementos, em conjunto com a distância e a altura dos nós em relação ao PA, tornam-se importantes no processo de degradação do sinal de rádio emitido pelos nós sensores, podendo reduzir o desempenho da RSSF neste tipo de ambiente. A distância entre os nós e o ponto de acesso também é um parâmetro importante para que ocorra o roteamento entre os sensores.

Um outro fator importante que deve ser levado em consideração é o trânsito de pessoas no ambiente, que pode afetar a intensidade do sinal transmitido e prejudicar a recepção.

As distâncias e a altura dos nós em relação ao ponto de acesso podem ser vistas na Tabela 5, estes valores foram definidos com base na disposição física da sala limpa.

Tabela 5 - Altura e distância dos nós sensores

Nó Sensor	Altura (m)	Distância (m)
Base	0,95	-
Região A	1,50	6,1
Região B	1,70	8,2
Região C	1,65	5,1
Região D	1,75	3,3

O uso de uma RSSF em ambientes controlados pode se tornar proibitivo devido à dificuldade de se prever o comportamento do sistema de rádio nestes ambientes, principalmente por se tratarem de ambientes ímpares, e que contam com o trânsito de pessoas em seu interior.

Uma maneira de se superar este problema é através da utilização do roteamento entre os nós, permitindo que uma determinada informação seja transmitida por caminhos diversos a fim de contornar determinadas limitações do sistema de rádio, aumentando a resistência a falhas. Desta maneira, é possível viabilizar o funcionamento da rede, mesmo perante as dificuldades inerentes a este ambiente.

Para tanto, deve-se respeitar as distâncias entre os nós e possibilitar sempre que possível a visada direta entre as antenas. O ajuste da potência do sistema de rádio pode favorecer o funcionamento da rede, principalmente se o nível de ruído do ambiente for elevado. Vale ressaltar que o ajuste da potência em níveis mais elevados provoca um maior consumo de energia, tendo como efeito direto a redução do tempo de vida da rede.

4.4 Caracterização da RSSF

A rede em questão foi classificada através da taxonomia apresentada por Ruiz et al. [16]:

- a) composição homogênea, por utilizar nós de mesma constituição;
- b) organização plana, devido ao fato dos nós não estarem organizados em grupo;
- c) estacionária, por manter os nós no local onde foram depositados durante todo o período de vida da rede;
- d) densidade balanceada, por apresentar uma distribuição considerada ideal de acordo com a função e o objetivo da rede;
- e) distribuição irregular, pois os nós não estão a uma mesma distância um dos outros.

A rede em estudo coleta dados em tempo real, e a disseminação dos dados é feita em regime contínuo. O tipo de comunicação entre os nós é assimétrico, pois os nós estão posicionados em regiões distintas que não estão a uma mesma distância. A transmissão dos dados entre os nós é feita no modo *half-duplex*, ou seja, não podem enviar e receber ao mesmo tempo, e a alocação do canal de transmissão é dinâmica devido à existência de um único canal de comunicação, sendo necessária a utilização de um protocolo que controle o acesso ao meio físico. O fluxo de informações é do tipo *convergecast*¹⁸, sendo necessária a presença de algum tipo de protocolo de roteamento. Após a classificação da rede, foi possível iniciar o trabalho relacionando os fatores que apresentam maior influência na degradação do desempenho da RSSF em questão.

¹⁸ O fluxo *convergecast* determina que os dados tenham como destino um único ponto, sendo o oposto ao fluxo de *broadcast*.

4.4.1 Nós Sensores

Os nós sensores utilizados neste trabalho pertencem à família Mica Motes, que atende as necessidades da rede proposta. Foi utilizado um conjunto composto por cinco nós do tipo Mica2dot modelo MPR500, onde foram necessárias modificações na estrutura do nó para a realização dos testes.

4.4.1.1 Microcontrolador e Memória

O microcontrolador utilizado em ambos os dispositivos é o ATmega128L, que trabalha com palavras de oito bits. Este dispositivo possui arquitetura RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) e a frequência de operação é de 7.37MHz no Mica2 e 4MHz no Mica2dot. Ele também possui trinta e dois registradores de uso geral, conectados diretamente à ULA (Unidade Lógica Aritmética), permitindo que dois registradores independentes possam ser acessados numa única instrução, com a duração de um único ciclo de *clock*. Este microcontrolador apresenta baixo consumo de energia, que é uma característica desejada para aplicações em RSSF [56]. Outras características importantes do microcontrolador podem ser vistas na Tabela 6.

Tabela 6 - Principais recursos do microcontrolador Atmega 128L

Recurso	Descrição
Memória Flash	128KBytes
Memória EEPROM e SRAM	4KBytes
Contador de Tempo Real	✓
Interface Serial	USART
Interfaces	JTAG , ADC de 10bits
Economia de energia	6 modos

O Mica2 e o Mica2dot também contam com uma memória *flash* externa de 512KBytes para armazenamento dos dados de monitoramento. O chip utilizado é o AT45DB014B, também fabricado pela Atmel [24].

4.4.1.2 O Sistema de Rádio

O sistema de rádio é baseado no *chip* CC1000, que trabalha com baixa potência e baixos níveis de tensão, e opera em UHF (*Ultra High Frequency*) na faixa ISM e SRD (*Short Range Device*) [57]. A banda de frequência pode ser definida em 315, 433, 868 e 915 MHz, sendo facilmente programado para operar também na faixa de 300 a 1000 MHz. Este sistema de rádio utiliza a modulação FSK, que permite atingir taxas de transmissão da ordem de 76.8Kbps utilizando a codificação NRZ (*Non Return to Zero*). No entanto, os dispositivos apresentados atingem uma taxa de transmissão na ordem de 38.4Kbps.

O *chip* CC1000 é alimentado com tensões que podem variar entre 2.1 e 3.6 Volts, permitindo que o sistema de rádio trabalhe com o mínimo de recursos energéticos.

Uma outra característica interessante é a robustez em relação à faixa de temperatura que pode variar entre -40 e 80°C, o que viabiliza a sua utilização nos mais variados tipos de ambiente [57].

A antena utilizada é do tipo omni *whip*, caracterizada como um monopolo de quarto de onda, que permite que as ondas de rádio sejam propagadas de forma omnidirecional. Esta antena pode ser visualizada na Figura 21.

Figura 21. Antena *whip* omnidirecional

O tamanho da antena depende da frequência de operação do sistema de rádio. A Tabela 7 apresenta os comprimentos mais comuns para as faixas de frequência utilizadas pelos modelos do Mica2 e Mica2dot.

Tabela 7 - Comprimento da antena em função da frequência de operação

Dispositivos	Frequência	Comprimento $\lambda / 4$ (cm)
MPR400/500	915MHz	8.2
MPR410/510	433MHz	17.3
MPR420/520	315MHz	23.8

Os valores apresentados na Tabela 7 foram obtidos através da equação 6, extraída da referência [58]:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (6)$$

Onde:

c = Velocidade da luz (2.997925×10^8 m/s)

f = Frequência de operação do sistema de rádio

Este tipo de antena apresenta um diagrama de irradiação próximo ao de uma antena isotrópica.

É possível ajustar a potência do sinal de saída através de uma modificação no módulo CC1000 do TinyOs, que é responsável pelo sistema de rádio. Este parâmetro deve ser ajustado antes do processo de compilação.

A potência de transmissão do sistema de rádio pode ser ajustada por *software*. Este valor pode variar entre -20 e 5dBm. Devido a este ajuste, a corrente consumida pelo sistema de rádio pode variar, entre 8,6 e 25,4mA, respectivamente.

A potência padrão do sistema de rádio é ajustada em 1mW, podendo assumir valores entre 0,01 e 10mW.

Variando a potência, é possível obter um maior alcance; porém, este parâmetro deve ser ajustado com certo cuidado devido ao compromisso que existe com o consumo de energia. Em alguns casos, a utilização do roteamento faz-se necessária para ampliar a área de cobertura sem a necessidade de utilizar a maior potência disponível.

Outra característica importante é o sistema que monitora a intensidade do sinal recebido, denominado RSSI (*Receive Signal Strength Indicator*) e que pode ser obtido através da porta ADC0 do microcontrolador Atmega128L. A equação 7 apresenta a maneira como é calculado o valor do V_{RSSI} :

$$V_{RSSI} = V_{bateria} \times \frac{ADC0}{1024} \quad (7)$$

Para se obter o valor em dBm, é necessário conhecer a frequência de operação do sistema de rádio.

No caso estudado, a frequência é de 915MHz. Portanto:

$$RSSI(dBm) = -50.0 \times V_{RSSI} - 45.5 \quad (8)$$

No caso do Mica2, a tensão da bateria é calculada através da equação 9:

$$V_{bateria} = \frac{V_{ref} \times 1024}{ADC7} \quad (9)$$

Onde:

$V_{bateria}$ = Tensão da Bateria

V_{ref} = 1.223 Volts

O Mica2 utiliza um diodo *Schottky* como referência. Portanto:

$$V_{bateria} = \frac{V_{ref} \times 1024}{ADC1} \quad (10)$$

Onde:

$V_{bateria}$ = Tensão da Bateria

V_{ref} = 0.6 Volts

O Gráfico 3 apresenta a relação entre a tensão em Volts e o nível RSSI expresso em dBm para as frequências 433MHz e 868MHz [57].

Extraído da referência [57]

Gráfico 3. Relação entre a tensão e o nível RSSI

Devido às dificuldades em observar a relação sinal ruído através do parâmetro fornecido por *software*, foi realizada a conexão de um condutor esmaltado no terminal RSSI, localizado no pino 28 do *chip* CC1000, este procedimento permitiu que os dados fossem coletados com auxílio de um osciloscópio.

O fabricante recomenda que os dispositivos sejam posicionados a uma distância mínima de 0,60m um do outro, para evitar os efeitos provocados pela interferência gerada pelos osciladores dos módulos MPR [24].

A Figura 22, apresenta o esquema elétrico do sistema de rádio do Mica2dot modelo MPR500.

Extraído da referência [24]

Figura 22. Esquema elétrico do sistema de rádio CC1000 no Mica2dot

4.4.1.3 Dimensões Físicas

Os dispositivos Mica2 e Mica2dot apresentam dimensões físicas reduzidas e podem ser utilizados em diversas aplicações. O Mica2dot apresenta um tamanho reduzido se comparado ao Mica2. O Mica2 apresenta as dimensões de 58mm x 32mm x 15mm, incluindo o suporte para as pilhas. Sua massa total é de 16,5g, desprezando a placa de expansão. Já o Mica2dot tem um diâmetro de 25mm e uma espessura de 6mm; a massa do dispositivo é de 5,6g, incluindo o suporte para a bateria. É importante ressaltar que os valores aqui apresentados não contemplam a massa das baterias.

A Tabela 8 apresenta a massa de diversas configurações dos dispositivos, com ou sem as placas de expansão (neste caso, a massa das baterias é considerada). Também são apresentadas as respectivas massas das baterias utilizadas durante a elaboração deste trabalho.

Tabela 8 - Massa dos dispositivos Mica2 e Mica2dot

Dispositivo	Massa (gramas)
MPR500 com 1 bateria do tipo <i>coin</i>	11,5
MPR500 + MDA500CA com bateria	12,8
MPR400 com 2 baterias do tipo AA	75,1
MPR400 + MTS310 com baterias	85,5
Pilha Sony NH-AA HR15/51	29,3
Bateria <i>coin</i> Panasonic CR 2354	5,9

Ambos contam com uma antena de 8.1cm de comprimento, que corresponde à frequência de operação de 915MHz. O tamanho da antena pode sofrer variações de acordo com a frequência de operação, como apresentado na Tabela. 7

4.4.1.4 Sensores

A placa de expansão fornece ao Mica2 a capacidade de monitorar diversas grandezas físicas através de uma gama de sensores: termistor, foto sensor, microfone, acelerômetro e magnetômetro.

Estes sensores são controlados através das interfaces ADC do microcontrolador Atmega128L.

A placa MTS (*Mote Sensor Board*) é acoplada ao Mica2 através do conector de expansão de 51 pinos, sendo alimentada pela mesma fonte de energia do nó sensor [59].

Estas placas podem ser vistas na Figura 23.

Extraído da referência [59]

Figura 23. Placas de expansão MTS310CA e MDA500CA

A placa MDA500CA é utilizada para acoplar diferentes tipos de sensores ao Mica2dot. Também conhecida como *protoboard*, possui 19 pinos que permitem uma perfeita conexão ao nó sensor. Esta placa pode ser modificada de acordo com a aplicação pretendida, oferecendo uma grande flexibilidade aos desenvolvedores.

O Laboratório de Sistemas Integráveis da Universidade de São Paulo vem desenvolvendo novas placas de sensores que podem oferecer algumas funcionalidades adicionais ao Mica2dot, equiparando a sua capacidade de sensoriamento ao Mica2.

4.4.1.5 *Kit* de Desenvolvimento

O *kit* de desenvolvimento é composto por uma base denominada MIB500, que contém uma interface paralela, uma interface serial, uma interface JTAG, um conector de expansão de 51 pinos e outro de 19 pinos para o acoplamento dos Motes Mica2 e Mica2dot. Acompanham algumas unidades MPR4x0 e MPR5x0, como algumas placas de expansão. Os principais componentes deste *kit* podem ser vistos na Figura 24.

Extraído da referência [24]

Figura 24. *Kit de desenvolvimento*

A base é responsável pelo processo de gravação do *firmware*, ou seja, a aplicação e o sistema que serão executados nos nós sensores. Este procedimento é realizado conectando-se o nó sensor à base; em seguida, o comando *make install* inicia o processo de gravação do código na memória *flash* do dispositivo. Este procedimento deve ser repetido para a gravação em todos os nós.

4.4.2 Modificações

A bateria do tipo *coin* foi substituída por um soquete capaz de acomodar duas pilhas alcalinas do tipo AA. Esta alteração foi realizada devido à rapidez com que a bateria sugerida pelo fabricante se descarregava e pela dificuldade de reposição. Outro fator importante está relacionado à quantidade de testes realizados, uma vez que os testes necessitam de baterias com plena carga. As pilhas foram substituídas por pilhas recarregáveis de 2100 mAh da marca Sony, modelo NH-AA HR15/51. Para tanto, foi necessário adquirir um conjunto de dezesseis pilhas e dois carregadores que permitissem trabalhar com as pilhas sempre recarregadas. Este procedimento garantiu que os dispositivos trabalhassem com a mesma carga em todos os testes. A Figura 25 apresenta as modificações nos nós sensores Mica2dot.

Figura 25. MPR500 e *protoboard* após as modificações propostas.

Foram acoplados ao *protoboard* o termistor e o resistor, recomendados pelo fabricante, com a finalidade de oferecer ao Mica2dot a capacidade de monitorar a temperatura ambiente da sala limpa.

As características técnicas do termistor utilizado nos testes realizados na sala limpa podem ser vistas na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados técnicos do termistor YSI44006

Descrição	Dados
Fabricante	Farnell Newark
Modelo	YSI 44006
Resistência	10K Ω à 25°C
Faixa de medida	+/- 0,2 °C entre 0°C à 70°C
Temperatura de armazenamento e operação	- 80°C até + 120°C

O cálculo para o ajuste da curva de temperatura foi realizado com base nas informações divulgadas nos manuais técnicos do MTS310 [59]. A equação 11 permite obter o valor da temperatura através do conversor analógico digital, valor este que pode variar entre 0 e 1023.

O formato original da equação 11 foi alterado para se obter os valores de temperatura diretamente em graus Celsius:

$$T(^{\circ}C) = \frac{1}{\{a + b \times \ln(R_{thr}) + c \times [\ln(R_{thr})]^3\} - 273.15} \quad (11)$$

$$R_{thr} = \frac{R1 \times (ADC_FS - ADC)}{ADC} \quad (12)$$

A seguir são apresentadas as variáveis e as constantes utilizadas:

$$a = 0.001010024$$

$$b = 0.000242127$$

$$c = 0.000000146$$

$$R1 = 10 \text{ K}\Omega$$

$$ADC_FS = 1023$$

$$ADC = \text{Valor em decimal}$$

A variável ADC corresponde à leitura da interface analógico-digital; R1 é o valor do resistor de referência; as constantes a, b e c são definidas na referência [59]; ADC_FS é o valor máximo que a interface ADC pode atingir; e Rthr corresponde ao valor ajustado através da equação 12.

4.4.3 Topologia Física

Durante a fase de testes, foram utilizadas duas topologias: a ponto-a-ponto e a infra-estruturada.

A topologia ponto-a-ponto foi utilizada no levantamento da taxa de entrega de pacotes em função da distância e altura dos nós, onde havia um nó transmissor e um receptor. A topologia infra-estruturada foi utilizada na avaliação da taxa de entrega dos pacotes na sala limpa, onde foram realizados testes baseados no envio dos dados diretamente à base, com a ausência

do roteamento. Uma topologia similar foi utilizada na avaliação dos protocolos de roteamento baseados em disseminação contínua de dados.

Nos experimentos baseados na topologia ponto-a-ponto, foram utilizados dois nós através de uma topologia lógica baseada em *unicast*, onde o nó sensor enviava os dados diretamente ao ponto de acesso, como pode ser visualizado na Figura 26.

Figura 26. Teste em ambiente interno na Universidade de São Paulo

Os nós foram posicionados em dois ambientes distintos, um interno e outro externo, com base nos experimentos realizados por Anastasi et al.[27]. Foi adicionada a este experimento uma sequência de testes com distâncias variando de 5m a 20m com passo de 5m, para assim avaliarmos os efeitos da distância e da altura na taxa de entrega dos pacotes em ambientes internos e externos.

Também foram criadas bases de madeira para a realização dos testes que avaliaram a intensidade do sinal recebido, também conhecido como RSSI. Estas bases foram construídas com alturas de 0,30m, 0,50m e 0,70m, respectivamente.

A topologia infra-estruturada foi configurada nas dependências da sala limpa através do posicionamento de quatro nós sensores, de forma que os mesmos pudessem monitorar a temperatura dos quatro ambientes existentes na sala limpa.

Figura 27. Ponto de acesso utilizado no monitoramento da Sala Limpa

O quinto nó foi conectado à base MIB500, que estava ligada a um microcomputador, a fim de realizar a coleta dos dados, como apresentada na Figura 27.

4.4.4 Protocolos

A escolha dos protocolos também se torna um passo importante para a realização dos testes e a reprodutibilidade dos resultados. Procurou-se utilizar os protocolos padrões disponíveis para a plataforma Mica. A camada de enlace foi controlada pelo protocolo B-MAC [34], definido como padrão a partir da versão do TinyOs 1.1.13. Não foram feitos ajustes para melhorar o desempenho deste protocolo. O B-MAC foi escolhido por apresentar um tamanho de quadro menor comparado com o protocolo SMAC, e por apresentar um melhor desempenho para aplicações de disseminação contínua de dados.

A camada de rede contou com a utilização de dois protocolos de roteamento para redes de disseminação contínua de dados: o TOSB e o PROC, ambos descritos na seção 2.3.1. Foi utilizado como referência o protocolo padrão denominado TOSB, que acompanha o sistema

operacional. Este protocolo é definido no arquivo *makefile*¹⁹ no processo de compilação da aplicação em questão.

O protocolo PROC foi escolhido por se tratar de um protocolo orientado a aplicações que utilizam disseminação contínua de dados, e por apresentar uma abordagem nova que é a interação com a aplicação e suas características de pró-atividade. Este protocolo apresenta menor consumo de energia, menor latência, número de pacotes de roteamento inferior e uma taxa de entrega maior em relação ao TOSB em redes com mais de cinquenta nós, como apresentado nas simulações realizadas por Macedo et al. [17].

4.4.5 Aplicações

Para a realização dos testes, foram utilizadas três aplicações distintas. Para uma análise preliminar, foi utilizada a aplicação *oscilloscopeRF*²⁰. Como esta aplicação não utiliza nenhum tipo de protocolo de roteamento, os nós sensores encaminham os pacotes de dados diretamente à base. Para o seu pleno funcionamento, é necessário instalar em cada um dos dispositivos a aplicação *oscilloscopeRF*, tendo o cuidado de inserir o número de identificação de cada nó. O ponto de acesso foi configurado com a aplicação *TOSBase*, que também acompanha o *TinyOs*, permitindo o recebimento dos dados enviados pelos nós sensores, que são imediatamente encaminhados ao microcomputador através da *UART*, onde é realizado o processo de análise dos dados. É possível analisar a temperatura da sala através de um *software* de visualização desenvolvido em Java e que apresenta os dados numa tela semelhante a de um osciloscópio. Uma deficiência desta interface é que a mesma apresenta os dados em formato decimal ou hexadecimal, sem realizar as devidas conversões para as unidades respectivas dos

¹⁹ O arquivo *makefile* contém alguns parâmetros de configuração da aplicação.

²⁰ Esta aplicação pode ser encontrada na pasta *apps/OscilloscopeRF/* do pacote *TinyOS*.

parâmetros fornecidos pelos sensores acoplados ao nó sensor. A Figura 28 apresenta um exemplo composto por seis sinais amostrados através desta ferramenta.

Figura 28. Aplicação de visualização OscilloscopeRF

A segunda aplicação a ser utilizada foi o Surge²¹, que utiliza o protocolo de roteamento TinyOs Beaconing.

Esta aplicação originalmente coleta informações a respeito da luminosidade do ambiente. O código padrão foi modificado para que fosse possível monitorar a temperatura através do termistor. Esta aplicação deve ser instalada em todos os nós, inclusive no ponto de acesso.

A diferença é que este último recebe a identificação zero, tornando-se a raiz da topologia em árvore. Foi necessário modificar o tempo de envio dos pacotes, que originalmente é estabelecido em dois segundos: por questões de compatibilidade com os demais aplicativos, configuramos este tempo para apenas um segundo. A visualização dos dados pode ser feita através de uma interface gráfica, conhecida como SurgeView, apresentada na Figura 29.

²¹ Esta aplicação pode ser encontrada na pasta apps/Surge/ do pacote TinyOS.

Figura 29. Interface de visualização do SurgeView

Por fim, a última aplicação utilizada nos testes foi o App, desenvolvida pela Universidade Federal de Minas Gerais [19], que utiliza o protocolo de roteamento PROC para enviar os dados de monitoramento dos nós sensores ao ponto de acesso.

A aplicação é instalada nos nós sensores tomando-se o cuidado de especificar uma identificação única para cada nó sensor.

Para que o protocolo funcione da forma esperada, faz-se necessária uma configuração especial no ponto de acesso.

Este nó é configurado com a aplicação denominada ProcBase, que coordena a criação do *backbone* da rede. Os dados podem ser visualizados através da aplicação de depuração *PROC interactive network debugging interface*.

A interface gráfica desta aplicação pode ser visualizada na Figura 30.

Extraído da referência [19]

Figura 30. Interface de visualização PROC

Os dados também podem ser visualizados no formato de pacotes em todas as aplicações apresentadas, através da aplicação *Listen*. O inconveniente nesse caso é que os dados são escritos em hexadecimal e não há uma visualização gráfica adequada.

4.5 Conclusões

A utilização de uma RSSF no monitoramento de parâmetros de ambientes controlados pode ser estendida a outras aplicações, como é o caso da indústria farmacêutica, de alimentos e aeroespacial.

A caracterização dos principais elementos que constituem uma RSSF e do ambiente é de suma importância, principalmente por se tratar de uma nova aplicação para este tipo de rede.

Foram utilizados alguns trabalhos científicos que direcionaram a realização de alguns testes, com a finalidade de adquirir o conhecimento a respeito da rede utilizada e do ambiente em questão.

Foi possível conhecer a sala limpa e as principais regiões de interesse através do estudo das normas, reuniões com a equipe técnica e visitas, que possibilitaram a escolha da temperatura ambiente como sendo a primeira grandeza física a ser monitorada pela RSSF e a definição dos pontos de monitoramento. A equipe da sala limpa questionou a possibilidade futura de monitorar outros parâmetros ambientais como: a umidade e a luminosidade.

A caracterização da rede foi inicialmente baseada no estudo realizado pela Universidade Federal de Minas Gerais, que apresenta uma taxonomia com os principais tipos de RSSF e os diversos regimes de funcionamento. Este processo foi seguido de testes com os nós sensores em bancada, onde foi possível adquirir o conhecimento necessário para a sua correta operação.

Foram definidos dois tipos de topologia física para a análise do comportamento da rede em ambientes internos e externos, principalmente para verificar o desempenho que pode ser afetado pelas condições do ambiente. Os resultados podem ser acompanhados no próximo capítulo.

Foi realizada também a escolha dos protocolos das camadas de enlace e de rede, a fim de permitir uma avaliação condizente com o regime de funcionamento da rede proposta, bem como as aplicações a serem utilizadas.

Capítulo 5

Avaliação de Desempenho

A avaliação de desempenho de uma RSSF é uma tarefa importante para se conhecer o comportamento da rede num determinado ambiente. Devido às limitações dos atuais simuladores e das características particulares do ambiente em questão, faz-se necessária a execução de uma série de experimentos para se obter um dimensionamento dos fatores que podem influenciar o desempenho da rede.

Não foram alteradas as características físicas do sistema de rádio, ou seja, a antena não foi modificada e os testes apresentam os dispositivos trabalhando em condições normais de uso.

Nas próximas subseções, serão apresentados os resultados dos principais experimentos realizados ao longo deste trabalho.

5.1 Avaliação dos efeitos da primeira zona de Fresnel

Foram realizadas algumas seqüências de testes com a intenção de avaliar o comportamento de um enlace único de rádio em determinados ambientes, com a finalidade de se conhecer o comportamento do sistema de rádio. Iniciamos esta seção apresentando uma análise do comportamento do enlace de rádio em função da taxa média de pacotes recebidos e a intensidade do sinal recebido.

Este teste foi realizado em ambiente externo para avaliar a degradação do sinal recebido devido aos efeitos da zona de Fresnel. O local para a realização dos testes foi escolhido por apresentar dimensões adequadas a este tipo de avaliação, minimizando possíveis efeitos devi-

do às reflexões. As condições climáticas no momento dos testes são descritas a seguir: dia de sol intenso com a temperatura ambiente de 30°C e a umidade relativa do ar em torno de 55%.

Foram utilizados dois nós do tipo Mica2dot modelo MPR500 que trabalham com uma frequência de 915MHz, como visto na Seção 4.4.1. O transmissor foi configurado com uma compilação do sistema operacional TinyOs baseada na aplicação OscilloscopeRF. Esta aplicação envia originalmente dez leituras de luminosidade em cada pacote transmitido. Foi necessário, no entanto, alterar o arquivo de configuração *DemoSensorC.nc*, para que o nó pudesse enviar dados de temperatura.

Durante o processo de gravação, foi inserido o indexador 1 (um), que indica o endereço do nó, como descrito na referência [24].

O nó localizado na base MIB500 foi configurado com a compilação do TinyOS baseada na aplicação TOSBase, onde foi definido o indexador 0 (zero) para este dispositivo.

As medidas foram realizadas a uma distância fixa de 10m entre o transmissor e o receptor, com a intenção de reproduzir as condições apresentadas na avaliação feita por Anastasi et al. [27], tendo como diferencial a utilização dos nós na configuração padrão.

O teste também se diferencia pela avaliação da intensidade do sinal recebido. Para a execução deste teste, foi necessário conectar um condutor no pino RSSI/IF do sistema de rádio CC1000, onde foi possível observar o nível do sinal recebido com o auxílio de um osciloscópio digital.

O sinal apresentado na Figura 31 representa a maior intensidade de sinal recebida, sem que houvesse a interferência dos osciladores de ambos os dispositivos. Neste caso, a intensidade do sinal apresentou um valor de -55,5dBm, que representa a perda de intensidade do sinal recebido em relação à potência do sinal no transmissor, que era de 1mW ou 0dBm.

Figura 31. Sinal amostrado no pino RSSI/IF do chip CC1000

A sequência de testes foi repetida três vezes para cada altura, com um tempo de duração de 180 segundos para cada medida.

A altura dos dispositivos foi alterada obedecendo a seguinte sequência: 0,05m, 0,30m, 0,50m e 0,70m.

Os sensores foram posicionados sobre as plataformas de madeira na disposição *back-to-back*, como pode ser visto na Figura 32. A única variável modificada neste teste foi a altura dos nós em relação ao solo, representada pela letra h .

Figura 32. Representação do posicionamento dos nós Mica2dot

As plataformas foram posicionadas no centro do estacionamento com a finalidade de afastar os dispositivos dos possíveis obstáculos existentes.

O teste foi iniciado com a altura igual a 0,05m, devido à própria estrutura da base MIB500 e à proteção feita para permitir que os motes ficassem próximos ao solo, sem que ocorressem danos aos mesmos.

Os valores da intensidade do sinal recebido na base em função da altura podem ser visualizados na Tabela 10.

Tabela 10 - Variação do RSSI em função da altura dos nós sensores

Altura (m)	RSSI (dBm)
0,05	-
0,30	-82,7
0,50	-75,9
0,70	-74,7

O cálculo teórico da primeira zona de Fresnel para uma distância de 10m revelou que o raio tem 0,904m. De acordo com a teoria apresentada na seção 2.1.2, em um enlace que contempla a visada direta, é necessário ter 60% deste raio livre de obstáculos. Isso corresponde a uma altura de 0,54m da linha de visada em relação ao solo.

É possível observar que a intensidade do sinal recebido (RSSI) sofreu alterações devido à variação da altura, tendo uma grande perda da intensidade do sinal quando os nós estavam posicionados a uma altura de 0,05m em relação ao solo. Neste ponto, o nível de sinal foi confundido com o ruído e ocasionou uma perda significativa de pacotes, pois o sistema de rádio não tem a capacidade de identificar as informações transmitidas. À medida que a altura foi sendo incrementada, o nível de sinal também foi aumentando, atingindo o valor de -82,7dBm a uma altura de 0,30m. Foi possível observar que o número de pacotes se manteve constante, independentemente do acréscimo da altura. O nível do sinal atingiu -75,9dBm a uma altura de 0,50m, tendo pouca variação entre esta altura e a altura limite de 0,70m, que

apresentou uma intensidade de -74,7dBm. Isto comprovou a influência da primeira zona de Fresnel na intensidade do sinal recebido.

O número de pacotes não variou entre a altura de 0,30m e 0,70m, como pode ser observado no Gráfico 4.

Gráfico 4. Perda de pacotes em função da altura dos nós em relação ao solo.

Foram realizados outros dois experimentos para avaliar a taxa de entrega de pacotes em relação a altura. Os testes foram realizados com distâncias variando entre 5 e 20m em dois ambientes distintos, um interno e outro externo, como apresentado na seção 4.4.3. Durante a execução do teste interno, a temperatura ambiente era de aproximadamente 25°C e a umidade relativa do ar estava em torno de 60%. O teste também foi realizado com auxílio da aplicação *OscilloscopeRF*.

O Gráfico 5 apresenta os dados obtidos através de uma sequência de testes composta por três alturas fixas e quatro distâncias pré-determinadas.

Gráfico 5. Avaliação dos efeitos da zona de Fresnel em ambiente interno

Na sequência em que os nós estavam posicionados próximos ao solo, é possível observar uma redução bastante acentuada do número de pacotes recebidos, principalmente para a distância de 5m. Nas demais distâncias à mesma altura, houve um aumento na taxa de entrega de pacotes, devido às características do ambiente: por se tratar de um corredor, é preciso considerar o fenômeno conhecido como canalização, que forma uma espécie de guia de ondas [28]. Desta forma, as ondas de rádio atingiram o receptor através da reflexão nas paredes do corredor. Devido a este fato, os efeitos da zona de Fresnel passaram a ser secundários, não influenciando diretamente a taxa de transmissão.

O segundo teste foi realizado em ambiente externo, onde não havia barreiras próximas. Desta forma, foi possível minimizar os efeitos provocados pelas ondas refletidas. A temperatura ambiente estava próxima a 27°C, e a umidade relativa do ar, em torno de 65%.

O Gráfico 6 apresenta um comportamento próximo ao esperado devido à obstrução de parte da primeira zona de Fresnel, como visto no primeiro experimento. Quando os nós foram

posicionados no mesmo nível do solo, a primeira zona de Fresnel foi reduzida a 50% da sua área original. O sistema de rádio, por sua vez, só conseguiu entregar os pacotes até a distância de 5m, tendo neste caso uma média de 78 pacotes entregues. Com o acréscimo da distância entre os nós, a taxa de transmissão foi reduzida a zero.

Gráfico 6. Influência da zona de Fresnel em ambiente externo.

Nas demais medidas realizadas o número de pacotes recebidos apresentou um comportamento constante.

Através desta seqüência de testes, é possível observar o comportamento do sistema de rádio padrão da plataforma Mica2dot. Este comportamento indica que este sistema de rádio apresenta um funcionamento adequado para alturas superiores a 0,30m, para ambientes internos e externos.

5.2 Monitoramento da sala limpa

A Sala Limpa da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo foi escolhida como um caso a ser estudado, devido à necessidade de se conhecer a variação de alguns parâmetros ambientais em suas dependências.

Para tanto, foi escolhido inicialmente o monitoramento de um único parâmetro através de quatro nós baseados na plataforma Mica2dot. Estes nós foram posicionados de acordo com a descrição feita na seção 4.3, e foram utilizados para monitorar a variação da temperatura nos quatro ambientes.

5.2.1 Monitoramento do RSSI em função do número de pacotes

O RSSI é um parâmetro importante para se conhecer a intensidade do sinal recebido no ponto de acesso. Ele é medido em dBm e pode ser de grande valor para auxiliar no posicionamento mais adequado dos nós em um ambiente, principalmente se forem internos, onde as ondas eletromagnéticas se propagam por múltiplos caminhos.

O monitoramento deste parâmetro foi realizado no ponto de acesso com o auxílio de um osciloscópio digital. Os dados foram coletados no terminal RSSI/IF do *chip* CC1000, que é responsável pelo sistema de rádio do Mica2dot.

A configuração da rede foi mantida para avaliar a possível perda de pacotes ao longo do teste. Para tanto, utilizamos a aplicação *OscilloscopeRF* com a taxa de transmissão ajustada em 0,2Kbps, totalizando a transmissão de 146 pacotes. Foram feitas três medidas para cada um dos pontos, com duração de 180s cada. A temperatura ambiente e a umidade relativa não sofreram variações, ficando em 21°C e 74% na sala de caracterização.

A Tabela 11 apresenta a intensidade máxima do sinal recebido dos quatro nós dispostos na sala limpa, no momento em que não havia movimentação de pessoas na sala.

Tabela 11 - Valor do RSSI para cada localidade da sala limpa

Local	RSSI (dBm)
Litografia	-73,9
Fornos	-75,1
Eletrodeposição	-77,5
Caracterização	-63,0

O teste foi idealizado com a finalidade de avaliar a perda de pacotes pelo ambiente. Para isso, os testes foram realizados em cada ponto da sala de forma isolada.

Desta forma, foi possível avaliar o comportamento do enlace de rádio sem a interferência dos demais nós da rede.

O Gráfico 7 apresenta a variação do número de pacotes recebidos no ponto de acesso.

É possível observar que a perda de pacotes em algumas regiões foi ocasionada exclusivamente pela movimentação das pessoas no interior da sala.

No momento em que alguns pesquisadores chegaram e se dirigiram aos seus postos de trabalho, a intensidade do sinal começou a variar de tal maneira que em alguns momentos chegou a ser confundida com o ruído, ocasionando assim a perda de alguns pacotes.

Gráfico 7. Pacotes recebidos pelo PA com a movimentação de pessoas

Durante os testes, haviam oito pesquisadores distribuídos nas regiões da sala limpa, evidenciando a normalidade das condições de uso da sala.

5.2.2 Monitoramento da temperatura ambiente da sala limpa

O monitoramento da temperatura ambiente foi realizado nas dependências da sala limpa, como apresentado na seção 4.3. O experimento teve a duração de 24 horas, cobrindo períodos de atividade e inatividade da sala. O Gráfico 8 apresenta a variação da temperatura nos quatro ambientes de interesse. É possível observar uma redução na temperatura dos quatro ambientes durante o período de inatividade, sendo que a temperatura não era a mesma nos quatro ambientes devido às dimensões dos mesmos. Este fato revela que o sistema de ar condicionado da sala limpa não consegue manter uma mesma temperatura em todos os ambientes da sala.

Gráfico 8. Variação da temperatura nos ambientes da sala limpa

Durante o período de atividade, a temperatura da sala sofreu elevação devido às atividades realizadas no seu interior, e também devido ao trânsito de pessoas no local. O nó localizado na região B apresentou um pico de temperatura de aproximadamente 25°C, devido ao uso dos fornos.

5.2.3 Variação do número de pacotes recebidos

Durante o teste, foi possível observar uma variação no número de pacotes recebidos pela base. Esta redução de pacotes ocorreu devido à movimentação dos pesquisadores nos ambientes da sala, como visto anteriormente, sendo que o sinal das regiões A, B e C apresentavam uma intensidade menor se comparada ao nó posicionado na região D, como representado na Tabela 11. Basta lembrar que este último nó está localizado no mesmo ambiente onde a base estava instalada tendo visada direta.

O Gráfico 9 apresenta o número de pacotes recebidos por nó sensor.

Gráfico 9. Número de pacotes recebidos por nó sensor durante 24 horas

O nó localizado na região da litografia apresentou uma redução de aproximadamente 9% dos pacotes que deveriam ter sido entregues.

5.2.4 Duração das baterias

De acordo com o estudo apresentado na referência [67], é possível estimar a durabilidade das baterias de acordo com o *Duty Cycles*²² e a capacidade das baterias utilizadas nos testes. Foram utilizadas baterias de 2100 mAh e o *Duty Cycles* foi ajustado em 1%. É possível observar através do Gráfico 10 que a bateria pode apresentar uma durabilidade de aproximadamente 12 meses neste modo de operação.

²² *Duty Cycles* é o regime de funcionamento do dispositivo.

Tempo de Vida x Capacidade da Bateria

Gráfico 10. Tempo de vida da bateria para um Duty Cycles de 1%

5.3 Avaliação dos protocolos de roteamento TOSB e PROC

Esta seção apresenta a avaliação dos protocolos de roteamento TOSB e PROC no ambiente proposto.

Os protocolos foram avaliados através dos resultados obtidos para as seguintes métricas: taxa de entrega de pacotes por nó e consumo médio de energia.

5.3.1 Número de pacotes recebidos

Comparamos os protocolos TOSB e PROC no ambiente da sala limpa com a finalidade de analisar seu comportamento diante das dificuldades oferecidas pelo ambiente em questão.

Foram feitas algumas modificações no código das aplicações para que ambas funcionassem a uma mesma potência de transmissão e a uma mesma taxa de entrega de pacotes. A potência de transmissão foi ajustada em 0,01mW, o que equivale a uma perda de -20dBm em relação a 1mW; a taxa de transmissão foi ajustada para um pacote por segundo.

Os dispositivos foram posicionados nos mesmos pontos indicados nas seções anteriores. Cada teste teve a duração de quatro horas, e os mesmos foram repetidos por duas vezes.

Ao avaliar o funcionamento dos protocolos, observamos que a aplicação que utilizava o protocolo TOSB entregou os dados dos quatro nós diretamente ao ponto de acesso. Por outro lado, a aplicação baseada no protocolo PROC realizou o roteamento dos pacotes. A comparação dos protocolos pode ser acompanhada através do Gráfico 11.

Gráfico 11. Comparação entre os protocolos TOSB e PROC

O PROC efetuou o roteamento no ambiente, trabalhando com a mesma potência de transmissão e com o mesmo posicionamento dos nós.

O TOSB não efetuou o roteamento, pois o pacote *beacon* atingiu todos os nós presentes no ambiente, fazendo com que os nós entregassem os dados diretamente à base.

Observamos também que a base estava dentro da área de cobertura de todos os nós da sala, tendo como variação a intensidade do sinal transmitido por cada nó sensor e o trânsito de pessoas.

O protocolo TOSB apresentou uma entrega de pacotes por nó mais constante, se comparado ao protocolo PROC no ambiente proposto.

5.3.2 Consumo de energia

Analizamos também o consumo de energia de ambos os protocolos durante o período de testes. O Gráfico 12 apresenta o consumo médio de cada nó sensor e deixa evidente que o protocolo PROC apresenta um consumo levemente maior nesta condição.

Gráfico 12. Consumo de energia entre os protocolos TOSB e PROC

Este fato pode ser justificado pela ausência do roteamento quando a rede estava configurada com o protocolo TOSB, o que pode ter proporcionado um menor consumo de energia.

5.4 Discussão dos resultados

A análise do desempenho inicialmente foi realizada em ambiente externo, o que permitiu a verificação do comportamento da rede através da redução de possíveis interferências eletromagnéticas e barreiras físicas, minimizando também possíveis reflexões do sinal transmitido. Este ambiente externo possibilitou a avaliação da taxa de entrega de pacotes em diversas condições, onde constatamos que não há variação desta grandeza ao posicionar os nós a uma altura igual ou superior a 0,30m a uma distância máxima de 20m. No entanto, foi possível observar que a intensidade do sinal recebido na base variou com a distância e a altura dos nós, devido aos efeitos da primeira zona de Fresnel. Os valores relacionados com a taxa de entrega de pacotes apresentados neste trabalho diferem dos dados apresentados por Anastasi et al. [27]. Os testes foram realizados de forma a manter as características originais do sistema de rádio do Mica2dot.

O desempenho do sistema de rádio também foi avaliado em ambientes internos, onde foi observado um comportamento imprevisível do RSSI. Este fato está relacionado ao desvanecimento do sinal devido às reflexões nas paredes e objetos da sala. Também foi possível observar que, ao posicionar os dispositivos a uma altura de 0,05m em relação ao solo, os mesmos continuavam a enviar pacotes em um número bem superior ao observado nas mesmas condições no ambiente externo.

Durante os testes na sala limpa, o valor do RSSI apresentou-se constante na ausência de pessoas na sala. Este parâmetro apresentou grandes variações quando havia o trânsito de

peessoas no ambiente, chegando a ser confundido com o ruído em muitas ocasiões, ocasionando a perda de pacotes.

Foi realizado o monitoramento da temperatura ambiente da sala limpa, que possibilitou conhecer a variação da temperatura ambiente de forma simultânea em quatro regiões distintas. Os dados coletados apontam a possibilidade de monitorar os micro-climas existentes nestes ambientes.

A conclusão desta etapa indica que a utilização de uma RSSF no monitoramento de salas limpas pode auxiliar no controle de diversos parâmetros ambientais que apresentam grande relevância nos processos realizados nestes ambientes.

A avaliação dos protocolos de roteamento aponta para a possibilidade de se construir redes com tamanhos maiores e mais confiáveis. No ambiente em questão, o protocolo padrão do sistema operacional TinyOs não efetuou o roteamento, pois todos os nós estavam dentro do alcance de rádio do nó raiz, ou seja, todos os nós receberam o pacote *beacon* e acabaram por encaminhar os seus dados diretamente ao ponto de acesso. O protocolo de roteamento PROC apresentou um comportamento diferenciado, realizando o roteamento e mostrando-se mais sensível as variações do ambiente. Ambos os protocolos apresentaram uma boa taxa de entrega de pacotes, embora o protocolo PROC tenha consumido mais energia. Desse modo, é possível concluir que a utilização de um protocolo de roteamento pode trazer grandes benefícios para a implementação de uma RSSF em ambientes controlados. Estudos apresentados por Macedo et al. [16], baseados em simulação, apontam um desempenho superior do protocolo PROC em redes compostas por um grande número de sensores.

Capítulo 6

Conclusões

A realização das etapas desse trabalho contribuiu para o conhecimento do comportamento de uma RSSF aplicada no monitoramento ambiental de uma sala limpa.

O processo de caracterização permitiu a definição do *hardware* e do *software* necessário para realizar o monitoramento da temperatura no ambiente proposto.

A sequência de experimentos realizados na etapa de análise de desempenho permitiu verificar que a intensidade do sinal recebido sofre variações quando a altura dos nós e a distância entre eles são modificadas, sendo que esta variação está diretamente relacionada com a primeira zona de Fresnel. Esta relação foi avaliada em ambiente externo e os nós estavam dispostos de forma a terem visada direta.

Essa grandeza também foi avaliada em ambiente interno, apresentando um comportamento não determinístico. Foi possível chegar à conclusão de que este parâmetro ajuda no posicionamento dos nós, uma vez que a análise do mesmo permitiu a localização dos pontos que apresentavam maior intensidade de sinal.

Os testes realizados para verificar a influência da zona de Fresnel na taxa de entrega de pacotes revelou que, em ambiente interno ou externo, a taxa só é alterada quando a amplitude do sinal recebido é reduzida a valores inferiores ao nível do ruído detectado pelo receptor, ou em situações em que a intensidade do sinal é inferior ao mínimo detectado pelo sistema de rádio CC1000. Este valor, para a frequência de 915MHz, é de -105dBm , para um BER (Bit Error Rate) de 10^{-3} .

Com base nestes experimentos, foi possível concluir que a taxa de entrega de pacotes é afetada quando não é possível garantir que sessenta por cento do raio da primeira zona de

Fresnel esteja livre de obstáculos, ou seja, quando os nós estão posicionados próximos ao solo em ambiente externo.

Não foi encontrada uma relação direta entre a taxa de entrega de pacotes e a obstrução da primeira zona de Fresnel nos ambientes internos, inclusive no experimento realizado no corredor, onde os dispositivos dispunham de visada direta.

A movimentação de pessoas e objetos nos ambientes internos realmente afetam a intensidade do sinal, tendo uma relação com a redução do número de pacotes recebidos no ponto de acesso.

Foi possível concluir que a utilização de roteamento pode aumentar a resistência a falhas, principalmente aquelas ocasionadas pela queda da intensidade do sinal, devido ao deslocamento de pessoas e objetos no ambiente.

Não foi possível analisar experimentalmente as regras de aplicação do protocolo PROC, devido ao pequeno número de dispositivos disponíveis para os testes.

A análise do monitoramento de temperatura dos ambientes da sala limpa foi esclarecedor, pois permitiu avaliar a capacidade real dos nós de monitorar tal grandeza física, de forma a permitir a visualização da variação da temperatura instantânea em cada ponto de monitoramento.

Por fim, a utilização de uma RSSF com as características apresentadas neste trabalho pode gerar benefícios e estender-se tanto na utilização de salas limpas como também em ambientes controlados, presentes na indústria farmacêutica, de alimentos e aeroespacial.

6.1 Contribuições

A elaboração desta dissertação contribuiu para o desenvolvimento e a realização de experimentos com a RSSF na Universidade de São Paulo. Foi criada uma bancada para a realização dos testes e desenvolvida algumas rotinas para assegurar o processo de gravação das aplicações nos dispositivos.

Foram feitas medições para analisar a influência da primeira zona de Fresnel na taxa de transmissão de pacotes através da variação da altura e da distância dos nós, ampliando os testes realizados por Anastasi et al. [27].

Foram instalados e configurados o simulador TOSSIM e o NS-2 em uma estação de trabalho, com a finalidade de realizar simulações a respeito do funcionamento das RSSF.

Foi possível caracterizar e instalar uma RSSF na sala limpa do laboratório de Sistemas Integráveis da USP, onde foram realizados experimentos com a finalidade de avaliar o desempenho dos protocolos de roteamento TOSB e PROC, o estudo dos fatores que afetam o funcionamento da RSSF em ambientes controlados, e uma estrutura capaz de monitorar parâmetros ambientais em diversos pontos de forma instantânea.

Alguns resultados parciais foram apresentados em conferências nacionais e internacionais, e a relação dos artigos está descrita no apêndice A.

6.2 Trabalhos Futuros

- Avaliação experimental da escalabilidade e das regras de aplicação do protocolo PROC através da utilização do laboratório MoteLab, que é disponibilizado pela Universidade de Harvard através da Internet.
- Análise experimental das vantagens e desvantagens da utilização da plataforma TmoteSky, devido principalmente à mudança do sistema de rádio e do microcontrolador. Outro aspecto importante é a análise da coexistência das RSSF com as atuais redes WLAN 802.11b/g e WPAN 802.15, uma vez que estas tecnologias de rede sem fio utilizam a mesma faixa de frequência.
- Verificar a viabilidade de construir uma rede de sensores que tenha a capacidade de oferecer uma plataforma para testes de novas aplicações por parte da comunidade científica nos moldes dos projetos Motelab e Mirage.
- Desenvolvimento de uma nova plataforma de nós sensores, implementando a capacidade de processamento de sinais já disponível em diversos microcontroladores.
- Implementar um módulo no simulador NS-2, capaz de simular o funcionamento de uma RSSF, composta por dispositivos que utilizam o sistema de rádio CC1000 e CC2420.
- Avaliação do sistema operacional TinyOs versão 2 nas plataformas Mica2, Mica2dot e TmoteSky.

Referências Bibliográficas

- [1] CROW, B.P.; Widjaja, I.; Kim, L.G.; Sakai, P.T., **IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks**, Communications Magazine IEEE, Vol. 35, p.116-126, Setembro, 1997.

- [2] SHNAYDER, Victor; Chen, Bor-rong; Lorincz, Konrad; Fulford-Jones, Thaddeus R. F.; Welsh, Matt, **Sensor Networks for Medical Care**, Harvard University, Abril, 2005. (Relatório Técnico TR-08-05).

- [3] FULFORD-JONES, Thaddeus R. F.; Wei, Gu-Yeon; Welsh, Matt, **A Portable, Low-Power, Wireless Two-Lead EKG System**, 26th IEEE EMBS Ann. Int'l Conf, 2004.

- [4] KRISHNAMURTHY, L.; Adler, R.; Buonadonna, P.; Chhabra, J.; Flanigan, M.; Kushalnagar, N.; Nachman, L.; Yarvis, M., **Design and deployment of industrial sensor networks: experiences from a semiconductor plant and the north sea**, In *Proceedings of the 3rd international Conference on Embedded Networked Sensor Systems* (San Diego, California, USA). SenSys '05. ACM Press, New York, NY, p. 64-75, Novembro, 2005.

- [5] THELEN, John; Goense, Daan; Langendoen, Koen, **Radio Wave Propagation in Potato Fields**, 1st workshop on Wireless Network Measurements, WinMee 2005, Abril, 2005.

- [6] SIKKA, Pavan; Corke, Peter; Overs, Leslie, **Wireless sensor devices for animal tracking and control**, Embedded Networked Sensors, Novembro, 2004.
- [7] DELIN, K. A.; Jackson, Shannon P.; Burleigh, Scott C.; Johnson, David W.; Woodrow, Richard R.; Britton, Joel T., **The JPL Sensor Webs Project: Fielded Technology**, Space Mission Challenges for IT Proceedings, Annual Conference Series, 2003.
- [8] SZEWCZYK, Robert; Polastre, J.; Mainwaring, A.; Culler, D., **Lessons From a Sensor Network Expedition**, in Proc. 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN), p.307-322, Janeiro, 2004.
- [9] WERNER-ALLEN, G.; Johnson ,J.; Ruiz, M.; Lees J.; Welsh, Matt, **Monitoring Volcanic Eruptions with a Wireless Sensor Network**, European Workshop on Sensor Networks, Janeiro, 2005.
- [10] MECHITOV, K.; Kim, W.; Agha G.; Nagayama, T., **High-Frequency Distributed Sensing for Structure Monitoring**, First International Workshop on Networked Sensing Systems, 2004.
- [11] AKYILDIZ, Ian F.; Pompili, Dario; Melodia, Tommaso, **Underwater acoustic sensor networks: research challenges**, Ad Hoc Networks (Elsevier), 2005.
- [12] YANG, Xiping; Ong, Keat G.; Dreschel, William R.; Zeng, Kefeng; Mungle, Casey S.; Grimes, Craig A., **Design of a Wireless Sensor Network for Long-term, In-Situ Monitoring of an Aqueous Environment**, p. 455-472, Sensors, 2002.

- [13] VASILESCU, I.; Kotay, K.; Rus, D.; Dunbabin, M.; Corke, P., **Data Collection, Storage, and Retrieval with an Underwater Sensor Network**, 3rd international conference on embedded networked sensor, 2005.
- [14] FEDERAL STANDARD 209E, **Airborne Particulate Cleanliness Classes in Cleanrooms and Clean Zones**, Setembro, 1992.
- [15] National Science Foundation, Report of the National Science Foundation Workshop on Fundamental Research in Networking, <http://www.cs.virginia.edu/~jorg/workshop>, Janeiro, 2004.
- [16] RUIZ, L.B.; Correia, L. H. A.; Vieira, L.F.M; Macedo, D.F; Nakamura E.F.; Figueiredo, C.M. S.; Vieira, M.A.M.; Habib, E. B.; Câmara, D.; Loureiro A. A. F.; Nogueira, J. M. S.; Silva, D. C. Jr.; Fernandes, A. O., **Arquiteturas para Redes de Sensores Sem Fio**, SBRC, 2004.
- [17] MACEDO, D. F.; Correia, L. H. A.; Santos, Aldri L. dos; Loureiro, A. A.; Nogueira, J. M., **A pro-active routing protocol for continuous data dissemination wireless sensor networks**, In *10th IEEE Symposium on Computer and Communications (ISCC)*, p. 361-366, Junho, 2005.
- [18] MACEDO, Daniel F.; Correia, Luiz H. A.; Santos, Aldri L.; Loureiro, Antônio A. F.; Nogueira, José Marcos S., **Avaliando aspectos de tolerância a falhas em protocolos de roteamento para redes de sensores sem fio**, Anais do Workshop de Tolerância a Falhas (SBRC), 2005.

- [19] MACEDO, Daniel Fernandes, **Um Protocolo de Roteamento para Redes de Sensores Sem Fio Adaptável por Regras de Aplicação**, 2006, 97 f., Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação), Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2006.
- [20] WARNEKE, B.; Last, M.; Liebowitz, B.; Pister, K. S. J., **Smart Dust: communicating with a cubic-millimeter computer**, Computer, Vol. 35, p.44-51, 2001.
- [21] WARNEKE, B.; Pister, K.S.J., **An ultra-low energy microcontroller for Smart Dust wireless sensor networks**, Solid-State Circuits Conference, IEEE International, Vol.1, p.316-317, 2004.
- [22] STALLINGS, William, **Wireless Communications and Networking**, Prentice Hall, 2001.
- [23] MISRA, Devendra K., **Radio-Frequency and Microwave Communication Circuits Analysis and Design**, Wiley-Interscience, 2001.
- [24] User Manual: MPR – Mote Processor Radio Board, MIB - Mote Interface, Programming Board User's Manual, Crossbow Technology Inc., 2005.
- [25] LEE, W. C. Y., **Mobile Communications Design Fundamentals**, Indianapolis, EUA, Howard W. Sams & Co., p. 66, 1986.

- [26] GRIMMER, Michael, **Considerations for Radio Communications Links**, Crossbow Inc., 2005.
- [27] ANASTASI, G.; Falchi, A.; Passarella, A.; Conti, M.; Gregori E., **Performance Measurements of Motes Sensor Networks**, ACM/IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile System, Veneza, Itália, Outubro, 2004.
- [28] ALENCAR, Marcelo Sampaio de, **Sistemas de Comunicações**, Ed. Érica, São Paulo, 2001.
- [29] SARKAR, T.K; Zhong, Ji; Kyungjung, Kim; Medouri, A.; Salazar-Palma, M, **A survey of various propagation models for mobile communication**, Antennas and Propagation Magazine, IEEE, Vol. 45, p. 51-82, Junho, 2003.
- [30] BARANAUSKAS, Vitor, **Efeitos das Radiações Eletromagnéticas Emitidas pela Telefonia Celular na Saúde Humana**, Caderno Jurídico, Escola Superior do Ministério Público do Estado de São Paulo, Vol. 6, nº2, p. 245-256, Abril/Junho, 2004.
- [31] KALIDINDI, R.; Ray, L.; Kannan, R.; Iyengar., S., **Distributed Energy aware MAC layer for Wireless Sensor Networks**, Technical report, Lousianan State University, 2003.

- [32] RAJENDRAN, Venkatesh; Obraczka, Katia; Garcia-Luna-Aceves, J. J., **Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks**, *Wireless Networks*, Vol.12, p.63-78, Fevereiro, 2006.

- [33] BHARGHAVAN, V.; Demers, A.; Shenker, S.; Zhang, L., **MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LANs**, In *Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications*, ACM Press, p.212-225, Londres, Inglaterra, 1994.

- [34] POLASTRE, Joseph; Hill, Jason; Culler, David, **Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks**, In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems Sensys*, p.95-107, ACM Press, Baltimore, EUA, Novembro, 2004.

- [35] YE, W.; Heidemann, J.; Estrin, D., **An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks**. In *Proceedings of the IEEE Infocom*, p.1567-1576, New York, USA, 2002.

- [36] DAM, Tijs Van; Langendoen, Koen, **An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks**. In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, p.171-180. ACM Press, Califórnia, EUA, 2003.

- [37] WOO, A.; Culler, D. E., **A transmission control scheme for media access in sensor networks**. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, p.221-235, ACM Press, Roma, Itália, 2001.

- [38] LEVIS, Philip; Madden, Sam; Polastre, Joseph; Szewczyk, Robert, Whitehouse, Kamin; Woo, Alec; Gay, David; Hill, Jason; Welsh, Matt; Brewer, Eric; Culler, David, **TinyOS: An Operating System for Sensor Networks**, IEEE INFOCOM, 2002.
- [39] LEVIS, Philip; Lee, Nelson; Welsh, Matt; Culler, David, **TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications**, In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, p.126-137, Los Angeles, California, EUA, 2003.
- [40] DUNKELS, A.; Grönvall B.; Voigt T., **Contiki - a Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors**, In Proceedings of the First IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors, p.455-462, Flórida, EUA, Novembro, 2004.
- [41] BHATTI, S.; Carlson J.; Dai H.; Deng J.; Sheth A.; Shucker B.; Gruenwald C.; Torgenson A.; Han R., **Mantis Os: An Embedded Multithreaded Operating System for Wireless Micro Sensor Plataforms**, ACMKluwer Mobile Networks & Applications (MONETS) Journal, Special Issue on Wireless Sensor Networks, Agosto, 2005.
- [42] ALMEIDA, Vinícius C. de; Vieira, Luiz Filipe M.; Vitorino, Breno A. D., Vieira, Marcos Augusto M.; da Silva Jr., Diógenes C. ; Fernandes, Antônio O.; Coelho Jr., Claudionor Nunes, **Sistema Operacional YATOS para Redes de Sensores sem Fio**, Workshop de Sistemas Operacionais 2004, Salvador, Bahia, Agosto, 2004.

- [43] GAY, David; Levis, Philip; Behren, Robert von; Welsh, Matt; Brewer, Eric; Culler David, **The nesC Language: A Holistic Approach to Network Embedded Systems**, In *Proceedings of the ACM SIGPLAN 2003 Conference on Programming Language Design and Implementation (PLDI)*, ACM Press, p.1-11, San Diego, Califórnia, EUA, 2003.
- [44] WERNER-ALLEN, Geoffrey; Swieskowski, Patrick; Welsh, Matt, **MoteLab: A Wireless Sensor Network Testbed**, Special Track on Platform Tools and Design Methods for Network Embedded Sensors (SPOTS), Abril, 2005.
- [45] CHUN, B.N.; Buonadonna, P.; AuYoung, A.; Ng, Chaki ; Parkes, D.C.; Shneidman, J.; Snoeren, A.C.; Vahdat, A, **Mirage: A Microeconomic Resource Allocation System for Sensornet Testbeds**, In *Embedded Networked Sensors, 2005. EmNetS-II. The Second IEEE Workshop*, p. 19-28, Maio, 2005.
- [46] MULTIHOPLQI, <http://www.tinyos.net/tinyos-1.x/tos/lib/MultiHopLQI>, Junho, 2006.
- [47] Data Sheet, **TmoteSky Low Power Wireless Sensor Module**, Moteiv Corporation, Junho, 2006.
- [48] Moteiv Application Note 001: **Changes Between TmoteSky and Telos**, Moteiv Corporation, Março, 2005.
- [49] DELIN, K.A.; Jackson, S.P., **The Sensor Web: A New Instrument Concept**, *SPIE's Symposium on Integrated Optics*, San Jose, CA, EUA, Janeiro, 2001.

- [50] DELIN, K.A.; Harvey, R.P.; Chabot, N.A.; Jackson, S.P.; Adams, Mike; Johnson, D.W.; Britton, J.T., **Sensor Web in Antarctica: Developing an Intelligent, Autonomous Platform for Locating Biological Flourishes in Cryogenic Environments**, *34th Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, TX, EUA, Março, 2003.

- [51] GREEN, D. B.; Obaidat, M. S., **An Accurate Line of Sight Propagation Performance Model for Ad-Hoc 802.11 Wireless Lan (WLAN) Devices**, *IEEE International Conference on Communications*, Vol. 5, p. 3424-3428, New Jersey, EUA, 2002.

- [52] PARDO, J.M. Molina Garcia; Sala, A. Martinez; Delgado, M.V. Bueno; Lopez, E. Egea; Llacer, L. Juan; Haro, J. García, **Channel Model at 868 MHz for Wireless Sensor Networks in Outdoor Scenarios**, *International Workshop on Wireless Ad-hoc Networks*, Universidade da Inglaterra, Inglaterra, 2005.

- [53] CERPA, Alberto; Busek, Naim; Estrin, Deborah, **SCALE: A tool for Simple Connectivity Assessment in Lossy Environments**, Los Angeles: Universidade da Califórnia, EUA, Setembro, 2003. (Relatório Técnico #21).

- [54] LEVIS, Philip; Lee, Nelson, **Tossim: A simulator for tinyos networks**, *Manual Técnico*, Setembro, 2003.

- [55] NS-2 simulator, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> , Junho, 2006.

- [56] AVR Microcontroller Atmega 128L Reference Manual, Atmel Corporation, Novembro, 2004.
- [57] Chipcon CC1000 Data Sheet, Chipcon Corporation, 2005.
- [58] RIOS, Luis Gonzaga; Perri, Eduardo Barbosa, **Engenharia de Antenas**, Edgard Blücher, 2002.
- [59] MTS/MDA Sensor and Data Acquisition Board User's Manual, Crossbow Technology Inc., 2005.
- [60] Getting Started Guide, Crossbow Technology Inc., Setembro, 2005.
- [61] CABRINI, Fábio H.; Florido, Ivan Roca; kofuji, Sergio Takeo, **Monitoramento de Temperatura Utilizando Redes de Sensores Sem Fio em Ambientes Controlados**, 3º Contecsi, p.32, São Paulo, Brasil, Maio, 2006.
- [62] HÁC, Anna, **Wireless Sensor Network Designs**, Wiley, 2003.
- [63] CALLAWAY, Edgar H., **Wireless Sensor Networks : architectures and protocols**, Auerbach, 2003.
- [64] TANENBAUM, Andrew S., **Redes de Computadores**, 4ª edição, Campus, 2003.

- [65] ZIOUVA, Eustathia; Antonakopoulos, Theodore, **CSMA/CA Performance under High Traffic Conditions: Throughput and Delay analysis**, Computer Communications, 2002.

- [66] FLORIDO, Ivan Roca; Cabrini, Fábio Henrique; Esquiagola, John; Paredes, Jenny; Morais, Fernando; Lieutaud, Jean; Kofuji, Sergio Takeo, **Monitoramento Ambiental de Salas Limpas através do uso de Redes de Sensores Sem Fio**, Ibersensor, Montevideu, Uruguai, Setembro, 2006.

- [67] Power Analysis, www.xbow.com/Support/Support_pdf_files/PowerManagement.xls, Crossbow Technology Inc., Setembro, 2006.

Apêndice A

Lista de Publicações

No decorrer do período de elaboração desta dissertação de mestrado, foram apresentados os seguintes artigos em conferências nacionais e internacionais, relatando alguns resultados parciais:

1. CABRINI, Fábio H.; Florido, Ivan Roca; Kofuji, Sergio Takeo, **Monitoramento de Temperatura Utilizando Redes de Sensores Sem Fio em Ambientes Controlados**, 3º Contecsi, página 32, São Paulo, Brasil, Maio, 2006.
2. FLORIDO, Ivan Roca; Cabrini, Fábio Henrique; Esquiagola, John; Paredes, Jenny; Morais, Fernando; Lieutaud, Jean; Kofuji, Sergio Takeo, **Monitoramento Ambiental de Salas Limpas através do uso de Redes de Sensores Sem Fio**, Ibersensor, Montevideú, Uruguai, Setembro, 2006.

Anexo

Regras para a correta utilização dos nós sensores

Instrumentos e acessórios necessários

- Base de borracha previamente conectada ao fio terra;
- Pulseira anti-estática.

Roteiro

- Verifique se a porta paralela do computador está no modo SPP;
- Os cabos paralelo e serial devem estar em boas condições de uso, seguindo as especificações do fabricante;
- Qualquer atividade relacionada à gravação dos nós sensores será realizada sobre a base de borracha e o pesquisador deverá utilizar a pulseira anti-estática;
- Os dispositivos devem ser colocados em embalagens anti-estática e guardados nas respectivas caixas após a utilização;
- Nenhum cabo (Serial, Paralelo e Alimentação) pode estar conectado a base no momento da conexão do nó sensor;
- Após a conexão do nó sensor à base, conecte os cabos corretamente de acordo com a seguinte ordem: Serial, Paralelo e Alimentação.

Observação: O não cumprimento destas recomendações pode danificar permanentemente os nós sensores Mica2 e Mica2dot.