

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Técnicas de Controle de Potência
para Protocolos MAC em
Redes de Sensores Sem Fio

Luiz Henrique Andrade Correia

Belo Horizonte

24 de Novembro de 2006

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Técnicas de Controle de Potência para Protocolos MAC em Redes de Sensores Sem Fio

Luiz Henrique Andrade Correia

Belo Horizonte

24 de Novembro de 2006

Luiz Henrique Andrade Correia

**Técnicas de Controle de Potência
para Protocolos MAC em
Redes de Sensores Sem Fio**

Tese apresentada ao Curso de Pós-graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Ciência da Computação.

Belo Horizonte

24 de novembro de 2006

À glória de
Deus,
à minha esposa
Maria,
à minha filha
Alice,
aos meus pais
Mário e Aparecida,
às minhas irmãs
Lucinda e Lúcia,
à minha vó
Maria (em memória) e
aos meus amigos
Daniel, Aldri, Linnyer e José Marcos ...

Agradecimentos

Agradeço a *Deus* por trilhar pelo caminho do conhecimento, pelo apoio nos momentos mais difíceis, por colocar seus anjos em meu caminho e por possibilitar o êxito em mais esta missão.

À minha família que soube compreender os meus momentos de angústia, minha ausência e algumas vezes até mesmo a minha omissão. À minha esposa *Maria* que sempre me apoiou nas minhas decisões, mesmo que isso mudasse completamente nossas vidas. Agradeço a ela pelos sacrifícios, orações e promessas para que este trabalho fosse concretizado. À minha filha *Alice* que desde pequena me viu trabalhando nesse negócio de “tese” e soube entender a minha ausência e incentivar a terminar este trabalho. À minha mãe *Aparecida* que sempre foi o meu porto seguro, que é exemplo de docente dedicada e que muito me apoiou durante os meus estudos. Às minhas irmãs *Lucinda* e *Lucia* que me acolheram nas suas casas, foram minhas amigas e confidentes. Ao meu cunhado *Júlio César* (em memória) pelo incentivo de ingressar na vida acadêmica e pelo apoio de cursar o doutorado. À minha avó *Maria* que infelizmente não alcançou o final deste trabalho, mas que com certeza deve estar feliz e zelando por nós. Aos meus amigos e “anjos” da guarda *Daniel Macedo* e *Aldri* que sempre acreditaram no meu trabalho, que foram meus “comparsas” nas publicações e na execução de novas idéias. Agradeço a vocês pela confiança, pela atenção, pelas várias revisões do trabalho, pela paciência e amizade de sempre. Ao meu amigo *Daniel Andrade* (Daniacs) pelo suporte no desenvolvimento deste trabalho, pelo esforço e dedicação.

À amiga e professora *Linnyer* pelo tema de meu trabalho, pelo incentivo, pela confiança, pelo apoio logístico oferecido e principalmente por acreditar que poderíamos realizar este trabalho.

Ao meu amigo e orientador *José Marcos* pelo apoio, pelas decisões tomadas nesses anos de trabalho, pela imensa paciência até o término do trabalho, pelas revisões, pelas palavras de incentivo, pela confiança e por me ensinar a pesquisar.

No início do doutorado conheci o professor *Loureiro* que em suas aulas de PAA dizia que deveríamos vestir um boné com a inscrição “Pesquisador”, que não deveríamos nos acomodar e sempre procurar avançar o conhecimento nas diversas áreas da computação. Talvez naquela época não tivesse compreendido a profundidade de suas palavras, mas hoje compartilho de suas idéias e agradeço pelo incentivo e colaboração em meus trabalhos.

Aos professores do DCC/UFMG a minha gratidão e o reconhecimento de seus esforços na formação de novos pesquisadores. Um agradecimento especial ao

professor *Newton José Vieira* por sua dedicação, atenção e colaboração na minha formação.

Ao pessoal do laboratório VERLab pelo apoio nos experimentos com mobilidade, principalmente ao professor *Mário Montenegro* e ao colega *Pedro Shiroma*.

Aos meus amigos e colegas *Kíssia, Silvana, Gabriela, Umberto e Júlio* pelas horas de convivência e estudos, pelo carinho, dedicação, amizade, companheirismo e superação de momentos difíceis. Agradeço a vocês pelas madrugadas que passamos juntos estudando Arquitetura, PAA e Teoria, pelas comemorações de pequenas conquistas ao longo do curso, por afogarmos as mágoas juntos e por agüentarem meus desabafos. Ao meu colega *Gurvan* que sempre me repreendia dizendo “Isso não resolve o nosso problema” nas madrugadas de estudos e pelas cervejas nas sextas de madrugada. À família *Macedo* pelo apoio nos experimentos emprestando os espetos de churrasco para servir como suporte para os nós sensores.

Aos meus colegas com os quais compartilhei minha vida nos últimos cinco anos *Lilian, Carla, Joyce, Humberto, Romanelli, Sérgio* e outros. Aos funcionários do DCC/UFMG pela atenção, dedicação e carinho com que sempre fui recebido.

À galera do futebol, com a qual tentei jogar futebol para desestressar: *Carlos Maurício, Claudiney, David, Menotti, Fabiano, Nakamura, Pedrão, Luis Henrique, Allan, Ruiter e Adão*.

Ao pessoal do laboratório ATM e do projeto SensorNet, agradecimentos especiais ao *Adriano* pelo auxílio no estudo de antenas.

A todos os meus amigos do DCC *Carlos Frederico, Isabela, Horácio, Flávio, Cristiano, João Sarubbi, Alex, irmãos Flip-Flop, Fabíola, Thaís, Leonardo, Rabelo, Rainer, Raquel, Jamil, Paulo, Camilo, Frederico e Habib*.

À Universidade Federal de Lavras pelo apoio institucional e incentivo para a minha formação, principalmente aos reitores *Antônio Nazareno Guimarães Mendes* e *Fabiano Ribeiro do Vale* que souberam entender o meu afastamento das atividades administrativas do Centro de Informática.

Aos colegas e funcionários do DCC/UFLA por me incentivarem e colaborarem para a conclusão desta etapa. Aos funcionários e colaboradores do CIN-UFLA que compreenderam a minha ausência nesse último ano.

E finalmente agradeço a Capes e ao CNPq pelo imprescindível apoio financeiro.

Resumo

Nas redes de sensores sem fio (RSSFs), a comunicação é a atividade que, em geral, mais consome energia. A longevidade dessas redes é determinada pela capacidade das baterias e um dos grandes desafios é reduzir o consumo de energia durante a comunicação. Técnicas para economia de energia têm sido propostas em protocolos de roteamento por meio da redução do tráfego de dados, pela otimização no estabelecimento de rotas ou por técnicas de controle de topologia. Entretanto, é responsabilidade do protocolo de controle de acesso ao meio (MAC) o gerenciamento e operação dos dispositivos de comunicação dos elementos de rede. É nesta camada MAC que podemos obter os maiores ganhos na redução do consumo de energia.

Na literatura atual encontramos vários protocolos MAC para RSSFs que visam reduzir o consumo de energia. Definimos uma taxonomia para avaliação e classificação das técnicas empregadas nesses protocolos. Uma das técnicas de economia de energia proposta nos protocolos MAC para redes móveis ad hoc tem sido o controle da potência de transmissão (CPT). Entretanto, não existem trabalhos na literatura que proponham técnicas de CPT para RSSFs. Além disso, os protocolos para redes móveis ad hoc não podem ser aplicados diretamente nas RSSFs devido às severas restrições de recursos destas redes.

Este trabalho apresenta quatro novas técnicas para o controle da potência de transmissão para protocolos MAC em RSSFs. Essas técnicas são baseadas na interação entre os nós e levam em conta as limitações de recursos, como processamento, memória e energia, para o cálculo da potência mínima de transmissão. As técnicas propostas nos protocolos Iterativo e Híbrido calculam a potência mínima de transmissão por interações sucessivas entre os nós, que estimam a qualidade da comunicação e iteram sobre as potências de transmissão do rádio. Os protocolos Atenuação e AEWMA (*Attenuation with Exponentially Weighted Moving-Average*) mantêm a qualidade do enlace calculando a potência mínima de transmissão, considerando o desvanecimento do sinal no meio de transmissão.

Os protocolos com CPT, Iterativo, Atenuação, AEWMA e Híbrido, foram avaliados por experimentos realizados na plataforma Mica Motes2. Os protocolos foram avaliados em diversos cenários, variando parâmetros tais como o tipo de ambiente interno e externo, a distância de comunicação entre os nós, a ocorrência de transmissões simultâneas, a comunicação em caminho multisaltos e a mobilidade. Os resultados mostram que os protocolos com CPT reduzem o consumo de energia em até 57% em relação aos protocolos com potência fixa de transmissão. Além disso, os protocolos com CPT aumentam a vazão da rede e incrementam a taxa de entrega para um valor próximo ao encontrado em protocolos sem CPT na máxima potência de transmissão.

Abstract

Communication is usually the most energy-consuming event in wireless sensor networks (WSNs). The lifetime of these networks is determined by capacity of batteries and one of the great challenges is to reduce the energy consumption in the communication. Several techniques to reduce the energy consumption have been proposed in routing protocols: diminish the traffic of data, optimize the routes or the topology control. However, it is responsibility of medium access control (MAC) protocol the management and operation node's communication devices. The MAC layer is where we can get better reduction in the energy consumption.

In the literature there are some MAC protocols for WSNs aiming at reducing the energy consumption. We define a taxonomy for evaluation and classification of the employed techniques in these protocols. One of the techniques to reduce energy consumption in MAC protocols for mobile ad hoc networks (MANET) is the transmission power control (TPC). However, there are not papers in the current literature that consider TPC techniques for WSNs. Moreover, the protocols for MANETs cannot be applied directly to WSNs due to the severe restrictions of resources of these networks.

This thesis presents four new transmission power control techniques for MAC protocols in WSNs. These techniques are based on the interaction between sensor nodes and take in to account the limitations of resources such as processing, memory and energy in the calculation of the minimum of transmission power. The Iterative and Hybrid protocols calculate the minimum transmission power by successive interactions between the sensor nodes. In these protocols, the quality of the communication is determined by iterating on the radio transmission power. The protocols Attenuation and AEWMA (Atenuation with Exponentially Weighted Moving-Average) keep the reliability of link by calculating the minimum transmission power, taking in to account the fade-out of the signal in the transmission media.

The TPC protocols Iterative, Attenuation, AEWMA and Hybrid had been evaluated by experiments carried out in the Mica Motes2 plataform. The protocols had been evaluated in diverse scenes, varying parameters such as the type of internal and external environment, in the distance of communication among the sensor nodes, the occurrence of simultaneous transmissions, the communication in the multi-hop transmissions and node mobility. The results have shown that the TPC protocols reduce the consumption of energy up to 57 % in comparison to the protocols with fixed transmission power. Moreover, the protocols with TPC increase the throughput of the network and the delivery rate to value close to the are found in protocols without TPC on full power transmission.

Sumário

Lista de Siglas	xix
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Motivação	4
1.3 Definição do problema	5
1.4 Contribuições	7
1.5 Organização do trabalho	8
2 Consumo de Energia na Comunicação em RSSFs	11
2.1 Restrições de energia em RSSFs	11
2.2 Consumo de energia dos componentes de hardware	12
2.3 Fatores que afetam o consumo de energia na comunicação	16
2.4 Técnicas de economia de energia na comunicação	17
2.5 Problemas na comunicação em redes sem fio	20
2.6 Conclusões	23
3 Uma taxonomia para protocolos MAC em RSSFs	25
3.1 Alocação de canais de transmissão	26

3.1.1	Alocação estática de canal	27
3.1.2	Alocação dinâmica de canal	28
3.2	Coordenação da comunicação entre nós	28
3.3	Notificação da existência de dados no canal	29
3.4	Capacidade de adaptação	30
3.5	Técnicas de QoS em RSSF	31
3.5.1	QoS na camada de acesso ao meio	33
3.6	Conclusões	34
4	Protocolos MAC para RSSFs: Descrição e classificação	37
4.1	Protocolo S-MAC	38
4.2	Protocolo ARC	39
4.3	Protocolo T-MAC	40
4.4	Protocolo B-MAC	42
4.5	Protocolo TRAMA	43
4.6	O padrão IEEE 802.15.4	44
4.7	Protocolo WiseMAC	47
4.8	Protocolo LMAC	48
4.9	Protocolo AI-LMAC	49
4.10	Classificação dos protocolos MAC para RSSFs	50
4.11	Conclusões	52
5	Protocolos em MANETs com CPT	55
5.1	Gerenciamento de energia e CPT	55
5.2	MACA: o primeiro protocolo com CPT	56

5.3	Protocolo PCMA: controle de potência com negociação	57
5.4	Controle de potência distribuído em MANET	60
5.5	Deficiências dos protocolos com CPT em MANETs	62
5.5.1	Colisões em protocolos com Esquema Básico	63
5.5.2	Reduzindo as colisões com o protocolo PCM	65
5.6	Controle de potência com memória	66
5.7	Conclusões	67
6	Técnicas de Controle de Potência para Protocolos MAC em RSSFs	69
6.1	Redução do consumo de energia na comunicação	70
6.2	Operação das redes sem fio com CPT	72
6.3	Benefícios do controle de potência	73
6.4	Princípios de projeto para CPT em RSSFs	74
6.4.1	Mecanismos de CPT e as camadas da arquitetura de rede .	75
6.4.2	Requisitos de hardware para CPT	76
6.4.3	Avaliação de canal livre	77
6.4.4	Cálculo da potência mínima de transmissão	78
6.5	Técnicas de Controle de Potência	80
6.5.1	Método Iterativo	80
6.5.2	Método Atenuação	84
6.5.3	Método AEWMA	87
6.5.4	Método Híbrido	89
6.6	Comparação dos métodos de CPT propostos	92

6.7	Conclusões	93
7	Implementação das técnicas de CPT em RSSFs	95
7.1	Arquitetura de nós sensores	96
7.2	Protocolo MAC do Mica Motes2/TinyOS	100
7.2.1	Estrutura do B-MAC	101
7.2.2	Controle da operação do rádio	102
7.2.3	Transmissão	104
7.2.4	Recepção	106
7.3	Modelo analítico de consumo de energia do B-MAC	107
7.4	Protocolo MAC Iterativo com CPT	111
7.4.1	Ajuste da potência de transmissão	112
7.4.2	Formato dos quadros	113
7.4.3	Operação do protocolo Iterativo	114
7.5	Protocolo MAC Atenuação com CPT	116
7.5.1	Formato dos quadros	118
7.5.2	Operação do protocolo Atenuação	119
7.6	Protocolo MAC com amortização	120
7.6.1	Formato dos quadros	121
7.6.2	Operação do protocolo AEWMA	121
7.7	Protocolo MAC Híbrido	122
7.7.1	Formato dos quadros	123
7.7.2	Operação do protocolo Híbrido	124
7.8	Conclusões	126

8	Avaliação dos protocolos MAC com CPT	129
8.1	Montagem dos experimentos	130
8.2	Levantamento dos parâmetros empíricos	131
8.2.1	Estimadores da qualidade do enlace	132
8.2.2	Cálculo da potência mínima	133
8.3	Ambiente Externo	136
8.4	Ambiente Interno	140
8.5	Transmissões multisaltos	141
8.6	Reuso Espacial	143
8.7	Mobilidade dos Nós	145
8.8	Conclusões	149
9	Conclusões e Trabalhos Futuros	151
9.1	Contribuições	154
9.2	Trabalhos Futuros	155
A	Lista de Publicações	171

Lista de Tabelas

2.1	Consumo de energia no Mica Motes2.	13
2.2	Características dos transceptores.	14
2.3	Consumo dos transceptores.	15
4.1	Protocolos MAC em ordem cronológica.	51
4.2	Classificação dos protocolos MAC.	52
6.1	Métodos de CPT × métodos sem CPT.	92
7.1	Rádio CC1000 - Potência de transmissão × corrente consumida. .	109
7.2	Campos de um nó vizinho da tabela de potência e consumo de memória na plataforma Mica Motes2.	113
7.3	Validando a precisão do cálculo de potência mínima.	117
7.4	Tamanho de código e consumo de memória nos protocolos MAC. .	126
8.1	Parâmetros empregados nos experimentos.	136
8.2	Melhores resultados para cada protocolo em ambiente interno. . .	141

Lista de Figuras

1.1	Ajustando a potência de transmissão para evitar colisões.	6
2.1	Técnicas de redução de consumo de energia.	17
2.2	Problema do terminal escondido.	21
2.3	Problema da estação exposta: C está exposta para B	21
2.4	Efeito da captura.	22
3.1	Taxonomia para protocolos MAC.	26
4.1	Ciclo adaptativo do protocolo T-MAC.	41
4.2	O nó D dorme antes de C enviar um RTS.	41
4.3	Organizações de uma rede no padrão IEEE 802.15.4.	45
4.4	Estrutura de <i>superframe</i> utilizada no 802.15.4 em <i>beacon-mode</i>	46
4.5	Controle de admissão no protocolo AI-LMAC.	50
5.1	Fluxo de comunicação no PCMA.	59
5.2	Regiões de propagação do sinal transmitido do Esquema Básico.	63
5.3	Colisões no Esquema Básico.	64
5.4	Ajuste do atraso de transmissão.	65
6.1	Múltiplos caminhos de um sinal na presença de obstáculos.	78

6.2	Operação do método Iterativo (lado emissor).	82
6.3	Operação do método Iterativo (lado receptor).	83
6.4	Operação do método Atenuação.	86
6.5	Operação do método AEWMA.	88
6.6	Operação do método Híbrido (lado emissor).	90
6.7	Operação do método Híbrido (lado receptor).	91
7.1	Hierarquia da pilha de comunicação no TinyOS.	99
7.2	Diagrama de módulos e interfaces do B-MAC.	100
7.3	Estrutura dos quadros de dados e de confirmação do B-MAC.	101
7.4	Ciclo de operação do rádio em modo de economia de energia.	103
7.5	Diagrama dos subestados de transmissão do protocolo B-MAC.	105
7.6	Diagrama dos estados de recepção do protocolo B-MAC.	106
7.7	Intervalos de operação do rádio (CC1000).	110
7.8	Quadros de dados e de confirmação do protocolo Iterativo.	114
7.9	Quadros de dados e de confirmação do protocolo Atenuação.	118
7.10	Quadros de dados e de confirmação do protocolo AEWMA.	121
7.11	Quadros de dados e de confirmação do protocolo Híbrido.	124
8.1	Monitorando dados com a MIB.	131
8.2	Número de quadros perdidos ao variarmos L_D e L_A .	132
8.3	Potência média de transmissão variando L_D com $L_A=1$.	133
8.4	Potência média de transmissão variando L_A com $L_D=8$.	134
8.5	Nível do sinal recebido variando a distância entre os nós.	135
8.6	Taxa de entrega média em ambiente externo.	137

8.7	Taxa de entrega média em ambiente externo com intervalo de confiança.	138
8.8	Potência média de transmissão para os protocolos com CPT.	139
8.9	Taxa de entrega média do AEWMA variando α (ambiente interno).	141
8.10	Experimento com cinco nós alinhados em um caminho multisaltos.	142
8.11	Potência média de transmissão no cenário multisaltos.	142
8.12	Taxa de entrega média no cenário multisaltos.	143
8.13	Cenário do experimento de reuso do meio.	144
8.14	Resultados do experimento de reuso do meio.	145
8.15	Taxa de entrega média para o nó móvel (ambiente externo).	146
8.16	Taxa de entrega média para o nó móvel (ambiente interno).	147
8.17	Potência média de transmissão para o nó móvel (ambiente externo).	148
8.18	Potência média de transmissão para o nó móvel (ambiente interno).	148

Lista de Siglas

ACK	<i>Acknowledgment</i>
A/D	<i>Converter Analogic to Digital</i>
AEA	<i>Adaptive Election Algorithm</i>
AEWMA	<i>Atenuation with Exponentially Weighted Moving-Average</i>
APTS	<i>Acceptable Power To Send</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
B-MAC	<i>Berkeley Medium Access Control</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CCR	<i>Corner Cube Reflector</i>
CDMA	<i>Code Division Multiplex Access</i>
$c_{f_{pwr}}$	<i>current-forward power</i>
CPT	Controle da Potência de Transmissão
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i>

CTS	<i>Clear To Send</i>
DIFS	<i>Distributed coordination function Interframe Space</i>
DDT	<i>Data Distribution Tables</i>
dr_{pwr}	<i>discarded power</i>
EIFS	<i>Extended InterFrame Space</i>
EWMA	<i>Exponentially Weighted Moving-Average</i>
FDD	<i>Full Function Device</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiplex Access</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.</i>
JTAG	<i>Joint Test Action Group</i>
LFSB	<i>Linear Feedback Shift Register</i>
LOS	<i>Line Of Sight</i>
LPL	<i>Low Power Listening</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MACA	<i>Multiple Access with Collision Avoidance</i>
mAh	<i>miliámpere hora</i>
MALT	<i>Motorized Active Laser Transceiver</i>
MANET	<i>Mobile Ad Hoc Network</i>

MEMS	<i>Mechanical Electrical Micro Systems</i>
MHz	<i>Megahertz</i>
MIB	<i>Mote Interface Boards</i>
NAV	<i>Network Allocation Vector</i>
N_F	<i>Noise Floor</i>
NesC	<i>Network embedded system C</i>
NP	<i>Neighbor Protocol</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PA	Ponto de Acesso
PCMA	<i>Power Controlled Multiple Access</i>
PID	Proporcional Integral Derivativo
PS	<i>Power Save</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAP	<i>Real-Time Architecture Protocol</i>
RFD	<i>Reduced Function Devices</i>
RF	Rádio Frequência
RSSI	<i>Received Strenght Signal Indicator</i>
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RSSFs	Redes de Sensores Sem Fio
RPTS	<i>Request Power To Send</i>

RTS	<i>Request To Send</i>
SEP	<i>Schedule Exchange Protocol</i>
SIFS	<i>Short Interframe Space</i>
SNR	<i>Signal-Noise Ratio</i>
TDMA	<i>Time Division Multiplex Access</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver and Transmitter</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
UWB	<i>Ultra Wide Band</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos anos, o desenvolvimento de novos dispositivos eletrônicos tem motivado o surgimento de novas aplicações nas áreas da computação ubíqua e pervasiva [Foundation, 2004, Kwiatkowska and Sassone, 2004]. O alto grau de integração na fabricação de componentes eletrônicos tem produzido dispositivos cada vez menores, mais rápidos e eficientes em energia.

Essa nova geração de dispositivos eletrônicos tem possibilitado o desenvolvimento de uma grande variedade de aplicações para sensoriamento de ambientes. As aplicações podem ser as mais diversas, como sistemas de segurança, coleta de dados físicos e químicos de uma determinada área, fiscalização de tráfego de veículos, monitoração de animais e observação de ambientes explorados por robôs em áreas de desastres ou em regiões inóspitas [Boone, 2004, Boyle, 2005, Ganesan et al., 2004, Werner-Allen et al., 2005].

Essas aplicações têm propiciado uma nova área de pesquisa, a monitoração de eventos observados por sensores. Os elementos de sensoriamento, ou nós sensores, são constituídos de processador, transceptor, memória, sensores, bateria e em alguns casos atuadores, constituindo um verdadeiro sistema autônomo de comunicação. Outro componente do nó sensor é o software executado em seu processador, ou seja, o componente lógico do nó. A interligação desses sistemas autônomos estabelece uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) [Loureiro et al., 2003, Ruiz, 2003].

Em geral, as Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) dispõem uma infraestrutura fixa de comunicação para a coleta e transporte dos dados. Os dados coletados são enviados para um ponto de acesso remoto (PA), o qual é o elemento da rede que conecta a RSSF com um ou mais observadores. O observador é a entidade da rede ou usuário final que deseja receber a informação da área

observada [Meguerdichian et al., 2001, Ruiz et al., 2003]. A comunicação entre os nós sensores é estabelecida por um sistema sem fio, usando transceptores ópticos ou em rádio frequência (RF), formando uma rede ad hoc. A comunicação entre os elementos dessa rede pode ser realizada diretamente entre os nós ou indiretamente, utilizando repasses das mensagens.

As RSSFs diferem das tradicionais redes móveis ad hoc sem fio (MANET - *Mobile Ad Hoc Network*) em diversos aspectos. De maneira geral, as RSSFs possuem severas restrições de hardware e software, são compostas por um grande número de elementos de rede, operam sem intervenção humana direta, apresentam baixa mobilidade, necessitam de mecanismos de autogerenciamento e são fortemente dependentes da aplicação [Clare et al., 1999, Ruiz et al., 2004]. As limitações de recursos nas RSSFs são tão severas que os protocolos desenvolvidos para as tradicionais redes ad hoc sem fio (WLAN - *Wireless Local Area Network*) não podem ser empregados diretamente nessas redes. Os protocolos nas RSSFs consideram aspectos de redução do consumo de energia e são projetados para uma aplicação específica. Dessa forma, não existe uma arquitetura de rede apropriada para todas as aplicações em RSSFs [Langendoen and Halkes, 2005].

Nas RSSFs, o fluxo de dados é predominantemente unidirecional, e a ocorrência de falhas não é uma exceção. Os nós sensores podem ser descartados, perdidos ou saírem de serviço por diversas razões como falta de energia, problemas no lançamento da rede, ameaças e ataques de segurança, falhas nos seus componentes eletrônicos e falhas de comunicação [Macedo et al., 2005a, Ruiz, 2003].

Pelas características das aplicações, o hardware dos elementos nas RSSFs deve ser de baixo custo e de tamanho reduzido, o que impacta na limitação de recursos como: processador de dezenas de MHz, memórias de alguns kilobytes, transceptores com alcance de dezenas de metros e baterias de capacidade reduzida (centenas de mAh). Essas limitações restringem a capacidade de processamento, o alcance de transmissão, a conectividade e o tempo de vida da rede [Hać, 2003].

As RSSFs são projetadas para operar de forma autônoma e, geralmente, a troca ou recarga das baterias é inviável pela grande quantidade de nós na rede ou pela localização do nó em áreas de desastres ou inóspitas. Dessa forma, um dos grandes desafios em RSSFs é aumentar a longevidade de operação da rede, reduzindo o consumo de energia de seus elementos [Foundation, 2004].

Algumas abordagens para reduzir o consumo de energia têm sido apresentadas em diversos níveis da arquitetura das RSSFs: transporte, roteamento e controle de acesso ao meio [Narayanaswamy et al., 2002, Polastre et al., 2004, Wan et al., 2002]. Uma das camadas mais relevantes na arquitetura das RSSFs, que trata

diretamente do consumo de energia, é a camada de controle de acesso ao meio (MAC - *Medium Access Control*). Os métodos empregados nessa camada influenciam no consumo de energia dos dispositivos, na operação dos protocolos de roteamento e no projeto das aplicações [Kawadia and Kumar, 2003]. Em geral, os protocolos de controle de acesso ao meio para RSSFs propõem mecanismos de autoconfiguração e de economia de energia nos elementos da rede [Correia et al., 2005a].

Os protocolos de controle de acesso ao meio para MANETs, propostos na literatura, têm reduzido o consumo de energia através de mecanismos de gerenciamento do ciclo de operação de seus dispositivos (transceptor, processador e sensores) [Hać, 2003, Lettieri and Srivastava, 1998, Rodoplu and Meng, 1998, Singh and Raghavendra, 1999, Sohrabi and Pottie, 1999] ou por mecanismos de controle da potência de transmissão do rádio [Bambos and Kandukuri, 2000, Haas and Deng, 1999, Jung and Vaidya, 2002, Pires et al., 2004]. Nas RSSFs, os protocolos de controle de acesso ao meio têm implementado técnicas de gerenciamento do ciclo de operação do transceptor [Kalidindi et al., 2003, Polastre et al., 2004, Rajendran et al., 2003, van Dam and Langendoen, 2003, Ye et al., 2002, Woo and Culler, 2001], mas não empregam técnicas de controle da potência de transmissão (CPT).

As técnicas de controle da potência permitem a economia de energia ao transmitir na potência mínima necessária para manter a conectividade entre os nós da rede. Os parâmetros necessários para o controle da potência são negociados por quadros de controle e são ajustados para um valor mínimo da potência de transmissão em que o enlace ainda permaneça estabelecido [Agarwal et al., 2001, Ebert et al., 2000, Monks, 2001].

A redução da potência de transmissão diminui o alcance de transmissão do rádio e reduz a probabilidade de colisões na rede. Essa redução do alcance de transmissão permite que, dentro de uma mesma região da rede, existam várias conexões simultâneas estabelecidas. As técnicas de controle de potência aumentam o tempo de vida e melhoraram a capacidade de transmissão da rede [Agarwal et al., 2001, Gomez et al., 2001a, Jung and Vaidya, 2002, Pires et al., 2004]. Assim, o emprego das técnicas de CPT em RSSFs é essencial na redução do consumo de energia e deve ser considerado no projeto de protocolos MAC.

1.1 Objetivos

Os objetivos desta tese são a definição de uma taxonomia para classificar os protocolos MAC em RSSFs, a análise dos principais problemas de comunicação

encontrados nessas redes e a proposição de novas técnicas de controle da potência de transmissão eficientes em energia. Pelo nosso conhecimento, este é o primeiro trabalho que desenvolve e implementa técnicas de CPT em protocolos MAC especificamente para as RSSFs.

Um outro objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho desses protocolos com CPT em cenários reais considerando as métricas de consumo de energia, taxa de entrega de quadros, número de colisões e potência de transmissão. Essa avaliação consiste na especificação e implementação das técnicas de CPT em uma plataforma comercial de nós sensores Mica Motes2 [Crossbow, 2004]. A escolha dessa plataforma se justifica por ser a mais utilizada em RSSFs e por apresentar características similares a outras plataformas, como por exemplo, os transceptores empregados e o sistema operacional utilizado [Levis et al., 2004b]. Os cenários reais utilizados na avaliação consistem de redes homogêneas situadas em ambientes internos e externos com nós estáticos e móveis e com disseminação contínua de dados.

1.2 Motivação

As técnicas de CPT têm sido empregadas com sucesso em redes de celulares e extensivamente pesquisadas nas MANETs para reduzir o consumo de energia na comunicação [Oh and Wasserman, 1999, Rashid-Farrokhi et al., 1997]. Regulamentações recentes dos órgãos de telecomunicações, requerem que novos equipamentos para redes sem fio em banda larga, desenvolvidos para redes locais, tenham um mecanismo de controle que permita a seleção dinâmica do nível da potência de transmissão [ANATEL, 2004]. Atualmente, estudos para a padronização de equipamentos de comunicação por rádio frequência que empregam o CPT também têm sido realizados, como o grupo de trabalho IEEE 802.11h [Qiao et al., 2003]. O emprego das técnicas de CPT em RSSFs é ainda incipiente e apresenta-se como uma solução inovadora para reduzir o consumo de energia nessas redes.

A motivação para empregarmos as técnicas de CPT em protocolos MAC, está na necessidade da melhor utilização dos recursos da rede. As técnicas de CPT permitem um maior número de transmissões simultâneas dentro de uma RSSF e menor probabilidade de ocorrência de colisões. Este fato garante a redução do consumo de energia, uma maior taxa de entrega e aumento na vazão da rede. Além disso, o emprego das técnicas de CPT possibilita estabelecer enlaces confiáveis pelo ajuste dinâmico da potência em função de parâmetros pré-determinados para uma aplicação.

A utilização de plataformas comerciais de nós sensores possibilita a imple-

mentação e avaliação das técnicas de CPT. Isso muitas vezes é inviável em redes MANET devido às alterações que devem ser realizadas no software de propriedade dos fabricantes da interface sem fio.

Os resultados obtidos com a implementação das técnicas de CPT em RSSFs são animadores. A potência de transmissão é ajustada dinamicamente e mantém a taxa de entrega de quadros próxima aos protocolos MAC sem CPT na máxima potência de transmissão, além de reduzir o consumo médio de energia e manter a estabilidade do enlace.

1.3 Definição do problema

A limitação de recursos faz com que o consumo de energia seja um fator crítico nas RSSFs e uma comunicação eficiente em energia é crucial para aumentar o tempo de vida da rede. Os atuais protocolos MAC nas RSSFs empregam uma potência de transmissão global e fixa, definindo um alcance de transmissão que garanta a conectividade entre os nós da rede.

O emprego de uma potência fixa de transmissão consome energia desnecessariamente quando a comunicação é realizada entre nós próximos, além de causar interferências na comunicação de seus vizinhos. A figura 1.1 mostra um exemplo de interferência na comunicação quando dois nós transmitem seus quadros em potência fixa de transmissão.

Sejam os nós transmissores B e D com alcances de transmissão dados pelas linhas tracejadas da figura. Os nós receptores são A e C , sendo que o nó A está dentro do alcance de transmissão do nó B e o nó C está dentro do alcance de transmissão dos nós B e D . Os nós B e D iniciam simultaneamente as transmissões de seus quadros para os nós A e C respectivamente. Como o nó C pode ser alcançado pelas transmissões de B e D simultaneamente, haverá colisão dos quadros recebidos, ou seja, a transmissão de B para A irá interferir na comunicação entre D e C .

Se reduzirmos a potência de transmissão de maneira que o alcance de transmissão seja o mínimo necessário para encontrar o receptor, linhas sólidas da figura 1.1, a colisão em C não ocorrerá. Dessa forma, o controle de potência de transmissão por quadro enviado pode além de evitar colisões, economizar energia quando a potência é reduzida.

A maioria dos protocolos MAC projetados para RSSFs transmitem com potência fixa e global, e para evitar colisões empregam os mesmos métodos utilizados

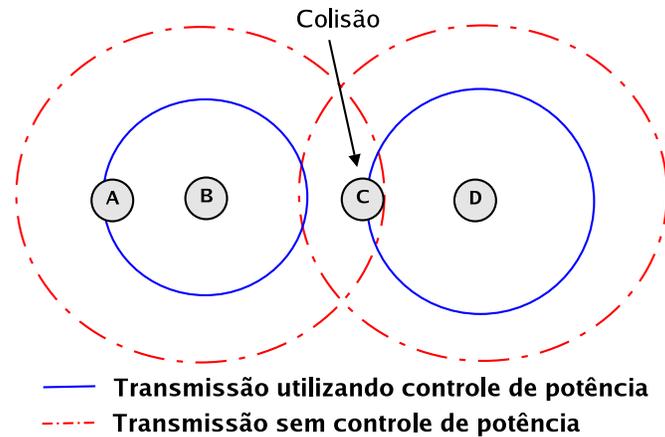


Figura 1.1: Ajustando a potência de transmissão para evitar colisões.

nas MANETs [van Dam and Langendoen, 2003, Ye et al., 2002], trocando quadros de controle e reduzindo o ciclo de operação do rádio dos nós. Esse tráfego de quadros de controle aumenta o consumo de energia e diminui a vazão da rede.

Alguns protocolos não empregam mecanismos de detecção de colisões, eles consideram que como os dados coletados na monitoração de um determinado fenômeno são de tamanho reduzido, de apenas algumas dezenas de bytes, a probabilidade da ocorrência de colisão na rede é baixa. Protocolos com essas características podem levar à saturação do canal e à diminuição da vazão da rede [Polastre et al., 2004].

As técnicas de CPT determinam a menor potência de transmissão em que um quadro pode ser recebido e ainda ser decodificado corretamente no destino. Os protocolos MAC projetados para MANETs que empregam técnicas de CPT usam cálculos complexos para determinar a potência mínima de transmissão e contam com hardware auxiliar para ajustar dinamicamente a potência do rádio [Agarwal et al., 2001, Jung and Vaidya, 2002, Monks, 2001, Pires et al., 2004], como rádios multicanais ou detectores de sinal.

Como as RSSFs empregam hardware de baixo custo, os transceptores possuem somente um canal de transmissão e não possuem hardware adicional para ajuste dinâmico dos parâmetros de comunicação. Dessa forma, os protocolos MAC com CPT desenvolvidos para MANETs não podem ser empregados diretamente nas RSSFs.

Neste trabalho as técnicas de CPT desenvolvidas para RSSFs levam em conta as limitações do hardware utilizado nas plataformas comerciais, bem como as características do meio de transmissão como ruído, interferências e variabilidade

das condições do ambiente (interno ou externo). Consideramos somente as RSSFs homogêneas, ou seja, aquelas em que seus elementos de rede possuem os mesmos recursos de hardware. A comunicação entre os nós será direta (*single hop*) ou por multisaltos (*multihop*) para os cenários ad hoc idealizados.

O principal problema solucionado neste trabalho é o desenvolvimento de técnicas de CPT que podem ser implementadas em um nó sensor real, respeitando suas limitações. Além disso, são apresentados experimentos em uma plataforma real de nós sensores para a avaliação e análise das técnicas propostas. Outros assuntos como a definição de uma taxonomia para a classificação dos protocolos MAC para RSSFs, também são apresentados.

1.4 Contribuições

Este trabalho apresenta contribuições relevantes no desenvolvimento e análise de protocolos MAC com CPT eficientes em energia. Essas contribuições são sumariadas como:

- O desenvolvimento de quatro técnicas originais de controle da potência de transmissão para protocolos MAC em RSSFs, que possibilitam reduzir significativamente o consumo de energia e aumentar o tempo de vida da rede.
- A especificação do primeiro protocolo MAC para RSSFs que emprega técnicas de CPT [Correia et al., 2005c].
- A apresentação de uma taxonomia para análise e classificação dos principais protocolos MAC desenvolvidos para RSSFs. Essa taxonomia caracteriza esses protocolos considerando os métodos de alocação de canal, a capacidade de adaptação aos requisitos da aplicação, os mecanismos de qualidade de serviço e outros aspectos da comunicação, tais como coordenação e notificação de transmissão [Correia et al., 2005a].
- A especificação e implementação de outros três protocolos MAC para RSSFs que empregam as técnicas de CPT em uma plataforma comercial.
- A avaliação dos quatro protocolos especificados em cenários reais considerando as métricas de consumo de energia, taxa de entrega, taxa de colisões e potência de transmissão. Nesses cenários são considerados ambientes interno e externo, reuso do meio de transmissão, caminho multisaltos e mobilidade dos nós. Os protocolos propostos são comparados ao protocolo MAC padrão da plataforma comercial [Correia et al., 2006].

Outras contribuições relevantes no desenvolvimento de protocolos em RSSF:

- A especificação de um protocolo de roteamento para redes ad hoc com QoS baseado no CPT e que determina rotas eficientes em energia [Macedo et al., 2006].
- A especificação de um protocolo de roteamento para RSSFs, denominado de PROC (*Proactive ROuting with Coordination*), baseado em regras que interage com a aplicação [Macedo et al., 2005b, Macedo et al., 2005c].
- Avaliação dos aspectos de tolerância a falhas em protocolos de roteamento para RSSFs. Foram considerados cenários onde as falhas dos nós variam em intensidade, tipo e duração [Macedo et al., 2005a, Macedo et al., 2005d].

Os resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho foram publicados em conferências e periódicos nacionais e internacionais. Alguns resultados dessas pesquisas foram publicados como dissertação de mestrado [Macedo, 2006] e como artigos em periódicos nacionais e internacionais.

1.5 Organização do trabalho

Esta tese propõe técnicas de controle de potência de transmissão para protocolos MAC em RSSFs. Essas técnicas consideram as restrições de hardware dos nós empregados em RSSFs e visam reduzir o consumo de energia e aumentar a vazão da rede. O texto está organizado em nove capítulos como descrito a seguir.

No capítulo 2, são apresentados e identificados os elementos de hardware que mais consomem energia nas RSSFs. As características dos principais transceptores empregados nessas redes são descritas e mostram como a comunicação afeta o consumo de energia. As técnicas para reduzir o consumo de energia são classificadas e discutidas, baseadas na redução da quantidade de quadros transmitidos, na melhoria da organização da rede e na sincronização de dados. Os principais problemas encontrados na comunicação como terminal escondido, estação exposta e efeito da captura também são discutidos.

Uma taxonomia para protocolos de controle de acesso ao meio em RSSFs é proposta no capítulo 3. Essa taxonomia considera tanto as características comuns dos protocolos, como alocação de canais, coordenação da comunicação e tipos de notificação recebidas pelo nó, quanto a sua capacidade de adaptação aos requisitos das aplicações e aos mecanismos de qualidade de serviço empregados.

O capítulo 4 apresenta os principais protocolos de controle de acesso ao meio desenvolvidos para RSSFs. As características e os métodos de redução de energia propostos por esses protocolos são descritos e analisados. Usando a taxonomia definida no capítulo anterior os protocolos MAC para RSSFs são classificados e comparados.

No capítulo 5, são apresentados os principais protocolos em MANETs que utilizam técnicas de controle da potência de transmissão. Os esquemas de comunicação apresentados, na sua maioria, modificam as características do protocolo padrão IEEE 802.11 e visam o reuso de canal e a redução do consumo de energia pelo controle da potência de transmissão. São discutidos alguns problemas e soluções encontrados por esses protocolos em MANETs e as restrições de sua aplicação em RSSFs.

O capítulo 6 apresenta quatro técnicas inovadoras para o controle de potência de transmissão em RSSFs. Essas técnicas são baseadas em estimadores da qualidade do enlace e no cálculo de atenuação do meio. Os aspectos de hardware e software envolvidos no projeto das técnicas de CPT são analisados. Também discutimos a influência da escolha da potência de transmissão na operação da rede, as métricas empregadas e os benefícios obtidos.

No capítulo 7, avaliamos a viabilidade da implementação das técnicas de CPT em uma plataforma real de nós sensores. Analisamos as características do sistema operacional TinyOS e da plataforma de hardware Mica Motes2. Um estudo do protocolo MAC padrão dessa plataforma é apresentado, bem como seu modelo analítico para o consumo de energia. Esse modelo mostra que a potência de transmissão é um dos parâmetros que deve ser considerado na redução do consumo de energia. Neste capítulo, propomos quatro novos protocolos MAC baseados nas técnicas de CPT, Iterativo, Atenuação, AEWMA e Híbrido. São apresentadas suas funcionalidades, quadros e operação.

Os resultados experimentais da avaliação dos protocolos MAC com CPT são apresentados no capítulo 8. Os experimentos com os quatro protocolos propostos, Iterativo, Atenuação, AEWMA e Híbrido, foram realizados na plataforma Mica Motes2 considerando ambientes distintos, transmissão em caminho multisaltos, reuso espacial e mobilidade do nós. As métricas consideradas nesta avaliação foram consumo de energia, taxa de entrega de quadros, número de colisões e potência de transmissão. Os resultados obtidos com os protocolos com CPT foram comparados ao protocolo B-MAC, padrão da plataforma Mica Motes2.

O capítulo 9 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Consumo de Energia na Comunicação em RSSFs

Este capítulo identifica os elementos de hardware que mais consomem energia em um nó sensor. É mostrado como a comunicação afeta o consumo de energia nas RSSFs e os principais tipos de transceptores empregados. São caracterizados os eventos e situações responsáveis pelo consumo de energia durante a comunicação, utilizando transceptores em rádio frequência. As técnicas para reduzir o consumo de energia são apresentadas, classificadas e discutidas, tendo como base a redução da quantidade de quadros transmitidos, a melhoria da organização da rede e a sincronização de dados. Os principais problemas encontrados na comunicação como terminal escondido, estação exposta e efeito da captura também são apresentados.

2.1 Restrições de energia em RSSFs

Em algumas aplicações em RSSFs não existe uma topologia planejada da rede, os nós sensores são lançados de maneira aleatória em regiões inóspitas ou de difícil acesso. Nessas situações não existem procedimentos para a recarga das baterias. Em outras aplicações, onde a topologia da rede é planejada, ou em ambientes mais acessíveis, a troca das baterias muitas vezes é inviável devido ao grande número de nós existentes.

Outras aplicações em RSSFs podem utilizar fontes alternativas de energia, tais como células de energia solar, conversores de campo eletromagnético ou vibrações em energia [Pottie and Kaiser, 2000]. As dimensões reduzidas dos nós

e as limitações específicas de cada aplicação, entretanto, podem restringir o uso dessas fontes alternativas.

A inviabilidade de recarga das baterias e do uso de fontes alternativas, na maioria das aplicações em RSSFs, torna a energia um fator limitante no tempo de operação dessas redes. Portanto, é essencial identificar as principais fontes consumidoras de energia para otimizar o uso desse recurso e aumentar a longevidade da rede.

O projeto de uma RSSF deve considerar vários aspectos da comunicação entre os nós, como a escalabilidade da rede, o ambiente operacional, a topologia da rede, o meio de transmissão, as restrições de hardware, as falhas e o consumo de energia. Todos esses aspectos afetam diretamente a formação e o tempo de vida da rede.

Um protocolo MAC projetado especificamente para RSSFs deve considerar todas as restrições impostas pelo hardware e pelo software, visando reduzir o consumo de energia. As próximas seções identificam os principais elementos de hardware e as atividades, que em geral, mais consomem energia.

2.2 Consumo de energia dos componentes de hardware

O consumo de energia dos nós sensores está relacionado aos seus componentes de hardware, que realizam funções de sensoriamento, processamento e comunicação. No sensoriamento os dispositivos sensores consomem energia ao coletarem dados do ambiente, tais como luminosidade, intensidade de campo magnético, posição geográfica, temperatura, etc. No processamento, o consumo é função do tipo e quantidade de instruções executadas pelo processador do nó sensor. Na comunicação o consumo de energia está relacionado ao envio e recepção de dados pelo transceptor e às suas características como nível de potência de transmissão, modos de operação e disciplinas de acesso ao canal.

Uma plataforma comercial tipicamente usada em RSSFs é a Mica Motes [Crossbow, 2004], cujo consumo de seus componentes de hardware é mostrado na tabela 2.1 (Fonte: [Crossbow, 2004]). Dentre os seus componentes, o maior consumidor de energia é a memória *flash* em operações de escrita. Apesar do alto consumo de energia durante os ciclos de gravação e leitura, a utilização da memória *flash* não é essencial na manutenção da conectividade ou na formação de uma RSSF. Em geral, essa memória é empregada para armazenar dados lidos pelos sensores, tabelas de roteamento e outras informações específicas de cada

aplicação. O uso de estratégias genéricas para economizar energia na utilização da memória *flash* não seria eficaz.

O transceptor é o maior consumidor de energia dentre os componentes de hardware que são essenciais para a manutenção da conectividade e formação das RSSFs. Mesmo quando está ligado e escutando o meio de transmissão (modo *idle*) ou em repouso (modo *sleep*), o transceptor consome energia.

Tabela 2.1: Consumo de energia no Mica Motes2.

Componente	Corrente
Processador	
<i>Operação em carga</i>	8 mA
<i>Repouso</i>	8 μ A
Transceptor (0 dBm)	
<i>Recepção</i>	8 mA
<i>Transmissão</i>	12 mA
<i>Repouso</i>	2 μ A
Memória Flash	
<i>Escrita</i>	15 mA
<i>Leitura</i>	4 mA
<i>Repouso</i>	2 μ A
Sensor	
<i>Ativo</i>	5 mA
<i>Inativo</i>	5 μ A

Os transceptores nas RSSFs utilizam o espectro eletromagnético para comunicação sob a forma de laser, infravermelho ou rádio frequência. Os nós que utilizam transceptores ópticos ou laser consomem menor quantidade de energia por bit transmitido e não necessitam de antena, mas devem ser alinhados de maneira que exista visada direta (LOS - *Line Of Sight*) entre os nós de origem e destino.

Essa característica de alinhamento, impossibilita o uso desses transceptores em redes que não possuem uma topologia planejada, como nas redes lançadas de maneira aleatória. Na plataforma Smart Dust [Dust, 2004] vários tipos de transceptores podem ser acoplados, entre eles um transceptor óptico de comunicação passiva, realizada por um *Corner Cube Reflector* (CCR) com dimensões $0,5 \times 0,5 \times 0,1$ mm³. Esse transceptor óptico transmite a uma taxa de 10 kbps, consumindo 1 μ W de energia e com alcance de transmissão de até 1 km.

Outra opção da plataforma Smart Dust é o uso de um transceptor laser com transmissão ativa, com dimensões de $1,0 \times 0,5 \times 0,1$ mm³. Esse transceptor transmite a 1 Mbps, com consumo de 10 mW de energia e alcance de até 10 km.

O volume total de um nó sensor Smart Dust chega a $1,5 \text{ mm}^3$ e a massa total a 5 mg, dimensões que tornam inviável o uso de outros transceptores que utilizam antenas. Um dos projetos que utiliza esse transceptor é o MALT (*Motorized Active Laser Transceiver* [Hubert, 2004]).

Os transceptores infravermelhos possuem as mesmas restrições de alinhamento dos transceptores laser, com o agravante de serem susceptíveis às variações de temperatura e umidade do meio de transmissão. Para resolver estes problemas são empregadas lentes para corrigir o desalinhamento, buscando ajustar o foco do sinal para o receptor [Agilent Technologies, 2004]. No entanto, essas lentes não funcionam adequadamente em dias nublados. As especificações de cada tipo de transceptor, alcance de transmissão, consumo e taxa de transmissão estão sumariados na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Características dos transceptores.

Transceptor	Óptico ou laser	Infravermelho	Rádio frequência
<i>Alcance máximo</i>	10Km	1,5m	$\approx 100\text{m}$
<i>Consumo médio</i>	10mW	$\approx 7,5\text{mW}$	15mW
<i>Banda passante</i>	1Mbps	1-4Mbps	10-250Kbps
<i>Restrições</i>	Precisa de linha de visada	Susceptível às condições do ambiente	Baixo alcance

A maioria dos projetos em nós sensores usam transmissão em rádio frequência (RF) devido às restrições impostas pelos outros tipos de transceptores. Exemplos de plataformas que empregam RF são: Medusa [CENS, 2004], Smart Dust [Dust, 2004], SensoNet [GATECH, 2004], JPL [JPL, 2002], Millennial [Millennial Net, 2004], Mica Motes [Motes, 2002], μ AMPS [μ AMPS, 2002], PicoRadio [Pico, 2003], BEAN [Vieira, 2004], WINS [WINS, 2003], EYES [EYES Project, 2005] e MoteIV [Polastre, 2006].

Os transceptores de rádio frequência empregados nas RSSFs são de ultrabaixa potência (mW ou μW) e de baixa tensão (de 3 a 5 V) [CC2420, 2006, CC1000, 2006, TR 1000, 2004]. A faixa de frequência utilizada por estes rádios é livre, sendo conhecida como ISM/SRD (*Industrial, Scientific and Medical band/Short Range Device*). Os rádios podem utilizar frequências que variam nas faixas de 315, 433, 868, 915 MHz e 2,4 GHz, dependendo da plataforma e do país. Nessas faixas de frequências são empregadas diversas técnicas de modulação, tais como ASK (*Amplitude Shift Keying*), FSK (*Frequency Shift Keying*) e DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), que influenciam na propagação dos sinais no meio de transmissão.

A arquitetura de nós sensores Mica Motes, por exemplo, emprega vários tipos de rádios, cujas especificações são apresentadas na tabela 2.3 (Fonte: [Crossbow, 2004]).

Tabela 2.3: Consumo dos transceptores.

Transceptores RF			
Parâmetros	CC1000 Mica Motes 2	TR1000 Mica Motes	CC2420 MicaZ
<i>Frequência</i>	915 MHz	915 MHz	2,4 GHz
<i>Transmissão (0 dBm)</i>	49,5 mW	36 mW	52,2 mW
<i>Recepção</i>	11,4 mW	13,5 mW	59,1 mW
<i>Ocioso</i>	10,5 mW	40,5 mW	1,3 mW
<i>Repouso</i>	5 μ W	15 μ W	3 μ W
<i>Banda</i>	76,4 kbps	19,2 kbps	250 kbps
<i>Modulação</i>	FSK	ASK	DSSS

Os rádios empregados em RSSFs operam em *half-duplex*, ou seja, a comunicação é bidirecional e não simultânea [Ruiz et al., 2004, Tanenbaum, 2003]. Dessa forma, o rádio pode somente transmitir ou receber informações a cada instante de tempo. Do ponto de vista de uma pilha de protocolos, as características do rádio estão relacionadas às funções da camada física, isto é, tipos de modulação, esquemas de codificação de sinais, técnicas de transmissão e alocação de canal.

O controle dos modos de operação do rádio está relacionado ao protocolo de controle de acesso ao meio. Esses protocolos são responsáveis por definir métodos de alocação de canal e controle dos parâmetros do rádio, tais como potência de transmissão, período de escuta e período de repouso.

Os modos de operação do rádio determinam o consumo de energia e são controlados pelos protocolos MAC, mas existem outros eventos que também devem ser tratados, tais como colisão de quadros. Esse tratamento muitas vezes implica em negociar parâmetros de latência, vazão e *fairness* (justiça) em detrimento da economia de energia.

Devido à quantidade e popularidade das plataformas que empregam transceptores em rádio frequência, neste trabalho são abordados somente os protocolos que empregam esse tipo de transceptor. As principais fontes de consumo de energia relacionadas ao emprego dos transceptores em rádio frequência são apresentadas a seguir.

2.3 Fatores que afetam o consumo de energia na comunicação

O projeto de um protocolo de acesso ao meio deve considerar as principais fontes de consumo de energia na comunicação. Muitos eventos e situações de comunicação consomem energia desnecessariamente e podem ser evitados ou minimizados de acordo com o modo de operação escolhido. Essas fontes de consumo de energia na comunicação são citadas e discutidas abaixo de acordo com o método de alocação de canal utilizado.

Colisão de quadros: quando dois ou mais nós transmitem simultaneamente para um mesmo destino haverá colisão no receptor, sendo necessária a retransmissão dos quadros, o que aumenta o consumo de energia. Os protocolos MAC que empregam métodos de contenção ou disputa pelo meio estão sujeitos a colisões e, portanto, consomem energia com quadros enviados mas não entregues, enquanto os protocolos MAC baseados em reserva ou alocação de banda não estão sujeitos a colisões (ver seção 3.1).

Overhearing: situação na qual cada nó mantém seu rádio ligado escutando quadros transmitidos não destinados a ele. Para os protocolos MAC baseados em contenção, o período de escuta pode ser minimizado desligando-se o rádio por um período de tempo ao verificar que o quadro não é endereçado a ele. Os protocolos baseados em alocação de banda não possuem esse problema, já que os nós somente operam em intervalos de tempo reservados para cada nó.

Overhead: situação que ocorre quando quadros de controle são utilizados para reserva do canal de comunicação, confirmação de recebimento de quadros de dados, sincronização e outras operações. Os quadros de controle aumentam o tráfego da rede e não transportam dados da aplicação, aumentando o consumo de energia e reduzindo a largura de banda do canal. Alguns protocolos baseados em contenção empregam quadros de controle para estabelecer um diálogo de comunicação entre os nós. Esses quadros de controle são usados para reserva de canal, troca de informações sobre o tamanho dos dados a serem transmitidos, aviso de transmissão em andamento aos nós vizinhos e confirmação de quadros recebidos. Nos protocolos baseados em alocação estática de canal, ou de banda, os quadros de controle são utilizados para sincronização entre os nós.

Idle listening: situação na qual o nó escuta o meio de transmissão mesmo quando não existe tráfego na rede. Nos protocolos baseados em contenção esse problema pode ser minimizado estabelecendo períodos de escuta e de repouso, ou seja, ajustando-se o modo de operação do transceptor. Nos protocolos baseados em alocação de banda, este problema é minimizado desligando-se o rádio quando

nenhuma transmissão ocorre durante a reserva da banda alocada.

Sincronização de eventos: situação que ocorre quando um fenômeno monitorado em uma determinada região da rede é percebido simultaneamente por mais de um nó sensor. Esses nós sensores tendem a transmitir os dados coletados simultaneamente e aumentam o tráfego na rede e a probabilidade de colisões [Woo and Culler, 2001]. Este problema afeta somente os protocolos baseados em contenção e pode ser minimizado empregando métodos de agregação, supressão ou correlação de dados, ou ainda, por algoritmos de *backoff* usados para atrasar aleatoriamente a transmissão de dados. Os protocolos baseados em alocação estática são imunes a esse tipo de sincronização, já que cada nó transmite somente dentro da banda alocada.

O consumo de energia está relacionado à quantidade de quadros transmitidos e ao ciclo de operação do rádio. Algumas técnicas para redução do consumo de energia podem ser empregadas, como gerenciamento dos modos de operação do rádio e tratamento dos dados a serem transmitidos. A seção seguinte descreve as técnicas empregadas para economia de energia durante a comunicação dos nós na rede.

2.4 Técnicas de economia de energia na comunicação

As técnicas para a economia de energia na comunicação são baseadas na redução da quantidade de quadros transmitidos, na melhoria da organização da rede e nos métodos de sincronização de dados. A figura 2.1 mostra algumas técnicas empregadas para economizar energia durante o estabelecimento da comunicação entre os nós nas RSSFs, sendo detalhadas a seguir.



Figura 2.1: Técnicas de redução de consumo de energia.

Redução do tráfego de dados

A quantidade de informação transmitida pelo transceptor pode ser reduzida por métodos de fusão, agregação e compressão de dados, pelo processamento colaborativo e pelo emprego de técnica de correlação de dados.

Fusão de dados: um nó sensor ao receber pacotes de outros nós vizinhos concatena os dados desses pacotes em um único pacote de dados e o envia. Esse método diminui o *overhead* de tráfego de mensagens de controle na rede.

Agregação de dados: um nó da rede, ao receber pacotes de seus vizinhos, realiza um processamento dos dados recebidos e envia o resultado aos seus vizinhos em um único pacote, reduzindo o tráfego de dados e de quadros de controle.

Compressão: o nó sensor comprime seus dados de maneira a inseri-los em um único pacote diminuindo o tráfego de dados na rede.

Processamento colaborativo: nós monitorando o mesmo evento podem apresentar medidas díspares. O processamento dos dados pode ajudar na calibração das medidas dos nós, evitando que medidas errôneas trafeguem na rede e minimizando futuras retransmissões.

Correlação de dados: a ocorrência de eventos em uma determinada região faz com que sensores próximos transmitam informações semelhantes sobre o evento monitorado. Métodos como supressão, filtragem e outros podem ser usados para reduzir o tráfego de dados na rede.

Organização da rede

A economia de energia por organização da rede se aplica à potência de transmissão do transceptor, ao modo de comunicação entre os nós e à densidade de nós na rede.

Potência de transmissão: o ajuste da potência de transmissão do transceptor está relacionado ao alcance de comunicação. Quanto maior a potência de transmissão, maior será a área de cobertura do transceptor e maior o consumo de energia. A redução da potência de transmissão pode diminuir a probabilidade de terminais escondidos (seção 2.5) e o número de colisões na rede, reduzindo o consumo de energia.

Comunicação entre os nós: a comunicação nas RSSFs pode ser direta entre o nó e o ponto de acesso, denominada comunicação *single hop*, ou indireta entre os nós da rede até alcançar o ponto de acesso, denominada *multihop*. Segundo Heinzelman et al. o emprego de comunicação *multihop* na transferência de mensagens

economiza energia [Heinzelman et al., 2000].

Densidade de nós: uma maior densidade de nós coletores pode aumentar a precisão dos dados e também propiciar maior tolerância à falhas. No entanto, segundo [Tilak et al., 2002], o aumento da densidade de nós pode contribuir para o aumento da colisão de quadros na rede. Dessa forma, é necessário ajustar a densidade de nós na rede para atender o compromisso de alta precisão dos dados e baixa taxa de colisão de dados.

Sincronização da comunicação

As técnicas empregadas na sincronização de dados podem influenciar no consumo de energia. A comunicação pode ser sincronizada por intervalos de *backoff*, quadros de controle, e ciclo de operação do transceptor.

Período de backoff: na ocorrência de eventos na rede de uma determinada região monitorada, os nós próximos ao detectarem variações no ambiente coletam dados e transmitem seus quadros simultaneamente ao ponto de acesso. As transmissões simultâneas de nós vizinhos aumentam a probabilidade de colisões na rede. Para reduzir as colisões na rede por transmissões simultâneas, os nós aguardam um período de tempo aleatório para transmitir seus quadros na ocorrência de um evento na rede.

Quadros de controle: a sincronização da comunicação pode utilizar escalas de tempo definidas por troca de quadros de controle entre os nós. Essas escalas definem quando os nós podem transmitir e receber quadros, permitindo que os nós fiquem em repouso quando não estão transmitindo, economizando energia. O tráfego dos quadros de controle usados para sincronização pode aumentar o consumo de energia dos nós.

Ciclo de operação: os transceptores podem operar nos modos de transmissão, recepção, escuta e repouso. A redução do consumo de energia pode ser obtida alternando o ciclo de operação do rádio em períodos de escuta e repouso. No período de repouso o rádio consome apenas alguns μW , enquanto que no modo de escuta, consome algumas dezenas mW . O aumento do período de repouso acarreta redução do consumo, mas aumenta a latência de transmissão já que durante esse período o nó fica inativo e não recebe dados.

2.5 Problemas na comunicação em redes sem fio

Os protocolos de controle de acesso ao meio baseados em alocação dinâmica do canal, ou contenção, estão sujeitos a ocorrência de colisão durante o estabelecimento de comunicação. Métodos como o CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) são utilizados nas MANETs para evitar colisões e empregam um diálogo de comunicação de três passos, *RTS-CTS-DATA*, envolvendo a transmissão entre as duas estações emissora e receptora:

Seja *A* uma estação emissora que deseja iniciar um diálogo de comunicação com a estação *B* de destino. A estação *A* antes de enviar seus dados, transmite um quadro de controle *RTS* para o destino. Este quadro de controle é responsável pela reserva do meio de transmissão. A estação de destino *B* responde à reserva transmitindo um quadro de controle *CTS*. A estação emissora *A* ao receber o quadro *CTS* assume que o meio foi reservado e envia seus dados *DATA*.

Como nas redes sem fio a estação ao transmitir não tem como escutar o canal, as colisões que ocorrem no receptor são devido à recepção de quadros de controle e de dados. Para diminuir a probabilidade da ocorrência de colisões na rede, as estações ao detectarem a presença de quadros de controle *RTS-CTS* não destinados a elas, bloqueiam seus transceptores até o final da transmissão. Mesmo com o bloqueio dos transceptores, existe a probabilidade de ocorrer colisões nas redes sem fio. Essas colisões podem ocorrer por problemas conhecidos como terminal escondido e estação exposta.

Problema do terminal escondido

O problema do terminal escondido é caracterizado quando uma estação *A* transmite seu quadro *RTS* para uma estação *B* dentro do alcance de transmissão de seu rádio [Bharghavan et al., 1994, Karn, 1990]. Uma outra estação *C*, que está dentro do alcance de transmissão de *B* e fora do alcance de transmissão de *A*, também envia um quadro de *RTS* para a estação *B* no mesmo instante de tempo. Nesta situação ocorrerá colisão na estação *B* como mostrado na figura 2.2.

Outra problema encontrado em redes sem fio é conhecido como estação exposta, descrito a seguir.

Problema da estação exposta

O problema da estação exposta ocorre quando uma estação *B* solicita transmissão à uma estação *A* enviando um quadro de controle *RTS* [Karn, 1990]. Neste

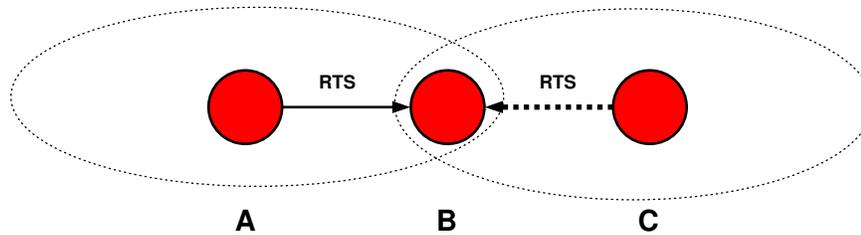


Figura 2.2: Problema do terminal escondido.

momento, a estação C está pronta para transmitir, mas como ela está dentro do alcance de transmissão do rádio de B , ela escuta o quadro de controle RTS e bloqueia seu rádio até que a transmissão de B termine. Se a estação C desejar transmitir para uma estação diferente de B , por exemplo para a estação D fora do alcance de transmissão de B , ela estará impedida de transmitir.

A transmissão da estação C para a estação D não iria interferir na comunicação entre as estações A e B , então a escuta do quadro de RTS não fornece informação completa sobre a disponibilidade do canal. A estação C poderia transmitir se escutasse o retorno de um CTS , mas como está impedida de escutar qualquer resposta, uma tentativa de transmissão seria inútil. Como a estação C escuta somente o RTS , ela não pode dizer se a troca de mensagens $RTS-CTS$ obteve sucesso e nem se B irá transmitir dados efetivamente. Neste caso, dizemos que a estação C está exposta às transmissões da estação B , conforme mostrado na figura 2.3.

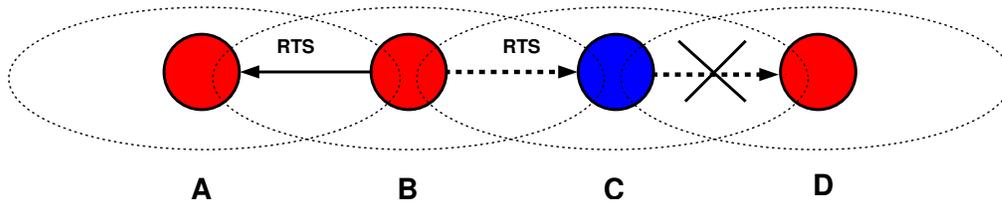


Figura 2.3: Problema da estação exposta: C está exposta para B .

É importante observar que os problemas de terminal escondido ou estação exposta ocorrem somente em rádios monocal, já que rádios com mais canais, podem escutar o meio de transmissão medindo o sinal e detectando transmissões em andamento durante a sua transmissão. Os protocolos de controle de acesso ao meio devem resolver ou minimizar os problemas de terminal escondido e de estação exposta. Outro problema encontrado nas transmissões em redes sem fio é o efeito da captura.

Efeito da captura

O efeito da captura, também conhecido como interferência co-canal, é a capacidade que certos rádios possuem de receber corretamente o sinal de um transmissor apesar da interferência de outro transmissor [Leentvaar and Flint, 1976]. O efeito ocorre quando um dos pacotes transmitidos por um terminal consegue ser decodificado corretamente em presença de transmissões simultâneas de múltiplos terminais. O receptor captura um pacote se a potência recebida for suficientemente elevada para exceder a potência dos demais pacotes interferentes por um certo limiar chamado de razão de captura.

O efeito de captura é insignificante sob condições de tráfego moderado ou baixo, mas pode ser representativo em condições de tráfego intenso. Este efeito tem sido encontrado em uma grande variedade de transceptores incluindo aqueles empregados em sistemas de WLANs 802.11, Bluetooth, celulares e de plataformas de nós sensores [Whitehouse et al., 2005]. A figura 2.4 ilustra o efeito da captura, sendo descrito a seguir.

Sejam as estações transmissoras A , B e C . Essas estações iniciam simultaneamente suas transmissões para a estação receptora, conforme mostra a figura 2.4. A estação receptora recebe os quadros da estação A que possui o maior nível de sinal, mesmo na presença da interferência dos sinais das outras estações, B e C .

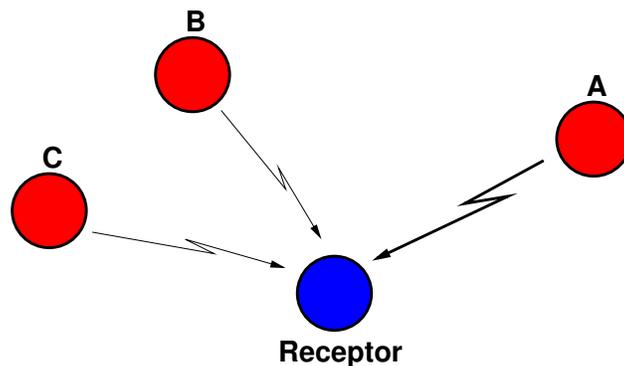


Figura 2.4: Efeito da captura.

O efeito da captura viola o princípio que a colisão “corrompe” os pacotes, ou seja, que pacotes capturados pelo receptor podem ser decodificados corretamente e ainda estarem íntegros. Dessa forma, o efeito de captura pode ser benéfico, e tem sido explorado por muitos protocolos MAC e de roteamento para prevenir colisão de pacotes aumentando a vazão da rede e reduzindo a latência [Whitehouse

et al., 2005]. Em teoria, o efeito da captura poderia fornecer ganhos adicionais através de detecção de colisão e recuperação de pacotes com sinais mais fortes da colisão.

Os protocolos com controle da potência de transmissão podem aumentar ou diminuir o nível do sinal transmitido para o envio de cada quadro. Dessa forma, esses protocolos podem evitar colisões em presença do efeito da captura, tentando garantir que a qualidade do enlace entre dois nós seja mantida mesmo com interferências de sinais de outros nós [Luo and Ephremides, 2002].

2.6 Conclusões

A energia é um fator restritivo no tempo de vida da rede. A principal fonte de consumo de energia está na comunicação entre os nós das RSSFs. O componente de hardware responsável pela comunicação é o transceptor, que nas RSSFs é o componente que mais consome energia.

As estratégias para economia de energia têm sido reduzir as transmissões na rede e controle das operações do transceptor. As técnicas empregadas com sucesso em MANETs têm sido controle do ciclo de operação do rádio, permitindo que o rádio fique desligado enquanto ele não é necessário para manter a conectividade da rede, e o controle da potência de transmissão, que ajusta o nível da potência de transmissão do rádio para cada quadro transmitido.

Apesar da técnica de controle da potência de transmissão ser empregada com sucesso nas MANETs, ela não tem sido considerada nas RSSFs, que empregam somente a estratégia do controle do ciclo de operação do rádio. O controle da potência de transmissão por quadro transmitido se apresenta como uma solução promissora na redução do consumo de energia para as RSSFs, visto que, ela pode também ser empregada de forma complementar aos métodos de controle do ciclo de operação do rádio. Além disso, as técnicas de controle da potência de transmissão podem aumentar a vazão da rede, reduzir a probabilidade de colisões e ainda se beneficiar do efeito da captura.

Os principais protocolos MAC para RSSFs propostos na literatura empregam técnicas para reduzir o consumo de energia. Essas técnicas são baseadas nas características encontradas nos métodos de alocação de canais, notificação de transmissão, coordenação da comunicação, capacidade de adaptação do nó sensor ao ambiente da rede e qualidade de serviço. Essas características permitem a elaboração de uma taxonomia para protocolos MAC, apresentada no próximo capítulo.

Capítulo 3

Uma taxonomia para protocolos MAC em RSSFs

Este capítulo define uma taxonomia para protocolos de controle de acesso ao meio em RSSFs, considerando tanto as características comuns dos protocolos quanto a sua capacidade de adaptação aos requisitos das aplicações e aos mecanismos de qualidade de serviço empregados. O objetivo dessa taxonomia é classificar os protocolos MAC existentes.

Os autores Langendoen & Halkes classificam os protocolos MAC para RSSFs considerando três questões de projeto: tipos de alocação e quantidade de canais, grau de organização dos nós e tipo de notificação recebida pelos nós [Langendoen and Halkes, 2005]. No entanto, a classificação proposta por eles não considera outros aspectos como a diversidade das aplicações em RSSFs, a dinâmica do ambiente e aspectos de QoS. Por se tratarem de redes de propósito específico, os protocolos devem ser otimizados para cada cenário e devem ser configuráveis para se adaptarem às características da aplicação. Além disso, os protocolos devem ser capazes de se adaptarem às mudanças do ambiente e da aplicação, no caso de redes dinâmicas.

Portanto, além das questões mencionadas anteriormente, nossa taxonomia também inclui uma classificação quanto à capacidade de adaptação dos protocolos e quanto aos requisitos de qualidade de serviço. A figura 3.1 apresenta a taxonomia empregada na classificação dos protocolos MAC.

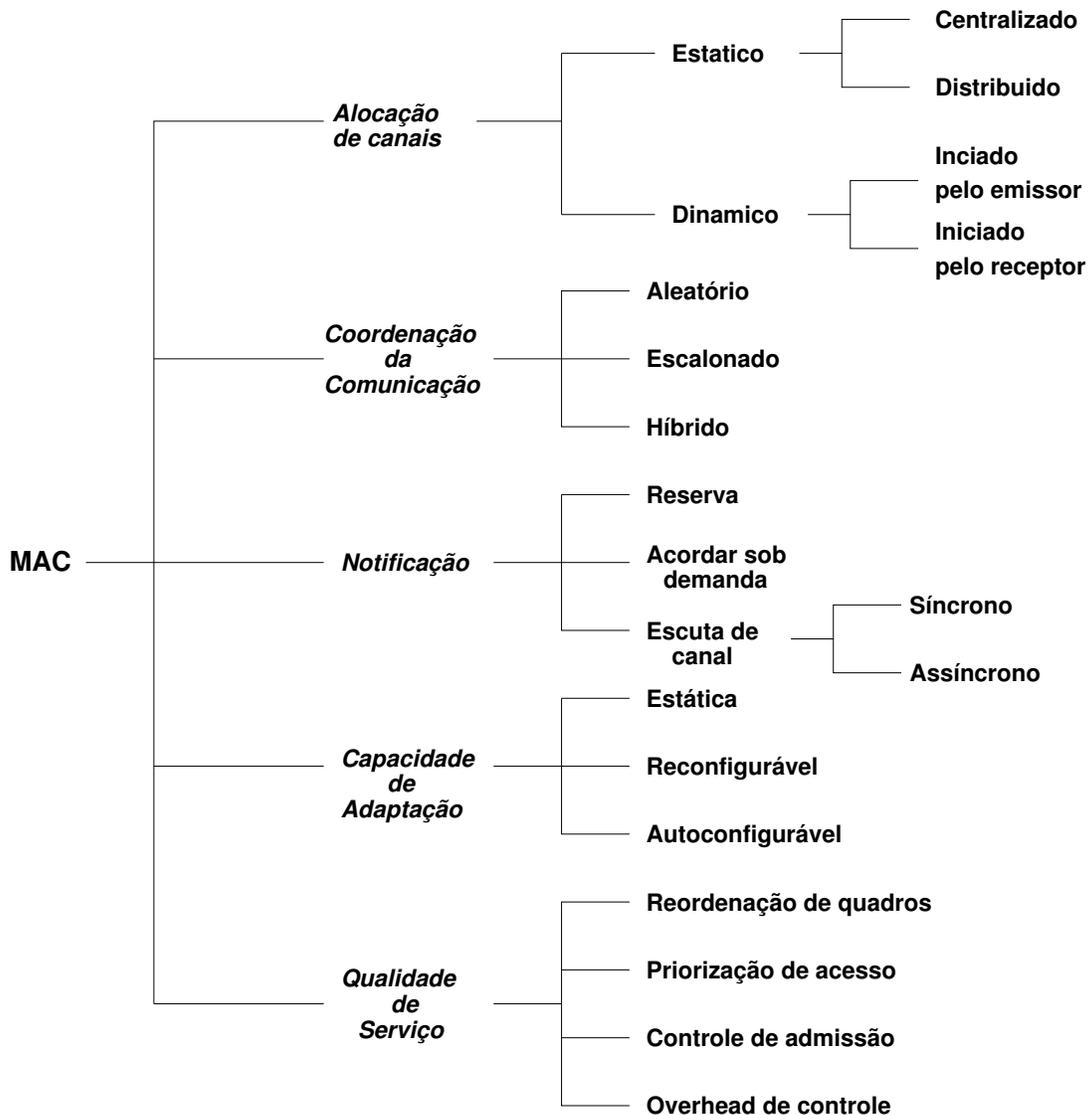


Figura 3.1: Taxonomia para protocolos MAC.

3.1 Alocação de canais de transmissão

Na comunicação em rádio frequência, o sinal é propagado para todos os nós dentro do alcance de transmissão do transceptor. Se dois ou mais nós transmitem dados no mesmo canal e ao mesmo tempo, ocorrerão problemas na comunicação, tais como colisão de quadros ou distorção do sinal. Para evitar esses problemas, a largura de banda é dividida e alocada para cada nó. Esta alocação pode ser dinâmica ou estática.

3.1.1 Alocação estática de canal

A alocação estática de canal (ou síncrona) divide a largura de banda em N partes, alocadas para cada nó da rede. Esses nós estarão livres de colisões de sinais e de disputas pelo meio de transmissão, já que cada nó transmite ou recebe quadros somente dentro de seu espaço alocado.

Várias técnicas de multiplexação são empregadas na divisão da banda: divisão de tempo (TDMA - *Time Division Multiplex Access*), divisão de frequência (FDMA - *Frequency Division Multiplex Access*) e divisão de código (CDMA - *Code Division Multiplex Access*).

Para evitar interferências entre enlaces adjacentes os protocolos alocam diferentes canais, usando a técnica FDMA para separação em frequência ou por divisão no código usando CDMA. A técnica FDMA requer que o rádio possua múltiplos canais, que em termos de consumo de energia é desaconselhável para RSSFs [Dewasurenda and Mishra, 2004, Ye et al., 2002]. O emprego da divisão da banda usando CDMA é computacionalmente caro para ser usada em RSSFs, já que os receptores devem possuir canais separados para decodificar o sinal recebido. O método FDMA requer mais componentes de hardware para organizar a alocação do canal, o que aumenta o consumo de energia [van Hoesel et al., 2003].

Os protocolos em RSSFs que empregam alocação estática de canal usam, em geral, as técnicas TDMA. Essas técnicas de alocação estática de canal necessitam de sincronização para que cada nó da rede identifique seu intervalo de tempo (*time slot*). A sincronização pode ser centralizada ou distribuída:

Centralizada: uma entidade da rede (nó sensor ou nó sorvedouro) envia periodicamente um sinal de sincronização para todos os nós. Essa técnica é inapropriada para redes sem fio devido às características da rede como falhas e perdas frequentes de quadros.

Distribuída: cada nó, ou grupo de nós, gera sua própria escala de operação. O uso de diferentes escalas de sincronização na rede pode causar um escorregamento de relógio (*clock drift*), levando a perda de sincronismo. Dessa forma, ajustes locais e periódicos devem ser realizados para minimizar este escorregamento de relógio. Alguns protocolos MAC para RSSFs que empregam essa técnica assumem que o intervalo de tempo reservado para o quadro transmitido é muito maior que o tempo de um possível escorregamento de relógio.

Por causa dos problemas de sincronização encontrados nas técnicas com alocação estática de canal métodos de alocação dinâmica têm sido usados e pesquisados.

3.1.2 Alocação dinâmica de canal

Na alocação dinâmica de canal não existe atribuição fixa de largura de banda para cada nó. Os nós disputam o acesso ao meio, existindo a probabilidade de colisões no envio dos dados. Isto ocorre por que os rádios são *half-duplex*, não podendo escutar o meio para verificar se algum outro nó está tentando transmitir ao mesmo tempo ou se ocorreu uma colisão. Dessa forma, métodos de detecção de colisão no meio de transmissão, como o CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*), não podem ser empregados.

As redes sem fio empregam um protocolo de contenção CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) que em geral, utilizam quadros de controle para estabelecer um diálogo de comunicação entre as estações. A comunicação pode ser iniciada pelo emissor ou pelo receptor:

Iniciada pela emissor: o nó transmissor envia requisição ao receptor informando que tem dados a transmitir, e aguarda resposta do receptor para estabelecer a comunicação.

Iniciada pelo receptor: o nó receptor envia requisição aos nós da rede informando que está pronto para receber dados. O nó que tem dados para transmitir responde a requisição, estabelecendo a comunicação.

As técnicas de alocação de canal, estática ou dinâmica, possibilitam o uso de várias abordagens de coordenação da comunicação entre os nós da rede, descritas a seguir.

3.2 Coordenação da comunicação entre nós

Para evitar colisões, os protocolos MAC para RSSFs devem coordenar a comunicação entre os nós. As técnicas para essa coordenação da comunicação são descritas a seguir.

Aleatórias: não existe coordenação, os nós enviam seus dados sem seguir qualquer escalonamento. Antes de enviar seus dados os nós escutam o meio de transmissão, se existe uma transmissão em andamento, ele aguarda um tempo aleatório. Os protocolos baseados em alocação dinâmica de canais seguem os modelos de contenção CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*).

Escalonadas: a transmissão de dados ocorre dentro de um intervalo de tempo pré-determinado para evitar colisões. Os intervalos de tempo (*time slots*) são

determinados por um escalonador, o qual pode ser um entidade fora da rede ou um nó da rede. Este método é usado em protocolos com alocação estática de canal.

Híbridas: nessa técnica os nós disputam o meio de transmissão, mas utilizam escalonadores para que cada nó saiba quando seu vizinho está pronto para receber dados. Alguns protocolos para RSSF como o S-MAC e T-MAC, seguem um modelo híbrido de comunicação entre os nós [van Dam and Langendoen, 2003, Ye et al., 2002].

Para transmitir um quadro, o nó deve aguardar até que o receptor esteja pronto para a recepção de dados. Dessa forma, os nós devem ser notificados da existência de dados no meio. Os métodos de notificação empregados em RSSFs são descritos na próxima seção.

3.3 Notificação da existência de dados no canal

Para que a transmissão ocorra, o receptor deve escutar o meio no momento da transmissão. Dessa forma, o nó deve ser notificado da existência de dados no canal. Pelas características dos protocolos de controle de acesso ao meio, podemos classificar essas notificações como:

Reserva: os protocolos para RSSFs baseados em alocação estática de canal reservam um intervalo de tempo (*slot*) para a transmitir ou receber quadros. Nesses protocolos o nó mantém seu rádio ligado somente durante os períodos reservados à escuta, transmissão e recepção. O TRAMA é exemplo de protocolo que emprega este método de notificação [Rajendran et al., 2003].

Acordar sob demanda: os nós utilizam dois rádios, um de maior potência para transmitir e receber quadros e outro de ultra baixa potência que fica escutando o meio aguardando uma notificação. O rádio de menor potência desperta o segundo rádio ao receber uma notificação. Esse método é empregado por protocolos projetados para redes ad hoc, como por exemplo o STEM, PCMA e PicoRadio [Bambos and Kandukuri, 2000, Pico, 2003, Schurgers et al., 2002].

Escuta do canal: nos protocolos baseados em contenção não existe uma reserva de tempo definida para cada nó da rede transmitir ou receber quadros. Uma alternativa é manter o receptor ligado aguardando uma transmissão, mas isso consome muita energia. O ideal é que o rádio fique ligado somente no momento da recepção para evitar períodos de escuta ociosa, estabelecendo-se um ciclo de operação (*duty cycle*). Portanto, a escuta do canal pode ser feita de maneira:

- *Síncrona*: os nós seguem um ciclo de operação, definindo períodos de repouso e atividade, que são determinados localmente pela troca de quadros de sincronização. Dessa forma, o transmissor aguarda até que o receptor esteja em atividade para enviar seus quadros. Protocolo que utilizam esse método são o S-MAC e o T-MAC [van Dam and Langendoen, 2003, Ye et al., 2002].
- *Assíncrona*: o nó periodicamente escuta o canal, seguindo o seu próprio ciclo de operação, para verificar se existe alguma transmissão em progresso. Um esquema conhecido como LPL (*Low Power Listening*) é utilizado pelo nó transmissor, que envia um preâmbulo de tamanho superior ao tempo de repouso, garantindo a escuta. Esse método é usado no protocolo B-MAC [Polastre et al., 2004].

Além das notificações propostas para que os nós da rede possam receber dados, é necessário que o nó se adapte às características da aplicação e das condições do ambiente na formação da rede. Essa capacidade de adaptação é apresentada a seguir.

3.4 Capacidade de adaptação

As operações de uma RSSF são influenciadas pela aplicação e pela variabilidade das condições do ambiente. Além disso, a estrutura da rede tende a se modificar durante sua vida, seja por falha ou por desvanecimento de energia dos nós. Logo, os protocolos de controle de acesso ao meio devem possuir mecanismos que permitam seu ajuste à variabilidade do ambiente de modo a otimizar seu funcionamento e economizar energia. Os protocolos podem ser classificados de acordo com a sua capacidade de adaptação em: permanente, reconfigurável e autoconfigurável. A seguir descrevemos as características desses protocolos quanto à capacidade de adaptação.

Permanente: não permitem à aplicação ajustar os parâmetros de configuração dos protocolos em tempo de execução. Os parâmetros são definidos no momento de compilação do código ou durante a programação do nó, se mantendo inalterados durante todo o tempo de vida da rede. Os parâmetros dos protocolos permanentes são simples de programar e, em geral, demandam menos recursos de memória e processamento, permitindo seu uso em ambientes com restrição severa de recursos. Os parâmetros podem ser estáticos devido a uma decisão de projeto ou limitações de hardware, como por exemplo frequência e potência de transmissão do rádio. Além disso, o emprego de parâmetros estáticos limita a aplicabilidade do protocolo a um tipo de rede ou cenário específico.

Reconfigurável: permitem a mudança de parâmetros pelo operador ou pela aplicação em tempo de execução. A mudança dos parâmetros pode ser desencadeada pela aplicação ou por recebimento de um comando do operador. A reconfiguração aumenta a aplicabilidade do protocolo a vários cenários. Para isto a aplicação deve adicionar uma lógica de ajuste dos parâmetros em tempo de execução às condições da rede. Outra forma de reconfiguração é o envio de comandos do operador, permitindo a tomada de decisão fora da rede e a utilização de algoritmos mais complexos. Essa abordagem demanda mais recursos de hardware e está sujeita a falhas, como por exemplo erros na programação da aplicação ou da transmissão do comando do operador [Pradhan, 1996].

Autoconfigurável: permitem a mudança automática dos parâmetros, ajustando-se à variabilidade do ambiente sem a influência do operador. Esses ajustes são realizados por uma lógica interna pré-definida no protocolo. Caso essa lógica seja modificada durante o tempo de execução, consideramos que o protocolo é reconfigurável e autoconfigurável. A autoconfiguração permite ao protocolo se ajustar às variações das condições do ambiente e às múltiplas configurações em pontos distintos da rede. Para tanto, o código é mais complexo e geralmente necessita de mais recursos em comparação com a reconfiguração, pois deve levar em conta todos os estados possíveis de operação. A autoconfiguração pode ser baseada em algoritmos distribuídos e, portanto, os nós estarão sujeitos a falhas bizantinas decorrentes de problemas de sincronização [Avizienis et al., 2004].

Para garantir que o serviço da rede opere dentro de parâmetros de qualidade especificados, os protocolos MAC podem utilizar técnicas de qualidade de serviço. Essas técnicas são sumarizadas a seguir.

3.5 Técnicas de QoS em RSSF

Tradicionalmente as RSSFs são desenvolvidas para serem eficientes em energia. Entretanto, no projeto da rede, devemos também considerar aspectos de qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*). Redes para respostas a situações de risco e redes de monitoração de intrusão são exemplos de RSSFs onde a qualidade de serviço deve ser considerada.

Em RSSFs, o acesso ao meio de comunicação é determinante para a qualidade de serviço [Lu et al., 2002]. Os protocolos são projetados para aplicações específicas e necessitam de mecanismos internos para prover requisitos de qualidade. Além disso, os sinais e dados que trafegam no meio sem fio são utilizados tanto para coordenar as atividades dos nós quanto para a transmissão das leituras efetuadas. Dessa forma, em RSSFs a QoS é obtida por meio de políticas de pri-

orização das funções de rede e não da aplicação. As técnicas de qualidade de serviço são geralmente aplicadas nas camadas física, enlace, rede e aplicação da pilha de protocolos.

Camada física: esta camada busca evitar a interferência com sinais de outras redes ou de fontes naturais de radiação, modificando a modulação e frequência de operação para melhorar o nível da relação sinal/ruído (SNR), como acontece na rede HiperLAN [Walke et al., 2001] e nos padrões de redes domiciliares HomePlug e HomePNA [Velloso et al., 2004]. Em RSSFs, com exceção do padrão IEEE 802.15.4, a modulação e a frequência de operação normalmente são fixas, para simplificar o projeto do rádio e dos protocolos. Desta forma, os transceptores das RSSFs atuais não permitem ajuste de parâmetros de QoS na camada física.

Camada de enlace: nesta camada, o escalonamento do acesso ao meio e a ordem dos quadros a serem enviados são modificados para atender os requisitos de QoS. Estas modificações podem ser obtidas pela reordenação de quadros e por políticas de priorização e controle de admissão de dados. Por fim, é possível ajustar a quantidade de dados de controle enviados para aumentar a QoS da transmissão do quadro. Cada uma dessas alternativas são descritas na seção 3.5.1.

Camada de rede: assim como ocorre na camada de enlace, podemos também utilizar a priorização de pacotes na camada de rede. Em redes tradicionais, priorizam-se dados por fluxo ou individualmente, utilizando políticas de enfileiramento de pacotes como o *token bucket* e o WFQ (*Weighted Fair Queuing*) [Peterson and Davie, 2003], entre outras. Em RSSFs, geralmente não existe o conceito de fluxo e portanto temos uma priorização por pacote. Devido à variabilidade da qualidade dos enlaces, a quantidade de cópias enviadas e o número de rotas distintas de um mesmo pacote podem ser ajustadas de acordo com a sua prioridade, aumentando sua probabilidade de entrega [Bhatnagar et al., 2001].

Camada de Aplicação: as aplicações de áudio e vídeo em redes tradicionais utilizam técnicas de compressão adaptativa, que se ajustam às condições da rede diminuindo a largura de banda utilizada [Peterson and Davie, 2003]. Da mesma forma, em RSSFs a camada de aplicação pode ajustar a periodicidade do envio de dados [Sankarasubramaniam et al., 2003].

Em redes tradicionais, a qualidade de serviço se baseia em métricas como largura de banda, latência e *jitter*. Devido as características das RSSFs, encontramos diferentes abordagens no projeto dos protocolos com QoS que diferem das tradicionais:

Energia escassa: para prolongar o tempo de vida da rede, os protocolos devem considerar a energia residual dos nós. Assim, métricas de QoS em sensores também devem considerar o consumo de energia na transmissão de dados, de forma

a seguir rotas mais eficientes em energia [Younis et al., 2004].

Correlação de dados: os dados transmitidos por nós sensores tendem a ser correlacionados; sendo assim, muitos deles podem ser descartados [Sankarasubramaniam et al., 2003], ou são passíveis de fusão ou agregação dos dados [Younis et al., 2004].

Desligamento de nós: os nós sensores alternam entre períodos de atividade e inatividade, como forma de economia de energia [Mihaela Cardei and Jie Wu, 2004]. Os protocolos com QoS devem adaptar-se dinamicamente ao estado dos nós.

Limitações de hardware: como ocorre em qualquer aplicação ou protocolo proposto para RSSF, a limitação de recursos imposta aos nós sensores limita as opções de projeto de políticas de QoS a soluções simples e de baixo consumo de banda e memória.

Ruído do meio: alta taxa de erro de bits é uma característica das redes sem fio e deve ser considerada nas políticas de QoS, pois afeta o número de retransmissões e a taxa de entrega. Além disto, esta taxa pode definir se será utilizado um código de detecção de erros (CRC - *Cyclic Redundancy Check*) ou um código de correção de erros (FEC - *Forward Error Correction*) na transmissão de dados, de acordo com a importância da informação transmitida.

Tendo em vista os fatores considerados anteriormente, Younis et al. propuseram a adição de dois novos parâmetros de QoS: energia residual e taxa de entrega de pacotes [Younis et al., 2004]. Sankarasubramaniam et al. discutem que as políticas de QoS deveriam garantir a corretude da visão do ambiente sensoriado, medida como a diferença das leituras observadas após o processamento dos dados recebidos em relação ao fenômeno real [Sankarasubramaniam et al., 2003]. Devido ao surgimento de várias propostas de QoS para RSSFs, optamos por mesclar técnicas utilizadas nas tradicionais redes guiadas e em redes sem fio com as atuais propostas em RSSFs, uma vez que acreditamos que várias soluções utilizadas em redes tradicionais podem ser adaptadas para RSSFs.

3.5.1 QoS na camada de acesso ao meio

As técnicas de QoS no acesso ao meio podem ser divididas em quatro categorias:

Reordenação de quadros: são políticas de reordenação da fila de pacotes a serem enviados, utilizadas para que os dados que possuem maior prioridade fiquem menos tempo na fila. O padrão IEEE 802.11e utiliza esta técnica dividindo a fila

por classes, que são definidas pelas camadas superiores [Xiao, 2004]. O protocolo RAP (*Real-Time Architecture Protocol*) é um exemplo de protocolo que emprega reordenação de quadros em RSSFs [Lu et al., 2002].

Priorização do acesso ao meio: esta categoria de algoritmos emprega políticas que aumentam a chance de pacotes de maior prioridade ganharem acesso ao meio. Para os protocolos baseados em contenção, como o IEEE 802.11e com EDCF (*Enhanced Distributed Coordination Function*) [Xiao, 2004], são utilizadas políticas diferenciadas de *backoff* e de tempos de espera para cada classe de dados. Nos protocolos baseados em alocação estática de canal, tal como o IEEE 802.15.4 em modo *superframe* [Callaway et al., 2002], os *slots* são reservados para pacotes de alta prioridade. Esses mecanismos podem ser empregados nas RSSFs para ajustar parâmetros de latência.

Controle de admissão: categoria de algoritmos que controlam a quantidade de dados que um nó pode enviar em um dado período de tempo. É utilizado no IEEE 802.11e, onde o ponto de acesso determina quantos bytes uma estação pode enviar a cada *superframe* [Xiao, 2004]. O controle de admissão pode ser implementado como um protocolo MAC distribuído de taxa adaptativa, que sinaliza para a aplicação se ela pode aumentar ou diminuir a frequência de envio dos pacotes [Woo and Culler, 2001]).

Ajuste do Overhead de controle: são algoritmos que seletivamente ajustam a quantidade de quadros de controle usados na transmissão de cada quadro de dados, de maneira a melhorar a taxa de entrega. Esse mecanismo aumenta a taxa de entrega ao custo de uma menor banda efetiva e um maior consumo de energia. Dessa forma, as mensagens que necessitariam de uma maior garantia de recebimento (por exemplo, mensagens de reprogramação) utilizariam quadros de controle, enquanto mensagens comuns seriam enviadas sem sinalização ou confirmação [Bhatnagar et al., 2001].

3.6 Conclusões

Os protocolos MAC para RSSFs têm sido classificados na literatura atual de acordo com os métodos de acesso ao canal, pelas características da aplicação quanto à organização da rede e pelas notificações trocadas entre os nós da rede. Entretanto, os protocolos MAC, projetados para RSSFs, têm apresentado outras aspectos que devem ser considerados para sua classificação como a diversidade das aplicações nas RSSFs, a variabilidade das condições do ambiente e aspectos de qualidade de serviço. Por se tratarem de redes de propósito específico, esses protocolos são otimizados para cada cenário e são em alguns casos adaptáveis às

características da aplicação. Outros protocolos são projetados para se adaptarem às mudanças do ambiente e da aplicação, no caso de redes dinâmicas.

Portanto, além das características comuns dos protocolos, encontradas na literatura atual, nossa taxonomia classifica os protocolos MAC para RSSFs quanto à capacidade de adaptação e quanto aos requisitos de qualidade de serviço. No próximo capítulo descrevemos os principais protocolos MAC para RSSF e os classificamos segundo a taxonomia proposta.

Capítulo 4

Protocolos MAC para RSSFs: Descrição e classificação

Este capítulo apresenta os principais protocolos de controle de acesso ao meio para RSSFs, segundo os critérios definidos no capítulo anterior. As características e os métodos para redução de energia desses protocolos são descritos. Em geral, esses protocolos são desenvolvidos para aplicações específicas e buscam otimizar a tríade das métricas latência, vazão e consumo de energia. A partir dos conceitos apresentados no capítulo anterior e nas otimizações propostas, classificamos esses protocolos MAC e estabelecemos critérios para compará-los.

Os protocolos de acesso ao meio para RSSFs são diferentes dos empregados em redes ad hoc sem fio. As características da aplicação influenciam os requisitos do MAC e assim os protocolos são especializados para certos tipos de redes. Além disso, os pacotes possuem algumas dezenas de bytes, devido à baixa largura de banda, ao tamanho dos dados gerados pelos sensores e por restrições de outra ordem. Outra característica das RSSFs é que seus elementos de rede não possuem hardware adicional para detecção de portadora, detecção de colisão, enquadramento de dados ou balanceamento de energia. Dessa forma, a comparação e classificação dos protocolos MAC em RSSFs não é uma tarefa trivial. Os principais protocolos MAC para RSSFs são descritos: S-MAC, ARC, T-MAC, B-MAC, TRAMA, IEEE 802.15.4, WiseMAC, LMAC e o AI-LMAC. Esses protocolos foram escolhidos por serem os mais disseminados na literatura atual, por apresentarem diversidade de técnicas e por serem os mais empregados nas plataformas comerciais.

4.1 Protocolo S-MAC

O S-MAC (*Sensor-MAC*) foi o primeiro protocolo de controle de acesso desenvolvido especificamente para RSSFs [Ye et al., 2002]. O S-MAC é destinado a aplicações dirigidas a eventos, insensíveis a latência e com baixa taxa de envio de mensagens. O S-MAC procura ser eficiente em energia reduzindo o consumo de energia nos eventos da comunicação:

- *Colisões*: o S-MAC faz reserva de canal usando quadros de controle *RTS-CTS* e um vetor de alocação de rede (NAV - *Network Allocation Vector*) para detecção de portadora virtual, como no IEEE 802.11. Esta técnica reduz a probabilidade da ocorrência de colisões e o problema de terminal escondido (seção 2.5). Caso ocorra colisão, o S-MAC utiliza um algoritmo para aguardar um tempo aleatório, o BEB (*Binary Exponential Backoff*).
- *Overhearing*: o protocolo S-MAC desliga o rádio do nó ao verificar que o quadro não é destinado a ele.
- *Overhead*: no protocolo S-MAC o tamanho dos quadros de controle é reduzido. Esse protocolo também emprega a técnica de *message passing*, que faz uma única reserva de canal para mensagens grandes, comportando diversos quadros de dados.
- *Idle listening*: é empregado um ciclo de operação com tempos fixos de atividade (*listen*) e de repouso (*sleep*) para evitar escuta ociosa. O tempo de atividade é, em geral, cerca de 10% do ciclo de operação.

Apesar de empregar alocação dinâmica de canal e um método de controle de acesso aleatório (CSMA/CA), o S-MAC utiliza sincronização para coordenação dos modos de operação do rádio, assim ele pode ser considerado um protocolo que emprega uma técnica híbrida de comunicação entre os nós. Agrupamentos (*clusters*) virtuais são formados entre nós vizinhos que possuem o mesmo ciclo de operação. Para manter a sincronização entre os nós, quadros SYN são enviados em difusão para todos os nós da vizinhança. Os nós que estão na fronteira de dois agrupamentos seguem as duas escalas de sincronização.

A comunicação dentro de cada agrupamento virtual segue um ciclo de operação com períodos de atividade e repouso. No intervalo de atividade os nós escutam o canal de modo a detectar transmissões de outros nós. Caso detectem transmissões, e essas sejam destinadas especificamente àquele nó, um quadro de dados é recebido, caso contrário o nó entra em estado de repouso. Durante o intervalo de repouso o nó desliga seu rádio, economizando energia.

A eficiência em energia é obtida pelo uso de ciclo de operação reduzido, negociado em detrimento da latência. Quanto maior o período de repouso maior será a latência na comunicação. A técnica de *message passing* é usada para reduzir a latência durante a contenção em aplicações que requerem armazenamento de informações para processamento na rede (*in-network processing*). Esta técnica permite a transmissão de mensagens longas, dividindo a mensagem em pequenos fragmentos que são enviados em rajada.

O protocolo S-MAC emprega uma comunicação multisaltos e considera os requisitos de uma rede densa e homogênea (nós com hardware idêntico) para ser eficiente em energia e permitir a adaptação dos nós às condições da rede. Para tal, o S-MAC é programado para se autoconfigurar à variabilidade do ambiente na inserção ou remoção de nós, bem como a detecção de novos agrupamentos dentro do seu alcance de rádio. Atualmente o protocolo S-MAC está implementado no ambiente de simulação NS [Network Simulator, 2004] e na plataforma Mica Motes [Motes, 2002].

4.2 Protocolo ARC

O protocolo ARC (*Adaptive Rate Control*) tem como metas a alocação de largura de banda, justiça (*fairness*) e eficiência em energia para condições de alto e baixo tráfego na rede [Woo and Culler, 2001]. A comunicação no ARC emprega um rádio monocal de baixa potência e utiliza como método de controle de acesso a alocação dinâmica de canal.

O protocolo assume uma rede com comunicação multisaltos, na qual a ocorrência de um evento físico em uma determinada região de uma RSSF pode fazer com que todos os nós daquela região transmitam ao mesmo tempo, ou de modo sincronizado. Esse evento pode se repetir periodicamente, sendo que a transmissão sincronizada leva à colisão dos dados transmitidos pelos nós. O ARC propõe um mecanismo para atrasar e desincronizar a transmissão dos nós na ocorrência de um evento físico na rede. Um atraso inicial, denominado de *backoff* inicial, é introduzido antes da transmissão dos nós, atuando como uma fase de deslocamento da periodicidade da aplicação. Para os casos de colisão, um mecanismo de *backoff* aleatório é empregado.

Um mecanismo adaptativo é usado para controlar a taxa de dados trafegados na rede. A relação entre o tráfego originado e o tráfego de passagem pelo nó (*traffic thru*) tem um impacto direto em encontrar justiça na transmissão, já que eles competem pela mesma banda de passagem. Para aumentar a probabilidade dos dados chegarem ao ponto de acesso, o ARC controla a taxa de dados de

passagem utilizando um mecanismo de sinalização. Se um nó ao inserir dados na rede obtém sucesso, o mecanismo de sinalização indica ao nó para aumentar sua taxa de dados; se não houve sucesso indica ao nó para diminuir. O ARC utiliza quadros de controle para evitar o problema do terminal escondido e fornecer efetivo controle de acesso ao meio, mas nenhum esquema de priorização de quadros ou confirmação de mensagens é empregado.

4.3 Protocolo T-MAC

O protocolo Time-out-MAC (T-MAC) é baseado em contenção [van Dam and Langendoen, 2003] e foi desenvolvido para aplicações dirigidas a eventos que possuem baixa taxa de envio de mensagens e insensíveis a latência. Utiliza alocação dinâmica de canal e os nós identificam as transmissões usando métodos de detecção das portadoras física e virtual. A comunicação é realizada por meio de um rádio monocanal que permite manipulação de seus modos de operação. Da mesma forma que no S-MAC, o protocolo T-MAC utiliza sincronização híbrida da comunicação. Um quadro de sincronização é utilizado para formar agrupamentos virtuais, sendo enviado periodicamente em *broadcast*.

O T-MAC tem como meta ser eficiente em energia e para isso utiliza um ciclo de operação dinâmico que se adapta à variação da carga da rede. O período de atividade é controlado por um temporizador T_A (*time-out activity*), que ao seu término coloca o rádio em repouso. As mensagens recebidas durante o tempo de repouso são armazenadas e transferidas em rajadas de tamanho variável, no início do tempo ativo, conforme mostrado na figura 4.1. A técnica de notificação é por escuta síncrona do canal, que ocorre durante o período ativo, quando o nó pode transmitir e receber dados. Os nós utilizam quadros de confirmação e de reserva de canal *RTS-CTS* para evitar colisões e incrementar a probabilidade da recepção de quadros. Se um quadro de *RTS* ou *CTS* é recebido, o tempo T_A é renovado por um período suficiente para receber um quadro de dados. O mecanismo de *backoff* é calculado em função do tráfego instantâneo da rede.

Os protocolos que empregam ciclos de operação, como o T-MAC, estão sujeitos ao problema de dormir cedo (*early sleeping*), como apresentado na figura 4.2. Este problema ocorre quando um nó dorme enquanto um outro nó ainda tem mensagem para ele. Este problema pode ser resolvido de duas formas:

- Na primeira, um nó ao escutar um pacote *CTS* destinado a outro nó envia imediatamente aos seus vizinhos um pacote designado de *FRTS* (*Future RTS*), que evita que os nós vizinhos entrem em modo de repouso.

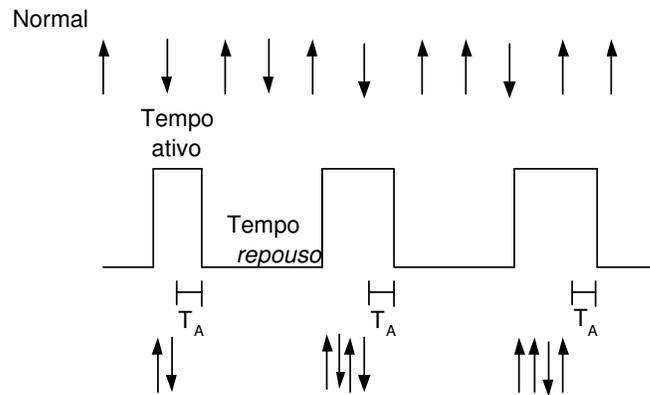


Figura 4.1: Ciclo adaptativo do protocolo T-MAC.

- A outra forma é usar um esquema que prioriza o esvaziamento da *buffer* quando ele estiver perto de sua capacidade limite. Um nó ao receber um *RTS* ao invés de responder com um *CTS*, transmite todas as mensagens armazenadas em seu *buffer* para o nó de destino.

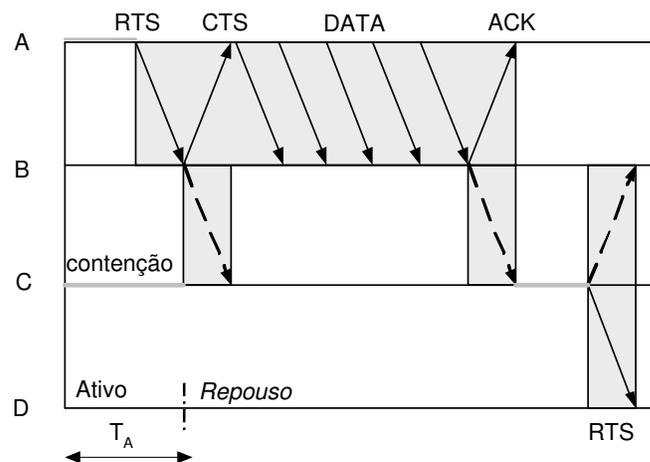


Figura 4.2: O nó *D* dorme antes de *C* enviar um RTS.

O protocolo T-MAC emprega autoconfiguração para identificar seus vizinhos durante a inicialização da rede e para permitir a inserção ou remoção de nós. Esse protocolo também se adapta à variação de carga na rede reduzindo o período ativo.

Comparativamente o T-MAC consegue ser mais eficiente em energia que o S-MAC. O uso de temporizador para reduzir o período de atividade do nó, quando

não existe atividade na rede, limita a largura de banda e a transferência de grandes quantidades de dados. Atualmente o protocolo T-MAC pode ser encontrado para implementações na plataforma EYES [EYES Project, 2005].

4.4 Protocolo B-MAC

O protocolo B-MAC (*Berkeley Media Access Control*) foi projetado para aplicações dirigidas a eventos em RSSFs [Polastre et al., 2004]. A meta desse protocolo é ser eficiente em energia, evitar colisões na rede, possuir menor tamanho de código e fornecer interfaces para permitir reconfiguração de parâmetros pela aplicação. O B-MAC emprega mecanismos para reduzir o consumo de energia e maximizar a vazão e a justiça da rede.

O B-MAC utiliza um rádio monocanal e alocação dinâmica com coordenação aleatória do canal. Esse protocolo não utiliza quadros de sincronização ou de reserva de banda de modo a reduzir o tamanho de código. Para evitar colisão de quadros na rede, o B-MAC utiliza uma heurística que verifica se existe atividade no canal por julgamento do seu estado, livre ou ocupado. Essa heurística é conhecida como CCA (*Clear Channel Assessment*), que amostra a força do sinal recebido do meio de transmissão quando não existe tráfego na rede. A partir dessas amostras é determinado o valor máximo de ruído do meio, sendo denominado de ruído base.

Dessa forma, quando um nó deseja transmitir ele amostra o nível de sinal do meio e o compara com o ruído base usando o CCA. Caso o sinal amostrado seja maior que o ruído base, é estimado que o canal está ocupado e o nó não poderá transmitir. Dessa forma, a transmissão será atrasada por meio de um algoritmo de *backoff* aleatório. Se o sinal amostrado está próximo do ruído base então o meio está livre para a transmissão. O CCA provê um método de detecção de portadora antes da transmissão pelo nó, não necessitando de sincronização entre os nós vizinhos ou reserva de canal.

O B-MAC utiliza ciclo de operação para minimizar os períodos de *idle listening*. O nó periodicamente escuta o canal para obter as amostras do nível de sinal e verificar se existe alguma transmissão em progresso. Se alguma transmissão é identificada, o nó entra em modo de recepção e pesquisa um preâmbulo no sinal recebido. Para garantir a escuta dos quadros, os preâmbulos enviados são ajustados de maneira que seu tempo de transmissão seja superior ao intervalo de tempo de repouso dos nós. Esse método de escuta assíncrona do canal é conhecido como LPL (*Low Power Listening*). Dessa forma, o tempo de vida da rede é função do intervalo de amostragem, do tamanho do preâmbulo e do tempo de repouso do

nó.

O protocolo foi projetado de maneira a permitir a reconfiguração de seus parâmetros pelos serviços da aplicação em função das condições do enlace, do número de vizinhos e do tráfego da rede [Polastre et al., 2004]. Essa capacidade de adaptação do B-MAC permite simplicidade e redução do tamanho do código, suporte a vários tipos de tráfego, maior funcionalidade e o aumento do tempo de vida da rede.

Os serviços da aplicação podem controlar adaptativamente os parâmetros do B-MAC habilitando ou desabilitando o CCA, configurando períodos de *back-off* para negociar vazão e justiça. O protocolo também permite configurar um serviço confiável de enlace por meio de quadros de controle de mensagem recebida (ACK), o serviço pode escolher entre retransmitir quadros perdidos e reconfigurar o tamanho do preâmbulo. O tamanho do preâmbulo está relacionado com o tempo de repouso do nó, de maneira que seja possível que o nó detecte o preâmbulo a cada ciclo de operação. No B-MAC o tamanho do preâmbulo é calculado dinamicamente em função do tempo de repouso, de modo a minimizar o custo da transmissão do preâmbulo.

Nenhum requisito de qualidade de serviço é considerado no protocolo B-MAC, suas metas são economia de energia, justiça e vazão da rede. O B-MAC encontra-se implementado nas arquiteturas de nós sensores que utilizam o sistema operacional TinyOS [Levis et al., 2004b].

4.5 Protocolo TRAMA

O protocolo TRAMA (*TR*affic *A*daptive *M*ultiple *A*ccess) é baseado em alocação estática de canal, sendo projetado para aplicações dirigidas a eventos para RSSFs [Rajendran et al., 2003]. Esse protocolo tem como meta ser eficiente em energia e o método de acesso ao canal garante que não existirão colisões em comunicações *unicast*, *broadcast* ou *multicast*.

A transmissão de dados é coordenada usando escalas que são construídas utilizando um algoritmo distribuído de eleição. Este algoritmo determina qual nó pode transmitir em determinado intervalo de tempo (*time slot*) e não faz reserva para os nós sem tráfego de envio. O algoritmo de eleição, que é baseado em informações de tráfego de cada nó, seleciona receptores baseados em escalas anunciadas pelos transmissores. As escalas são obtidas pela troca de informações locais de sua vizinhança de dois *hops* e especificam quais nós serão os respectivos receptores de seu tráfego em ordem cronológica.

O TRAMA alterna entre acessos aleatórios, usados para troca de quadros de controle, e acessos escalonados, usados para troca de dados. O período de alocação dinâmica é usado para atualizar as informações da vizinhança, permitindo ao TRAMA escalonar a transmissão de dados e realizar autoconfiguração quando nós são adicionados ou removidos da rede. O protocolo executa três tarefas durante o período de alocação dinâmica do canal:

- NP (*Neighbor Protocol*) - responsável pela propagação e atualização de informações sobre seus vizinhos de um *hop*. As atualizações são incrementais e permitem determinar o conjunto de vizinhos que serão adicionados ou removidos da rede.
- SEP (*Schedule Exchange Protocol*) - permite que os nós troquem informações da vizinhança de suas escalas de dois *hops*.
- AEA (*Adaptive Election Algorithm*) - utiliza as informações da vizinhança e de suas escalas para selecionar transmissores e receptores para o intervalo de tempo atual, enquanto os outros nós selecionam o modo de repouso (*sleep*).

O protocolo TRAMA cria uma visão global da rede pela troca de mensagens locais e de sua vizinhança de dois *hops*. Assume também que não existe problema de escorregamento de relógio. Mesmo com todas essas considerações, as simulações realizadas com esse protocolo mostraram que ele é adequado apenas para aplicações insensíveis à latência e que requeiram alta taxa de entrega. Esse protocolo não implementa qualquer técnica de QoS.

4.6 O padrão IEEE 802.15.4

O IEEE 802.15.4 é uma padronização das camadas física e de acesso ao meio para dispositivos de baixo custo, que possuem limitações severas de energia e que enviam dados a baixas taxas [Zheng and Lee, 2004b]. O padrão IEEE 802.15.4 é uma alternativa ao Bluetooth [SIG, 2004], pois suporta um maior número de dispositivos e possui implementação mais simples e de menor custo. Foi desenvolvido para aplicações de automação doméstica e industrial, monitoração ambiental e entretenimento, além das RSSFs. São permitidos até 2^{64} dispositivos na rede, distribuídos em uma ou mais redes, coexistindo até 2^{16} redes em uma região.

O padrão especifica duas frequências de operação: 2,4 GHz com banda total de 250 kbps, e 868/915 MHz operando a 20/40 kbps, respectivamente. A frequência

de operação também determina outras características, como área máxima de cobertura do sinal, interferência e modulação [Callaway et al., 2002]. A largura de banda é dividida em canais. Por padrão todos esses canais são utilizados, mas podem ser selecionados dinamicamente por outras camadas como uma forma de atenuar interferências com outras redes ou evitar canais com ruído alto.

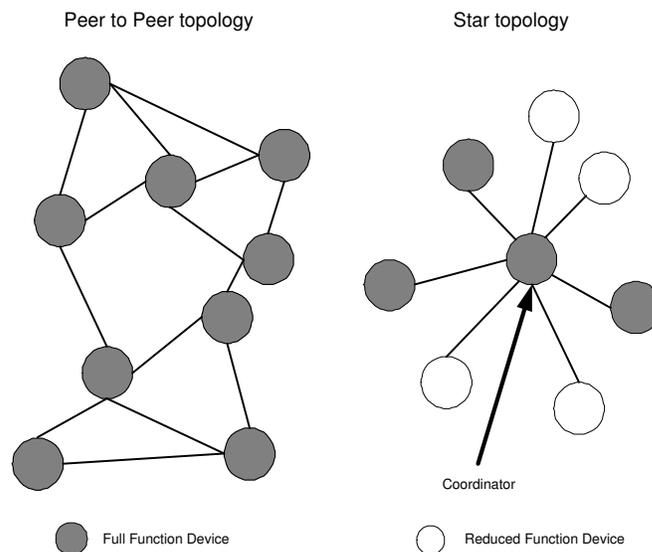


Figura 4.3: Organizações de uma rede no padrão IEEE 802.15.4.

O padrão foi desenvolvido para topologias estrela e com comunicação multi-saltos, definidos pela camada de controle de acesso ao meio, mostrados na figura 4.3. A configuração da rede permite o uso de dispositivos mais simples, possibilitando assim redes de baixo custo, como detalhamos a seguir.

Redes em estrela: as redes em estrela são apropriadas para aplicações onde um nó com grande capacidade, chamado de FDD (*Full Function Device*), controla a comunicação entre vários dispositivos restritos RFDs (*Reduced Function Devices*). Os sistemas domésticos de alarmes ou de substituição de cabos são exemplos de aplicações que se beneficiam dessa topologia. Nestas redes o controlador da comunicação é denominado coordenador, e toda a comunicação é feita por meio deste. As topologias em estrela podem operar em CSMA/CA sem *slots* ou com *slots* (chamado de *beacon-mode*).

Redes multisaltos: nestas redes todos os dispositivos são FFDs, e se comunicam diretamente ou utilizando uma comunicação multisalto. São redes onde os dispositivos formam uma rede ad hoc, como em redes de sensores.

As redes em estrela possuem mecanismos adicionais para reduzir o consumo de

energia. Um deles é o *beacon-mode*, no qual o coordenador estabelece uma janela chamada de *superframe*, mostrada na figura 4.4, que divide o tempo em intervalos (ou *slots*). Periodicamente o coordenador envia uma mensagem de sincronização chamada de *beacon*, que determina o início de um *superframe*, bem como o seu tamanho e número de *slots*. O acesso ao *slot* é por contenção, utilizando o método CSMA/CA, ou sem contenção quando alocados para um nó específico. Os slots sem contenção são chamados de GTS (*Guaranteed Time Slot*).

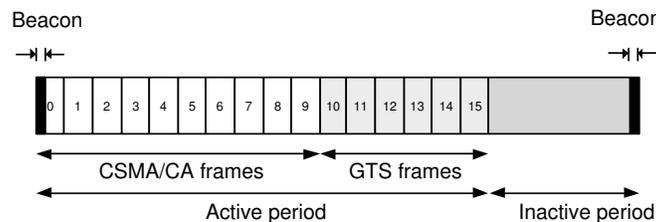


Figura 4.4: Estrutura de *superframe* utilizada no 802.15.4 em *beacon-mode*.

O GTS possibilita a implantação de qualidade de serviço no MAC. O *beacon-mode* também determina um período de inatividade, onde todos os nós desligam o seu rádio. Por fim, o coordenador pode estabelecer uma forma indireta de comunicação, permitindo ainda maior economia de energia pelos dispositivos escravos. Neste modo, o coordenador anuncia a cada início de *superframe* uma lista de dados pendentes, utilizando uma mensagem de *beacon*. Os dados são armazenados até que o nó requisite explicitamente o seu recebimento, permitindo assim que os dispositivos liguem o rádio esporadicamente para consultar se existem quadros a serem recebidos.

O padrão IEEE 802.15.4 ainda especifica mecanismos de auto-organização da rede, que permitem a um dispositivo detectar as redes presentes e ajustar a sua operação, além de prever extensões de segurança.

Zheng e Lee analisaram o desempenho do IEEE 802.15.4 [Zheng and Lee, 2004a]. Neste estudo verificaram que, apesar de não utilizar reserva de canal, o 802.15.4 possui uma degradação de desempenho ocasionada pelo problema do terminal escondido, mas que é negligenciável para redes com baixas taxas de dados. O estudo mostra que a utilização do meio sem reserva permite uma diminuição na latência, apesar do aumento das colisões. Verificou-se que, mesmo com *superframes* muito longos, que permitem ao nó desligar o rádio por períodos prolongados, a perda de sincronização é rara, e quando acontece o nó rapidamente se associa novamente à rede.

Atualmente existem poucas implementações do IEEE 802.15.4, mas seu uso tende a aumentar devido ao seu emprego na arquitetura ZigBee [Kinney, 2003], apoiada por vários fabricantes de dispositivos embutidos.

4.7 Protocolo WiseMAC

O protocolo WiseMAC foi desenvolvido para aplicações dirigidas a eventos, como detecção de movimento de pessoas ou animais em um ambiente [El-Hoiydi and Decotignie, 2004]. A meta desse protocolo é ser eficiente em energia diminuindo o tempo de escuta ociosa (*idle listening*) e adaptando-se ao tráfego da rede.

O WiseMac utiliza um rádio monocanal de baixa potência. O controle de acesso ao meio é realizado por alocação dinâmica do canal e utiliza o método CSMA/CA. A técnica de amostragem de canal é usada para minimizar o consumo de energia durante o período *idle listening*. No WiseMac essa técnica consiste em obter amostras em intervalos regulares para verificar se existe atividade no canal. O período de amostra tem a duração de um símbolo.

Os nós amostram o canal com a mesma periodicidade, mas seguem escalas diferentes e independentes do tráfego na rede. Se o canal está ocupado, o receptor continua escutando até que o canal se tornar livre novamente. No emissor um preâmbulo de *wake-up* é transmitido antes do quadro de dados, garantindo que o receptor estará acordado quando o quadro chegar. O tipo de notificação usada nesse protocolo é por escuta assíncrona do canal.

Para minimizar o consumo de energia devido à transmissão de preâmbulos, os nós aprendem a diferença do período de amostragem entre seus vizinhos. A diferença entre as escalas é obtida por transmissão de um quadro de reconhecimento (ACK), sendo esses valores armazenados em uma tabela. A transmissão entre vizinhos é realizada no tempo exato de amostragem. Nenhum quadro de sincronização é trocado entre os nós e a comunicação segue um modelo de coordenação aleatório.

O WiseMac se adapta às condições de tráfego da rede em função do período de recebimento de confirmações. Em condições de baixo tráfego na rede o protocolo usa preâmbulos de *wake-up* mais longos para reduzir o consumo de energia da recepção. Se o tráfego na rede é alto os preâmbulos de *wake-up* serão menores reduzindo o consumo de energia.

O protocolo WiseMAC obtém considerável redução no consumo de energia e

adaptabilidade às condições de tráfego da rede, mas nenhum outro parâmetro de qualidade de serviço é considerado. Este protocolo foi desenvolvido no projeto de RSSFs WiseNETTM [Enz et al., 2004].

4.8 Protocolo LMAC

O protocolo LMAC (*Lightweight Medium Access Control*) foi desenvolvido especificamente para RSSFs e possui como metas ser eficiente em energia, minimizando o *overhead* da camada física, e reduzindo o número de transições de estados dos transceptores (liga-desliga) [van Hoesel and Havinga, 2004].

O projeto do LMAC assume um rádio monocanal com controle de acesso ao meio baseado em alocação estática de canal que utiliza a técnica TDMA. Para cada nó é reservado somente um *time-slot*, durante o qual o nó pode transmitir ou receber dados. Cada nó é responsável pelo controle de seu próprio *time slot*, usando métodos de alocação de canal distribuída e coordenação escalonada. Um *slot* pode ser reusado por um ou mais nós desde que estejam antes fora do alcance de rádio, ou seja em pontos diferentes da rede.

Os quadros transmitidos pelos nós possuem duas partes, controle e dados. A parte de controle é utilizada para manter e controlar a sincronização entre os nós, sendo necessário que os nós transmitam o número do *time slot* utilizado. Os nós receptores escutam durante o seu *time slot* os quadros enviados por seus vizinhos. Se o quadro recebido não é endereçado ao nó o rádio é colocado em repouso. Se o quadro é endereçado ao nó, ele escuta a parte de dados que pode ser menor que o *time slot* alocado. Os transmissores e receptores desligam seus rádios após a transmissão dos dados até o seu próximo *time slot*.

Na inicialização da rede todos os nós estão desincronizados. O ponto de acesso (PA) é responsável por sincronizar todos os nós, enviando um quadro de controle e especificando a escala para cada *slot* alocado. Os nós dentro do alcance de transmissão do PA, vizinhos de um salto, receberão o quadro de controle e sincronizarão seus relógios com o PA. Os nós vizinhos escolherão aleatoriamente um *slot* que não esteja ocupado. Os nós da rede mantêm uma tabela com seus vizinhos de até três saltos para diminuir a probabilidade de colisões e para permitir o reuso do *slot*.

O nó ao escolher um *slot* ocupado deverá aguardar um período de *backoff* e escolher posteriormente outro *slot*. Os *slots* selecionados pelos nós são mantidos durante o tempo de vida da rede ou são alterados devido a uma colisão. O número de *slots* deve ser suficientemente grande para manter a conectividade da rede. O

protocolo LMAC é um protocolo não adaptável que não possui qualquer requisito de QoS. O LMAC foi avaliado por simulação, e atualmente não está disponível em nenhuma plataforma real de rede de sensores.

4.9 Protocolo AI-LMAC

O protocolo AI-LMAC (*Adaptive Information-centric Lightweight MAC*) é uma extensão do protocolo LMAC, sendo o primeiro protocolo a empregar mecanismos de adaptação para interação com os protocolos de roteamento e de aplicação [Chatterjea et al., 2004]. Esse protocolo foi projetado para aplicações que disseminam requisições na rede para descobrir o estado atual dos sensores. O protocolo AI-LMAC ao receber as respostas às requisições e identificar quais os nós estão presentes na rede ajusta a quantidade de tráfego que o nó pode enviar.

Da mesma forma que o LMAC, o AI-LMAC é um protocolo não adaptável com alocação dinâmica de canal. Diferentemente do LMAC, os nós alocam mais que um *time slot* por vez. O número de *slots* alocados é proporcional à quantidade de tráfego que o nó recebe e envia. Para determinar o número de *slots* alocados, o AI-LMAC irá interagir com as tabelas de DDT (*Data Distribution Tables*), que mantém gravado o estado atual de requisições na rede.

Essas tabelas informam quantos nós dependem do nó atual para entregar dados para cada requisição, e qual é o número esperado de pacotes recebidos para esses nós. Usando esta informação, o AI-MAC identifica quantas requisições dependem desse nó, e aloca a largura de banda de acordo com cada requisição. Dessa forma, esse mecanismo implementa o controle de admissão, fornecendo um alto grau de justiça entre as requisições e aumentando o QoS nas transmissões.

O DDT é também populado com informações de roteamento, que são usadas para melhorar a QoS da rede. Todos os nós sabem quais vizinhos enviam dados para o nó atual, e usam essa informação para evitar perda de quadros devido a fila cheia. Como exemplo, considere a rede da figura 4.5.

Nessa figura os nós *C* e *D* entregam dados para o nó *B*, o qual entrega todos os dados para o nó *A*. Dessa forma, se o nó *A* aloca 10 *slots* para comunicar-se com *B*, todos os dados produzidos por *B*, *C* e *D* devem ser transmitidos dentro de 10 *slots*. Dessa forma, *B* aloca até 10 *slots* para *C* e *D*. Se mais do que 10 *slots* são alocados, os quadros serão acumulados em *B*, e eventualmente serão descartados, assim *A* não manipula mais do que 10 quadros de *B* ao mesmo tempo. A alocação de *slots* é reconfigurada a cada nova requisição, então o protocolo se autoconfigura para o novo padrão de tráfego.

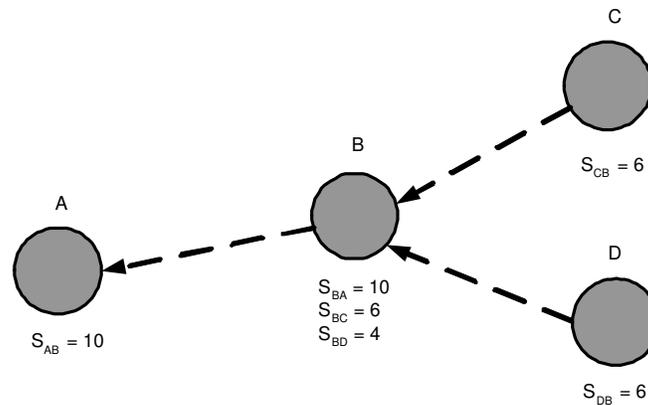


Figura 4.5: Controle de admissão no protocolo AI-LMAC.

4.10 Classificação dos protocolos MAC para RSSFs

Os protocolos MAC para RSSFs apresentados neste capítulo, em geral, foram desenvolvidos em projetos de pesquisa de universidades por meio de simulações ou aplicações implementadas em plataformas comerciais. A tabela 4.1 apresenta em ordem cronológica de desenvolvimento dos principais protocolos e suas plataformas de experimentação ou simulação empregadas para cada protocolo.

Os mecanismos utilizados pelos protocolos MAC para RSSFs visam otimizar alguma métrica. Em geral, esses protocolos buscam aumentar o tempo de vida da rede, em detrimento de parâmetros de latência, vazão, taxa de entrega e outros, para reduzir o consumo de energia durante a comunicação entre os nós. Utilizando a taxonomia que definimos para protocolos MAC para RSSFs, classificamos os protocolos apresentados neste capítulo, conforme mostra a tabela 4.2.

Podemos observar da tabela 4.2 que todos os protocolos MAC para RSSFs apresentados empregam transeptores de um único canal. Esses transeptores, em geral, são de ultra baixa potência, apresentam uma arquitetura de hardware simplificada e modos de operação elementares de forma a garantir um consumo de pico de apenas mW .

O método de alocação de canal mais empregado tem sido o dinâmico, principalmente nos protocolos avaliados em plataformas comerciais. Os protocolos que empregam alocação estática de canal, na sua maioria, são somente simulados, o que pode ser justificado pela complexidade encontrada em estabelecer sincronismo entre os nós de uma rede ad hoc sem fio.

Tabela 4.1: Protocolos MAC em ordem cronológica.

Protocolos	Data	Projetos/ Universidades	Plataforma
S-MAC	2001	SCADDS/ USC-IS	Mica Motes
ARC	2001	University of California Berkeley	Mica Motes
T-MAC	2003	University of Technology The Netherlands	EYES
B-MAC	2003	UCLA/ USC/ IR	Mica Motes
TRAMA	2003	i-NRG/ UC Santa Cruz	Simulação
IEEE 802.15.4	2004	IEEE/ Zig Bee Alliance	Mica Motes
WiseMAC	2004	CSEM/ Switzerland	WiseNet
LMAC	2004	University of Twente, NL	Simulação
AI-MAC	2004	University of of Twente, NL	Simulação

Os protocolos MAC para RSSFs devem seguir algum método de notificação para que um nó receptor esteja apto a estabelecer a comunicação entre os nós. A alocação estática de canal, empregada por alguns protocolos, utiliza escalonadores e reserva de canal para estabelecer a comunicação e notificar o receptor. A técnica de comunicação empregada em protocolos com alocação dinâmica de canal segue os modelos de contenção CSMA/CA que é aleatória. Entretanto, o método de notificação que predomina entre os protocolos apresentados é o de escuta síncrona do canal, onde os nós usam um ciclo reduzido de operação e empregam escalonadores para que o receptor esteja pronto para receber dados.

Em geral, as aplicações em RSSFs apresentam um cenário dinâmico, de modo que os nós devem se adaptar às mudanças da rede. Os protocolos apresentados são em geral autoconfiguráveis em resposta às alterações da rede e em alguns casos se reconfiguram em função das características da aplicação executada.

Podemos observar que a maioria dos protocolos MAC desenvolvidos para RSSFs empregam a plataforma Mica Motes, talvez por ser a primeira plataforma de nós sensores que suporta um sistema operacional aberto para o desenvolvimento de aplicações diversas. Como tendência de desenvolvimento desses protocolos observamos que o método de alocação de canal é dinâmico, empregando

Tabela 4.2: Classificação dos protocolos MAC.

Protocolos	Alocação de canais	Técnicas de Comunicação	Notificação	Capacidade de adaptação	QoS
S-MAC	Monocanal CSMA/CA	Híbrido	Escuta Síncrona	Autoconfigurável	não
ARC	Monocanal CSMA/CA	Aleatório	Escuta Síncrona	Autoconfigurável	Admissão
T-MAC	Monocanal CSMA/CA	Híbrido	Escuta Síncrona	Autoconfigurável	não
B-MAC	Monocanal CSMA/CA	Aleatório	Escuta Assíncrona	Reconfigurável	não
TRAMA	Monocanal TDMA	Escalonado	Reserva	Autoconfigurável	não
IEEE 802.15.4	Monocanal CSMA/CA	Híbrido	Reserva	Autoconfigurável	Admissão
WiseMAC	Monocanal CSMA/CA	Aleatório	Escuta Assíncrona	Estática	não
LMAC	Monocanal TDMA	Escalonado	Reserva	Estática	não
AI-LMAC	Monocanal TDMA	Escalonado	Reserva	Estática	Admissão

CSMA/CA, com estabelecimento de comunicação híbrida ou aleatória, usando notificação por escuta síncrona ou assíncrona do canal pelo receptor. Os futuros protocolos MAC devem atender aos requisitos de QoS impostos pela aplicação, reconfigurando-se e adaptando-se à dinamicidade da rede.

4.11 Conclusões

O consumo de energia nos elementos de rede ainda é um grande problema na operação das RSSFs. Pesquisas têm sido realizadas para o desenvolvimento de novos dispositivos eletrônicos que consumam menos energia, utilizando modos de gerenciamento de energia e variação de potência do sinal transmitido. Das tarefas de um nó sensor, para as redes que estamos tratando aqui, a comunicação é a que consome mais energia, sendo que os protocolos MAC em especial influenciam fortemente no consumo.

O consumo de energia, entretanto, não é o único requisito a ser considerado. Aplicações podem demandar da rede um serviço confiável, impondo requisitos de segurança, qualidade de serviço, tolerância a falhas, escalabilidade e auto-configuração. Para nortear o desenvolvimento de protocolos que sigam estas características, apresentamos uma taxonomia de protocolos MAC que considera esses requisitos. A taxonomia, baseada em técnicas propostas para protocolos em redes sem fio categoriza os protocolos de acordo com os mecanismos de alocação

do canal, coordenação da comunicação, notificação de envio dos dados, adaptabilidade e qualidade de serviço. Utilizamos esta taxonomia para classificar os protocolos existentes.

É importante observar que não existe um protocolo MAC que atenda às necessidades de todas as aplicações e, portanto, novos mecanismos deverão ser desenvolvidos nos próximos anos. A evolução do hardware permitirá o emprego de rádios reconfiguráveis. Outras tecnologias tais como CDMA e UWB (*Ultra Wide Band*) também irão contribuir para modificar os métodos empregados em protocolos de controle de acesso bem como a taxonomia proposta.

O próximo capítulo apresenta os principais protocolos em redes móveis ad hoc que empregam CPT. Este capítulo tem como objetivo lançar as bases para a proposição de novas técnicas de CPT para RSSFs.

Capítulo 5

Protocolos em MANETs com CPT

Este capítulo descreve os mecanismos de controle da potência de transmissão empregados nos principais protocolos MAC das redes móveis ad hoc. Os esquemas de comunicação que são apresentados nas redes móveis ad hoc, na sua maioria, modificam as características do protocolo padrão IEEE 802.11 para reduzir o consumo de energia e prover reuso do canal por meio do controle de potência de transmissão. São discutidos alguns problemas e soluções encontrados por esses protocolos em MANETs e as restrições de sua aplicação em RSSFs.

5.1 Gerenciamento de energia e CPT

A limitação dos recursos de energia nas redes móveis sem fio tem requerido pesquisas de novas técnicas para a economia de energia. Em geral, dois mecanismos têm sido propostos em MANETs: gerenciamento de energia e controle da potência de transmissão.

- *Gerenciamento de energia (Power Save)* - os nós entram em modo de baixo consumo de energia desligando o rádio de sua interface de rede sem fio quando comandados [Chen et al., 2001, Jung and Vaidya, 2002, Langendoen and Halkes, 2005, Singh and Raghavendra, 1998].
- *Controle de potência da transmissão* - os nós são comandados para aumentar ou diminuir o nível do sinal transmitido para economizar energia e possibilitar o aumento do número de transmissões simultâneas dentro da rede [Agarwal et al., 2001, Jung and Vaidya, 2002, Karn, 1990, Monks, 2001, Pires et al., 2004, Pursley et al., 2000, Son et al., 2004].

Atualmente, o mecanismo de gerenciamento de energia é usado em quase todas as interfaces sem fio IEEE 802.11, permitindo a manipulação direta pelo usuário ou pelo sistema operacional. Os mecanismos de controle de potência têm sido largamente utilizados em redes de celulares CDMA, WMANs e em protocolos MANETs. Para as redes de sensores sem fio nenhum protocolo de controle de acesso ao meio utiliza esse tipo de mecanismo até então.

As técnicas desenvolvidas para MANETs, em sua maioria, não podem ser empregadas diretamente nas RSSFs. As limitações de recursos nas RSSFs, como energia, processamento e memória, são mais severas que nas MANETs. Esse capítulo tem o objetivo de apresentar o estado da arte de desenvolvimento dos protocolos MAC com CPT em MANETs. O conhecimento dos mecanismos e técnicas de CPT utilizados em MANETs contribui para o desenvolvimento e aplicação de novas técnicas de CPT para RSSFs. Com esse objetivo apresentamos a seguir os principais esquemas de controle de potência empregados em MANETs.

5.2 MACA: o primeiro protocolo com CPT

A proposta de utilizar controle de potência em redes sem fio não é nova. Karn, ao propor o protocolo MACA (*Multiple Access with Collision Avoidance*) em 1990, já especificava um esquema para controle automático do nível de sinal transmitido [Karn, 1990]. A proposta apresentava a necessidade de empregar hardware adicional para controlar o nível de sinal transmitido e para medir a força do sinal recebido.

O esquema de Karn com CPT propõe que o emissor faça uma estimativa da potência mínima necessária para alcançar um determinado receptor quando os nós interagem trocando quadros de controle *RTS-CTS*. O receptor, ao receber um quadro *RTS*, faz a leitura do nível do sinal recebido e inclui essa informação dentro do quadro *CTS*, que é enviado para o emissor. O recebimento de um quadro *CTS* atualiza as informações do nível de sinal no emissor, auxiliando na estimativa da potência de transmissão dos próximos quadros. Essa estimativa determina a potência mínima de transmissão necessária para que o nó destino seja alcançado. Os quadros de dados enviados após essa estimativa serão transmitidos com a potência mínima necessária para alcançar o destino.

Uma modificação proposta no protocolo MACA original é feita de maneira que quando as estações vizinhas escutarem um quadro de *CTS* na rede, ao invés de bloquearem seus transmissores, elas limitam temporariamente a potência de saída de seus transmissores. Isso permite o reuso espacial do canal, ou seja, permite que um número maior de estações possam transmitir ao mesmo tempo sem causar

interferência entre as transmissões de seus vizinhos. Por exemplo, se uma estação A transmitiu recentemente para uma estação B , então A , pela estimativa do sinal recebido do CTS de B , conhece qual a potência necessária para alcançar B . Se a estação B responde a uma transmissão para uma outra estação C de maneira que a estação A pôde escutar seu CTS , então a estação A poderá estimar o alcance de C . Dessa forma, a estação A não necessita permanecer em silêncio, ela pode transmitir para uma outra estação que esteja fora do alcance de transmissão das estações B e C , usando uma potência de transmissão reduzida.

Um problema enfrentado no envio de quadros CTS , para indicar ao emissor que ele pode enviar seus dados, está nas interferências e ruídos encontrados no meio de transmissão. Dessa forma, o receptor pode necessitar de maior potência para enviar um quadro CTS do que o valor estimado. O receptor após enviar seu quadro de CTS aguarda por um período de tempo o recebimento de dados ($DATA$). Caso o receptor receba um quadro de RTS ao invés dos dados, ele deverá aumentar sua potência de transmissão para enviar um novo quadro CTS . Por outro lado, se o receptor recebeu corretamente os dados do emissor, ele poderá tentar diminuir a potência de transmissão até o limite de alcance do emissor.

De maneira geral, o controle de potência apresentado no MACA é apenas um esquema sem nenhuma implementação prática ou análise formal. Esse esquema apresenta apenas os requisitos para o controle automático da potência de transmissão. Outros protocolos para MANETs baseados nas propostas de controle de potência do protocolo MACA são encontrados na literatura. Alguns dos principais protocolos para MANETs que empregam controle de potência de transmissão são descritos a seguir.

5.3 Protocolo PCMA: controle de potência com negociação

O PCMA (*Power Controlled Multiple Access*) é um protocolo de controle de acesso ao meio que, além de evitar colisões, tem como objetivo melhorar a eficiência do uso do canal de rádio por meio do controle de potência do sinal transmitido [Monks et al., 2001]. O protocolo é projetado para MANETs e não necessita de uma estação base para gerenciamento da potência de transmissão.

O controle de potência de transmissão do PCMA proporciona uma comunicação entre transmissor e receptor com raio mínimo de propagação, permitindo que outras estações na rede possam se comunicar ao mesmo tempo sem que haja colisões. O protocolo PCMA usa uma abordagem baseada na força do sinal

recebido das mensagens de controle para limitar a potência de transmissão das estações envolvidas na comunicação. São utilizados dois canais de rádio, um para enviar os quadros de dados e outro para enviar as mensagens de controle. Essas mensagens de controle são sinais que informam às estações próximas que o canal está ocupado (*busy tone*). Na verdade, é uma generalização do quadro de controle *CTS* usado em outros protocolos.

O PCMA utiliza quadros de controle, *RPTS* (*Request Power To Send*) e *APTS* (*Acceptable Power To Send*), para negociar a mínima potência de transmissão entre emissor e receptor dentro do canal de dados. O diálogo de comunicação segue um fluxo *RTPS-APTS-DATA-ACK* e o nível de ruído do meio de transmissão é obtido em função do nível de sinal recebido no canal de controle (*busy tone*).

Os componentes do PCMA são análogos aos empregados no CSMA/CA. O emissor monitora o canal de controle escutando se existe tom de ocupado (*busy tone*), de maneira equivalente à detecção de portadora. O receptor periodicamente pulsa o tom de ocupado no canal de controle, equivalente ao *CTS* para evitar colisões. A negociação *RTPS-APTS* precede a transmissão de dados, similar à troca de *RTS-CTS*, exceto que sua proposta não é forçar estações escondidas a atrasarem suas transmissões, mas de negociar uma potência de transmissão de dados. Desta forma, o PCMA procura melhorar a eficiência do acesso ao canal sem alterar o paradigma fundamental de controle de acesso ao meio. O algoritmo de CPT empregado no PCMA é dado por:

Seja i um nó origem que deseja transmitir para um nó destino j com a interferência de um potencial transmissor l . Os passos descritos a seguir e a figura 5.1 (Fonte: [Bambos and Kandukuri, 2000]) mostram como o protocolo PCMA é executado pelos nós envolvidos na comunicação.

1. Inicialmente o nó i está em modo ocioso monitorando o canal de controle. Para determinar o limite inferior de potência de transmissão, P_{min} , o nó mede o nível de sinal recebido no canal de controle (ruído do meio). Quando i deseja transmitir um quadro de dados, calcula o valor da potência de transmissão, maior que o limite inferior P_{min} , e aguarda um tempo aleatório para resolver problemas de contenção. Durante esse atraso aleatório o nó continua escutando e medindo o nível de sinal no canal de controle. Se após esse período de tempo a potência de transmissão calculada, P_{tx} , ainda é superior à P_{min} , o nó envia um quadro *RPTS* com este valor de potência pelo canal de dados. O quadro *RPTS* contém em seu cabeçalho os níveis das potências de transmissão e de ruído do canal de controle.
2. O nó j ao receber o quadro *RPTS*, mede a potência do sinal recebido P_{rx} e calcula o ganho do sinal em relação à P_{tx} encontrada dentro do quadro.

Em seguida calcula a potência em que os dados devem ser enviados, P_d , de maneira a satisfazer a um valor de potência de recepção mínima ou a uma relação de sinal ruído que mantenha o enlace estabelecido (valores empíricos). Em seguida, calcula a potência de envio do *APTS*, P_j , considerando o nível de ruído local no canal de dados e assumindo que o ganho é o mesmo em ambas as direções. Os dados são enviados pelo canal de dados com P_j . O quadro *APTS* contém a informação sobre as potências de P_d e P_j .

3. O nó i ao receber o quadro *APTS*, verifica se a P_d está abaixo de sua atual $P_{mín}$, e caso esteja transmite o quadro de dados com a potência P_d . Se o quadro *APTS* demorar e esgotar o tempo limite de recepção, o nó i aumenta multiplicativamente o seu tempo de atraso (*backoff*) e reinicia a transmissão.
4. O receptor j ao receber os dados (canal de dados) inicia o envio dos tons de ocupado no canal de controle. Esses tons de ocupado são enviados periodicamente com um nível de potência suficiente para diminuir a probabilidade de interferências destrutivas dos dados.
5. Quando o nó l recebe o sinal de tom de ocupado, ele calcula seu limite de potência de transmissão, P_{tl} imposta pelo nó j . Se o nível de potência P_{tl} é menor que o nível de sinal do canal de dados $P_{mín}$ o nó volta para o estado ocioso.
6. Quando o nó j recebe todo o quadro de dados corretamente, ele envia um quadro *ACK* com o nível de potência necessário para alcançar o nó i pelo canal de dados.
7. O nó i ao receber um quadro *ACK* válido retorna para o estado ocioso.

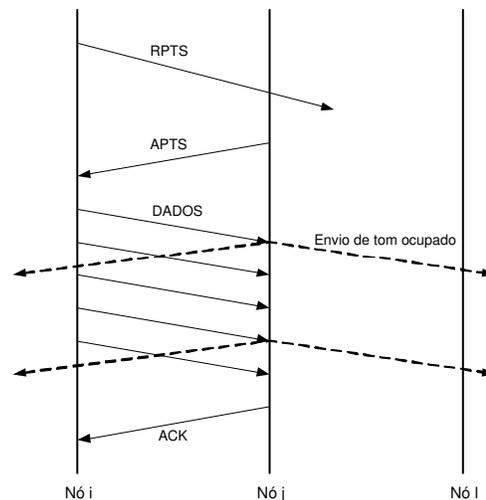


Figura 5.1: Fluxo de comunicação no PCMA.

O protocolo PCMA é avaliado por simulação no *Network Simulator* (NS-2) [Network Simulator, 2004] e apresenta um modelo matemático para os cálculos da potência mínima de transmissão e de tons de ocupado. Na simulação o cenário considerado foi de uma rede estática e altamente densa, para comunicações com a distância de apenas um salto. Os resultados obtidos revelaram que a largura de banda usando o PCMA é superior ao IEEE 802.11 em quase duas vezes [Monks, 2001]. Foi também avaliado o número de emissores simultâneos, o PCMA, por adaptar o raio de transmissão para o valor mínimo entre emissor e receptor, obteve um maior número de transmissões simultâneas que o IEEE 802.11.

5.4 Controle de potência distribuído em MANET

Nas redes de celulares CDMA o controle de potência é feito de maneira centralizada, onde a estação base toma as decisões sobre como administrar e controlar a potência dos transmissores [Oh and Wasserman, 1999]. Um transmissor usará a mínima potência de transmissão necessária para comunicar-se com seu destino. O estabelecimento dessa comunicação com CPT minimiza as interferências causadas por outros terminais na vizinhança, reduz o consumo de energia e melhora a taxa de utilização do canal. Em MANETs a conservação de energia e a largura de banda também são requisitos importantes que devem ser previstos no planejamento dessas redes, mas o CPT deve ser realizado de forma distribuída.

Agarwal et al. propõe um esquema de controle de potência distribuído para redes ad hoc sem fio [Agarwal et al., 2001]. Esse esquema reduz o consumo de energia, mas aumenta potencialmente a latência de comunicação entre os elementos da rede. A economia de energia é obtida por redução das interferências de rádio frequência entre os nós e pela diminuição da potência de transmissão.

O controle de potência é implementado na camada MAC e requer modificações no protocolo padrão IEEE 802.11. O formato dos cabeçalhos dos quadros de controle *CTS-DATA* foram alterados de maneira a incluírem o valor da relação da força do sinal recebido na última mensagem, pela força do sinal de transmissão empregado atualmente pelo nó. Essas modificações nos cabeçalhos das mensagens de controle são baseadas na descrição da proposta do protocolo MACA [Karn, 1990]. Outra modificação proposta é que cada nó mantenha uma pequena tabela de vizinhos, armazenando os valores das potências empregadas para alcançar o destino das últimas transmissões efetuadas. Essa tabela possui dois campos: um que mantém o histórico da relação da força do sinal recebido e da potência atual necessária para transmitir para cada vizinho cf_{pwr} (*current-forward power*), e outro campo que contabiliza as mensagens perdidas, ou tentativas de envio a nós vizinhos na potência dr_{pwr} (*discarded power*). Um contador é mantido em cada

nó, e para evitar flutuações rápidas dos valores de potências armazenadas, é usado um algoritmo de média móvel ponderada exponencial (EWMA - *Exponentially Weighted Moving-Average*).

O algoritmo proposto pelo protocolo padrão IEEE 802.11 é modificado para inserir controle de potência, sendo descrito abaixo:

1. Um nó i ao transmitir uma mensagem para um nó de destino j , primeiro verifica se o endereço de j está em sua tabela de vizinhos, se não estiver ele envia um quadro de controle *RTS* na potência máxima.
2. O nó j ao receber o quadro de controle *RTS* verifica o nível de sinal recebido e calcula o valor mínimo da potência de transmissão em que deseja receber os dados. O receptor j atualiza o histórico de sua tabela de vizinhos, campo cf_{pwr} , e envia um quadro de controle *CTS*, contendo o valor mínimo da potência de transmissão de dados. O quadro de *CTS* é enviado na potência máxima de transmissão.
3. O nó i ao receber um quadro de *CTS*, atualiza o campo cf_{pwr} em sua tabela. Se o valor do campo cf_{pwr} é maior que o do campo dr_{pwr} e dr_{pwr} é maior que zero, o nível da potência de transmissão é decrementado em uma unidade (o algoritmo considera que os níveis de potência são discretos). Caso contrário, se $cf_{pwr} < dr_{pwr}$, o valor de cf_{pwr} será incrementado e atualizado na tabela enviando os dados com esse novo valor.
4. O nó j ao receber um quadro de dados *DATA* realiza todo o procedimento anterior e envia um quadro de confirmação *ACK* para o nó i .
5. Se o tempo de espera de quadros expirar em um dos nós aguardando quadros de *CTS*, *DATA* ou *ACK* a potência de transmissão será incrementada em um nível e o valor do campo dr_{pwr} atualizado. A perda de um desses quadros pode ter ocorrido por aumento do ruído do meio de transmissão ou por que o nível da potência de transmissão está abaixo de um limiar de recepção.
6. Na próxima transmissão do nó i para o nó j a potência de transmissão de suas mensagens de controle serão efetuadas com os valores de potência obtidos da tabela de vizinhos.

O protocolo foi simulado no *Network Simulator* (NS-2) [Network Simulator, 2004] com parâmetros reais de uma interface de rede sem fio. Os cenários considerados utilizam nós móveis com baixa mobilidade. Os resultados encontrados demonstram que o protocolo com CPT apresenta economia de energia, cerca de 10 a 20%, em comparação com o protocolo padrão sem IEEE 802.11.

Na avaliação do protocolo não foram analisados os problemas de terminal escondido e estação exposta, já que a minimização da potência de transmissão dos quadros de controle *RTS-CTS* pode aumentar o número de colisões na rede. Também não foram avaliados o reuso espacial do canal, as latências devido às consultas das tabelas e cálculo de potências de transmissão.

5.5 Deficiências dos protocolos com CPT em MANETs

Muitos protocolos com controle de potência têm sido propostos apenas modificando o protocolo padrão IEEE 802.11. Em geral, propõem técnicas de controle de potência que transmitem os quadros de controle *RTS-CTS* na potência máxima para trocarem informações sobre o nível de sinal transmitido no meio. Os quadros *DATA-ACK* são transmitidos na mínima potência de transmissão necessária à manutenção da comunicação entre os nós. O uso de potências em diferentes níveis causa assimetria nos enlaces da rede.

Jung & Vaidya demonstram como esses protocolos, denominados de Esquema Básico, podem degradar a capacidade da rede e aumentar de consumo de energia [Jung and Vaidya, 2002]. Isso ocorre devido às colisões no receptor, causada pela ausência de detecção de portadora pelos nós vizinhos. Para o entendimento do Esquema Básico é necessário estabelecer como um sinal pode ser detectado e decodificado pelo receptor. Os autores definem as seguintes regiões de propagação do sinal:

Alcance de transmissão: limite máximo de área em que um nó consegue transmitir para os demais. Quando o nó está dentro do alcance de transmissão de outro nó, ele pode receber e decodificar corretamente os pacotes do nó emissor.

Alcance de detecção de portadora: limite em que os nós ainda podem detectar transmissões do emissor. O alcance de detecção é maior que o alcance de transmissão, tipicamente duas vezes.

Zona de detecção de portadora: limite da área onde o nó consegue detectar os sinais, mas não decodificá-los corretamente. A zona de detecção de portadora não inclui o alcance de transmissão.

A figura 5.2 mostra as definições anteriores e como esses termos estão relacionados entre si. Para ilustrar o funcionamento, considere que o nó *C* envia

um quadro de controle *RTS* para outro nó. Os nós *B* e *D* estão dentro do alcance de transmissão de *C*, eles detectam a presença da transmissão de um quadro e conseguem decodificá-lo corretamente. Os nós *A* e *E* estão dentro da zona de detecção de portadora e conseguem identificar que existe um sinal sendo transmitido, mas não conseguem decodificar o conteúdo do quadro. Os nós que estiverem fora do alcance da detecção de portadora não escutarão as transmissões realizadas pelo nó *C*. É importante observar que esses alcances variam em função da potência do sinal transmitido e que a forma circular das áreas é apenas ilustrativa.

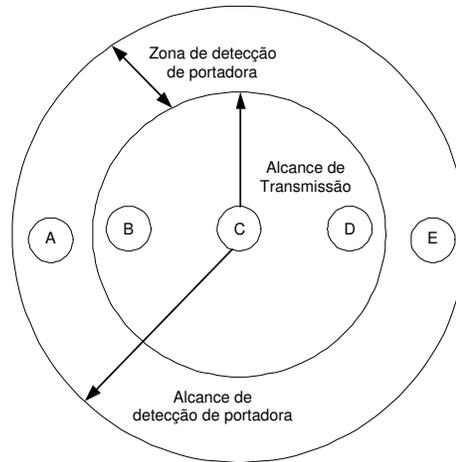


Figura 5.2: Regiões de propagação do sinal transmitido do Esquema Básico.

Os protocolos que empregam o Esquema Básico apresentam deficiência no controle das colisões na rede devido à assimetria dos enlaces. As técnicas de operação desses protocolos são baseadas no protocolo padrão IEEE 802.11 e utilizam detecção de canal físico e de canal virtual. Os quadros envolvidos na comunicação, segundo a especificação do protocolo padrão, possuem um campo com as informações da duração estimada do tempo de transmissão de uma mensagem, usado para ajustar o NAV (*Network Allocation Vector*).

5.5.1 Colisões em protocolos com Esquema Básico

A figura 5.3 mostra como as colisões podem ocorrer em uma rede usando o Esquema Básico com enlaces assimétricos. O ajuste do atraso de transmissão SIFS (*Short Interframe Space*) e DIFS (*Distributed coordination function Interframe Space*) em função dos quadros de controle e de dados é mostrados na figura 5.4. Os passos são descritos a seguir:

1. O nó D transmite em potência máxima (círculo com linha tracejada) um quadro de controle RTS ao nó E . Os nós B , C e F que estão dentro do alcance de transmissão de D irão ajustar o seu NAV (*Network Allocation Vector*) em função das informações decodificadas do quadro RTS e atrasam suas transmissões até o final da transmissão de um quadro ACK .
2. O nó E transmite em potência máxima (círculo com linha tracejada) um quadro CTS para o nó D . O nó G que está dentro do alcance de transmissão de E , também ajusta seu NAV até o final da transmissão de um quadro ACK .
3. O nó A não está dentro do alcance de transmissão dos nós D ou E , mas está dentro da zona de detecção de portadora de D . Ele consegue identificar que existe um sinal sendo transmitido, mas não consegue decodificá-lo. Dessa forma, o nó A ajusta seu NAV por um período referente ao EIFS (*Extended InterFrame Space*). O mesmo ocorre com o nó H .
4. Quando os quadros $DATA-ACK$ são enviados com potência reduzida, a zona de detecção de portadora será menor e os nós A e H não detectarão o sinal de transmissão. Eles poderão iniciar uma transmissão em potência máxima, interferindo na transmissão dos dados $DATA-ACK$. Isso ocorrerá por que os nós A e H não conhecem o tamanho dos quadros transmitidos por D e E e atrasam suas transmissões por um período inferior ao necessário para a transmissão dos quadros $DATA-ACK$.

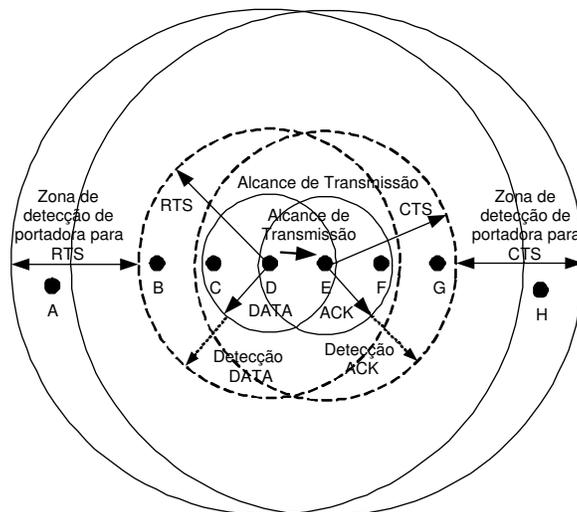


Figura 5.3: Colisões no Esquema Básico.

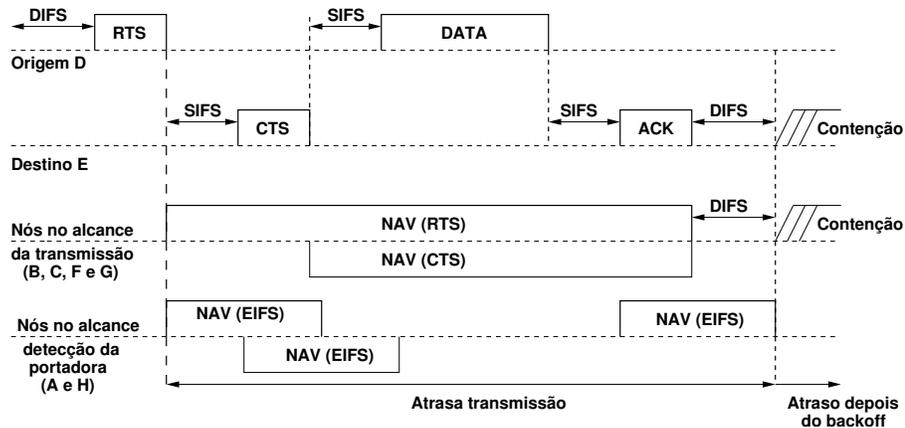


Figura 5.4: Ajuste do atraso de transmissão.

O uso de potências diferentes na transmissão pode causar colisões na rede devido aos enlaces assimétricos que são estabelecidos. Esse aumento de colisões reduzirá a vazão da rede e aumentará o consumo de energia. Uma solução para resolver o problema das colisões no Esquema Básico é proposta por Jung & Vaidya, descrita na próxima seção.

5.5.2 Reduzindo as colisões com o protocolo PCM

Para resolver o problema de colisões em nós vizinhos do transmissor ou do receptor, Jung & Vaidya propõem um esquema em que o quadro *DATA* varie o seu nível de potência durante sua transmissão [Jung and Vaidya, 2002]. O protocolo PCM (*Power Control MAC*) também é uma modificação do protocolo padrão IEEE 802.11. O esquema proposto é descrito a seguir:

1. Os nós de origem e destino transmitem seus quadros de controle *RTS-CTS* na potência máxima. Os nós dentro da zona de detecção de portadora de transmissão ajustam seus NAVs por um período de EIFS.
2. O nó origem transmite seu quadro *DATA* em potência mínima de transmissão, semelhante ao Esquema Básico.
3. Para evitar colisão com o quadro *ACK*, o nó origem transmite seus dados, quadro *DATA*, variando a potência de transmissão entre seus limites mínimo e máximo. Essa variação da potência é feita por um período de tempo que seja suficiente para que os nós na zona de detecção de portadora possam detectar a presença de uma transmissão no meio.

4. O nó destino transmite um *ACK* usando a potência mínima necessária para alcançar o emissor.

Com esse esquema os nós que poderiam potencialmente interferir com a recepção do *ACK* no emissor detectarão a presença de portadora no meio e ajustarão seu NAV por um período EIFS. O protocolo PCM resolve os problemas do uso de enlaces assimétricos, mas não previne totalmente as colisões na rede. Como no protocolo padrão IEEE 802.11, as colisões podem ocorrer com a recepção do quadro *DATA* no destino.

Para avaliação do protocolo PCM foi utilizado o *Network Simulator* (NS-2) [Network Simulator, 2004], sendo também implementados no simulador os protocolos IEEE 802.11 e o Esquema Básico. Os resultados encontrados na simulação demonstram que o protocolo PCM obteve redução do consumo de energia e aumento de vazão, quando comparados aos protocolos IEEE 802.11 e Esquema Básico. Apesar desses resultados, o desempenho do PCM é dependente do tamanho do quadro de dados utilizado e a implementação da variação de potência aumenta sua complexidade. O protocolo PCM não aumenta o reuso do canal em comparação ao protocolo padrão IEEE 802.11.

5.6 Controle de potência com memória

Para evitar que os nós calculem a potência mínima de transmissão a cada interação entre os nós, Pires et al. propõem uma extensão ao Esquema Básico adicionando uma tabela de vizinhos em cada nó [Pires et al., 2004]. Essa extensão é designada de Esquema Básico com memória, no qual a tabela armazena os valores das potências usadas nas suas últimas transmissões. O ciclo de funcionamento do Esquema Básico com memória é descrito a seguir.

1. No início da comunicação na rede todas as tabelas dos nós estão vazias.
2. O nó i inicia a comunicação com o destino j , enviando um quadro de controle *RTS* na potência máxima de transmissão. Esse quadro de controle *RTS* contém informação sobre o nível de potência usado na transmissão.
3. O nó j ao receber o quadro *RTS*, calcula a potência mínima de transmissão necessária ao estabelecimento da comunicação entre i e j . Esse cálculo considera a sensibilidade de recepção e o ganho da potência de transmissão. O nó j envia um quadro de controle *CTS*, também na potência máxima, inserindo o valor mínimo da potência de transmissão em que os dados devem ser enviados dentro do quadro.

4. O nó i , ao receber o quadro *CTS*, atualiza a sua tabela com o endereço de j e com a potência mínima necessária para alcançá-lo. Esse parâmetros serão utilizados para transmitir o quadro de dados e também para transmitir um futuro *RTS* para o nó j .
5. O nó j ao receber o quadro *DATA*, atualiza a sua tabela e envia um quadro *ACK* com a potência mínima necessária à comunicação.
6. Em uma comunicação futura entre os nós i e j , o emissor irá consultar sua tabela de potências e transmitir o *RTS* no valor da potência armazenado em sua tabela. Caso não obtenha resposta, porque o receptor se afastou dele ou o nível de ruído do meio tenha aumentado, o emissor envia novamente o quadro *RTS* em potência máxima. As tabelas possuem um tempo máximo de validade (*time stamp*).

O Esquema Básico com memória foi simulado no *Network Simulator* (NS-2) [Network Simulator, 2004] e apresenta maior economia de energia e aumento da capacidade do canal, quando comparado aos protocolos padrão IEEE 802.11 e ao Esquema Básico sem memória. O aumento da capacidade do canal se justifica pela redução do alcance de detecção de portadora quando a potência de transmissão é reduzida nos quadros *RTS-CTS*, mantendo a simetria dos enlaces e permitindo maior reuso espacial do canal com menor probabilidade de colisões. A utilização do protocolo em cenários com alta mobilidade, segundo os autores, pode trazer penalidades ao desempenho, bem como em cenários que apresentam condições de propagação adversas e desvanecimento rápido do sinal.

5.7 Conclusões

Os protocolos MANETs que empregam controle de potência conseguem obter maior vazão e menor consumo de energia quando comparados com o protocolo padrão IEEE 802.11 sem controle de potência. Os estudos apresentados por Jung & Vaidya demonstram que é necessário resolver o problema de colisões causados por enlaces assimétricos que aumentam o consumo de energia e diminuem a vazão da rede. O protocolo PCM, embora resolva os problemas de colisão, apresenta maior complexidade de implementação devido a variação de potência na transmissão do quadro de dados e uma dependência do tamanho dos dados transmitidos. Além disso, esse protocolo não faz reuso espacial de canal. O Esquema Básico com memória apresenta uma solução simples, que consegue manter os enlaces simétricos e ainda obtém reuso espacial do canal de transmissão. Todos os protocolos apresentados para MANETs com controle de potência são baseados no

protocolo padrão 802.11 e utilizam os mesmos mecanismos para detecção de portadoras física e virtual. Além disso, esses protocolos foram somente simulados e não se preocuparam com o tempo necessário para o cálculo da potência mínima de transmissão ou com a complexidade do hardware envolvido.

Nas RSSFs as restrições de energia são maiores e os métodos de detecção de portadora empregados nos protocolos MANETs podem ser ineficientes e aumentarem o consumo de energia. Nessas redes não existe hardware auxiliar para detecção de portadora durante a transmissão, já que os rádios empregados são monocanais. A maioria das plataformas comerciais de nós sensores possuem processadores limitados, sem unidade de ponto flutuante, o que atrasa e dificulta a execução de cálculos complexos. Uma das fronteiras a serem exploradas em RSSFs é a especificação de técnicas de CPT que possam ser empregadas em protocolos MAC. As técnicas de CPT apresentam grande potencial para a economia de energia, além de permitir o reuso espacial do canal e aumentar a vazão das RSSFs. As técnicas de CPT deverão ajustar a potência de transmissão por quadro transmitido, verificando as condições do ambiente e reduzindo os efeitos de enlaces assimétricos.

No próximo capítulo são discutidos aspectos relacionados ao uso de CPT nas RSSFs. São apresentados os aspectos que afetam a operação da rede, os principais benefícios, os princípios de projeto para protocolos MAC e as técnicas para controle de potência em RSSFs.

Capítulo 6

Técnicas de Controle de Potência para Protocolos MAC em RSSFs

Este capítulo apresenta quatro novas técnicas de controle de potência em RSSFs. São discutidos os aspectos envolvidos no emprego do controle de potência de transmissão em RSSFs. Apresentamos as principais técnicas empregadas na redução do consumo de energia e discutimos a influência da escolha da potência de transmissão na operação e nas métricas desse tipo de rede e os benefícios obtidos. Discutimos os principais aspectos de projeto para o desenvolvimento dos mecanismos de controle de potência, apresentando as características de hardware e software envolvidos. Desenvolvemos e apresentamos quatro técnicas de controle de potência para RSSFs. A primeira técnica utiliza um controle em malha fechada, no qual os nós se comunicam para determinar a potência mínima de transmissão por iterar sobre os níveis de potência do rádio. Denominamos esse método de Iterativo. A segunda técnica calcula a potência mínima de transmissão considerando a atenuação do sinal no meio e a relação sinal/ruído. Denominamos esse método de Atenuação. A terceira técnica incorpora um filtro de média móvel exponencial ao método de cálculo de atenuação para calcular a potência mínima de transmissão, sendo denominado de método AEWMA (*Atenuação com EWMA*). A quarta técnica incorpora as características dos métodos Iterativo e Atenuação para a determinação da potência mínima, sendo denominado de Híbrido.

6.1 Redução do consumo de energia na comunicação

As dimensões reduzidas do hardware empregado nas RSSFs limitam a capacidade das baterias e tornam a energia um fator crítico. Além disso, inviabilizam a utilização direta de protocolos e aplicações desenvolvidos para outras redes sem fio, como por exemplo nas MANETS e de celulares, que não possuem restrições tão severas. A comunicação é o evento que, em geral, mais consome energia, assim este deve ser otimizado. As técnicas para redução do consumo de energia em RSSFs têm sido empregadas principalmente nos protocolos MAC [Dewasurenda and Mishra, 2004, Woo and Culler, 2001, Ye et al., 2002].

Uma das técnicas para economia de energia na comunicação baseia-se na ordenação dos períodos de transmissão e recepção de quadros entre os nós da rede. Essa técnica reduz a probabilidade de colisões de quadros e de retransmissões, além de manter o rádio desligado fora dos períodos de transmissão e recepção [Langendoen and Halkes, 2005]. O emprego dessa técnica exige sincronização entre os nós da rede, provida por troca de quadros ou por um canal adicional de rádio.

Outra técnica, comumente empregada em protocolos MAC, para redução do consumo de energia, baseada no controle de topologia é desligar o rádio quando ele não é essencial para manter a conectividade da rede. Nessa técnica, pressupõe-se que a rede é composta por um grande número de nós sensores, que são suficientes para monitorar toda uma área de interesse de coleta de dados. Dentre esses nós, um subconjunto é escolhido para coletar os dados e para manter a conectividade da rede durante um determinado período de tempo, enquanto os nós restantes são desligados. Existe um revezamento entre os nós de modo a manter o balanceamento de energia, a cobertura de sensoriamento e a redução do tráfego na rede [Chen et al., 2001, Mihaela Cardei and Jie Wu, 2004]. O subconjunto de nós escolhidos é baseado na localização dos nós, determinada por hardware auxiliar de localização geográfica, como um GPS (*Global Positioning System*), e na sua capacidade de cobertura de sensoriamento. A determinação de quais nós são essenciais à conectividade da rede é obtida por troca de quadros de controle, formando um *backbone* para a transferência dos dados coletados até o ponto de acesso.

As duas técnicas anteriores visam a economia de energia mantendo o rádio desligado o maior tempo possível e reduzindo o tráfego de quadros para o mínimo necessário. Outra estratégia empregada na camada MAC é a minimização da quantidade de energia despendida para enviar um quadro. Um nó ao transmitir seu quadro para outro nó, deve usar a potência mínima de transmissão necessária

para alcançar seu destino, já que quanto maior a potência de transmissão maior o consumo de energia. Nesta técnica, o protocolo MAC ajusta os parâmetros do rádio para que a potência de transmissão seja a mínima necessária durante a comunicação entre os nós.

Ammari e Das desenvolveram modelos analíticos para avaliar como a potência de transmissão afeta a latência e o consumo de energia em RSSFs [Ammari and Das, 2005]. Os autores mostraram que, para nós afastados com diferentes alcances de transmissão, quanto menor o alcance, menor o consumo de energia e maior a latência de transmissão. Eles também observaram que para enlaces de um salto entre nós distantes, a latência total diminui ao custo de um consumo de energia mais elevado. Avaliaram também que para enlaces multisaltos o consumo de energia é reduzido, mas a latência é aumentada.

A potência de transmissão pode ser ajustada escolhendo-se um nível de potência fixo e global que mantenha toda a rede conectada. Neste caso, ao adicionarmos mais nós à rede, maior será a contenção pelo meio e menor será a vazão de dados da rede. Gomez e Campbell analisaram o ajuste da potência de transmissão para cada quadro enviado em redes sem fio multisaltos [Gomez and Campbell, 2004]. Os autores observaram que as potências de transmissão são diferentes em cada salto em caminhos multisaltos e demonstraram que o ajuste da potência de transmissão por quadro enviado aumenta a vazão da rede em até 50%, quando comparados com a vazão em comunicação com potência fixa de transmissão. O uso de uma potência fixa e global determina que todos os nós tenham o mesmo alcance de transmissão. Isso implica em aumentar o grau de interferência entre os nós durante a transmissão, o que aumenta a probabilidade de colisões e diminui a vazão da rede.

Ao invés de uma potência de transmissão fixa e global, que define um alcance que mantém a rede conectada, as redes sem fio devem ajustar o alcance de transmissão para cada quadro enviado. Para o desenvolvimento das técnicas de CPT, consideramos que as mensagens são tratadas pelo protocolo de enlace como sendo um conjunto de quadros que são encaminhados por múltiplos caminhos até o destino. Em nossas técnicas o controle de potência é realizado por quadro transmitido, de maneira a manter constante a capacidade de tráfego médio por nó quando mais nós forem adicionados à rede em uma determinada área. Podemos observar que o ajuste da potência de transmissão afeta várias métricas e também aspectos de operação das RSSFs, que são apresentados na próxima seção.

6.2 Operação das redes sem fio com CPT

Em redes sem fio o controle da potência de transmissão (CPT) emprega um algoritmo distribuído que ajusta os parâmetros do rádio de cada nó a cada quadro transmitido. A escolha da potência de transmissão afeta aspectos de operação e métricas de desempenho da rede tais como conectividade, contenção, latência, vazão e energia, além de propiciar a formação de enlaces assimétricos [Kawadia and Kumar, 2005]. As influências da potência de transmissão sobre a operação e métricas da rede são discutidas a seguir.

Conectividade. A formação de rotas na rede é assumida como uma atividade cooperativa entre seus nós. Dessa forma, a decodificação correta dos quadros no destino é essencial para o estabelecimento de rotas que determinam a conectividade da rede. Para que os quadros sejam decodificados corretamente é necessário que a potência de transmissão seja suficiente para superar as restrições impostas pelo meio, tais como interferências, atenuações e distorções. Um nível de potência adequado para que o quadro seja recebido corretamente no destino determina a qualidade do enlace entre os nós e garante a conectividade da rede [Gupta and Kumar, 1998].

Contenção do meio. Quanto maior a potência de transmissão, maior o raio de alcance do transmissor e maior a probabilidade de mais nós compartilharem o meio. Esse fato aumenta a probabilidade de colisões e de disputas pelo meio de transmissão, que podem causar atrasos na transmissão e reduzir a taxa de entrega de quadros.

Latência. A comunicação entre os nós pode ser direta ou em múltiplos saltos. A latência é função do número de saltos no estabelecimento da comunicação entre os nós. Quanto mais saltos, mais nós estarão envolvidos na comunicação, sendo que cada nó insere um atraso na comunicação. Dessa forma, quanto maior a quantidade de saltos maior será a latência. Como a potência de transmissão estabelece o raio de alcance do nó, esta determina indiretamente o número de saltos.

Vazão. A capacidade de utilização do canal é afetada pelo número de nós dentro do alcance de transmissão, diminuindo à medida que o número de nós aumenta. O controle da potência de transmissão pode variar o alcance de transmissão e o número de nós que compartilham o meio e afetar a vazão da rede [Gupta and Kumar, 2000]. Além disso, o CPT possibilita o aumento do reuso espacial do meio possibilitando um maior número de transmissões simultâneas.

Formação de enlaces assimétricos. A variação da potência pode causar o estabelecimento de enlaces assimétricos. Isso ocorre quando um nó i transmite em um nível de potência diferente em que o nó j usa para respondê-lo. A formação de enlaces assimétricos pode causar problemas na comunicação, quando o nó i é capaz de receber um quadro do nó j , mas não tem potência suficiente para alcançá-lo, ou vice-versa. A assimetria do enlace pode causar colisões, perda de quadros, aumento de retransmissão e redução da vazão da rede [Jung and Vaidya, 2002]. O controle da potência de transmissão pode evitar a formação de enlaces assimétricos, de modo que, os nós interajam e acordem sobre o uso de um nível de potência comum.

Energia. O consumo de energia do rádio é proporcional à potência de transmissão do nó. Quanto mais alta a potência maior será o consumo. Entretanto, a utilização de níveis de potência muito baixos pode causar a ruptura da comunicação entre os nós e aumentar o número de retransmissões, elevando o consumo de energia. O controle da potência de transmissão pode garantir a manutenção do enlace, por meio da interação entre os nós na potência mínima de transmissão, reduzindo assim o consumo de energia.

O uso de técnicas de CPT possui outras vantagens além da redução do consumo de energia, como apresentado a seguir.

6.3 Benefícios do controle de potência

O emprego do controle da potência de transmissão em redes sem fio, como nas MANETs e celulares, tem demonstrado que o uso da potência mínima de transmissão pode trazer mais benefícios além da redução do consumo de energia, como o estabelecimento de enlaces de maior qualidade e um melhor uso do meio. A seguir detalhamos cada um dos benefícios obtidos com o ajuste da potência de transmissão.

Comunicação no custo mínimo de energia. Em alguns protocolos MAC a comunicação é estabelecida em uma potência fixa de transmissão, mesmo que os nós receptores estejam próximos. Isso implica em desperdício de energia, uma vez que a comunicação poderia ser feita em uma menor potência de transmissão. O CPT estabelece a comunicação entre os nós na potência mínima de transmissão, mantendo a confiabilidade do enlace com custo mínimo de energia.

Estabelecimento de enlaces de maior qualidade. O controle de potência pode ser usado em conjunto com algoritmos de avaliação da confiabilidade do

enlace para melhorar a qualidade da comunicação. Ao detectar que um enlace possui comunicação de baixa qualidade, o protocolo MAC aumenta a potência de transmissão procurando diminuir a quantidade de erros no receptor. Esse procedimento diminui a probabilidade de dados corrompidos e reduz a taxa de bits errados. A potência de transmissão pode ser ajustada dinamicamente em função das variações das condições do ambiente.

Reuso espacial. O ajuste da potência de transmissão permite aos nós um melhor aproveitamento do meio. O alcance de transmissão é reduzido, quando os nós se comunicam na potência exata de transmissão, necessária para garantir sucesso na comunicação. Dessa forma, somente os nós próximos do receptor irão disputar o acesso ao meio reduzindo a probabilidade de colisões, melhorando a taxa de utilização da rede, diminuindo a latência, além de evitar problemas de terminal escondido e estação exposta [Monks, 2001].

Apesar do controle de potência trazer benefícios, ele afeta alguns aspectos de operação da rede. A otimização de uma métrica é obtida, em geral, em detrimento de outra, sendo necessário uma negociação desses parâmetros para uma aplicação específica. Esses aspectos devem ser considerados no projeto dos mecanismos de controle de potência em RSSFs e são discutidos a seguir.

6.4 Princípios de projeto para CPT em RSSFs

As técnicas de CPT empregadas em MANETs são baseadas no protocolo IEEE 802.11 e empregam os mesmos mecanismos de detecção de portadoras física e virtual. Esses mecanismos são implementados por meio de hardware adicional para detecção de sinais no meio e por troca de quadros de controle (*RTS/CTS*). Nas RSSFs os nós não dispõem de hardware extra para a detecção de sinal no meio enquanto estão transmitindo, pois empregam rádios de um único canal. A troca de quadros de controle *RTS/CTS* nas RSSFs pode aumentar em demasia o *overhead*, já que os quadros nessas redes são de apenas algumas dezenas de bytes. Outra restrição nas RSSFs é a baixa autonomia de energia, visto que em muitas aplicações a recarga das baterias é inviável ou as células de energia possuem baixa capacidade (algumas centenas de mAh). Dessa forma, é necessário o desenvolvimento de novas técnicas de CPT para RSSFs que considerem as restrições impostas pelo hardware dos nós sensores e que sejam eficientes em energia.

6.4.1 Mecanismos de CPT e as camadas da arquitetura de rede

Como o controle da potência de transmissão afeta muitos aspectos de operação da rede, este é em geral descrito como um problema multicamadas [Kawadia and Kumar, 2005, Levis et al., 2004a]. A utilização dos mecanismos de CPT nas RSSFs envolvem questões relacionadas com as camadas de sua arquitetura, como descrito a seguir.

- *Física.* As características dos componentes do nó sensor, como a codificação de bits, a modulação do sinal, a sensibilidade do rádio e a variação da potência de transmissão entre os valores nominais máximo e mínimo do rádio, determinam a qualidade do sinal transmitido e recebido pelo nó.
- *Enlace.* A comutação entre os vários níveis de potência modifica os parâmetros do rádio afetando as disciplinas de acesso ao meio, a qualidade da comunicação entre os nós e o número de retransmissões.
- *Rede.* A formação das rotas e a conectividade da rede são determinadas de acordo com o alcance de transmissão do rádio. A seleção das rotas é baseada na comunicação entre nós vizinhos, que devem estar dentro do alcance de transmissão para que o enlace possa ser estabelecido. As informações de quais nós estão dentro do alcance de transmissão e com qual potência podem ser alcançados devem ser repassadas para a camada de rede, que será responsável na determinação das rotas e conseqüentemente da conectividade da rede [Macedo et al., 2006].
- *Transporte.* Esta camada, apesar de pouca explorada ou inexistente na maioria das aplicações em RSSFs, pode ser afetada pelos mecanismos de CPT. A variação da potência de transmissão pode aumentar ou diminuir as disputas dos nós pelo acesso ao meio, influenciando no congestionamento da rede, na confiabilidade das mensagens e no controle de fluxo da comunicação.

Determinar em que nível da arquitetura de rede os mecanismos de CPT devem ser implementados é um grande desafio. Nas MANETs os mecanismos de CPT têm sido implementados na camada MAC [Agarwal et al., 2001, Gomez et al., 2001b, Jung and Vaidya, 2002, Pires et al., 2004, Wu et al., 2001]. Outra proposta considerada em redes ad hoc é implementar os mecanismos de CPT nos protocolos de roteamento [Kawadia and Kumar, 2005, Ramanathan and Rosales-Hain, 2000].

Os protocolos de roteamento com CPT podem estabelecer rotas eficientes em energia, já que conhecem o próximo destino do pacote e podem estabelecer enlaces

com seus vizinhos na potência mínima de transmissão [Narayanaswamy et al., 2002]. Entretanto, é necessário que as operações de controle da potência do rádio sejam realizadas pela camada MAC. Os protocolos de controle de topologia que empregam mecanismos de CPT para controlar a conectividade da rede, apesar de implementados na camada de rede, também necessitam de informações da camada MAC [Kawadia and Kumar, 2003, Wattenhofer et al., 2001]. Portanto, é na camada MAC que as informações sobre a potência do sinal recebido e do ruído do meio são obtidas. Além do mais, é na camada MAC que são realizados o controle das operações do rádio e a variação da potência de transmissão.

6.4.2 Requisitos de hardware para CPT

As características de desenvolvimento de técnicas de CPT para as MANETs e RSSFs são semelhantes. A principal diferença é que nas RSSFs as aplicações requerem uma arquitetura de rede especializada e não seguem o modelo tradicional de camadas. A arquitetura de rede é fortemente dependente do projeto da aplicação. Porém, alguns princípios de projeto devem ser observados no desenvolvimento das técnicas de CPT [Monks, 2001]:

Cooperação entre os nós. Todo nó que inicia uma transmissão com um novo valor de potência deve verificar se o meio está livre de maneira a não interferir em transmissões em andamento.

Redução de consumo de energia. A transmissão de cada quadro deve ser realizada na potência mínima. Entretanto, essa potência deve ser suficiente para que o receptor possa decodificar o quadro corretamente.

Para a implementação desses princípios de projeto é necessário que o hardware atenda a alguns requisitos:

Ajuste dinâmico da potência de transmissão. Na camada física, o rádio deve prover diferentes níveis de potência e recursos para ajustar a potência de transmissão. Esses recursos devem permitir a interoperabilidade com a camada MAC, de modo que o protocolo possa controlar e o ajustar os parâmetros do rádio. A variação da potência de transmissão deve ser realizada de forma dinâmica e em tempo de execução, de maneira que o hardware do elemento de rede responda em tempo hábil.

Leitura da potência do sinal recebido. O cálculo da potência mínima de transmissão necessita da leitura do sinal recebido. O rádio deve prover em sua

interface de entrada a facilidade para indicar a potência do sinal recebido (RSSI - *Received Signal Strength Indicator*). O valor do RSSI coletado pode determinar o nível de ruído do meio e o nível de sinal recebido, de modo que o nó possa calcular a relação sinal/ruído (SNR - *Signal-Noise Ratio*).

Leitura da tensão instantânea da bateria. As medidas da potência do sinal recebido são, em geral, obtidas pela variação da tensão na interface de entrada do rádio. Dessa forma, é necessário coletar leituras instantâneas da tensão da bateria para obter o valor correto da potência do sinal recebido. Como a bateria está sujeita ao desvanecimento de energia, o valor da tensão lido sob carga pode ser diferente de um valor nominal, ou de uma tensão de referência, considerados no cálculo do RSSI.

Sensibilidade. O rádio possui uma sensibilidade nominal para detectar e decodificar corretamente os sinais recebidos em sua interface de entrada. Se qualquer transmissão é recebida abaixo desse limiar o quadro recebido não será decodificado corretamente. Esse requisito determina a taxa de bits errados (BER - *Bit Error Rate*) na recepção de dados.

Além da necessidade de recursos do hardware, outras operações são necessárias ao ajuste dinâmico da potência de transmissão e são realizadas em software, como a avaliação de canal livre e o cálculo da potência mínima de transmissão. Essas operações são apresentadas a seguir.

6.4.3 Avaliação de canal livre

Segundo o princípio da cooperação, é necessário que todo nó ao iniciar uma transmissão verifique se o meio está livre. Um mecanismo conhecido como avaliação de canal livre pode realizar essa tarefa em software e evitar colisões. Esse mecanismo é descrito abaixo.

Durante o período ativo do nó, amostras periódicas do nível de ruído do meio são realizadas quando não existem transmissões em andamento. Estas medidas determinam o ruído base (N_F - *Noise Floor*). Quando o nível de sinal no meio de transmissão é superior ao nível do ruído base, o nó avalia que existe uma transmissão em andamento e altera o modo de operação do rádio para recepção. Caso o nível do sinal do meio não apresente variação em relação ao ruído base, o nó considera que não existe nenhuma transmissão em andamento e que o nó pode transmitir dados.

Essa técnica é conhecida como avaliação de canal livre, (CCA - *Clear Channel Assessment*), sendo que alguns rádios, por exemplo o CC2420 [CC2420, 2006], já

apresentam em seu hardware essa facilidade. Entretanto, quando um ruído de maior intensidade é detectado no meio de transmissão, ele pode ser confundido com uma transmissão em andamento.

Para distinguir um ruído de alta intensidade de um sinal de quadro transmitido, uma série de bytes pré-definidos são enviados, denominados de preâmbulo. O rádio do nó ao verificar um nível alto de sinal na sua interface de entrada, entra em modo de recepção e processa o preâmbulo verificando a sua validade. Caso o preâmbulo seja válido, o nó irá ler o pacote recebido. Em caso contrário, o sinal é desconsiderado e o canal é avaliado como livre.

Usando a técnica de CCA, o nó sempre escuta o canal antes de transmitir seus dados. Caso o meio de transmissão esteja ocupado, o nó deve atrasar sua transmissão usando, por exemplo, um algoritmo de recuo exponencial.

6.4.4 Cálculo da potência mínima de transmissão

Em uma transmissão bem sucedida, o nível de sinal recebido deve ser superior ao ruído base (N_F) e às interferências do meio. Os fenômenos de atenuação do sinal como reflexão, difração e dispersão afetam a propagação do sinal transmitido. A existência de obstáculos entre o transmissor e receptor provoca degradação e queda do nível de potência do sinal. Um sinal transmitido na presença de obstáculos pode seguir múltiplos caminhos, como mostra a figura 6.1, cada um com sinais diferentes em amplitude e fases [Rappaport, 2002]. O sinal resultante observado pelo receptor em uma dada posição é a soma dos sinais oriundos de múltiplos caminhos, sendo atenuado em relação ao sinal original.

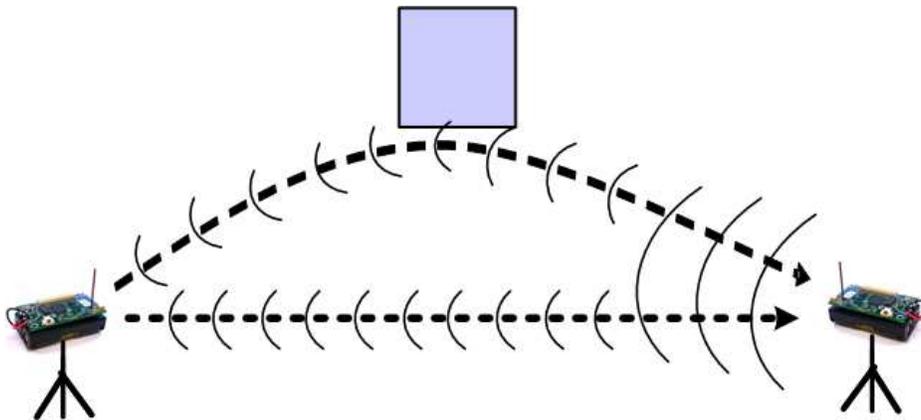


Figura 6.1: Múltiplos caminhos de um sinal na presença de obstáculos.

A atenuação do sinal aumenta à medida em que a distância entre o trans-

missor e emissor aumenta, diminuindo a potência de recepção do sinal. Alguns modelos de propagação do sinal tentam prever a potência do sinal recebido em função da distância entre transmissor e receptor e do ambiente de propagação. Esses modelos consideram ambientes externos, internos, com ou sem obstáculos, na presença ou não de interferências externas e são dependentes da faixa de frequências utilizadas. A modelagem da atenuação do sinal no meio de transmissão envolve parâmetros que muitas vezes consideram dados teóricos e empíricos.

Vários estudos caracterizaram a propagação do sinal em redes sem fio. Lal et al. mostraram que é possível identificar a qualidade do sinal de uma forma eficiente em energia [Lal et al., 2003]. Reijers et al. mostraram a influência dos obstáculos e do ambiente na variação do sinal, e verificaram que a propagação é assimétrica e sofre de direcionalidades das antenas [Reijers et al., 2004].

Os modelos de propagação de sinais fornecem uma boa aproximação para o cálculo da potência mínima em função da distância e de parâmetros do meio de transmissão. Entretanto, esses modelos apresentam cálculos complexos para serem realizados em nós sensores que não possuem uma unidade de ponto flutuante.

O modelo de propagação do sinal no espaço livre, sem a presença de obstáculos, é dado pela fórmula de Friis [Friis, 1946]. Esse modelo de previsão, mesmo sendo simplificado, envolve parâmetros empíricos (como o fator de perdas L) e apresenta cálculos complexos, como mostra a equação 6.1.

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} \times G_T \times G_R \times \lambda^2}{(4\pi)^2 \times d^\alpha \times L} \quad (6.1)$$

onde:

P_{RX} é o nível de potência do sinal recebido;

P_{TX} é o nível de potência do sinal transmitido;

G_T e G_R são os ganhos das antenas dos rádios transmissor e receptor respectivamente;

λ é o comprimento de onda do sinal;

d é a distância entre transmissor e receptor no espaço livre;

α é o coeficiente de perda do percurso do sinal, seus valores variam entre 2 e 6 em função do ambiente de propagação do sinal;

L : é o fator de perdas do sistema não relacionados à propagação do sinal eletromagnético, refere-se às perdas ocasionadas por atenuação no hardware do transceptor (antenas, filtros, etc).

O cálculo da potência mínima de transmissão pode ser baseado na troca de informações entre o emissor e o receptor, de modo a formar um controle em malha fechada. O controle de potência pode ser empregado em rádios que permitem o ajuste do nível do sinal transmitido. Idealmente, a comunicação seria estabelecida na menor potência de sinal que permita a transmissão do nó i e a correta decodificação dos dados no destino j . Esse controle consiste basicamente de três partes:

- Inicialmente, o nó i envia seu quadro na potência padrão ou pré-estabelecida P_{TX} , anexando ao seu cabeçalho o valor do nível de potência de transmissão.
- O nó j ao receber o quadro, mede o valor do RSSI na sua interface de entrada e estima a potência de recepção P_{RX} . Em seguida, o nó j calcula a potência mínima P_{TXmin} com a qual ainda pode ser alcançado e a envia no cabeçalho de um quadro de confirmação (ACK).
- O nó i ao receber a confirmação (ACK) do quadro enviado, verifica qual a potência P_{TXmin} indicada pelo nó j . A transmissão do próximo quadro do nó i para j , será realizada na potência mínima de transmissão calculada (P_{TXmin}).

As limitações de hardware encontradas nas RSSFs inviabilizam cálculos complexos da potência mínima de transmissão. Dessa forma, métodos mais adequados às restrições encontradas em RSSFs são apresentados a seguir.

6.5 Técnicas de Controle de Potência

Nesta seção propomos e descrevemos quatro técnicas para o ajuste da potência de transmissão para protocolos MAC em RSSFs, que podem ser empregadas sobre qualquer protocolo MAC existente. Essas técnicas buscam ser eficientes em energia e consideram métricas como vazão, taxa de entrega de quadros e probabilidade de colisões. Além disso, as técnicas de CPT desenvolvidas apresentam cálculos simplificados que podem ser executados em nós sensores. Essas técnicas são apresentadas a seguir.

6.5.1 Método Iterativo

Neste método um controle em malha fechada é empregado para o cálculo da potência mínima de transmissão. O objetivo é que os nós formem enlaces na

potência mínima de transmissão de forma a garantir a correta captura e decodificação do quadro no destino. A interação entre os nós possibilita avaliar as restrições impostas pelo meio de transmissão e ajustar dinamicamente a potência mínima de transmissão dos quadros.

No método Iterativo consideramos que o rádio empregado fornece níveis discretos de potências. Por exemplo, o rádio utilizado na plataforma Mica Motes2 disponibiliza 22 níveis diferentes de potência, separados de 1 dBm [CC1000, 2006]. Podemos, desta forma, iterar sobre as potências possíveis, aumentando ou diminuindo a potência de transmissão dentro dos limites nominais do rádio.

Para evitar o cálculo da potência de transmissão a cada quadro enviado, o método Iterativo utiliza uma tabela de vizinhos para armazenar a potência mínima de transmissão para cada nó. Ao enviar um quadro, o nó verifica se o destino possui uma entrada na sua tabela de vizinhos. Caso possua, é utilizada a potência armazenada. Caso contrário, o processo de cálculo de potência é executado, e o seu resultado é armazenado para uso futuro.

A potência mínima de transmissão é calculada utilizando refinamentos sucessivos para um fluxo contínuo de quadros enviados de um nó para seu vizinho. O método Iterativo opera em duas fases, como mostrado na figura 6.2. Na primeira fase, é determinada a potência mínima de transmissão, enquanto na segunda fase o protocolo procura adaptar a potência de transmissão dinamicamente às mudanças ocorridas no ambiente.

Primeira fase

Inicialmente consideramos um fluxo contínuo de quadros enviados de um nó i para seu vizinho j . A potência de transmissão (P_{TX}) é pesquisada para o nó j na sua tabela de vizinhos. Se existe uma entrada na tabela para o nó, a potência de transmissão é ajustada com o valor da tabela (P_{TXj}). Caso contrário, a potência de transmissão é ajustada para o valor máximo nominal do rádio ($P_{TXmáx}$).

O nó emissor transmite o quadro com a potência P_{TX} para o nó j . O nó j ao receber o quadro envia um quadro de confirmação (ACK) com a mesma potência de transmissão (P_{TX}) para o nó i (figura 6.3). Caso o nó i receba o quadro de confirmação (ACK), a sua potência de transmissão é decrementada em um nível ($P_{TX} = P_{TX} - 1$) para enviar novos quadros para j .

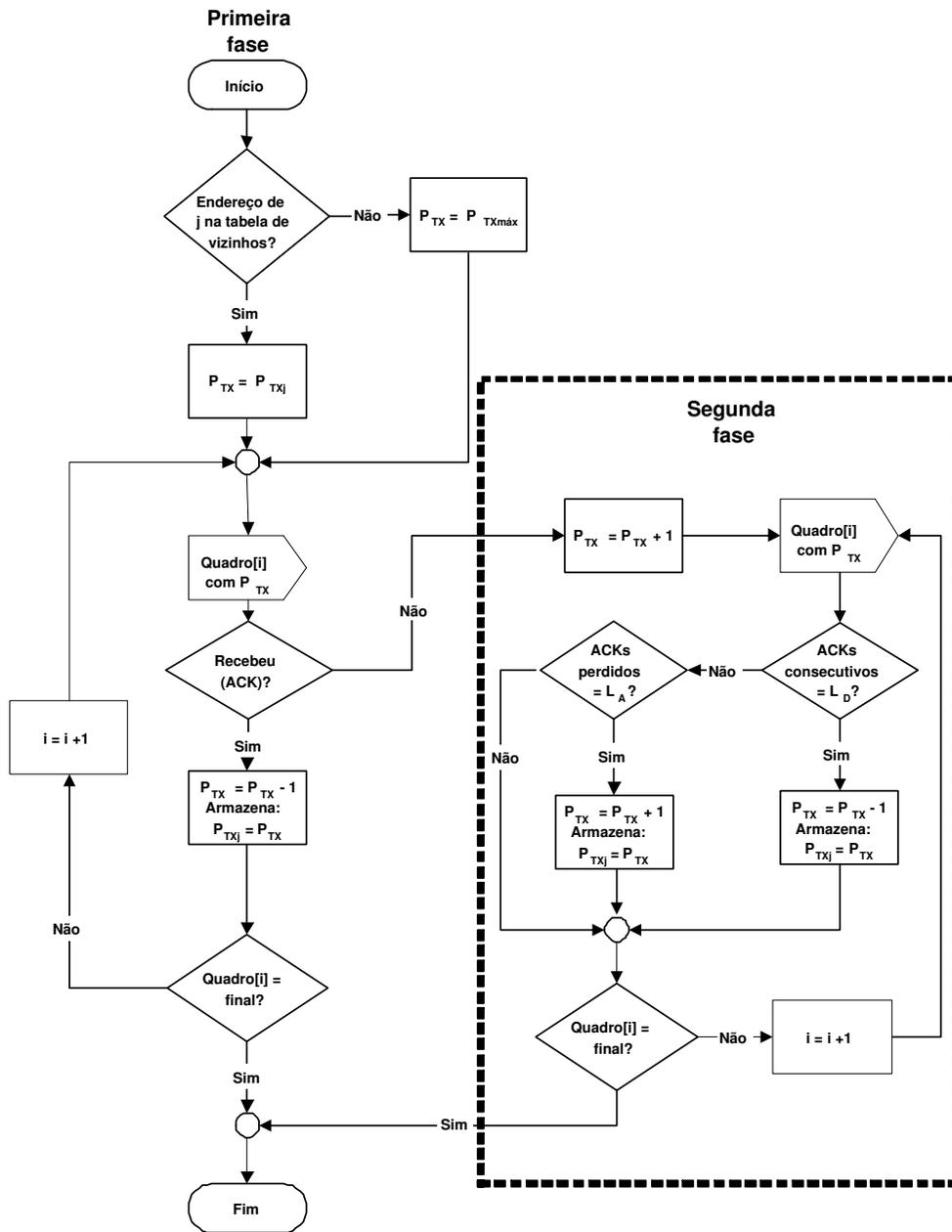


Figura 6.2: Operação do método Iterativo (lado emissor).

Os quadros são enviados continuamente, sendo que este processo termina quando não existirem mais quadros a serem enviados. Caso o emissor ainda possua quadros a serem enviados e não receba mais quadros de confirmação, significa que a potência P_{TX} não pode mais ser decrementada e que a potência mínima de transmissão foi alcançada. Para evitar que variações de ruído no meio cause perda de quadros, o método Iterativo entra na sua segunda fase, que ajusta

dinamicamente o nível da potência de transmissão.

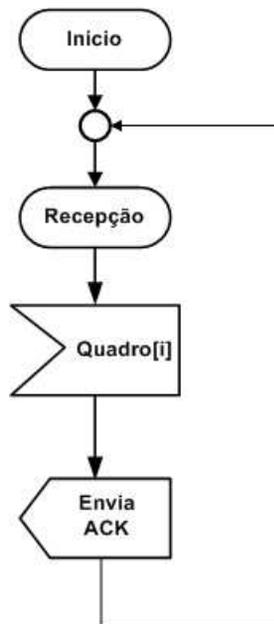


Figura 6.3: Operação do método Iterativo (lado receptor).

Segunda fase

Nessa fase, são contabilizados os quadros de confirmação recebidos para identificar variações no ruído. Caso o emissor receba corretamente um número de *ACKs* sucessivos igual ao limiar de decréscimo (L_D), a potência de transmissão é decrementada em um nível ($P_{TX} = P_{TX} - 1$). De maneira análoga, caso o nó emissor não receba um número L_A de *ACKs* consecutivos, a potência de transmissão é incrementada em um nível ($P_{TX} = P_{TX} + 1$).

Os valores de L_A e L_D devem ser ajustados de acordo com a periodicidade de envio de dados da aplicação, evitando assim que a reação às modificações no ruído do meio ocorra tarde demais em aplicações com baixo tráfego de dados, ou que mudanças na potência de transmissão sejam freqüentes em aplicações com tráfego contínuo de dados.

De maneira análoga à primeira fase, este processo termina quando não existem mais quadros a serem transmitidos. O valor da potência de transmissão necessária à comunicação entre os nós é armazenada na tabela de vizinhos.

Nesse método de controle de potência, as falhas de nós e de transmissão são tratadas da mesma forma, ou seja, a potência é aumentada quando L_A quadros

de confirmação não são recebidos pela origem. Os quadros enviados em difusão (*broadcast*) não são tratados pelo mecanismo, já que esses não retornam quadros de confirmação. Nesse caso, os quadros são enviados na potência máxima de transmissão ou em uma potência pré-estabelecida pela aplicação.

6.5.2 Método Atenuação

No método Atenuação é empregado um controle em malha fechada para o cálculo da potência mínima de transmissão. O objetivo desse método é calcular a potência mínima de transmissão considerando a atenuação do meio de transmissão, o ruído local observado pelo nó, a relação sinal/ruído (SNR) e a sensibilidade do rádio. A qualidade do enlace é definida em função desses parâmetros, que devem ser conhecidos previamente (utilizando para tanto valores empíricos ou especificações do rádio).

A potência mínima de transmissão pode ser calculada em função da atenuação do sinal no meio, devendo satisfazer as seguintes restrições [Monks, 2001]:

- (1) A potência mínima de transmissão deve estar dentro dos limites nominais de potência do rádio (equação 6.2):

$$P_{TX \text{ limite inferior}} \leq P_{TX \text{ min}} \leq P_{TX \text{ limite superior}} \quad (6.2)$$

- (2) Para que um quadro seja corretamente decodificado pelo receptor, a potência de transmissão deve ser superior à atenuação imposta pelo meio. Além disso, o rádio deve ter sensibilidade suficiente para detectar a presença deste sinal na sua interface de entrada. A atenuação (ou ganho $G_{i \rightarrow j}$) é dada pela relação entre as potências dos sinais recebido e transmitido, dado pela equação 6.3:

$$G_{i \rightarrow j} = \frac{P_{RXj}}{P_{TXi}} \quad (6.3)$$

- (3) O valor da potência mínima para a recepção de um quadro sem erros ($RX_{desejada}$) é determinado empiricamente, e se relaciona com a potência mínima de transmissão pela equação 6.4:

$$P_{TX \text{ min } (i \rightarrow j)} \geq \frac{RX_{desejada}}{G_{i \rightarrow j}} \quad (6.4)$$

- (4) O sinal recebido deve ser igual ou superior ao limite mínimo de separação entre o sinal e o ruído local (equação 6.5). Este limite é dado pela relação entre o nível de sinal/ruído do meio (SNR) e o ruído local percebido pelo nó de destino j (N_{Fj}).

$$P_{TXmin (i \rightarrow j)} \geq \frac{SNR_{desejado} \times N_{Fj}}{G_{i \rightarrow j}} \quad (6.5)$$

O cálculo da potência mínima de transmissão no método Atenuação é descrito a seguir e os passos de seu funcionamento são apresentados na figura 6.4. Periodicamente os nós amostram o nível de ruído local do meio quando não ocorrem transmissões para determinar o ruído base (N_F). O valor do ruído base é calculado pela média das últimas leituras.

Um nó emissor i , ao transmitir um quadro para j , informa a potência de transmissão no cabeçalho do quadro de dados, sendo inicialmente utilizada uma potência padrão. O nó j , ao receber o quadro de i , amostra o nível do sinal recebido na sua interface de entrada pelo valor do RSSI e estima a potência de recepção P_{RXj} . Em seguida o nó j calcula a potência mínima de transmissão $P_{TXmin (i \rightarrow j)}$ satisfazendo as restrições das equações de 6.2 a 6.5.

Para garantir que o sinal seja decodificado corretamente na próxima transmissão, é escolhido o maior valor calculado pelas equações 6.4 e 6.5. Assim, a potência mínima de transmissão será calculada¹ pela equação 6.6:

$$P_{TXmin (i \rightarrow j)} = \max \left\{ \frac{RX_{desejada}}{G_{i \rightarrow j}}, \frac{SNR_{desejado} \times N_{Fj}}{G_{i \rightarrow j}} \right\} \quad (6.6)$$

O nó j , após decodificar corretamente o quadro e calcular a potência mínima de transmissão, envia um quadro de confirmação (ACK) para o emissor na mesma potência de transmissão P_{TX} . O quadro de confirmação carrega em seu cabeçalho o valor da potência mínima $P_{TXmin (i \rightarrow j)}$. O nó emissor i irá transmitir o próximo quadro para j na potência mínima.

Se o quadro de confirmação (ACK) não retornar após um tempo limite, o nó i irá contabilizar o quadro como perdido. Caso o número de quadros perdidos consecutivos atinja um limiar L_A , a potência de transmissão é incrementada em um nível e o quadro retransmitido com o novo valor de potência. Se o limiar L_A não é atingido, o quadro será retransmitido com a mesma potência de transmissão.

¹As relações usadas nas equações são expressas em mW.

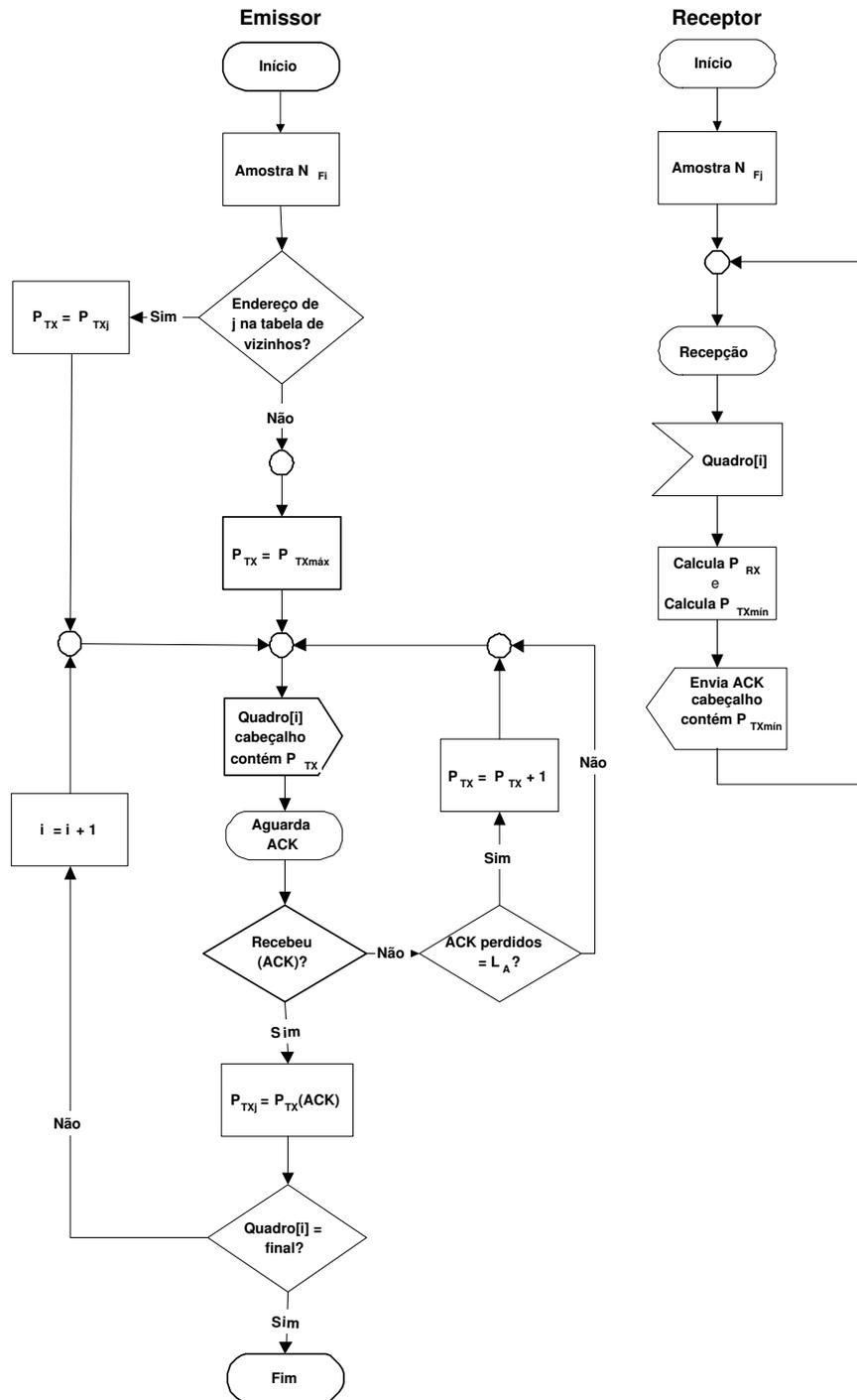


Figura 6.4: Operação do método Atenuação.

Para evitar que os quadros de dados sejam transmitidos inicialmente sempre na potência máxima de transmissão, o método Atenuação provê um mecanismo

para armazenar a potência mínima de transmissão para cada nó em uma tabela de vizinhos [Pires et al., 2004]. Antes de transmitir os dados, o emissor verifica se o destino possui uma entrada na sua tabela. Caso possua, a transmissão será realizada na potência armazenada. Caso contrário o quadro será enviado na potência máxima ou padrão. Como o ruído do meio é dinâmico e os nós podem se mover ou se retirarem da rede, as entradas da tabela de potência são invalidadas após um intervalo de tempo e um novo valor da potência mínima de transmissão deve ser armazenado.

6.5.3 Método AEWMA

O método Iterativo na primeira fase decrementa a potência até um valor mínimo quando não recebe mais uma confirmação. Na segunda fase o método ajusta a potência de transmissão em torno de uma potência mínima, que oscila em função das variações do meio de transmissão. O método Atenuação reage bruscamente às variações do meio, pois a cada quadro a potência mínima de transmissão é calculada e alterada para o envio do próximo quadro.

Para resolver esse problema de flutuação da potência de transmissão estendemos o método Atenuação empregando uma função de amortização para cálculo da potência mínima de transmissão. Escolhemos a função EWMA (*Exponentially Weighted Moving-Average*) como filtro da potência de transmissão pela simplicidade dos cálculos empregados, que podem ser realizados sem uma unidade de ponto flutuante e sem a necessidade do armazenamento de valores e parâmetros em memória. A seção 7.6 avalia o consumo de memória e a eficiência em tempo de processamento dessa função implementada em uma arquitetura de nós sensores.

O EWMA é uma função de média móvel ponderada exponencial, em que os valores mais antigos são decrementados exponencialmente. Essa média é baseada em um fator α , onde $0 < \alpha < 1$. O parâmetro v é a seqüência de valores que desejamos para a média, e v_i é o valor da potência mínima de transmissão (P_{TXmin}) dado pela equação 6.6. O valor de saída O para a iteração i do AEWMA é dado pela equação 6.7.

$$O_i = O_{i-1} \times (1 - \alpha) + v_i \times \alpha \quad (6.7)$$

O cálculo do EWMA garante que, em uma dada iteração i , o $(i - k)$ -ésimo elemento da seqüência irá contribuir com peso $\alpha \times (1 - \alpha)^{i-k}$ para o valor atual. Outra propriedade dessa função é que, decrementando o valor de α , aumentamos a influência dos valores passados sobre os valores mais recentes no resultado

final. Essa função evita flutuações bruscas na potência de transmissão como no método Atenuação. O novo método que utiliza essa função foi denominado de AEWMA, Atenuação com filtro EWMA, e funciona de maneira semelhante ao método Atenuação, como descrito a seguir.

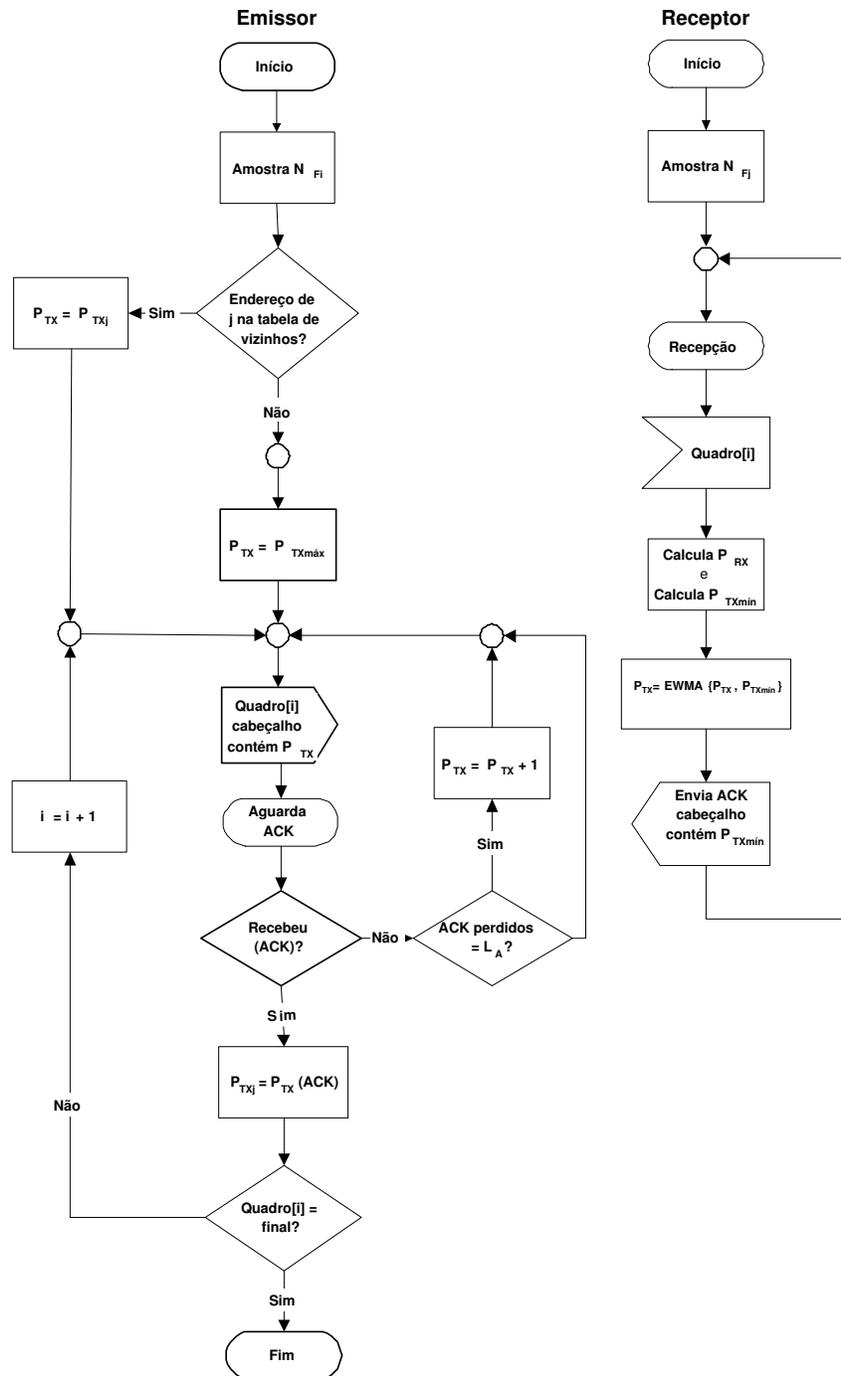


Figura 6.5: Operação do método AEWMA.

Um nó emissor i , ao transmitir para um nó j , envia no cabeçalho do quadro de dados o valor da potência de transmissão. O receptor j amostra o nível de sinal do quadro recebido e do ruído local e calcula a potência mínima de transmissão (equação 6.6). Antes de enviar uma confirmação, o nó j avalia potência mínima de transmissão usando a função de amortização EWMA (equação 6.7), considerando os valores passados da potência mínima de transmissão e de α . O quadro de confirmação (*ACK*), enviado na potência P_{TX} , carrega em seu cabeçalho o valor da potência mínima de transmissão calculado pela função EWMA. O nó i ao receber uma confirmação de j , armazena em sua tabela de vizinhos qual é o valor da nova potência mínima de transmissão para alcançar j no envio de um próximo quadro. O fluxo desse método é mostrado na figura 6.5.

Considerando que o cálculo da potência de transmissão utiliza níveis discretos de potência, o método Atenuação implementa, segundo a teoria de controle clássico, um controle Proporcional, enquanto o AEWMA implementa um controle Proporcional-Integral, que filtra o “ruído” introduzido pelas frequentes variações dos parâmetros de entrada [Ogata, 2004].

6.5.4 Método Híbrido

O quarto método proposto, denominado Híbrido, incorpora a restrição (4) do método Atenuação ao método Iterativo. Isso assegura que a potência de transmissão não decresce abaixo de um valor limite, garantindo a recepção correta dos quadros. O método Híbrido opera em duas fases, como no método Iterativo.

Na primeira fase, o nó i envia um quadro para o nó j , inserindo em seu cabeçalho a potência de transmissão. Após o envio de dados, o nó i aguarda uma confirmação (*ACK*) do nó j (figura 6.6). O nó j , ao receber um quadro de i , amostra o nível do sinal recebido (P_{RX}). Se o sinal recebido é maior que o nível de ruído local do nó j e existe uma separação mínima entre o sinal e o ruído médio local, que é a restrição (4) do método Atenuação, o nó j envia uma confirmação (*ACK*) para o nó i , carregando em seu cabeçalho o mesmo valor da potência de transmissão recebida. O nó i ao receber uma confirmação decrementa a potência de transmissão em um nível (figura 6.7).

Essa separação entre o sinal e o ruído visa manter a qualidade do enlace de maneira que o quadro seja decodificado corretamente. Caso a potência de recepção do sinal esteja abaixo desse limiar (ruído e separação desejada) e ainda assim o quadro é decodificado, o nó j informa que o emissor deve incrementar a potência de transmissão em um nível (figura 6.7). Além disso, caso a confirmação (*ACK*) não seja recebida dentro de um período pré-determinado de tempo

(*time-out*) o método entra na sua segunda fase. A potência de transmissão é incrementada em um nível e o quadro é reenviado pelo nó i .

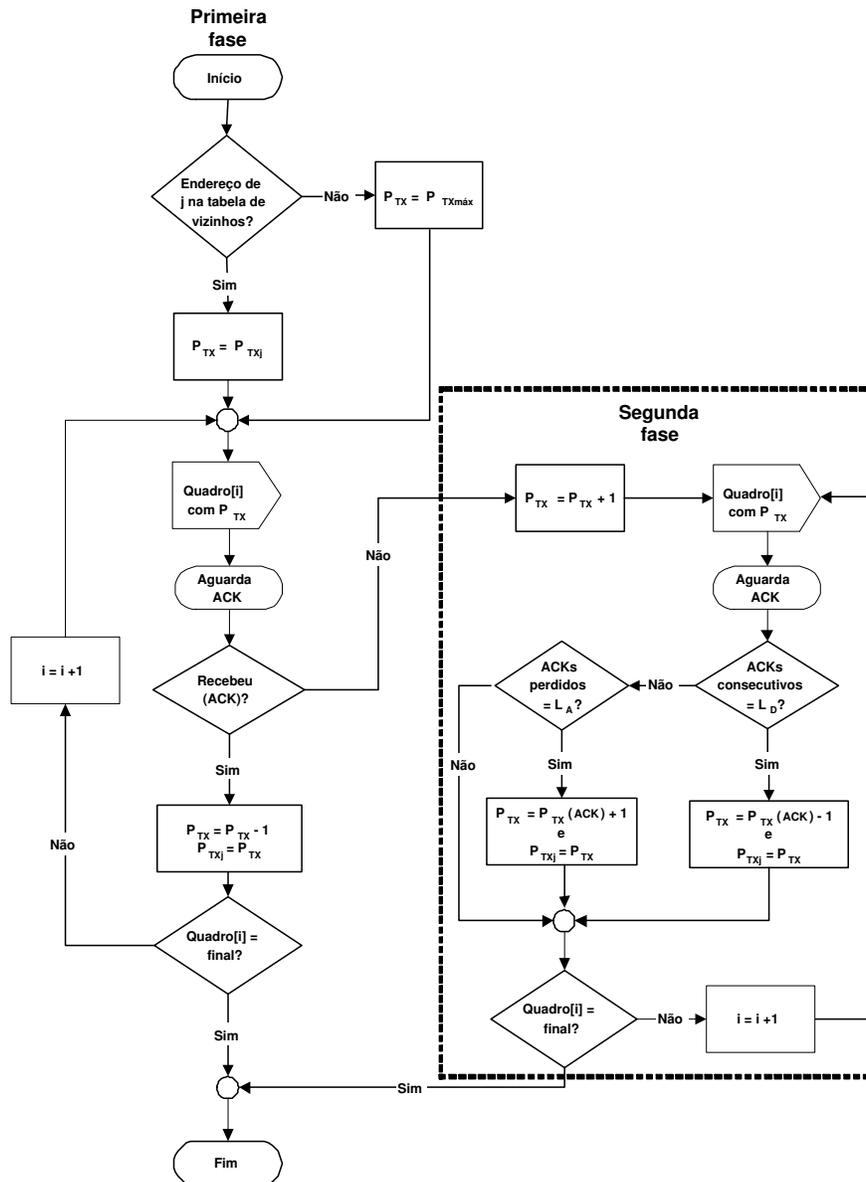


Figura 6.6: Operação do método Híbrido (lado emissor).

Na segunda fase, o método Híbrido procura ajustar dinamicamente a potência de transmissão para refletir as mudanças ocorridas no meio. Para tanto, o nó i decrementa a potência de transmissão caso receba L_D quadros de confirmação consecutivos. Por outro lado, caso o nó i perca L_A quadros de confirmação consecutivos ou a potência de recepção esteja abaixo do limiar apresentado an-

teriormente, a potência de transmissão será aumentada em um nível. As figuras 6.6 e 6.7 apresentam o fluxo de operação do método Híbrido e suas fases.

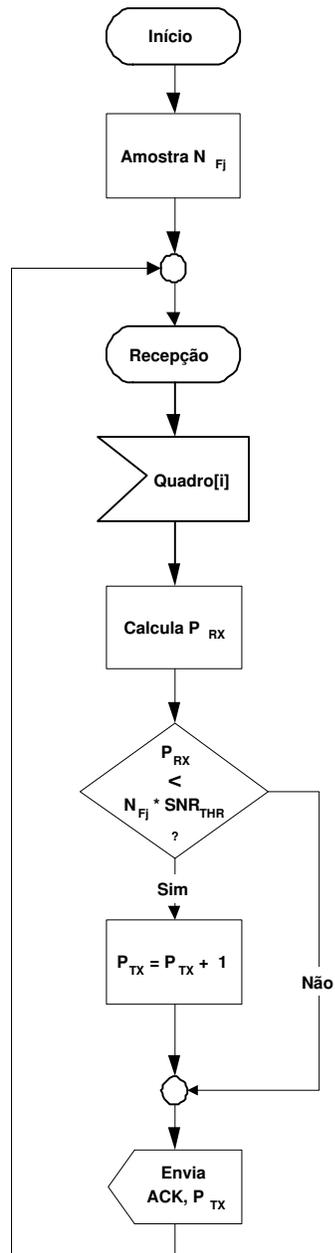


Figura 6.7: Operação do método Híbrido (lado receptor).

Podemos enfatizar que as alterações nas duas fases restringem a potência de transmissão ao limiar da relação sinal/ruído. Essa limitação mantém a estabilidade da potência mínima em relação à variabilidade do meio de transmissão.

6.6 Comparação dos métodos de CPT propostos

Os métodos de CPT reduzem o consumo de energia, mas apresentam algumas desvantagens em relação aos protocolos sem CPT, como a necessidade de uma comunicação confirmada e ajustes de parâmetros em função do tipo de tráfego na rede. O uso de comunicação confirmada aumenta minimamente o consumo de energia, segundo os estudos de Polastre et al. [Polastre et al., 2004]. Dessa forma, os métodos de CPT ajustam dinamicamente a potência mínima de transmissão reduzindo a probabilidade da ocorrência de colisões e o valor da potência média.

O método Iterativo apresenta simplicidade no cálculo da potência mínima, sendo determinada pela iteração nos valores nominais da potência do rádio. Para que essas iterações sejam realizadas é necessário que vários quadros sejam trocados entre os nós. Além disso, os parâmetros de confirmações L_A e L_D devem ser ajustados previamente de acordo com o tipo de ambiente e tráfego.

O método Atenuação determina a potência mínima de transmissão em função do ruído do meio. Esse método, em relação ao Iterativo, determina a potência mínima na primeira interação entre os nós por meio de cálculos. Para evitar complexos modelos de propagação de sinais, são empregados parâmetros empíricos na determinação da potência mínima de transmissão.

Apesar de eficientes em energia, os métodos Iterativo e Atenuação apresentam instabilidade na determinação da potência mínima de transmissão. O método AEWMA emprega uma função EWMA para evitar constantes oscilações da potência calculada, que aumenta a complexidade dos cálculos realizados pelo nó. O método Híbrido possui a simplicidade do Iterativo associada à relação sinal/ruído do método Atenuação. Apesar disso, os dois métodos (AEWMA e Híbrido) necessitam de ajustes de parâmetros empíricos para manter a qualidade do enlace. A tabela 6.1 apresenta as características dos métodos de CPT.

Tabela 6.1: Métodos de CPT \times métodos sem CPT.

Método	Vantagens	Desvantagens
Iterativo	<ul style="list-style-type: none"> ◊ P_{TXmin} determinada por iterações nos valores nominais do rádio. ◊ Ausência de cálculos complexos. 	<ul style="list-style-type: none"> ◊ Ajuste prévio do limite de confirmações L_D e L_A em função do tráfego. ◊ Flutuação da P_{TXmin} em presença de ruídos. ◊ Repetidas iterações para o cálculo da P_{TXmin}.
Atenuação	<ul style="list-style-type: none"> ◊ P_{TXmin} calculada na primeira interação entre os nós. ◊ Interação entre os nós evita modelos complexos de propagação de sinal. 	<ul style="list-style-type: none"> ◊ Ajuste de parâmetros empíricos P_{RX} e SNR desejados. ◊ Ruídos intermitentes causam oscilação da P_{TXmin}.
AEWMA	<ul style="list-style-type: none"> ◊ Redução de flutuações da P_{TXmin}. ◊ Rápida determinação da P_{TXmin}. 	<ul style="list-style-type: none"> ◊ EWMA aumenta complexidade dos cálculos. ◊ Ajuste prévio dos parâmetros: α, P_{RX} e SNR.
Híbrido	<ul style="list-style-type: none"> ◊ P_{TXmin} determinada na primeira interação entre os nós. ◊ Redução das oscilações da P_{TXmin}. ◊ Ausência de cálculos complexos. 	<ul style="list-style-type: none"> ◊ Ajuste prévio de parâmetros desejados: L_D, L_A e SNR em função do tráfego.

6.7 Conclusões

A comunicação é a tarefa que mais consome energia nas RSSFs, e por isso os protocolos de controle de acesso ao meio devem utilizar algoritmos que diminuam o consumo de energia do rádio. O controle da potência de transmissão é um destes mecanismos, mas o seu uso em RSSFs ainda é incipiente.

O tamanho reduzido dos nós sensores restringem o hardware do nó sensor em processamento, alcance de transmissão, capacidade de armazenamento e principalmente na autonomia de suas baterias. Portanto, os métodos empregados para o CPT devem ser desenvolvidos para respeitar suas limitações. As quatro técnicas de CPT propostas são baseadas em estimar a potência mínima de transmissão considerando as limitações do hardware dos nós sensores (processamento, memória e energia).

As técnicas de CPT visam melhorar a utilização dos recursos da rede ao possibilitar o aumento do número de transmissões simultâneas dentro de uma RSSF e reduzir a probabilidade de colisões. Este fato propicia o aumento da vazão total da rede. Outro objetivo das técnicas de CPT é a redução do consumo de energia na transmissão dos dados. Ao diminuir a potência de transmissão para um valor mínimo necessário ao estabelecimento do enlace, o consumo de energia na comunicação é reduzido.

Apesar das melhorias introduzidas pelos métodos de CPT, eles apresentam algumas características desfavoráveis em relação aos métodos tradicionais sem CPT, como a necessidade de uma comunicação confirmada e ajustes de parâmetros em função do tipo de tráfego na rede.

Alguns dos métodos propostos como o Iterativo e Atenuação são susceptíveis às variações de ruído do meio e apresentam flutuações da potência mínima. Além disso, necessitam do ajuste prévio de parâmetros em função do tráfego. Os métodos AEWMA e Híbrido suavizam essas variações da potência mínima.

Para reduzir a flutuação da potência mínima, o AEWMA emprega uma função de amortização, o que aumenta a complexidade dos cálculos realizados pelos nós. O método Híbrido obtém resultado semelhante, associando os recursos empregados nos métodos Iterativo e Atenuação. Apesar disso, o método Híbrido necessita do ajuste de parâmetros em função do tráfego (SNR e confirmações consecutivas recebidas e perdidas).

No próximo capítulo, descrevemos as características de uma plataforma comercial largamente utilizada em RSSFs. Em seguida, mostramos a implementação das quatro técnicas de CPT nessa plataforma comercial de nós sensores.

Capítulo 7

Implementação das técnicas de CPT em RSSFs

Este capítulo apresenta a implementação das técnicas de CPT em uma plataforma real de nós sensores. Na seção 7.1 são apresentadas as características da arquitetura de nós sensores, o sistema operacional TinyOS, amplamente empregado em RSSFs, e as plataformas de hardware existentes. Na seção 7.2 são descritas as características do protocolo B-MAC, o formato dos quadros, as funcionalidades e as técnicas empregadas. Um modelo analítico para o consumo de energia empregando o B-MAC é apresentado na seção 7.3. Esse modelo demonstra que a potência de transmissão é um dos parâmetros que pode ser considerado para a redução do consumo de energia.

Na seção 7.4 apresentamos o primeiro protocolo da literatura atual com CPT implementado em RSSFs, denominado de Iterativo. São apresentadas suas características, serviços providos, formato dos quadros e a estrutura de dados implementada. O protocolo Atenuação é apresentado na seção 7.5. São apresentadas suas funcionalidades, formato dos quadros e a estrutura de dados utilizada. A seção 7.6 apresenta um aprimoramento dos protocolos anteriores, Iterativo e Atenuação, por meio da implementação de uma função de cálculo de média móvel ponderada exponencial EWMA (*Exponentially Weighted Moving-Average*). Esse protocolo é denominado de AEWMA (*Attenuation with Exponentially Weighted Moving-Average*) e nessa seção são apresentadas as suas características, serviços, formato dos quadros e a estrutura de dados implementada. Na seção 7.7 são reunidas as características dos protocolos Iterativo e AEWMA e implementado um quarto protocolo denominado de Híbrido. Nessa seção apresentamos seu funcionamento, formato dos quadros e a estrutura de dados utilizada. A seção 7.8 apresenta as conclusões desse capítulo.

7.1 Arquitetura de nós sensores

Os atuais simuladores para RSSFs não representam com precisão as variações das condições do meio de transmissão e dos parâmetros de hardware. O meio de transmissão é altamente dinâmico e impõe restrições ao sinal que são descritas por diversos modelos de propagação que, além de complexos, são de difícil simulação. Os simuladores não consideram a variação de parâmetros, como por exemplo nas leituras da potência de recepção (RSSI), que são dependentes dos valores de tensão das baterias na entrada do conversor analógico/digital (A/D). Dessa forma, a utilização de simuladores na análise das técnicas de CPT não seria fidedigna. O desenvolvimento e a implementação das técnicas de CPT em uma plataforma real de nós sensores possibilita uma avaliação mais precisa das mesmas.

A limitação de recursos dos nós sensores não permite a utilização de sistemas operacionais desenvolvidos para os atuais sistemas embutidos, como aqueles utilizados em PDAs, celulares e outros dispositivos móveis. Em geral, esses sistemas exigem maior capacidade de processamento, memória e bateria que os existentes nas plataformas de sensores atuais [Hill, 2000, Ruiz et al., 2004].

Por causa das restrições do hardware empregado nas RSSFs foi desenvolvido na Universidade da Califórnia, em Berkeley, um sistema operacional especificamente para RSSFs, sendo denominado de TinyOS [TinyOS, 2004, Levis et al., 2004b]. Esse sistema foi projetado para ser simples, eficiente em processamento e consumo de memória. Atualmente, o TinyOS é o sistema operacional mais utilizado em RSSFs. São exemplos de plataformas que empregam esse sistema: a família Mica Motes (Mica, Mica2, MicaDot, MicaZ) [Crossbow, 2004], MoteIV [MoteIV Corporation, 2006], Telos [Polastre, 2006], EYES [EYES Project, 2005], Imote [Intel Corporation, 2006], Echelon [Echelon Corporation, 2006], Exscal [Ohio State University, 2006], BTNode [BTNode Project, 2006], CodeBlue [Harvard University, 2006] e outras.

O TinyOS gerencia eventos concorrentes, caso comum em sensoriamento de ambientes, utilizando um escalonador de tarefas não preemptivo. Além disso, esse sistema operacional possibilita a codificação de estruturas de dados com baixo consumo de memória estática e provê por meio de *componentes* protocolos de comunicação, configuração de sensores e ferramentas para aquisição de dados. Os componentes do TinyOS fornecem abstrações para o hardware, permitindo que suas configurações sejam alteradas em tempo de compilação, como por exemplo: codificação de bits, temporizações, modos de operação do rádio, taxa de amostragem de sinais, potência de transmissão do rádio, entre outros.

Os programas construídos no TinyOS são baseados em um modelo de eventos

e escritos em uma linguagem de programação derivada do *C*, denominada **NesC** (*Network embedded system C*). As aplicações são desenvolvidas a partir de um conjunto de componentes que definem os serviços providos e as operações executadas. Um componente inclui o formato de um quadro, tratadores de evento, comandos e tarefas para a manipulação de mensagens.

Os componentes podem executar ou exportar comandos de inicialização e gerenciamento de energia, iniciar a transmissão de mensagens, sinalizar eventos de hardware (interrupções) para a transmissão e recebimento de mensagens. A especificação do comportamento de um componente é feita por um conjunto de *interfaces*, implementadas ou requeridas de outros componentes. As interfaces conectam os componentes uns aos outros estaticamente, aumentando a eficiência em tempo de execução, já que o sistema operacional TinyOS é compilado em conjunto com a aplicação em um único código binário, que contém somente os componentes empregados pela aplicação. Como as interfaces e componentes são conectados somente em tempo de compilação, o TinyOS evita a carga dinâmica de bibliotecas, aumentando o desempenho das aplicações.

O TinyOS também provê um conjunto de serviços. Os principais serviços fornecidos por seus componentes e implementados por suas interfaces são:

- *Roteamento, controle de acesso ao meio e transmissão de mensagens*: componentes que implementam os protocolos de comunicação do TinyOS.
- *Configuração de sensores*: componentes que implementam interfaces para a especialização de diversos tipos de sensores utilizados pelo elemento de rede.
- *Gerenciamento de energia*: componentes que coordenam os modos de operação do rádio, do processador e dos sensores visando economia de energia.
- *Depuração de código*: componentes que implementam ferramentas de depuração de código via interfaces de hardware UART (*Universal Asynchronous Receiver and Transmitter*) e JTAG (*Joint Test Action Group*).
- *Escalonamento de tarefas*: componentes que implementam temporizadores para a execução de tarefas e manipulação de eventos.

O TinyOS tem sido empregado em dezenas de plataformas e em vários projetos desenvolvidos pela comunidade científica para o desenvolvimento de aplicações e protocolos para RSSFs [TinyOS Community Forum, 2006]. Uma das plataformas mais utilizadas e difundidas pela comunidade TinyOS é a Mica Motes2.

Os serviços providos pelos componentes na arquitetura Mica Motes2 criam uma hierarquia de camadas de componentes. Os componentes de alto nível, ou módulo, enviam comandos aos componente de baixo nível que interagem com o hardware por meio de interrupções. Essa hierarquia de comunicação da arquitetura Mica Motes2 é apresentada na figura 7.1, sendo descrita em camadas como:

- *Aplicação*: contém módulos que determinam as primitivas (eventos, comandos e tarefas) para os seus usuários ou para os componentes de baixo nível. Provê os serviços de roteamento, coleta de dados, endereçamento e troca de mensagens com a entidade par de destino. Os serviços são implementados pelos protocolos que definem o formato das mensagens trocadas, algoritmos de roteamento e de tratamento de dados.
- *GenericComm*: interliga os componentes de alto nível aos de baixo nível, por meio de interfaces, para enviar e receber mensagens pelo rádio ou porta serial. O serviço de comunicação oferecido é ponto a ponto, sem controle de fluxo, garantia de entrega ou ordenação de mensagens. Os protocolos desse nível implementam um módulo (conjunto de componentes) de comunicação para troca de mensagens entre as entidades pares.
- *AMStandard*: os componentes desse nível descrevem o formato e as primitivas para a troca de mensagens entre os nós. Provê os serviços de enquadramento de bytes, identificação dos nós, detecção de erros e *time stamping* para as mensagens envolvidas na comunicação. Os protocolos definem o formato das mensagens ativas AM (*Active Message*) e implementam os serviços de comunicação de mensagens enviadas e recebidas pelo rádio ou porta serial.
- *CC1000Control*: os componentes desse nível interagem com o hardware e possuem as funções para ajustes de parâmetros do rádio. Provê os serviços de codificação, envio e recepção de bytes pelo rádio. Os protocolos implementam esses serviços na plataforma Mica Motes2 para o rádio CC1000 [CC1000, 2006].
- *CC1000RadioIntM*: seus componentes possuem a função de controle de acesso ao meio. Provê serviços de gerenciamento de energia do rádio, controle de congestionamento, envio e recepção de bytes pelo rádio e disciplinas de acesso ao meio. Implementa um protocolo MAC baseado em CSMA/CA que emprega métodos de avaliação de canal (CCA) e serviços com ou sem confirmação de mensagens transmitidas a sua entidade par.
- *Hardware*: os componentes de baixo nível controlam as operações do nível físico. Provê serviços de amostragem de sinais, atrasos da transmissão,

temporizações, sinalizações de hardware, conversões de sinais e manipulação da interface do rádio.

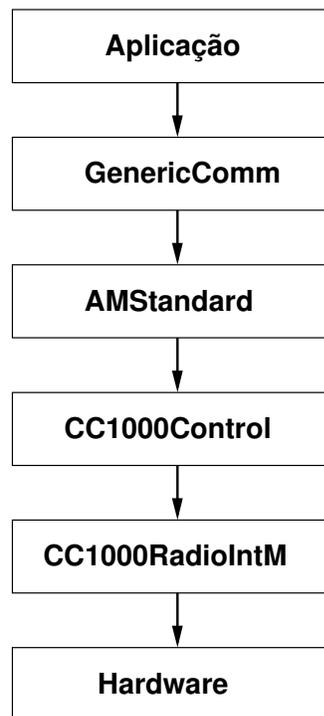


Figura 7.1: Hierarquia da pilha de comunicação no TinyOS.

A arquitetura de rede empregada nas RSSFs difere dos tradicionais modelos de referência OSI/ISO e TCP/IP. Isso é devido à necessidade de um modelo intercamadas que possa agregar serviços e funcionalidades a uma única camada para reduzir o tamanho de código, ou pela inexistência de uma camada de transporte, desnecessária na maioria das aplicações [Ruiz et al., 2004]. Apesar do modelo intercamadas empregado nas RSSFs, é possível criar e separar as funcionalidades e serviços em várias camadas como nos modelos tradicionais de referência.

As técnicas de CPT propostas no capítulo 6 foram implementadas sobre o protocolo MAC padrão da plataforma Mica Motes2/TinyOS. A descrição completa desse protocolo MAC, bem como seu funcionamento, formato dos quadros, serviços oferecidos e um modelo analítico são apresentados na próxima seção. Essa descrição tem por objetivo mostrar a viabilidade da implementação das técnicas de CPT sobre essa plataforma.

7.2 Protocolo MAC do Mica Motes2/TinyOS

O protocolo MAC padrão da plataforma Motes2/TinyOS, B-MAC, foi projetado na Universidade da Califórnia em Berkeley para aplicações dirigidas a eventos em RSSFs [Polastre et al., 2004]. Esse protocolo foi desenvolvido para prover serviço de controle de acesso ao meio, ser eficiente em energia, permitir reconfiguração pela aplicação e ainda possuir o menor tamanho de código.

O protocolo B-MAC está implementado no TinyOS a partir da versão 1.1.0 e implementa dois módulos de componentes para a interação do rádio do nó sensor e a aplicação, como mostra a figura 7.2.

O módulo `CC1000ControlM` provê os serviços de controle do ciclo de operação e configuração do rádio. O serviço de controle de acesso ao meio é fornecido pelo módulo `CC1000RadioIntM`. Esse módulo provê interfaces com primitivas para envio (*BareSendMsg*) e recepção (*ReceiveMsg*) de quadros para a comunicação entre as entidades de origem e destino. Outras interfaces também são providas para controle de atraso de transmissão (*MacBackoff*) e controle de acesso ao canal (*MacControl*). O protocolo B-MAC pode também oferecer um serviço de entrega confiável, implementado pela interface *ACKControl*, sendo definido pela aplicação. O módulo AM (*Active Message*) provê o formato do quadro com a designação de uma estrutura de programação de todos os campos do protocolo.

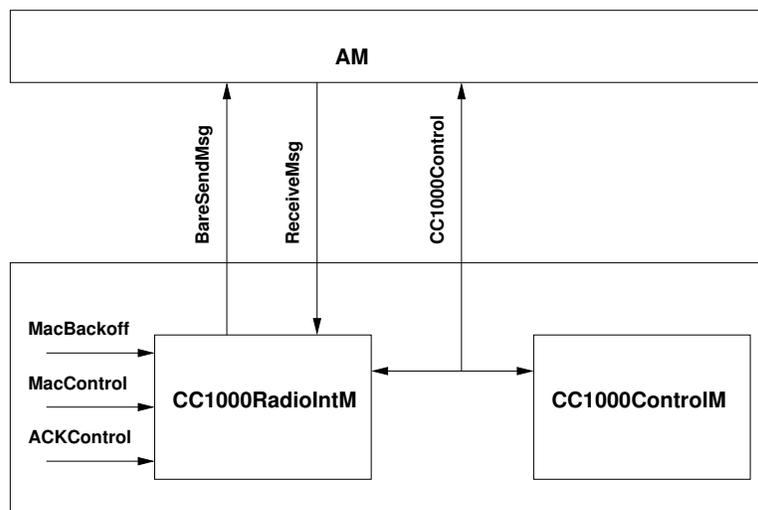


Figura 7.2: Diagrama de módulos e interfaces do B-MAC.

A estrutura e o funcionamento do protocolo B-MAC são descritos nas próximas seções.

7.2.1 Estrutura do B-MAC

O protocolo B-MAC emprega um controle CSMA para RSSFs e utiliza mecanismos de avaliação de canal livre, de atraso de transmissão (*backoff*), de quadros de confirmação e de escuta assíncrona do canal, conhecida como LPL (seção 4.4). O B-MAC permite à aplicação ajustar os parâmetros desses mecanismos, habilitando ou desabilitando a detecção da portadora física (CCA), os quadros de confirmação, o atraso de transmissão (*backoff*) e ainda ajustar dinamicamente o tamanho de preâmbulo (LPL) [Polastre et al., 2004]. Os quadros podem transportar dados ou serem usados para confirmação. O formato desses quadros são apresentados a seguir.

Formato do quadros

A estrutura dos quadros do protocolo B-MAC é definida como uma mensagem ativa (*Active Message*) que especifica os campos de dados e os cabeçalhos de controle. Os quadros de dados são de tamanho variável, de 7 a 36 bytes se não considerarmos os bytes de preâmbulo e sincronização, enquanto que os quadros de confirmação são de apenas dois bytes. O formato dos quadros é apresentado na figura 7.3 e seus campos são descritos a seguir.

Preâmbulo (variável)	SYN (2)	Destino (2)	Tipo (1)	Grupo (1)	Tamanho (1)	Dados (0..29)	CRC (2)
--------------------------------	-------------------	-----------------------	--------------------	---------------------	-----------------------	-------------------------	-------------------

ACK (2)

Figura 7.3: Estrutura dos quadros de dados e de confirmação do B-MAC.

- *Preâmbulo*: campo de tamanho variável dado em função do intervalo de repouso do rádio (ver seção 7.3).
- *SYN*: sincronização do rádio para a recepção e identificação de início de quadro.
- *Destino*: endereço do nó de destino.
- *Tipo*: identificador do tipo de mensagem ativa quando ela é recebida pela interface serial (UART) ou pelo rádio.
- *Grupo*: identificação do grupo ao qual o nó pertence. A comunicação é realizada somente entre nós do mesmo grupo, de acordo com a identificação do grupo.

- *Tamanho*: indica o tamanho em bytes da mensagem a ser enviada.
- *Dados*: campo de comprimento variável (de 0 a 29 bytes) que contém os dados da aplicação.
- *CRC*: campo de verificação de redundância cíclica para detecção de erros de quadro, inclui os campos de controle e de dados.

O quadro de confirmação de recepção possui somente um campo de dois bytes para identificação do quadro de confirmação. Seu emprego é opcional e deve ser habilitado pela aplicação quando necessário. O protocolo B-MAC ainda provê um serviço de economia de energia, desligando o rádio do nó quando está ocioso (*power save*). Esse serviço controla os modos de operação do rádio como descrito a seguir.

7.2.2 Controle da operação do rádio

Para controlar a operação do rádio, o B-MAC alterna o ciclo de operação do rádio entre intervalos ativo e de repouso. Durante o intervalo ativo o nó mantém o rádio ligado, escutando o meio, transmitindo ou recebendo dados. Durante o intervalo de repouso, o rádio é desabilitado. Se o ciclo de operação é definido como 100% ativo, o rádio estará sempre ligado e, portanto, o tempo de repouso será nulo. Por outro lado, para economizar energia, o tempo de repouso é ajustado para que o rádio fique o maior intervalo de tempo possível desativado. O preâmbulo deve ser ajustado de maneira que o nó, durante um ciclo de operação, seja capaz de escutar pelo menos um byte do preâmbulo no intervalo ativo. Dessa forma, o tamanho do preâmbulo deve ser maior que o intervalo de repouso. A relação entre o período do ciclo de operação (t_i) e o tempo de recepção de um byte pelo rádio (t_{rxbyte}) é conhecida como LPL e define o tamanho do preâmbulo, dado pela equação 7.1.

$$L_{preamble} \geq \frac{t_i}{t_{rxbyte}} \quad (7.1)$$

O controle da operação do rádio para economia de energia é dado pelo diagrama de estados ¹apresentado na figura 7.4.

¹Os diagramas de estados apresentados neste capítulo utilizam uma notação da UML (*Unified Modeling Language*) para uma máquina de estados finitos de Moore [Lee and Tepfenhart, 1997].

Inicialmente o rádio do nó sensor está desligado (*DISABLE*) e quando é ativado seus parâmetros são configurados, tais como frequência e potência de transmissão, ciclo de operação, número de leituras do ruído do meio e outros parâmetros da camada física.

Após a ativação do rádio (*Iniciar*) o nó escuta o meio de transmissão (*IDLE*), coleta amostras de sinal do meio para estimar o ruído local do meio (N_F), avalia o estado do canal e monitora a ocorrência de eventos de transmissão ou recepção de dados. Essas ações ocorrem durante o intervalo de atividade do nó, sendo que após esse intervalo, se nenhum evento é detectado, o rádio é colocado em modo de repouso (*POWER DOWN*). No estado de repouso o rádio é desabilitado por um intervalo de tempo, determinado pelo regime de LPL selecionado pela aplicação.

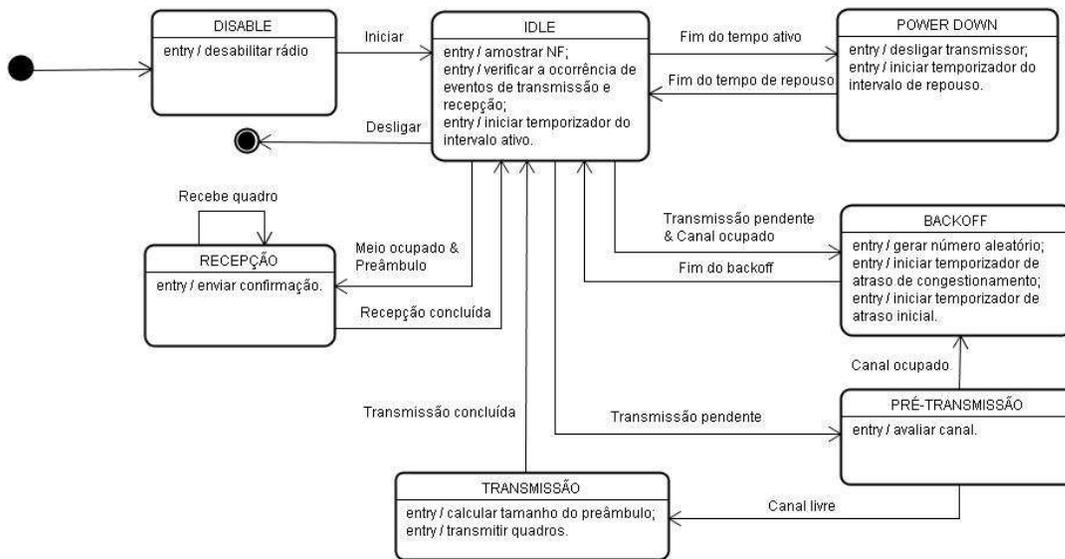


Figura 7.4: Ciclo de operação do rádio em modo de economia de energia.

Ao final do intervalo de repouso, o rádio é novamente ativado e retorna ao modo de escuta (*IDLE*). Durante o intervalo de atividade, o canal é novamente monitorado e realiza as ações descritas anteriormente. Se um sinal é detectado acima do valor da média das amostras de ruído do meio (N_F), significa que o canal está ocupado e que pode existir uma transmissão em andamento. Dessa forma, o rádio entra em modo de recepção (*RECEPÇÃO*).

Caso o nó tenha alguma mensagem para ser transmitida (*Transmissão pendente*), este aguarda o intervalo ativo e avalia o canal de transmissão. Se o meio estiver ocupado (*Canal ocupado*), é gerado um intervalo de tempo aleatório (*BACKOFF*) para atrasar a transmissão e evitar congestionamento. Caso con-

trário, se o meio estiver livre, o rádio entra em modo de pré-transmissão (*PRÉ-TRANSMISSÃO*).

A ocorrência de um evento em determinada área da rede faz com que todos os nós vizinhos que detectaram esse evento transmitam os dados coletados simultaneamente para um ponto de acesso. Se todos os nós transmitirem ao mesmo tempo a probabilidade de colisões no meio aumenta. A função do estado de pré-transmissão é evitar que essas colisões ocorram. Dessa forma, o nó avalia novamente o nível de sinal do canal. Se o canal é avaliado como ocupado, é gerado um atraso aleatório inicial antes da transmissão e o nó retorna para o modo de escuta (*IDLE*). Se o canal é novamente avaliado como livre, o nó inicia imediatamente sua transmissão (*TRANSMISSÃO*). Os processos de transmissão e recepção possuem estados intermediários, que são descritos a seguir.

7.2.3 Transmissão

Antes de transmitir um quadro, é necessário inserir bytes de controle para que ele seja detectado corretamente pelo destino. Dessa forma, vários subestados são definidos para a inserção dos bytes de controle como preâmbulo, sincronização e CRC. Quando são empregados quadros de confirmação, um outro subestado para aguardar o quadro de confirmação deve ser utilizado. O diagrama de transmissão com seus subestados (linhas tracejadas) é apresentado na figura 7.5 e descrito a seguir.

Supondo que o canal foi avaliado como livre no estado de pré-transmissão, a transmissão é iniciada (*TRANSMISSÃO*). O quadro a ser enviado deve ser precedido dos bytes de preâmbulo e de sincronização e também deve ser sucedido pelos bytes de verificação de redundância cíclica para detecção de erro no destino.

No estado de transmissão é calculado o tamanho do campo de preâmbulo (equação 7.1). A transmissão dos bytes de controle e dados é realizada nos subestados de transmissão. Assim, depois que os k bytes de preâmbulo foram escritos, eles são transmitidos byte a byte pelo rádio (subestado *TRANSMISSÃO: PREÂMBULO*). Um campo de sincronização de quadro deve ser inserido para que o receptor seja capaz de sincronizar o seu rádio e de identificar o início de um quadro de dados.

Para a transmissão da sincronização, o nó entra no subestado de sincronização (*TRANSMISSÃO: SINCRONIZAÇÃO*), transmite dois bytes de sincronização e entra em outro subestado, iniciando a transmissão dos dados (subestado *TRANSMISSÃO: DADOS*). Os bytes do quadro de dados são transmitidos pelo rádio e em seguida são calculados os bytes de CRC (subestado *TRANSMISSÃO: CRC*).

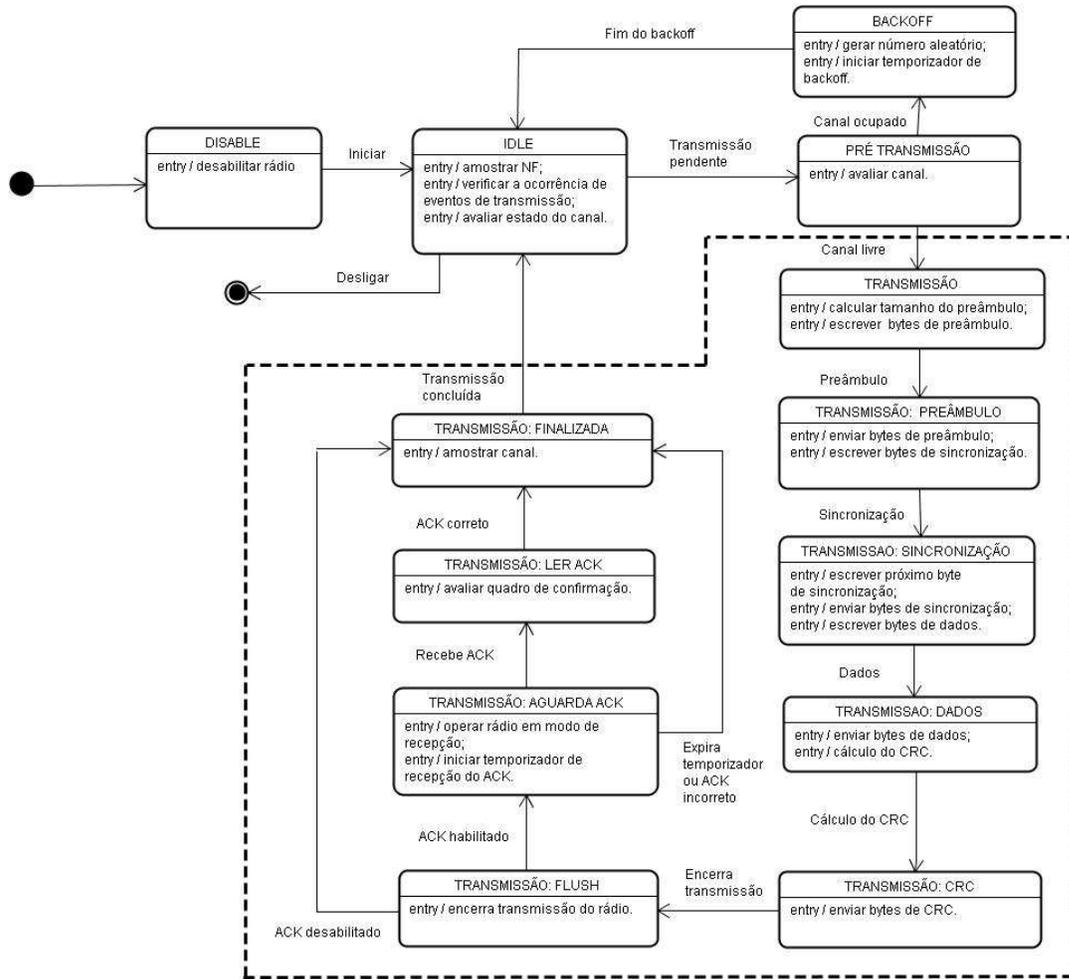


Figura 7.5: Diagrama dos subestados de transmissão do protocolo B-MAC.

No subestado de cálculo da redundância cíclica, dois bytes são enviados pelo rádio e o nó encerra a operação de transmissão (*TRANSMISSÃO: FLUSH*). Caso a aplicação não tenha solicitado o uso de quadros de confirmação, o nó conclui a transmissão (*TRANSMISSÃO: FINALIZADA*). Se o serviço é confirmado, o nó deve aguardar pelo recebimento de um quadro de confirmação (subestado *TRANSMISSÃO: AGUARDA ACK*).

No subestado para aguardar ACK, o nó coloca o rádio em modo de recepção e inicia um temporizador para o recebimento da confirmação. Se o temporizador expira, o nó encerra sua transmissão (subestado *TRANSMISSÃO: FINALIZADA*) e indica às camadas superiores que não recebeu confirmação. Caso a confirmação chegue antes do temporizador expirar, o nó deve ler o conteúdo do quadro de confirmação (subestado *TRANSMISSÃO: LER ACK*). Se o conteúdo do quadro recebido não corresponde ao padrão esperado para o quadro de confirmação, o nó

indica às camadas superiores que não recebeu confirmação e encerra a transmissão (subestado *TRANSMISSÃO: FINALIZADA*). Caso o conteúdo do quadro corresponda à confirmação, o nó conclui a transmissão (subestado *TRANSMISSÃO: FINALIZADA*).

Após concluir a transmissão dos bytes pelo rádio o nó amostra novamente o nível de ruído local (N_F) e retorna ao estado de escuta (*IDLE*).

7.2.4 Recepção

O diagrama de recepção é apresentado na figura 7.6. Durante a avaliação do canal (*IDLE*), se um sinal é detectado acima da média das amostras do ruído local (N_F), provavelmente existe uma transmissão em andamento. Neste caso, o nó avalia se os bytes na interface de entrada do rádio correspondem aos bytes de preâmbulo (*SINCRONIZAÇÃO*). Caso o preâmbulo não seja identificado, o nó continua escutando o canal (*IDLE*). Por outro lado, se os bytes correspondem ao preâmbulo, o nó avalia os bytes de sincronização (*SINCRONIZAÇÃO*).

Durante a fase de sincronização, os bytes após o preâmbulo são avaliados, e caso correspondam aos bytes de sincronização o rádio é sincronizado e entra em modo de recepção (*RECEPÇÃO*). Caso contrário, o nó retorna ao estado de escuta do canal (*IDLE*).

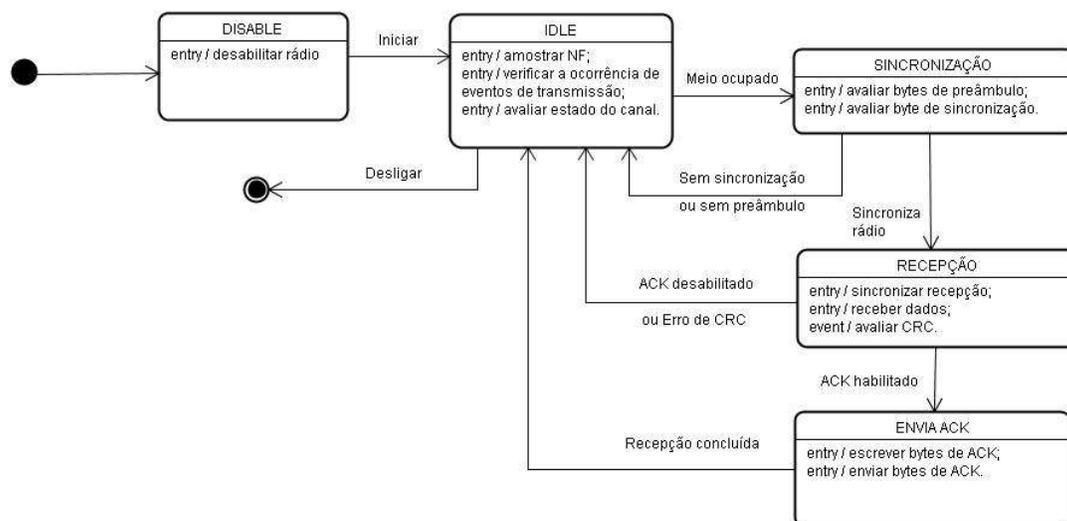


Figura 7.6: Diagrama dos estados de recepção do protocolo B-MAC.

Após todos os bytes do quadro serem recebidos, o receptor avalia os bytes de

CRC. Se os bytes são diferentes do calculado, o que indica erro na recepção, o nó informa às camadas superiores e retorna ao estado de escuta do canal (*IDLE*). Por outro lado, se os bytes de redundância estão corretos e o serviço é confirmado, o nó deve enviar um quadro de confirmação (estado *ENVIA ACK*). Após enviar o quadro de confirmação, o nó retorna para o estado de escuta do canal (*IDLE*). Se o serviço não é confirmado o nó retorna ao estado de escuta do canal.

O controle da operação do rádio pelo protocolo B-MAC determina a energia consumida. A seguir descrevemos e estendemos um modelo analítico do consumo de energia para o protocolo B-MAC, apresentado em [Polastre et al., 2004].

7.3 Modelo analítico de consumo de energia do B-MAC

Esta seção apresenta um modelo analítico de consumo de energia na comunicação proposto por Polastre et al. [Polastre et al., 2004]. O modelo considera a potência de transmissão como estática e global para todos os nós da rede. Pelo modelo proposto observamos que a utilização de técnicas de CPT pode contribuir para a redução do consumo de energia.

A energia consumida por um nó na comunicação, usando o protocolo B-MAC, na comunicação pode ser atribuída aos eventos de transmissão, recepção, escuta do canal e repouso, como mostra a equação 7.2 respectivamente.

$$\text{Consumo de Energia} = E_{TX} + E_{RX} + E_{Escuta} + E_{Repouso} \quad (7.2)$$

A energia consumida nesses eventos também é proporcional ao tamanho dos quadros enviados e recebidos. Esses quadros são formados por bytes de controle, preâmbulo, sincronização e dados. O preâmbulo possui tamanho variável, sendo proporcional ao período do ciclo de operação estabelecido pela aplicação. Durante o período do ciclo de operação (t_i), o nó deve ser capaz de avaliar o canal e ainda receber o preâmbulo. Dessa forma, o tamanho do preâmbulo ($L_{preambulo}$) deve ser ajustado para que o intervalo de recepção do preâmbulo ($t_{preambulo}$) seja pelo menos igual ao período do ciclo de operação do rádio, dado pela equação 7.3.

$$t_{preambulo} \geq t_i \quad (7.3)$$

O tempo de recepção do preâmbulo é limitado pelo tempo de recepção de bytes pelo rádio (t_{rxbyte}), como apresentado na equação 7.4.

$$t_{preambulo} = L_{preambulo} \times t_{rxbyte} \quad (7.4)$$

Considerando as equações 7.3 e 7.4, podemos calcular o tamanho mínimo do preâmbulo em função do ciclo de operação, dado pela equação 7.5.

$$L_{preambulo} \geq \frac{t_i}{t_{rbyte}} \quad (7.5)$$

A energia consumida na comunicação é proporcional ao tamanho dos quadros, à taxa de transmissão e aos tempos de transmissão (t_{TX}) e recepção (t_{RX}) dos quadros. O tempo de transmissão dos quadros é limitado pelo tempo de envio de bytes pelo rádio (t_{txbyte}) e pelo número de quadros enviados pela aplicação (r). O cálculo do tempo de transmissão é dado pela equação 7.6, considerando que o quadro é formado pelos bytes de controle e dados.

$$t_{TX} = r \times (L_{preambulo} + L_{sincronizacao} + L_{dados}) \times t_{txbyte} \quad (7.6)$$

O consumo de energia na transmissão está relacionado ao tempo de transmissão, ao valor da tensão (V) aplicada ao transceptor e à corrente demandada pelo rádio (I_{TX}), determinada pela potência de transmissão selecionada. Por exemplo, o rádio CC1000 da plataforma Mica Motes2 possui 22 níveis de potência, sendo que quanto maior a potência maior o valor de corrente, como pode ser visto pela tabela 7.1 (Fonte: [CC1000, 2006]). A equação 7.7 apresenta a energia consumida durante a transmissão.

$$E_{TX} = V \times I_{TX} \times t_{TX} \quad (7.7)$$

Para o nó receber um quadro, ele deve escutar o canal e detectar preâmbulos. Entretanto, durante o período ativo, o nó pode detectar preâmbulos não destinados a ele e escutar quadros de todos os seus n vizinhos. O limite superior do tempo de recepção dos quadros (t_{RX}) é dado pelo número de quadros recebidos (r), pela quantidade de nós vizinhos, pelo tamanho dos quadros e limitado pela capacidade de recepção do rádio (t_{rxbyte}), sendo dado pela equação 7.8.

$$t_{RX} \leq n \times r \times (L_{preambulo} + L_{dados} + L_{sincronizacao}) \times t_{rxbyte} \quad (7.8)$$

Tabela 7.1: Rádio CC1000 - Potência de transmissão \times corrente consumida.

Potência (dBm)	Corrente (mA)
-20	8.6
-19	8.8
-18	9.0
-17	9.0
-16	9.1
-15	9.3
-14	9.3
-13	9.5
-12	9.7
-11	9.9
-10	10.1
-9	10.4
-8	10.6
-7	10.8
-6	11.1
-5	13.8
-4	14.5
-3	14.5
-2	15.1
-1	15.8
0	16.8
1	17.2
2	18.5
3	19.2
4	21.3
5	25.4

A energia consumida durante a recepção é dada pela tensão (V) aplicada ao transceptor durante um intervalo de tempo (t_{RX}) com uma potência de recepção que demanda uma corrente (I_{RX}). O consumo de energia na recepção é dado pela equação 7.9.

$$E_{RX} = V \times I_{RX} \times t_{RX} \quad (7.9)$$

Na transição do intervalo de repouso para o intervalo ativo, o rádio é novamente habilitado e entra em regime permanente após um tempo de inicialização ($t_{inicial}$), como mostra a figura 7.7. No início do intervalo ativo o nó deve amostrar o canal durante um tempo de amostragem ($t_{amostra}$) dado pela quantidade de bytes da amostra ($L_{amostra}$), pelo número de amostras (s) e pelo tempo de coleta do conversor A/D (t_{ADC}). O tempo de amostragem do canal é dado pela equação 7.10.

$$t_{amostra} = s \times L_{amostra} \times t_{ADC} \quad (7.10)$$

Após o intervalo de amostragem do canal o nó deve escutar o meio de transmissão para identificar eventos de comunicação. Se nenhum evento é detectado, o nó retorna ao estado de repouso. O tempo necessário para avaliar o estado do canal (t_{ativo}) é superior ao tempo de amostragem de sinal, como mostra a figura 7.7, sendo dado pela equação 7.11.

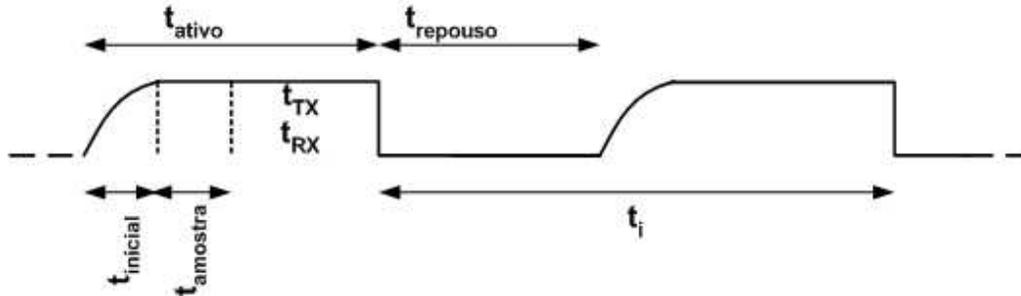


Figura 7.7: Intervalos de operação do rádio (CC1000).

$$t_{ativo} = t_{inicial} + t_{amostra} + t_{escuta} \quad (7.11)$$

A energia consumida no tempo ativo é função da tensão (V) de alimentação e da corrente consumida pelo conversor A/D (I_{ADC}) durante os intervalos de inicialização do rádio e escuta do canal, dada pela equação 7.12.

$$E_{Ativo} = V \times I_{ADC} \times t_{ativo} \quad (7.12)$$

No estado de repouso o nó desabilita seu rádio consumindo o mínimo de energia. O intervalo de repouso é dado pelo complemento do intervalo ativo em um ciclo de operação (figura 7.7), sendo dado pela equação 7.13.

$$t_{repouso} = t_i - t_{ativo} \quad (7.13)$$

A energia consumida durante o intervalo de repouso é função da tensão (V) aplicada ao transceptor e da corrente de manutenção do rádio no estado de repouso ($I_{repouso}$), dada pela equação 7.14.

$$E_{\text{Repouso}} = V \times I_{\text{repouso}} \times t_{\text{repouso}} \quad (7.14)$$

Podemos estimar o tempo de vida do nó (t_{vida}) considerando apenas a energia consumida pelas operações realizadas pelo protocolo B-MAC. A capacidade da bateria (C_{bateria}) determina o tempo de vida do nó em função da energia total consumida (*Consumo de Energia*), como mostra a equação 7.15.

$$t_{\text{vida}} = \frac{C_{\text{bateria}} \times V}{\text{Consumo de Energia}} \times 60 \times 60 \text{ (segundos)} \quad (7.15)$$

O modelo analítico, proposto por Polastre et al. [Polastre et al., 2004], mostra o consumo de energia durante a comunicação considerando os valores de corrente e tensão mostrados pelas equações 7.7 e 7.9. Durante a comunicação o modelo considera que a potência de transmissão é fixa e global para todos os nós da rede.

Por outro lado, as técnicas de CPT ajustam dinamicamente a potência de transmissão em função do nível de ruído do meio de transmissão. Entretanto, os valores da potência de recepção são nominais e não são alterados durante a comunicação. A utilização de técnicas que ajustam dinamicamente a potência de transmissão para o valor mínimo necessário ao estabelecimento da comunicação entre os nós, reduz o valor da corrente média demandada durante a comunicação. Dessa forma, observamos a potencialidade de reduzir o consumo de energia usando técnicas de CPT e aumentando o tempo de vida da rede.

As técnicas de CPT propostas neste trabalho visam, além da redução do consumo de energia, propiciar a manutenção da qualidade do enlace durante a comunicação entre os nós. A implementação dessas técnicas é apresentada nas seções seguintes.

7.4 Protocolo MAC Iterativo com CPT

O meio de transmissão é altamente dinâmico e propenso a ruídos e interferências provenientes de diversas fontes. A qualidade do enlace estabelecido entre os nós varia em função da potência de transmissão na presença desses ruídos e interferências. Na maioria das RSSFs, a escolha da potência de transmissão é determinada de modo a garantir a qualidade do enlace no caso crítico, ou seja, pela potência que suporte um alto nível de ruído no canal e mantenha a rede

conectada. Essa escolha não considera a variação do ruído no canal e muitas vezes consome energia desnecessariamente mantendo a potência de transmissão acima do necessário à comunicação.

A interação entre os nós pode determinar a variação do ruído no canal e estabelecer dinamicamente a potência de transmissão necessária à comunicação. Esse processo iterativo reduz a potência média de transmissão das mensagens e conseqüentemente o consumo de energia.

De acordo com literatura atual, propomos o primeiro protocolo MAC com CPT para RSSFs que ajusta dinamicamente a potência de transmissão para cada quadro enviado e o denominamos de Iterativo [Correia et al., 2005c]. O método Iterativo foi implementado sobre o protocolo B-MAC, alteramos o seu funcionamento e os seus formatos de quadros, bem como inserimos o reconhecimento de quadros. As interfaces utilizadas pelo protocolo Iterativo são as mesmas do B-MAC, *BareSend*, *ReceiveMsg*, *MacControl*, *MacBackoff*, *CC1000Control* e *RadioCoordinator*.

Para a interação entre os nós, habilitamos a confirmação de quadros, opção fornecida pelo B-MAC, e adicionamos uma nova interface para controle de confirmação recebida (*ACKControl*). O protocolo Iterativo analisa a variação de ruído do meio pelo controle do recebimento ou não de quadros de confirmação, aumentando ou decrementando a potência de transmissão.

7.4.1 Ajuste da potência de transmissão

Para alterar a potência de transmissão, adicionamos a interface *Pot* ao protocolo Iterativo. Esta interface controla um potenciômetro que ajusta a potência de transmissão do rádio. A escala de ajustes do potenciômetro está dentro dos limites nominais do rádio, definido pelo fabricante. O protocolo Iterativo utiliza essa interface para ajustar dinamicamente a potência de transmissão, em razão da variação de ruído no canal, trocando informações entre os nós.

Os valores de ruído local são coletados pelo nó quando não existe transmissão na rede. O rádio amostra em sua interface de entrada o sinal recebido e o converte em binário por meio do conversor A/D (componente ADC). No cálculo da potência do sinal recebido são utilizados os parâmetros do conversor A/D e da tensão nominal da bateria. Como a tensão da bateria decresce com o tempo de utilização do nó sensor, o cálculo da potência do sinal recebido deveria ser efetuado com o valor instantâneo de tensão da bateria ao invés do valor nominal. Para evitar esses erros no cálculo de potência do sinal coletado, adicionamos uma função para leitura instantânea da tensão da bateria.

O protocolo Iterativo utiliza quadros de confirmação (*ACK*) para determinar o ajuste do potenciômetro, incrementando ou decrementando a potência de transmissão. Durante a transmissão de uma mensagem os nós ajustam os valores da potência de transmissão para cada quadro transmitido. São definidos valores limites para confirmações consecutivas recebidas (L_D) e para confirmações consecutivas perdidas (L_A). Os valores de L_D e L_A são ajustados de acordo com o tráfego de envio de dados pela aplicação, evitando que a reação às modificações no ruído do meio ocorra tarde demais em aplicações com baixo tráfego de dados, ou que sejam frequentes em aplicações com tráfego contínuo de dados.

Para evitar recalcular constantemente os valores da potência de transmissão a cada quadro enviado, armazenamos em uma tabela os valores da potência mínima de transmissão para cada nó vizinho. Essa tabela foi implementada considerando o máximo de vinte vizinhos por nó. O nó não necessariamente irá comunicar com todos os seus vizinhos, assim o tamanho da tabela pode ser diminuído de acordo com a necessidade da aplicação. Os campos armazenados para um nó vizinho são mostrados na tabela 7.2. O nó armazena a configuração de bits fornecidos ao rádio para que a potência de transmissão seja a desejada (campo *PotTx*). O campo *NoReduce* indica se a potência mínima nominal do rádio já foi alcançada, enquanto o campo *Addr* registra o endereço do nó vizinho.

Tabela 7.2: Campos de um nó vizinho da tabela de potência e consumo de memória na plataforma Mica Motes2.

Campo	Tamanho	Descrição
<i>PotTx</i>	1 byte	Potência para transmissão ao vizinho
<i>NoReduce</i>	1 byte	Indica se a potência está no valor mínimo nominal
<i>Addr</i>	2 bytes	Endereço de rede do nó vizinho

Os formatos dos quadros de dados e de confirmação para o protocolo Iterativo são apresentados a seguir.

7.4.2 Formato dos quadros

A estrutura dos quadros do protocolo Iterativo é definida como uma mensagem ativa (*Active Message*) que especifica os campos de dados e os cabeçalhos de controle. As mensagens de ajuste de potência são enviadas nos quadros de confirmação (*ACK*).

Os quadros de dados do B-MAC foram acrescidos de um campo de um byte, indicando a potência de transmissão, e um campo de dois bytes que informa o endereço (identificação) do emissor da mensagem. O quadro de confirmação foi

aumentado em 5 bytes, adicionando os identificadores do emissor e receptor do ACK e a potência em que o ACK foi enviado. O formato dos quadros é mostrado na figura 7.8, desprezando-se o preâmbulo e a sincronização do quadro de dados.

Origem	Destino	Tipo	Grupo	Potência	Tamanho	Dados	CRC
(2)	(2)	(1)	(1)	(1)	(1)	(0..29)	(2)

Origem	Destino	Potência	ACK
(2)	(2)	(1)	(2)

Figura 7.8: Quadros de dados e de confirmação do protocolo Iterativo.

No total, a implementação do protocolo Iterativo aumentou o tamanho de código do B-MAC de 7.496 bytes para 8.512 bytes, e o consumo de memória RAM do nó de 241 bytes para 461 bytes, sendo que grande parte deste consumo é atribuída à tabela de vizinhos. A seguir apresentamos a operação do protocolo Iterativo.

7.4.3 Operação do protocolo Iterativo

O protocolo Iterativo opera em duas fases, como descrito no método Iterativo (seção 6.5.1). Na primeira fase, o nó i procura em sua tabela de vizinhos pelo endereço do nó de destino e determina a potência de transmissão do quadro. Se o endereço está na entrada de sua tabela o quadro é enviado para o nó j na potência de transmissão armazenada, caso contrário o quadro é enviado na máxima potência de transmissão nominal do rádio. O funcionamento do protocolo Iterativo é mostrado no algoritmo 1 e descrito a seguir.

O nó j ao receber um quadro envia uma confirmação (*ACK*) para o nó i (linha 6) ². Se o nó i recebe a confirmação, e ainda está na primeira fase, ele decrementa a potência de transmissão (*txPower*) de um nível para enviar o próximo quadro (linhas 7–8). Esse processo para decrementar a potência continua até que não existam mais quadros a serem enviados ou que a confirmação não seja recebida.

Caso o tempo limite para receber confirmação expire, o protocolo Iterativo entra na sua segunda fase e incrementa a potência de transmissão (linhas 17–21). Na segunda fase, o número de confirmações perdidas consecutivas é contabilizado

²Para o protocolo Iterativo as referências são feitas às linhas do algoritmo 1.

e caso atinja um valor limite (L_A) a potência de transmissão é incrementada em um nível (linhas 25–26).

Durante a segunda fase o protocolo também contabiliza o número de confirmações recebidas consecutivas. Se atinge o valor limite (L_D) a potência de transmissão é decrementada em um nível (linhas 9–15).

Na segunda fase, o protocolo Iterativo ajusta dinamicamente a potência de transmissão para o valor mínimo necessário à comunicação entre os nós, incrementando ou decrementando a potência de transmissão. Esse processo termina quando o emissor não possui mais quadros a serem enviados para j . O algoritmo 1 representa a operação do protocolo Iterativo e suas respectivas fases.

Algoritmo 1 - Protocolo Iterativo.

```

1: procedure Iterative( )
2:    $phase_i \leftarrow 1^{st} phase \forall i;$  // fase atual do nó  $i$ 
3:    $received_i \leftarrow 0 \forall i;$  // número de acks consecutivos recebidos
4:    $lost_i \leftarrow 0 \forall i;$  // número de quadros perdidos consecutivos
5:    $txPower_i \leftarrow 0 \forall i;$ 
Require:    $receive(data, src)$  // quadro de dados recebido
6:    $send(ACK, src, P_{RX});$ 
Require:    $receive(ACK, dst)$  // quadro ack enviado para o destino
7:   if  $phase_{dst} = 1^{st} phase$  then
8:      $txPower_{dst} \leftarrow txPower_{dst} - 1;$ 
9:   else
10:     $received_{dst} \leftarrow received_{dst} + 1;$ 
11:     $lost_{dst} \leftarrow 0;$ 
12:    if  $received_{dst} = L_D$  then
13:       $txPower_{dst} \leftarrow txPower_{dst} - 1;$ 
14:       $received_{dst} \leftarrow 0;$ 
15:    end if
16:  end if
Require:    $timeout(ACK, dst)$  // quadro ack enviado para o destino foi perdido
17:  if  $phase_{dst} = 1^{st} phase$  then // quadro ack perdido na primeira fase
18:     $txPower_{dst} \leftarrow txPower_{dst} + 1;$ 
19:     $phase_{dst} \leftarrow 2^{nd} phase;$ 
20:     $lost_{dst} \leftarrow 0;$ 
21:     $received_{dst} \leftarrow 0;$ 
22:  else // quadro ack perdido na segunda fase
23:     $lost_{dst} \leftarrow lost_{dst} + 1;$ 
24:     $received_{dst} \leftarrow 0;$ 
25:    if  $lost_{dst} = L_A$  then
26:       $txPower_{dst} \leftarrow txPower_{dst} + 1;$ 
27:       $lost_{dst} \leftarrow 0;$ 
28:    end if
29:  end if
30: end procedure

```

7.5 Protocolo MAC Atenuação com CPT

O protocolo Iterativo troca vários quadros entre os nós envolvidos na comunicação até determinar a potência mínima de transmissão. Para evitar repetidas interações, outra estratégia pode ser empregada para determinar a potência mínima de transmissão considerando apenas a atenuação do meio. Os nós calculam a potência mínima necessária à comunicação a cada interação e ajustam dinamicamente a potência de transmissão em função da variação do ruído do meio. Usando essa estratégia apresentamos um segundo protocolo, denominado Atenuação [Correia et al., 2005b, Correia et al., 2005c].

O protocolo Atenuação foi implementado sobre o protocolo padrão da plataforma Mica Motes2 e portanto, utiliza as mesmas interfaces. O controle de confirmação também está habilitado para o protocolo Atenuação (interface *ACKControl*). Para o cálculo da atenuação do meio de transmissão é necessário que o nó receptor conheça as potências de envio e recepção do quadro. Para avaliar a potência de recepção, são coletados os valores do sinal recebido na interface de entrada do rádio (RSSI) e transformados em valores binários por meio de um conversor A/D (componente ADC). Da mesma forma que no protocolo Iterativo, adicionamos leituras instantâneas da tensão da bateria para evitar erros no cálculo da potência de recepção.

Entretanto, para o cálculo da potência, o nó sensor irá prover valores inteiros para as leituras de RSSI, assim devem ser utilizadas funções de conversão destes valores para medidas em *dBm*. Como os nós sensores não possuem unidade de ponto flutuante, este cálculo deve ser feito com variáveis inteiras, o que pode comprometer a sua precisão.

Ao final desse processo, o nó sensor deve mapear a potência calculada para uma configuração de valores nos pinos do rádio que produzam a potência de transmissão esperada. Dessa forma, após calcular a potência mínima de transmissão, o receptor envia no cabeçalho do quadro de confirmação a potência mínima de transmissão para que possa ser alcançado no envio de um próximo quadro.

O nó emissor ao receber a confirmação deve ajustar a sua potência de transmissão. Para alterar a potência de transmissão adicionamos a interface *Pot* ao protocolo Atenuação. Essa interface ajusta a potência de transmissão do rádio por meio de um potenciômetro, cujos valores estão dentro dos limites nominais do rádio. Dessa forma, o protocolo Atenuação utiliza a interface *Pot* para ajustar dinamicamente a potência de transmissão em função dos valores calculados pelo receptor.

O desafio neste protocolo é definir um algoritmo para o cálculo da potência

mínima em um nó sensor (equações de 6.2 a 6.6) eficiente em memória e processamento e que possa ser implementado utilizando somente as operações de hardware disponíveis, obtendo precisão e estabilidade aceitáveis da potência de transmissão. Além disso, é necessário considerar que esse cálculo deve ser realizado em um intervalo de tempo menor que o tempo de chaveamento do rádio, do estado de recepção para transmissão e envio do quadro de confirmação, que no caso do rádio da plataforma Mica Motes2 é de $250\mu s$.

Para verificar a viabilidade do método de cálculo proposto na seção 6.5.2, uma simulação foi realizada em um microcomputador. Usamos valores dos sinais de dados e ruídos coletados em um experimento (seção 8.2.2). Inicialmente foi avaliado se o uso de variáveis inteiras para representar os valores necessários ao cálculo da potência mínima acarretaria perda de precisão. A tabela 7.3 mostra que a implementação feita calcula a potência mínima de transmissão com um erro inferior a $1dBm$, sendo que o erro médio é próximo do erro esperado no arredondamento de valores reais (escala de potências do rádio). A mediana do desvio mostra que 50% dos valores calculados tiveram erro abaixo de $0,2342dBm$.

Em seguida, foi avaliado o tempo de processamento do cálculo em um simulador do processador empregado na arquitetura Mica Motes2 [Atmel, 2006]. Foi verificado que para 20.480 execuções de um código compilado sem otimizações, o cálculo do controle de potência necessita de 834,17 ciclos de CPU em média, com um tempo médio de execução de $208,54\mu s$. Esse tempo médio de execução foi inferior ao intervalo de tempo de chaveamento do rádio, que no caso do rádio da plataforma Mica Motes2 é de $250\mu s$. Nenhuma otimização de código pelo compilador foi empregada, pois este diminuiria de forma irreal o tempo de execução do cálculo da potência mínima. Entretanto, a utilização de otimização para todo o código do protocolo pode diminuir o tempo de execução do algoritmo em um nó sensor real.

Tabela 7.3: Validando a precisão do cálculo de potência mínima.

Propriedade	Valor
Número de amostras	7.929
Desvio médio	0,2887 dBm
Desvio máximo	0,7526 dBm
Desvio mínimo	0,0013 dBm
Primeiro quartil do desvio	0,1178 dBm
Mediana do desvio	0,2342 dBm
Tempo de execução	$208,54\mu s$
No. de instruções executadas	834,17

Determinado que o cálculo proposto é factível e preciso, implementamos o protocolo Atenuação no TinyOS para a plataforma Mica Motes2. Esse protocolo

também possui uma tabela de vizinhos para armazenar a última potência de transmissão necessária à comunicação com um de seus vizinhos. Essa tabela foi implementada considerando o máximo de vinte vizinhos por nó. No total, a implementação do protocolo Atenuação apresentou um código de 9.002 bytes com consumo de memória RAM de 356 bytes, sendo que parte deste consumo é atribuída à tabela de vizinhos.

Os parâmetros empíricos da potência de recepção e da relação sinal/ruído desejados foram determinados por experimentos descritos no próximo capítulo. Os formatos dos quadros de dados e de confirmação para o protocolo Atenuação são apresentados a seguir.

7.5.1 Formato dos quadros

A estrutura dos quadros do protocolo Atenuação é definida como uma mensagem ativa (*Active Message*) que especifica os campos de dados e os cabeçalhos de controle.

Os valores da potência mínima de transmissão calculados pelo receptor são enviados nos quadros de confirmação (ACK). Os quadros de dados em relação ao B-MAC foram acrescidos de um campo de um byte, indicando a potência de transmissão, e um campo de dois bytes que informa o endereço do emissor da mensagem.

Origem (2)	Destino (2)	Tipo (1)	Grupo (1)	Potência de transmissão (1)	Tamanho (1)	Dados (0..29)	CRC (2)
----------------------	-----------------------	--------------------	---------------------	---------------------------------------	-----------------------	-------------------------	-------------------

Origem (2)	Destino (2)	Potência mínima (1)	ACK (2)
----------------------	-----------------------	-------------------------------	-------------------

Figura 7.9: Quadros de dados e de confirmação do protocolo Atenuação.

O quadro de confirmação foi aumentado em 5 bytes, adicionando os identificadores do emissor e receptor do ACK e a potência mínima calculada. O formato dos quadros é mostrado na figura 7.9, desprezando-se os bytes de preâmbulo e de sincronização do quadro de dados.

7.5.2 Operação do protocolo Atenuação

O protocolo Atenuação opera como descrito no método de Atenuação (seção 6.5.2). Inicialmente, o nó emissor i ao possuir dados para enviar procura em sua tabela de vizinhos pelo endereço do nó de destino e determina a potência de transmissão do quadro. Se o endereço está na entrada de sua tabela o quadro é enviado para o nó j na potência de transmissão armazenada, caso contrário o quadro é enviado na máxima potência de transmissão nominal do rádio.

Algoritmo 2 - Protocolo Atenuação.

```

1:  $lost_i \leftarrow 0 \forall i;$  // número de acks consecutivos perdidos
2:  $txPower_i \leftarrow 0 \forall i;$  // potência de transmissão
3: procedure Attenuation( )
Require:  $recv(data, src)$ 
4:  $txPower_{dst} \leftarrow attenuation(data.P_{TX}, P_{RX}, Noise);$  // cálculo da potência mínima de transmissão
5:  $ACK.txPower \leftarrow txPower_{dst};$ 
6:  $send(ACK, src, txPower_{dst});$ 
Require:  $recv(ACK, dst)$ 
7:  $txPower_{dst} \leftarrow ACK.TxIdeal;$ 
8:  $lost_{dst} \leftarrow 0;$ 
Require:  $timeout(ACK, dst)$ 
9:  $lost_{dst} \leftarrow lost_{dst} + 1;$ 
10: if  $lost_{dst} = L_A$  then // limiar de acks perdidos
11:  $txPower_{dst} \leftarrow txPower_{dst} + 1;$  // incrementa potência
12:  $lost_{dst} \leftarrow 0;$ 
13: end if
14: end procedure

```

O nó j ao receber um quadro calcula a potência de recepção do quadro, a atenuação do meio de transmissão e calcula a potência mínima de transmissão (linha 4)³. Em seguida o nó j envia um quadro de confirmação para i inserindo em seu cabeçalho a potência mínima de transmissão calculada (linhas 5–6).

Se a confirmação é recebida pelo nó i , o valor da potência mínima necessária para alcançar j é armazenado em sua tabela de vizinhos (linhas 7–8). O próximo quadro enviado para j será transmitido na potência mínima armazenada.

Caso a confirmação não retorne dentro do tempo limite estabelecido o protocolo Atenuação contabilizará o quadro como perdido (linha 9). Se um limite de confirmações perdidas (L_A) é atingido, a potência de transmissão é incrementada em um nível (linhas 10–13) e o quadro retransmitido na nova potência. O algoritmo 2 representa a operação do protocolo Atenuação.

³Para o protocolo Atenuação as referências são feitas às linhas do algoritmo 2.

7.6 Protocolo MAC com amortização

Os protocolos Iterativo e Atenuação, apesar de eficientes em energia, apresentam problemas de instabilidade ou flutuação na determinação da potência mínima de transmissão. Esses protocolos reagem bruscamente às variações de ruído no meio de transmissão. Para evitar cálculos díspares da potência mínima na presença de ruídos intermitentes, foi adicionado ao protocolo de atenuação uma função de cálculo de média móvel ponderada EWMA (*Exponentially Weighted Moving-Average*). Usando esta função EWMA propomos e implementamos um outro protocolo com CPT, denominado AEWMA (*Attenuation with Exponentially Weighted Moving-Average*) [Correia et al., 2006].

O protocolo AEWMA implementa as mesmas interfaces e componentes do protocolo Atenuação, sendo que a diferença entre esses protocolos está na implementação da função EWMA. O nó j ao receber um quadro de dados de i calcula a potência mínima de transmissão e usa a função EWMA para evitar distorções em relação aos valores calculados anteriormente. Esse valor da potência mínima de transmissão é enviada no cabeçalho do quadro de confirmação. O nó i ao receber a confirmação, extrai do cabeçalho do quadro a potência mínima de transmissão e armazena esse valor na sua tabela de vizinhos para a transmissão dos próximos quadros para j .

A função EWMA foi escolhida para filtrar as oscilações da potência mínima baseado em dois requisitos básicos necessários à sua implementação em nós de hardware restrito como o Mica Motes2. Primeiro, o filtro deve ser simples e consumir a menor quantidade de memória. Operações como cálculos de mediana, valores máximo e mínimo devem ser descartados, evitando dessa forma que os nós armazenem em memória esses valores para cada enlace. Segundo, os cálculos devem ser simples e rápidos evitando que a implementação utilize operações com variáveis em ponto flutuante e divisões. Dessa forma, funções que empregam equações diferenciais, como aquelas empregadas em controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo), foram descartadas.

Apesar da função EWMA requerer operações em ponto flutuante (equação 6.7), podemos escolher valores para α da forma $1 - \frac{1}{2^n}$ e implementarmos o cálculo da função EWMA usando somente três operações de deslocamento e uma adição. Dessa forma, o cálculo é eficiente em tempo de CPU e memória e tem sido usado com sucesso nas RSSFs, como no protocolo padrão de roteamento de nós sensores da plataforma Mica2 para avaliar a confiabilidade de enlaces [Woo et al., 2003]. A implementação do AEWMA produziu um código de 9.192 bytes com um consumo de memória de 393 bytes, contra 241 bytes do B-MAC. Mesmo assim, a função EWMA é eficiente em memória, já que armazena somente uma

variável, a potência de transmissão atual.

Os formatos dos quadros de dados e de confirmação do protocolo AEWMA são semelhantes ao protocolo Atenuação, sendo apresentados a seguir.

7.6.1 Formato dos quadros

O protocolo AEWMA é baseado em uma estrutura definida como mensagem ativa (*Active Message*), na qual são especificados os campos dos quadros de dados e dos quadros de controle. O quadro de dados do protocolo AEWMA é idêntico ao do protocolo Atenuação, no qual um campo de um byte é usado para informar a potência de transmissão atual e outro de dois bytes para identificar o emissor. Além desses campos, a identificação de destino do quadro, tipo, grupo, tamanho, dados e CRC são como no protocolo B-MAC padrão.

Origem	Destino	Tipo	Grupo	Potência de transmissão	Tamanho	Dados	CRC
(2)	(2)	(1)	(1)	(1)	(1)	(0..29)	(2)

Origem	Destino	Potência mínima	ACK
(2)	(2)	(1)	(2)

Figura 7.10: Quadros de dados e de confirmação do protocolo AEWMA.

Da mesma forma que no protocolo Atenuação, o receptor avalia o sinal do quadro de dados e calcula a potência mínima de transmissão, com a diferença de empregar uma função EWMA e inserir esse valor no cabeçalho do quadro de confirmação (ACK). Para tal, o quadro de confirmação foi acrescido de 5 bytes, sendo 4 bytes para os endereços dos nós de origem e destino e 1 byte para incluir a potência mínima calculada. O formato dos quadros é mostrado na figura 7.10, desprezando-se os bytes de preâmbulo e de sincronização do quadro de dados.

7.6.2 Operação do protocolo AEWMA

O protocolo AEWMA funciona de maneira semelhante ao protocolo Atenuação. Inicialmente, o nó emissor i ao possuir dados para enviar consulta sua tabela de vizinhos verificando se existe uma entrada para o endereço do nó de destino j . Caso possua, o quadro de dados é enviado na potência de transmissão P_{TXj} .

Se nenhuma entrada para o nó j é encontrada, o quadro é enviado na potência máxima de transmissão permitida.

O nó de destino j ao receber um quadro calcula a potência de recepção do quadro, a atenuação do meio de transmissão e calcula a potência mínima de transmissão (linha 4)⁴. Em seguida o nó j emprega a função EWMA para ajustar a potência mínima de transmissão (linha 5) e insere esse valor no cabeçalho do quadro de confirmação enviado para i (linhas 6–7).

Caso a confirmação seja recebida pelo nó i , o valor da potência mínima necessária para alcançar j é armazenado em sua tabela de vizinhos (linhas 8–9). O próximo quadro enviado para j será transmitido na potência mínima armazenada.

Se uma confirmação não retornar dentro de um tempo limite, o protocolo AEWMA contabiliza o quadro como perdido (linha 10). Caso o número de confirmações perdidas (L_A) seja atingido, o valor da potência de transmissão é incrementado em um nível (linhas 11–14) e o quadro retransmitido na nova potência. O algoritmo 3 apresenta a operação do protocolo AEWMA.

Algoritmo 3 - Protocolo AEWMA.

```

1:  $lost_i \leftarrow 0 \forall i;$  // no. de acks consecutivos perdidos
2:  $txPower_i \leftarrow 0 \forall i;$ 
3: procedure AEWMA( )
Require:  $recv(data, src)$ 
4:  $TX_{calc} \leftarrow attenuation(data.P_{TX}, P_{RX}, Noise);$  // cálculo da potência mínima
5:  $txPower_{dst} \leftarrow (\alpha \times TX_{calc}) + ((1 - \alpha) \times txPower_{dst});$  // função EWMA
6:  $ACK.txPower \leftarrow txPower_{dst};$ 
7: send(ACK, src, txPowerdst);
Require:  $recv(ACK, dst)$ 
8:  $txPower_{dst} \leftarrow ACK.TxIdeal;$ 
9:  $lost_{dst} \leftarrow 0;$ 
Require:  $timeout(ACK, dst)$ 
10:  $lost_{dst} \leftarrow lost_{dst} + 1;$ 
11: if  $lost_{dst} = L_A$  then // limiar de acks perdidos
12:  $txPower_{dst} \leftarrow txPower_{dst} + 1;$  // incrementa potência
13:  $lost_{dst} \leftarrow 0;$ 
14: end if
15: end procedure

```

7.7 Protocolo MAC Híbrido

Os primeiros protocolos propostos neste trabalho, Iterativo e Atenuação, devido as suas características tendem a apresentar oscilações na potência mínima de transmissão na presença de ruídos intermitentes. O protocolo AEWMA apesar

⁴Para o protocolo AEWMA as referências são feitas às linhas do algoritmo 3.

de resolver adequadamente esse problema insere mais complexidade nos cálculos efetuados pelo nó, mesmo que eficientes em tempo de processamento e consumo de memória.

O quarto protocolo proposto, denominado de Híbrido, tem as mesmas características e simplicidade de código empregadas no protocolo Iterativo aliada a uma das restrições consideradas no protocolo Atenuação. O objetivo do protocolo Híbrido foi de manter a mesma estabilidade fornecida pelo AEWMA com um custo inferior de processamento.

As interfaces e componentes empregados no protocolo Híbrido são as mesmas empregadas em todos os outros protocolos MAC com CPT propostos anteriormente. A diferença está no cálculo realizado pelo nó receptor, que compara o valor da potência de recepção com o nível de ruído local e estabelece que a qualidade do enlace deve ser mantida acima de um limiar da relação sinal/ruído, como definido pela equação 7.16 ⁵.

$$P_{RX} > N_F * SNR_{desejado} \quad (7.16)$$

O valor desse limiar é definido de forma experimental de acordo com o ambiente de propagação do sinal e com a qualidade do enlace desejado. A inserção dessa restrição no protocolo Híbrido evita que os valores da potência de transmissão oscilem constantemente e que ainda ele seja eficiente em energia.

O protocolo Híbrido possui um código de 8.853 bytes com um consumo de memória, superior somente ao protocolo B-MAC, de somente 353 bytes. Como em todos os protocolos MAC com CPT propostos, o protocolo Híbrido também possui uma tabela de no máximo vinte vizinhos para armazenar a última potência de transmissão empregada pelo nó. O formato dos quadros de dados e de confirmação do protocolo Híbrido segue os empregados nos outros protocolos com CPT e são apresentados a seguir.

7.7.1 Formato dos quadros

O protocolo Híbrido tem o formato de seus quadros definidos como uma mensagem ativa, na qual são especificados todos os campos dos quadros de dados e de controle.

⁵Valores expressos em mW

O formato dos quadros do protocolo Híbrido segue o mesmo formato dos outros protocolos de CPT propostos. Em relação ao protocolo B-MAC, o protocolo Híbrido adiciona três bytes ao cabeçalho do quadro de dados e cinco bytes ao do quadro de confirmação. O cabeçalho do quadro de dados é acrescido de um campo de um byte para que o emissor informe ao receptor a potência de transmissão empregada e um outro campo de dois bytes para a identificação do emissor.

Para o quadro de confirmação foram inseridos três novos campos ao seu cabeçalho, sendo dois campos de dois bytes para a identificação dos nós envolvidos na comunicação e um campo de um byte, Incrementa potência, para informar se o valor da potência de transmissão deve ser incrementado ou não. No campo Incrementa potência, são utilizados somente três bits para indicar se a potência será incrementada ou não.

O formato dos quadros de dados e de confirmação é mostrado na figura 7.11, desprezando-se os bytes de preâmbulo e de sincronização do quadro de dados.

Origem (2)	Destino (2)	Tipo (1)	Grupo (1)	Potência de transmissão (1)	Tamanho (1)	Dados (0..29)	CRC (2)
----------------------	-----------------------	--------------------	---------------------	---------------------------------------	-----------------------	-------------------------	-------------------

Origem (2)	Destino (2)	Incrementa potência (1)	ACK (2)
----------------------	-----------------------	-----------------------------------	-------------------

Figura 7.11: Quadros de dados e de confirmação do protocolo Híbrido.

A operação do protocolo Híbrido é descrita na próxima seção.

7.7.2 Operação do protocolo Híbrido

O protocolo Híbrido opera em duas fases como no Iterativo. Na primeira fase, o nó i antes de enviar um quadro pesquisa pelo endereço de destino j em sua tabela de vizinhos. Se existir uma entrada para esse destino, o quadro será enviado na potência de transmissão armazenada, caso contrário será enviado na potência padrão (pré-definida) empregada pelo nó.

O nó i envia o quadro de dados para j , inserindo em seu cabeçalho a potência atual de transmissão, e aguarda por uma confirmação. O nó j ao receber o quadro verifica qual o nível do sinal recebido e calcula a potência recebida (P_{RX}). Se o nível de sinal recebido é menor que o ruído local (N_{Fj}) acrescido da relação sinal/ruído desejado ($SNR_{desejado}$), o nó j informa no cabeçalho do quadro de confirmação que a potência de transmissão deve ser incrementada em um nível

(linhas 6–7)⁶. Caso contrário, se a potência de recepção calculada é maior que o ruído local acrescido da relação sinal/ruído, o quadro de confirmação carrega em seu cabeçalho o valor da potência de transmissão recebida de i .

Se o quadro de confirmação recebido por i informa incremento de potência ($ACK.mustIncrease$) em seu cabeçalho, o próximo quadro enviado para j será transmitido com a potência incrementada em um nível (linhas 8–11). Se a confirmação recebida não solicitar incremento de potência e o nó ainda estiver na primeira fase, a potência de transmissão é decrementada em um nível (linhas 12–13).

Algoritmo 4 - Protocolo Híbrido.

```

1: procedure Hybrid( )
2:    $phase_i \leftarrow 1^{st} phase \forall i;$  // fase atual do nó  $i$ 
3:    $received_i \leftarrow 0 \forall i;$  // no. de acks recebidos consecutivos
4:    $lost_i \leftarrow 0 \forall i;$  // no. quadros perdidos consecutivos
5:    $txPower_i \leftarrow 0 \forall i;$ 
Require:   receive( $data, src$ ) // recepção de quadro de dados
6:    $ACK.mustIncrease \leftarrow (P_{RX} < N_F * SNR_{threshold});$ 
7:   send( $ACK, src, P_{RX}$ );
Require:   receive( $ACK, dst$ ) // confirmação do quadro enviado para o dst
8:   if  $ACK.mustIncrease$  then
9:      $received_{dst} \leftarrow 0;$ 
10:     $lost_{dst} \leftarrow 0;$ 
11:     $txPower_{dst} \leftarrow txPower_{dst} + 1;$ 
12:   else if  $phase_{dst} = 1^{st} phase$  then
13:      $txPower_{dst} \leftarrow txPower_{dst} - 1;$ 
14:   else
15:      $received_{dst} \leftarrow received_{dst} + 1;$ 
16:      $lost_{dst} \leftarrow 0;$ 
17:     if  $received_{dst} = L_D$  then
18:        $txPower_{dst} \leftarrow txPower_{dst} - 1;$ 
19:        $received_{dst} \leftarrow 0;$ 
20:     end if
21:   end if
Require:   timeout( $ACK, dst$ ) // timed-out do quadro enviado para o dst
22:    $phase_{dst} \leftarrow 2^{nd} phase;$ 
23:    $lost_{dst} \leftarrow lost_{dst} + 1;$ 
24:    $received_{dst} \leftarrow 0;$ 
25:   if  $lost_{dst} = L_A$  then
26:      $txPower_{dst} \leftarrow txPower_{dst} + 1;$ 
27:      $lost_{dst} \leftarrow 0;$ 
28:   end if
29: end procedure

```

Se o quadro de confirmação não é recebido pelo nó i dentro de um intervalo de tempo determinado, o protocolo entra em sua segunda fase. Caso o número limite de confirmações perdidas (L_A) seja atingido a potência de transmissão é incrementada (linhas 22–28). Entretanto, se esse limiar não é alcançado o quadro é reenviado com a mesma potência de transmissão anterior.

Na segunda fase se as confirmações não solicitam incremento de potência e atingem um número de confirmações recebidas consecutivas (L_D), a potência é

⁶Para o protocolo Híbrido as referências são feitas às linhas do algoritmo 4.

decrementada (linhas 14–20). A potência de transmissão é mantida se o limiar de confirmações recebidas consecutivas não é atingido.

O algoritmo 4 representa a operação do protocolo Híbrido e suas respectivas fases. Podemos enfatizar que as alterações nas duas fases restringem a potência de transmissão ao limiar da relação sinal/ruído. Essa limitação mantém a estabilidade da potência mínima em relação à variabilidade do meio de transmissão.

7.8 Conclusões

Analisamos o modelo analítico proposto por Polastre et al. [Polastre et al., 2004] que apresenta a potência como sendo estática e única para a comunicação entre os nós na rede. Pelo modelo podemos concluir que a inclusão de um ajuste dinâmico da potência de transmissão pode, além de proporcionar uma redução no consumo de energia, adaptar-se às variações do meio de transmissão.

Os protocolos MAC com CPT propostos visam a redução do consumo de energia, a manutenção da qualidade do enlace durante a comunicação entre os nós e a adaptação às variações do meio de transmissão. Além disso, os quatro protocolos com CPT propostos possuem tamanho de código reduzido e são eficientes em consumo de memória, processamento e energia.

Para a implementação dos protocolos com CPT foram adicionados ao protocolo B-MAC novas interfaces e componentes para o cálculo e ajuste dinâmico da potência mínima de transmissão. Essas modificações aumentaram o tamanho de código e consumo de memória em relação ao protocolo B-MAC. A tabela 7.4 apresenta esses valores e mostra o percentual de ocupação de memória pelo código implementado.

Tabela 7.4: Tamanho de código e consumo de memória nos protocolos MAC.

Protocolo	Código ROM (bytes)	Consumo RAM (bytes)	Consumo ROM (%)
B-MAC	7.496	241	5,72
Iterativo	8.512	461	6,49
Atenuação	9.002	356	6,87
AEWMA	9.192	393	7,01
Híbrido	8.853	353	6,75

O protocolo Iterativo reduz o consumo de energia ao determinar a potência mínima de transmissão, sendo necessária a troca de vários quadros entre os nós envolvidos na comunicação. Para determinar a potência mínima de transmissão, evitando várias interações entre os nós, o protocolo Atenuação calcula por meio de equações e parâmetros empíricos a potência mínima de transmissão na primeira interação entre os nós. Esse protocolo aumenta o tamanho de código em ROM em apenas 1.506 bytes em relação ao protocolo B-MAC e em 115 bytes o consumo de memória RAM. Apesar da eficiência em energia desses dois protocolos (Iterativo e Atenuação) eles apresentaram flutuações no cálculo da potência mínima de transmissão em presença de ruídos.

Para evitar que ruídos intermitentes alterem de forma brusca a potência mínima de transmissão, o protocolo AEWMA emprega um filtro baseado em uma função exponencial de média móvel. A implementação desse filtro mostrou-se eficiente em tempo de processamento e consumo de memória, mas aumentou o tamanho do código em ROM e o consumo de memória RAM em relação aos protocolos anteriores.

O protocolo Híbrido associou as restrições de sinal/ruído empregados no protocolo Atenuação aos limites de confirmações recebidas e perdidas do protocolo Iterativo. Essa associação possibilitou a implementação de um código reduzido, 1.357 bytes maior que o B-MAC, e com um consumo inferior de memória em relação aos outros protocolos com CPT, 353 bytes.

O próximo capítulo apresenta a determinação dos parâmetros empíricos para cada tipo de ambiente. Os protocolos com CPT são avaliados em ambientes externos e internos, em comunicação multisaltos e em função da mobilidade dos nós. Nestes cenários medimos o consumo de energia e taxa de entrega para cada protocolo avaliado.

Capítulo 8

Avaliação dos protocolos MAC com CPT

Este capítulo apresenta a avaliação experimental dos protocolos MAC com CPT propostos no capítulo 7. Os experimentos com os quatro protocolos propostos, Iterativo, Atenuação, AEWMA e Híbrido, foram realizados na plataforma Mica Motes2 considerando ambientes distintos, transmissão em caminho multisaltos, reuso espacial e mobilidade. As métricas consideradas nesta avaliação foram taxa de entrega de quadros e potência de transmissão, além de outras demandas nos experimentos. Este capítulo está organizado como descrito a seguir. Os métodos e dispositivos empregados na avaliação experimental dos protocolos MAC com CPT são descritos na seção 8.1. A seção 8.2 descreve o levantamento dos parâmetros empíricos usados nos estimadores da qualidade do enlace e no cálculo da potência mínima de transmissão. Na seção 8.3 é apresentado o comportamento dos quatro protocolos com CPT que são comparados ao protocolo B-MAC por meio de experimentos realizados em ambiente externo livre de ruídos. Na seção 8.4 é apresentada a avaliação experimental em um ambiente interno para os protocolos AEWMA e Híbrido que são comparados ao protocolo B-MAC. A seção 8.5 apresenta a avaliação experimental do comportamento dos protocolos AEWMA, Híbrido e B-MAC considerando transmissões simultâneas e a propagação de sinais em um caminho multisaltos. Na seção 8.6 é apresentado um estudo do reuso espacial para os protocolos com CPT. O comportamento dos protocolos com a movimentação dos nós é avaliada na seção 8.7. Os resultados encontrados para a mobilidade consideram os protocolos os protocolos AEWMA, Híbrido e B-MAC. A seção 8.8 apresenta as conclusões desse capítulo.

8.1 Montagem dos experimentos

Os protocolos MAC com CPT propostos no capítulo 7 foram avaliados por meio de experimentos realizados na plataforma comercial Mica Motes2. Os quatro protocolos com CPT, Iterativo, Atenuação, AEWMA e Híbrido, foram implementados sobre o protocolo padrão B-MAC modificando suas características, funcionalidades e operação.

A avaliação dos protocolos foi realizada por meio de uma aplicação de testes para envio e recepção de mensagens sem nenhum dado útil. Esses programas de aplicação foram implementados no TinyOS usando como MAC os protocolos com CPT propostos.

Os experimentos consideram, na sua maioria, a comunicação entre dois nós e avaliam as métricas de taxa de entrega média e potência média de transmissão variando as distâncias entre os nós. Essas métricas são essenciais para avaliar o consumo de energia de cada protocolo e comparar a perda de quadros em função da potência de transmissão. Algumas outras métricas foram adicionadas de acordo com as demandas de cada cenário. Os experimentos foram realizados em ambientes externos livres de ruídos ou em ambientes internos com maior probabilidade de ruídos e de encontrar obstáculos.

Os dados dos experimentos foram coletados monitorando o comportamento dos nós por meio de um ponto de acesso de rede, chamado de MIB (*Mote Interface Boarders*), interligado ao nó por meio de sua interface. Na plataforma Mica Motes2 não existe um hardware dedicado para o ponto de acesso, ele é formado por um nó conectado a uma MIB como mostra a figura 8.1.

A MIB possui uma interface (serial ou Ethernet) que conecta um microcomputador ao nó e possibilita que a aplicação implementada no TinyOS possa ser transferida para a memória do nó [Crossbow Technology, 2003]. Além disso, a MIB possibilita o monitoramento dos dados recebidos pelo nó via interface UART (*Universal Asynchronous Receiver and Transmitter*), como mostra a figura 8.1. Dessa forma, os programas de envio e recepção de mensagens, além de estabelecerem a comunicação entre os nós, podem enviar os dados para a interface UART para serem gravados pelo microcomputador.

Nos experimentos foram usados dois notebooks para monitorar o comportamento dos nós, um do lado do transmissor e outro do lado do receptor. Os dados coletados pela MIB em todos os experimentos realizados foram armazenados em arquivos para as análises posteriores. Devido à dificuldade de realizar experimentos práticos com rádio frequência em ambiente real, no qual é difícil manter as condições do ambiente inalteradas, realizamos experimentos de curta duração

com um número reduzido de repetições. Outra dificuldade encontrada é a capacidade das baterias dos notebooks que limitavam o tempo de coleta de dados dos experimentos.

As aplicações de teste usadas nos experimentos enviam mensagens continuamente por um período de tempo determinado, como a simulação de tráfego em rajada, comumente encontrado nas aplicações de RSSFs em monitoramento ambiental. Os resultados apresentados nas próximas seções são a média dos valores encontrados em cinco experimentos independentes com intervalo de confiança de 95%.

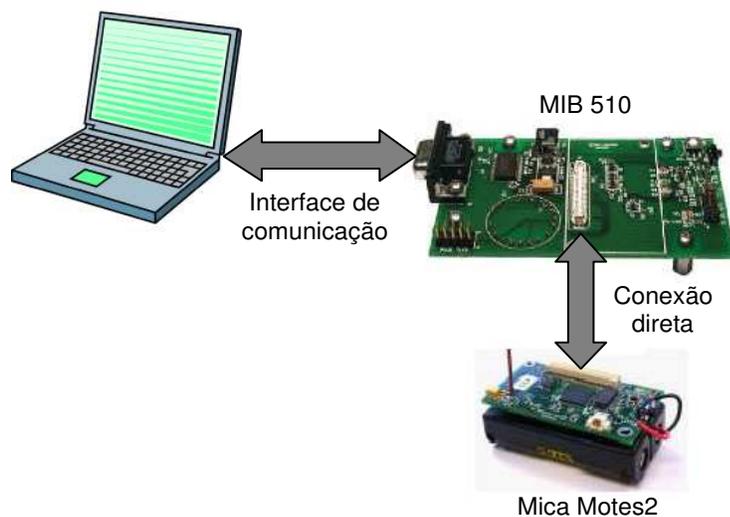


Figura 8.1: Monitorando dados com a MIB.

8.2 Levantamento dos parâmetros empíricos

Os protocolos MAC com CPT implementados na plataforma Mica Motes2 respeitam as limitações dos nós. Para evitar o uso de sofisticados modelos de propagação de sinais, que apresentam cálculos complexos, empregamos alguns parâmetros obtidos empiricamente para manter a qualidade do enlace na comunicação.

Os protocolos que empregam estimadores da qualidade do enlace usam parâmetros limites para estabelecer a comunicação entre os nós, enquanto que os protocolos que calculam a potência mínima de transmissão usam parâmetros que mantêm o sinal de recepção acima do ruído do meio. O levantamento desses parâmetros é apresentado a seguir.

8.2.1 Estimadores da qualidade do enlace

Os protocolos Iterativo e Híbrido utilizam valores limites para estimar a qualidade do enlace, como o número de confirmações consecutivas perdidas (L_A) ou recebidas (L_D) para incrementar ou decrementar a potência de transmissão, respectivamente.

Para determinar os valores ideais dos limiares de L_A e L_D utilizamos nós sensores da arquitetura Mica Motes2 rodando uma aplicação que envia 120 mensagens, de 36 bytes, a uma taxa de duas mensagens por segundo, usando o protocolo Iterativo. Os experimentos foram realizados em uma área externa livre de obstáculos. Somente dois nós, emissor e receptor, foram utilizados para evitar interferências de outros nós, criando um cenário controlado para os experimentos. Os nós foram elevados a uma altura de 71cm do solo para evitar fenômenos de reflexão e absorção. Verificamos o comportamento da comunicação separando os nós de 640cm. Os resultados representam a média de cinco experimentos.

Para monitorar e analisar a quantidade de quadros perdidos e a variação da potência de transmissão, usamos o campo de carga útil do quadro de dados: um byte foi utilizado para armazenar a potência de transmissão, outros dois bytes para contabilizar o número de quadros recebidos e mais dois bytes para armazenar o número de quadros com erros de CRC. A carga útil do quadro de dados foi utilizada somente para as nossas análises, sendo que em aplicações reais onde não existe esta demanda.

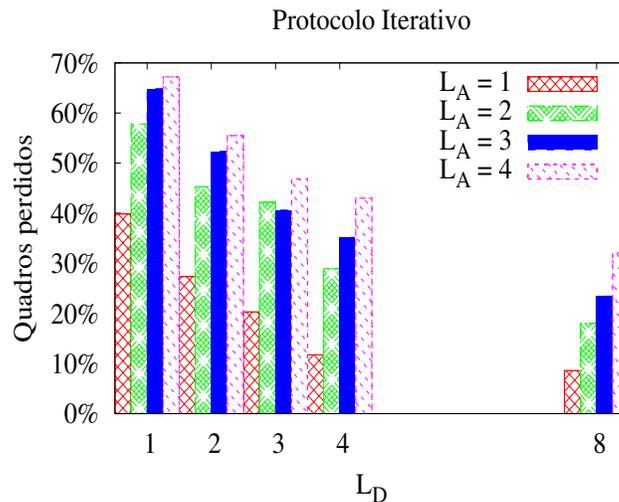


Figura 8.2: Número de quadros perdidos ao variarmos L_D e L_A .

De maneira a minimizar a perda de quadros, variamos os valores das confirmações consecutivas perdidas L_A de 1 a 4 e as confirmações consecutivas rece-

bidas L_D de 1 a 8. Os valores encontrados para esse experimento são mostrados na figura 8.2. Verificamos que ao aumentar o valor de L_D , a perda de quadros é menor, pois um L_D alto propicia um comportamento conservador, que decrementa lentamente o valor da potência. Observamos que o valor do limiar L_A , ao contrário, deve ser o menor possível, pois permite uma resposta rápida ao aumento de ruído do meio.

O comportamento da potência média de transmissão em função da quantidade de quadros enviados parametrizados por L_D e L_A é mostrado pelas figuras 8.3 e 8.4, respectivamente. Podemos observar pela figura 8.3 que ao fixarmos o valor de $L_A = 1$ e variarmos os valores de L_D , a potência é mantida mais estável para o maior valor de L_D .

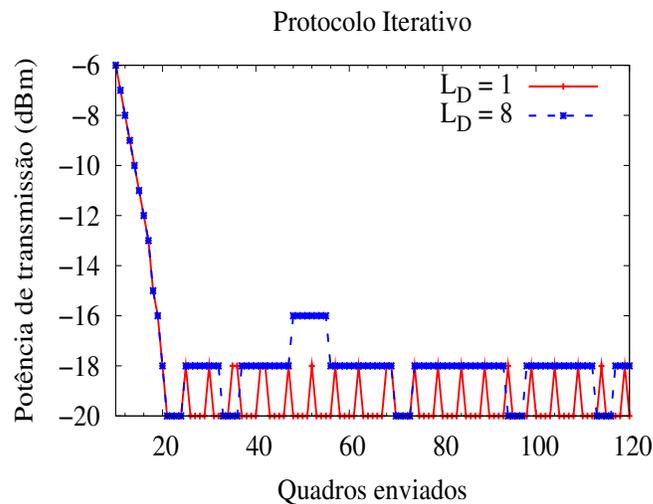


Figura 8.3: Potência média de transmissão variando L_D com $L_A=1$.

Quando fixamos o valor de L_D em 8, os valores menores de L_A aumentam o consumo de energia, uma vez que os aumentos na potência de transmissão serão maiores e mais frequentes, como mostra a figura 8.4.

8.2.2 Cálculo da potência mínima

Os protocolos Atenuação e AEWMA mantêm a qualidade do enlace calculando a potência mínima de transmissão baseada em parâmetros definidos empiricamente. Esses parâmetros visam manter o valor da potência mínima de transmissão acima da atenuação imposta pelo meio e do valor do ruído local observado pelo nó de destino. Dessa forma, os quadros transmitidos apresen-

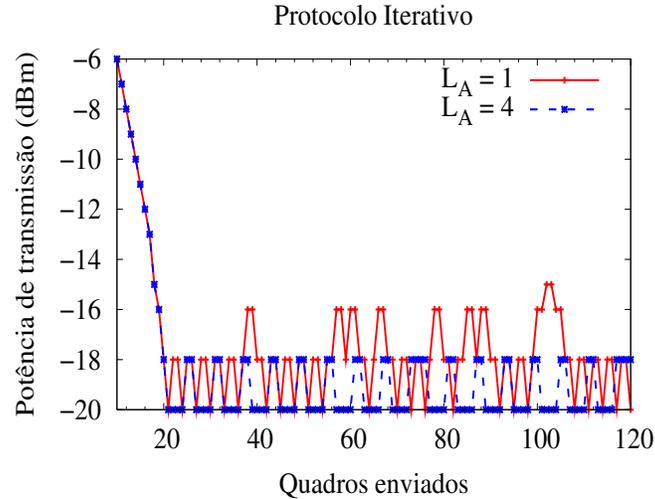


Figura 8.4: Potência média de transmissão variando L_A com $L_D=8$.

tam uma maior probabilidade de serem decodificados corretamente no destino, mantendo a qualidade do enlace.

Para utilizar a atenuação do sinal no cálculo da potência mínima de transmissão, equações apresentadas na seção 6.5.2, é necessário definir os valores dos parâmetros da potência de recepção desejada ($RX_{desejada}$) e o valor mínimo de separação entre o sinal recebido e o ruído local observado pelo nó de destino ($SNR_{desejado}$).

Estes parâmetros foram determinados experimentalmente utilizando dois nós sensores da arquitetura Mica Motes2. Os nós emissor e receptor foram separados por 5m, variando-se a distância entre eles na mesma proporção até o limite de 100m. Os experimentos foram realizados em uma área externa livre de obstáculos, com os dois nós elevados do solo à uma altura de 1,5m para evitar reflexão e absorção de sinais. A aplicação envia 1.000 mensagens de 36 bytes com uma taxa de 2 pacotes/segundo. O protocolo B-MAC, com uma potência fixa de 5dBm, foi empregado para avaliar a qualidade do enlace.

A figura 8.5 apresenta o comportamento do sinal variando-se a distância do emissor ao receptor. A curva “Propagação nominal” mostra o comportamento esperado, enquanto a curva “Dados experimentais” apresenta o comportamento empírico. Inferimos destas curvas que a potência do sinal recebido é inversamente proporcional à distância entre o emissor e o receptor. O ruído do meio, entretanto, permaneceu inalterado durante o experimento.

Em uma transmissão bem sucedida, o nível de sinal recebido deve ser supe-

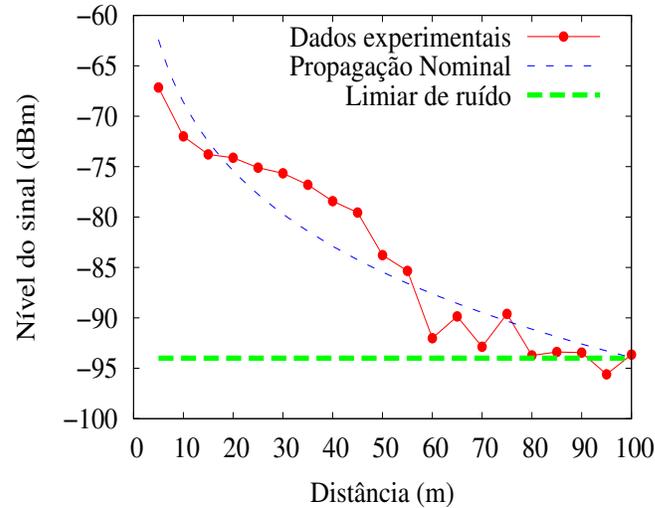


Figura 8.5: Nível do sinal recebido variando a distância entre os nós.

rior ao nível de ruído do meio. A qualidade da comunicação ainda depende da distância entre o emissor e receptor e da existência de fontes de reflexão, refração e dispersão do sinal. Observamos pela figura que o comportamento dos “Dados experimentais” coletados varia acima e abaixo da curva de “Propagação nominal”. Esse comportamento é atribuído às variações das condições do ambiente durante o experimento, como temperatura e interferências, e pelo posicionamento das antenas durante as repetições do experimento.

Usamos a atenuação do meio ($\frac{P_{RX}}{P_{TX}}$) para ajustar os valores da potência de recepção desejada ($RX_{desejada}$). Em função da atenuação e da distância entre os nós calculamos a potência mínima de transmissão necessária a manter um limiar de recepção aceitável no destino e que ainda mantivesse o mesmo alcance de transmissão obtido usando a fórmula de Friis [Friis, 1946]. O resultado foi um valor da potência de recepção desejada de $(-85,0 \pm 9,7)$ dBm. Dessa forma, determinamos que o valor da potência de recepção desejada para os experimentos com cálculo da potência mínima seja de -85dBm e que o valor de separação entre o sinal e o ruído seja de 10dB.

O protocolo AEWMA utiliza uma função de amortização de média móvel ponderada exponencial para diminuir as constantes oscilações da potência mínima calculada. Os valores do parâmetro α são escolhidos para evitar operações em ponto flutuante, sendo da forma $1 - \frac{1}{2^n}$. Dessa forma, o cálculo da função EWMA usa somente três operações de deslocamento e uma adição. Os valores escolhidos para os experimentos foram α com 0,25 e 0,125 de forma que a potência de transmissão não seja alterada constantemente. A faixa de valores escolhidos para

α visa impedir grandes variações da potência. Esses valores foram definidos por experimentos ad hoc que mostraram que outros valores fora desta faixa não apresentaram resultados satisfatórios para a taxa de entrega. Os valores dos parâmetros usados nos experimentos de acordo com cada cenário podem ser visualizados na tabela 8.1.

Tabela 8.1: Parâmetros empregados nos experimentos.

Protocolos			
Iterativo	Atenuação	AEWMA	Híbrido
Externo: $L_D = 8$ $L_I = 1$ Interno: $L_D = 4$ $L_I = 2$	$SNR=10dB$ $RX_{desejada} = -85dBm$	$SNR=10dB$ $RX_{desejada} = -85dBm$ $\alpha=0,25$ $\alpha=0,125$	$SNR=10dB$ Externo: $L_D = 8$ $L_I = 1$ Interno: $L_D = 4$ $L_I = 2$

Nas próximas seções são apresentados cinco experimentos realizados com os protocolos MAC com CPT. Os experimentos são realizados em ambientes externo e interno, verificando a propagação do sinal em várias distâncias, a comunicação em caminho multisaltos, o reuso espacial e o comportamento dos protocolos frente à mobilidade dos nós.

8.3 Ambiente Externo

O objetivo do experimento em um ambiente externo é verificar o comportamento dos protocolos com CPT, evitando fontes de interferências, e compará-los ao protocolo B-MAC com confirmação de quadros. Neste experimento são avaliadas a taxa de entrega média de quadros e a potência média de transmissão.

Os experimentos desenvolvidos no ambiente externo foram realizados em uma área livre de obstáculos. Foram usados dois nós Mica Motes2, um receptor e outro emissor, separados de 5 em 5m até uma distância máxima de 20m, e elevados a 71cm do solo. A aplicação do emissor enviou um total de 1.000 mensagens de 36 bytes com a taxa de 4 pacotes/segundo.

Os protocolos com CPT são comparados ao protocolo B-MAC transmitindo nas potências de 0 e 5dBm. Estas duas potências foram escolhidas para o B-MAC por representar o valor padrão da configuração do protocolo e o valor máximo nominal da potência do rádio do nó. O protocolo AEWMA foi avaliado para dois

valores de α , 0,25 e 0,125 e os parâmetros escolhidos para os protocolos Iterativo e Híbrido foram $L_D=8$ e $L_A=1$.

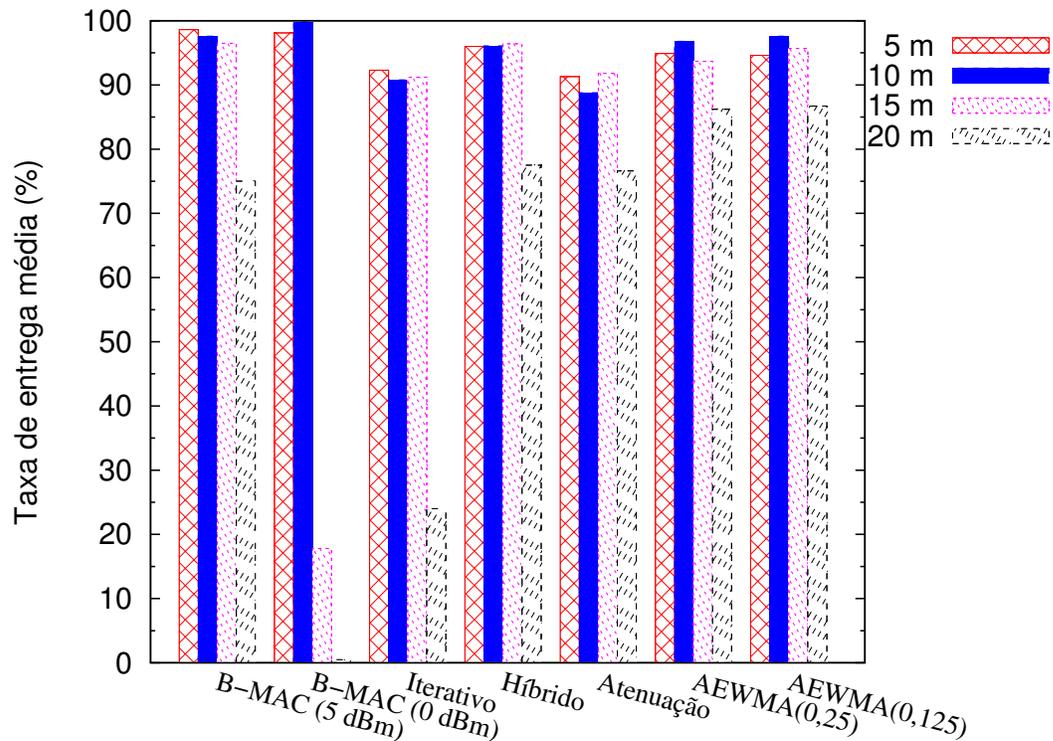


Figura 8.6: Taxa de entrega média em ambiente externo.

A figura 8.6 apresenta a taxa de entrega média de todos os protocolos para um ambiente externo. O protocolo B-MAC transmitindo dados em 5dBm entrega 97% dos quadros para as distâncias de 5 a 15m. Para a distância de 20m, entretanto, sua taxa de entrega diminui para 75%. O desempenho do protocolo AEWMA esteve próximo do B-MAC para as distâncias de 5 a 15m entregando acima de 93% dos quadros. Para a distância de 20m, o protocolo AEWMA obteve desempenho melhor que os outros protocolos, com uma taxa de entrega próxima a 86%.

Neste cenário o protocolo AEWMA usando $\alpha = 0,125$ é ligeiramente superior ao AEWMA com $\alpha = 0,25$, por ser mais conservador ao decrementar a potência. Por outro lado, o protocolo Atenuação encontrou uma taxa de entrega menor que o AEWMA, devido às constantes variações da potência de transmissão. Em 20m, por exemplo, o AEWMA teve um desempenho 10% melhor que o protocolo Atenuação.

Comparando os protocolos Iterativo e Híbrido, identificamos a vantagem de usar uma potência de transmissão limite. O método Híbrido teve um desempenho 5% melhor que o Iterativo para as distâncias de 5 a 15m, entregando 96% dos quadros. Em 20m o protocolo Híbrido obteve uma taxa de entrega média de 77,5%, enquanto que o protocolo Iterativo entregou apenas 23% dos quadros.

A figura 8.7 apresenta os mesmos resultados da taxa de entrega média para todos os protocolos, com a diferença de explicitar os intervalos de confiança de 95% para a repetição de cinco experimentos.

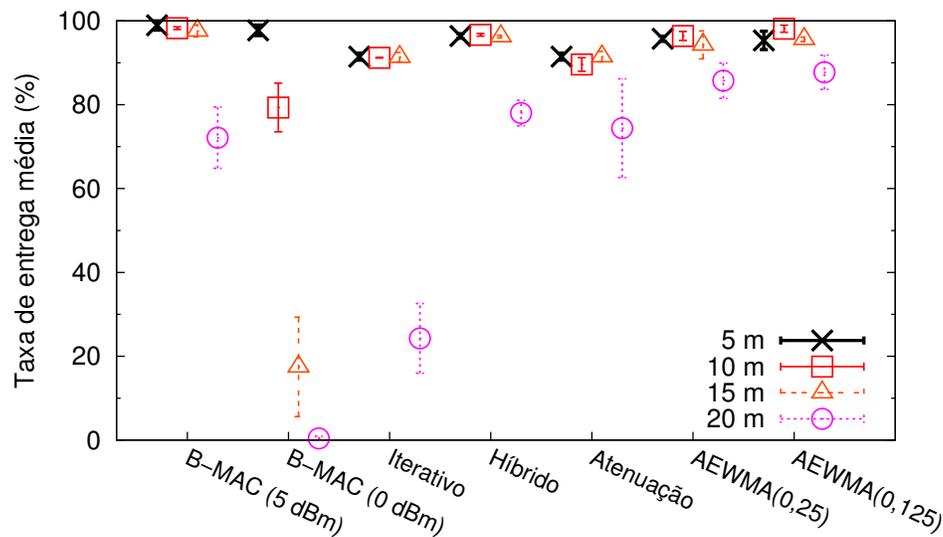


Figura 8.7: Taxa de entrega média em ambiente externo com intervalo de confiança.

A figura 8.8 mostra a potência de transmissão média para todos os protocolos. O protocolo Híbrido utiliza uma potência de transmissão cerca de 1dBm acima da potência do protocolo Iterativo para as distâncias de 10 a 20m, dessa forma ele garante uma potência de recepção aceitável no receptor. A potência de transmissão para o protocolo AEWMA é menor ou igual ao do protocolo Atenuação. Além disso, o desvio padrão do AEWMA é menor que o encontrado no protocolo Atenuação. Para distâncias superiores a 15m, todos os protocolos CPT usaram a potência de transmissão em 5dBm. Dessa forma, o baixo desempenho do B-MAC (0dBm) ocorre devido à sua potência de transmissão, que é insuficiente para decodificar corretamente os quadros.

Convertendo o valor da potência de transmissão para a energia consumida pelo rádio, verificamos que o protocolo AEWMA consumiu 57,7% e 43% menos energia

que o B-MAC (5dBm) para as distância de 5 e 10m respectivamente. Comparando o B-MAC utilizando 0dBm, para as mesmas distâncias de 5 e 10m, o protocolo AEWMA também consumiu menos energia 35% e 13,5%, correspondentemente.

Em 15m todos os protocolos com CPT transmitiram acima de 0dBm e consumiram mais energia que o B-MAC a 0dBm, mas obtiveram uma melhor taxa de entrega média. Para as distâncias de 5 a 15m, o protocolo Híbrido consumiu aproximadamente 13% mais energia do que o protocolo AEWMA, pois este foi mais conservador ao decrementar a potência de transmissão.

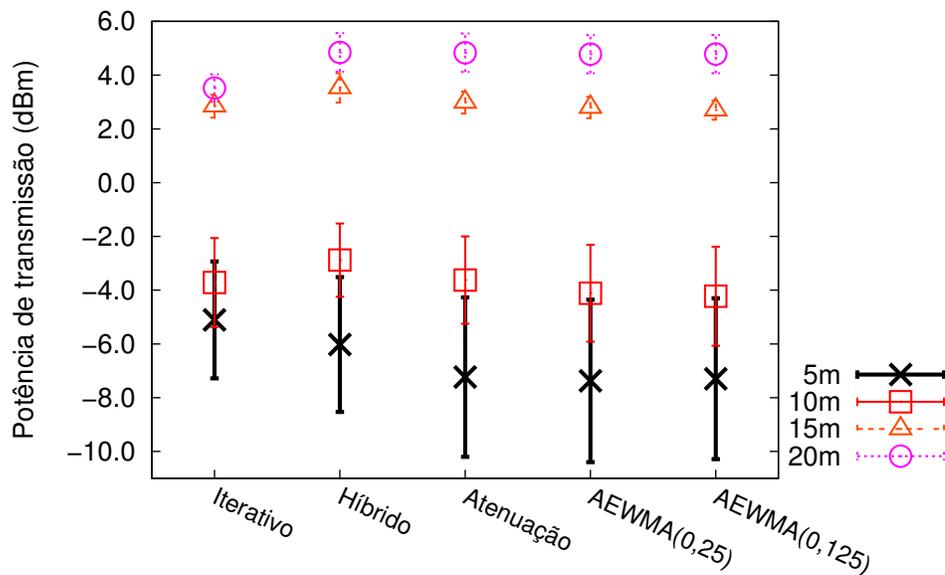


Figura 8.8: Potência média de transmissão para os protocolos com CPT.

Entre todos os protocolos avaliados, o mais eficiente em energia foi o AEWMA, que obteve a melhor relação de energia por quadro entregue, entregando mais quadros que o B-MAC e consumindo menos energia do que qualquer outro protocolo CPT. Devido aos resultados encontrados pelos protocolos Iterativo e Atenuação, os próximos experimentos foram realizados somente com os protocolos AEWMA e Híbrido.

8.4 Ambiente Interno

O objetivo deste experimento é observar o comportamento dos protocolos com CPT em um ambiente interno com várias fontes de ruído e obstáculos. Os protocolos AEWMA e Híbrido foram comparados ao protocolo B-MAC transmitindo na potências de 5dBm.

Neste cenário usamos dois nós Mica Motes2 colocados no chão e distanciados de 3,9m dentro de um laboratório com trânsito de pessoas interferindo no ambiente. A aplicação transmite pelo nó emissor 1.440 mensagens para um nó receptor durante seis minutos.

O primeiro conjunto de testes avaliou os parâmetros mais adequados para cada protocolo, já que o ambiente interno é mais propício a ruídos que o externo. O valor do parâmetro L_A (número de quadros perdidos consecutivos para incrementar a potência de transmissão) foi variado para o protocolo Híbrido, e o valor de α para o protocolo AEWMA. A primeira diferença observada em relação ao cenário externo é que o ambiente interno é mais propício a erros em rajadas, por causa do movimento de pessoas ou objetos, enquanto que no ambiente externo esses erros ocorrem ocasionalmente.

No experimento com o protocolo Híbrido no ambiente interno, alteramos o valor de L_A para dois e encontramos a mesma taxa de entrega média de 95%. A potência de transmissão média para $L_A=2$ foi aproximadamente 16% menor do que para $L_A=1$, $(3.7 \pm 0.55) \text{ dBm}$ e $(4.3 \pm 0.65) \text{ dBm}$, respectivamente.

Para o protocolo AEWMA variamos o valor de α no experimento em um ambiente interno como mostrado pela figura 8.9. Observamos que o incremento no alfa pode fornecer respostas mais rápidas devido a dinamicidade do ambiente interno, mas pode causar grandes oscilações na potência de transmissão e perda de quadros.

O valor de $\alpha=0,125$ apresentou o melhor resultado para o ambiente interno, a taxa de entrega média foi de 94,9%. Aumentando o valor de α para 0,25, a taxa de entrega caiu de 94,9% para 93,8%. O incremento de α causou um aumento insignificante na potência média de transmissão, de 3,26dBm para 3,40dBm. Quando α é ajustado para 0,5 a função EWMA responde mais rapidamente, mas o ganho de desempenho é inferior quando comparado a $\alpha = 0,125$. A taxa de entrega média diminuiu para 94,5% e ocorre um ligeiro aumento da potência média de transmissão para 3,38dBm. Ao mesmo tempo, o desvio padrão aumentou de 0,4591dBm para 0,4840dBm.

O protocolo B-MAC foi avaliado neste cenário transmitindo em 5dBm, pois

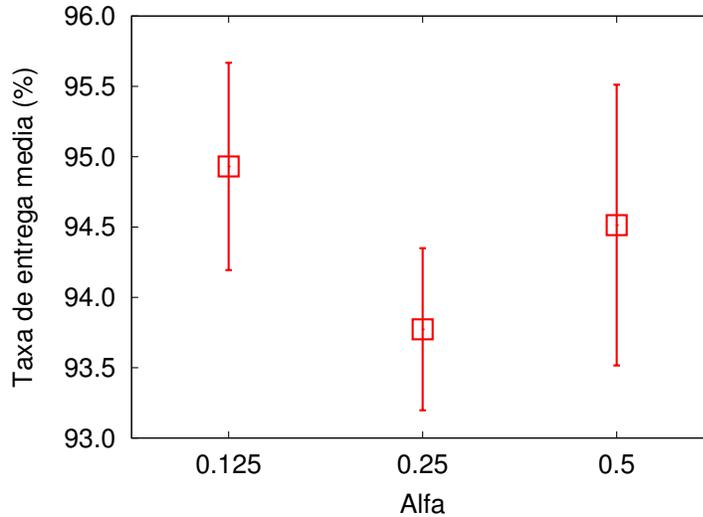


Figura 8.9: Taxa de entrega média do AEWMA variando α (ambiente interno).

para o valor de 0dBm apresentou uma taxa de entrega de quadros próxima de zero. Como o B-MAC usou uma potência de transmissão superior aos protocolos com CPT, ele obteve uma taxa de entrega de 97,9%, superior em 3% aos melhores resultados encontrados pelos protocolos CPT. Esses resultados são apresentados na tabela 8.2 para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 8.2: Melhores resultados para cada protocolo em ambiente interno.

Protocolo	Taxa de entrega	Potência média de transmissão
B-MAC	$(97.9 \pm 0.3) \%$	5 dBm
AEWMA($\alpha = 0.125$)	$(94.9 \pm 0.7) \%$	$(3.25 \pm 0.46) \text{ dBm}$
Hybrid ($L_I = 2$)	$(95.0 \pm 1.8) \%$	$(3.72 \pm 0.55) \text{ dBm}$

8.5 Transmissões multisaltos

O ajuste da potência de transmissão propicia aos protocolos com CPT reduzir o consumo de energia. Em redes densas, os protocolos com CPT tendem a estabelecer enlaces entre os nós com a menor potência nominal de transmissão e com uma alta taxa de entrega. Para as redes esparsas, entretanto, os protocolos CPT tendem a usar a máxima potência de transmissão.

Este experimento avaliou o comportamento dos protocolos com CPT considerando transmissões simultâneas e a propagação de sinais em um caminho multisaltos. Usamos a mesma topologia dos experimentos realizados com os pro-

protocolos B-MAC [Polastre et al., 2004] e ARC [Woo and Culler, 2001]. A simulação do caminho multissaltos é tal que um dado nó na posição i , ao receber uma mensagem de outro nó na posição $i - 1$, repassa a mensagem para o nó na posição $i + 1$.

O experimento foi realizado em um ambiente externo, livre de obstáculos. Foram utilizados cinco nós Mica Motes2, elevados a 71cm do solo, alinhados e distanciados de 5m. Usamos uma aplicação em que o nó emissor, nó 1, envia 2.000 mensagens de 36 bytes em direção ao destino, nó 5, com uma taxa de 4 pacotes/segundo. A figura 8.10 mostra a representação desse caminho multissaltos. Os protocolos AEWMA e Híbrido foram avaliados e comparados ao protocolo B-MAC. Ajustamos os parâmetros dos protocolos com CPT com $\alpha=0,25$ para o AEWMA e com $L_D=8$ e $L_A=1$ para o Híbrido.

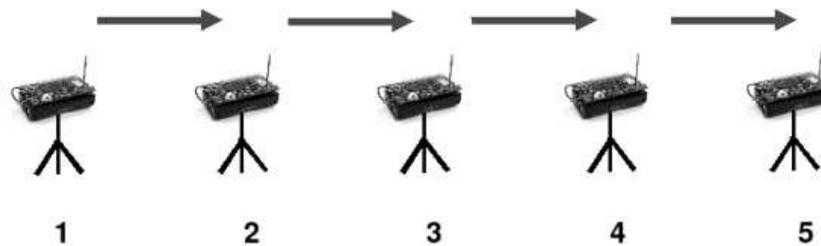


Figura 8.10: Experimento com cinco nós alinhados em um caminho multissaltos.

Para esse cenário, em particular, observamos pela figura 8.11 que os protocolos que empregam uma potência de transmissão fixa, B-MAC com 0 e 5 dBm, consomem mais energia do que os protocolos CPT.

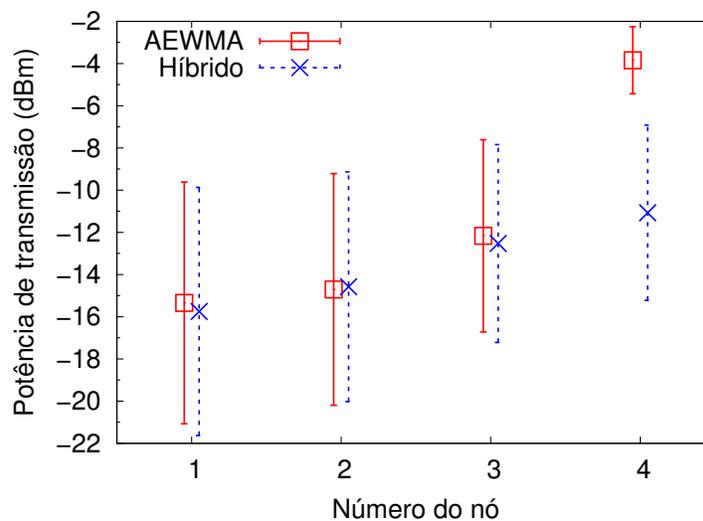


Figura 8.11: Potência média de transmissão no cenário multissaltos.

O protocolo Híbrido apresentou os melhores resultados, transmitindo dados nas potências de -16 a -13dBm. Em geral, o desempenho dos protocolos AEWMA e Híbrido são muito próximos, por causa da pequena distância entre os nós. Entretanto, a potência de transmissão em cada enlace é diferente, seja pelo posicionamento das antenas ou pelas características individuais do hardware de cada nó.

A taxa de entrega para todos os protocolos foi de 98%, como mostrado na figura 8.12, pois a proximidade dos nós permite que a potência de transmissão, mesmo que muito baixa, estabeleça a comunicação entre os nós.

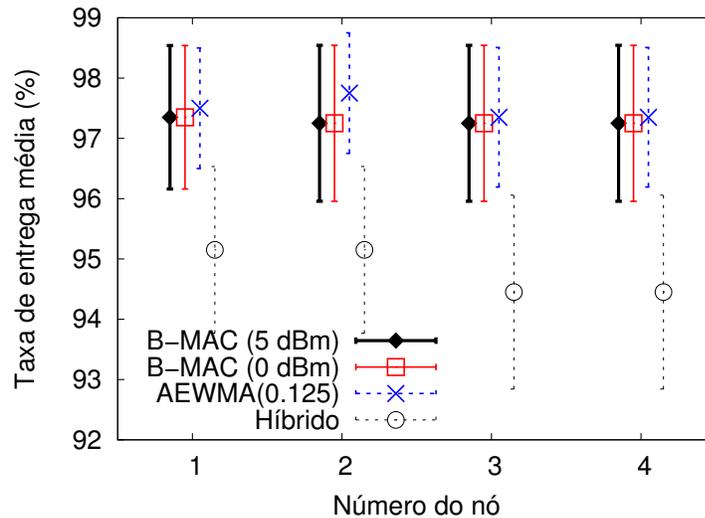


Figura 8.12: Taxa de entrega média no cenário multisaltos.

8.6 Reuso Espacial

O controle da potência de transmissão possibilita aos nós um melhor aproveitamento do meio. A comunicação na potência mínima de transmissão reduz o alcance de transmissão e somente os nós próximos do receptor irão disputar o acesso ao meio. Isso possibilita reduzir a probabilidade de colisões na rede e melhorar a utilização do meio de transmissão.

Este experimento tem como objetivo avaliar o reuso espacial para os protocolos com CPT. São avaliados a quantidade de quadros perdidos em presença de transmissões simultâneas e a probabilidade do nó encontrar o meio livre quando a potência de transmissão é reduzida. Na literatura encontramos afirmações que a comunicação na potência mínima de transmissão reduz o alcance de transmissão

e diminui as colisões, mas nenhuma comprovação mostra esses benefícios como apresentado neste experimento.

O cenário utilizado foi um corredor de ambiente interno sem obstáculos. Foram colocados quatro nós Mica Motes2 diretamente no chão. Neste experimento configuramos dois pares de nós emissor-receptor. O alcance de transmissão diminui significativamente quando os nós são colocados no chão, por causa do efeito de absorção de sinal no solo. Assim, os pares de nós foram afastados de 300cm e os nós emissor e receptor separados por 60cm, como mostra a figura 8.13 (as setas sólidas representam a transmissão de dados). Usamos uma aplicação em que os nós emissores transmitem 1.000 mensagens de 36 bytes a uma taxa de 12,5 pacotes/segundo. Os protocolos avaliados foram o AEWMA com $\alpha=0,25$ e o Híbrido com $L_D=4$ e $L_A=2$, ambos comparados ao protocolo B-MAC com 0 e 5 dBm.

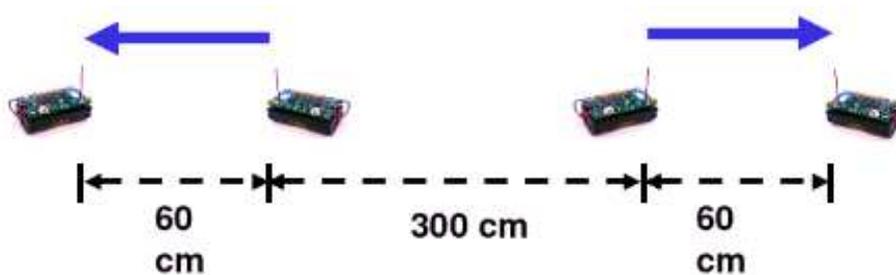


Figura 8.13: Cenário do experimento de reuso do meio.

A figura 8.14 mostra a probabilidade de perda de quadros, a probabilidade de um nó encontrar o meio livre para cada protocolo e a potência de transmissão. A potência de transmissão influencia o número de vezes que o meio é encontrado ocupado, como podemos observar ao comparar o protocolo B-MAC nas potências de 5 e 0dBm. Para essa configuração, o B-MAC em 5dBm tem 10% de chance de atrasar o envio de seus dados (*back-off*) em função da transmissão de outro nó, ou seja, este encontra o meio ocupado ao transmitir seus dados. Quando o B-MAC transmite em 0dBm, a probabilidade de encontrar o meio ocupado é de apenas 5%. Dessa forma, ao reduzir a potência de transmissão, os protocolos CSMA/CA têm menor probabilidade de atrasarem suas transmissões (*backoff*).

Para os protocolos AEWMA e Híbrido, a probabilidade de atraso de transmissão é reduzida para 3,9% e 2,3% respectivamente. Dessa forma, a redução da potência de transmissão decrementa a probabilidade de *backoffs* e melhora a vazão da rede.

O percentual de quadros perdidos, entretando, não é alterado quando existem transmissões simultâneas. Verificamos que a quantidade de quadros perdidos

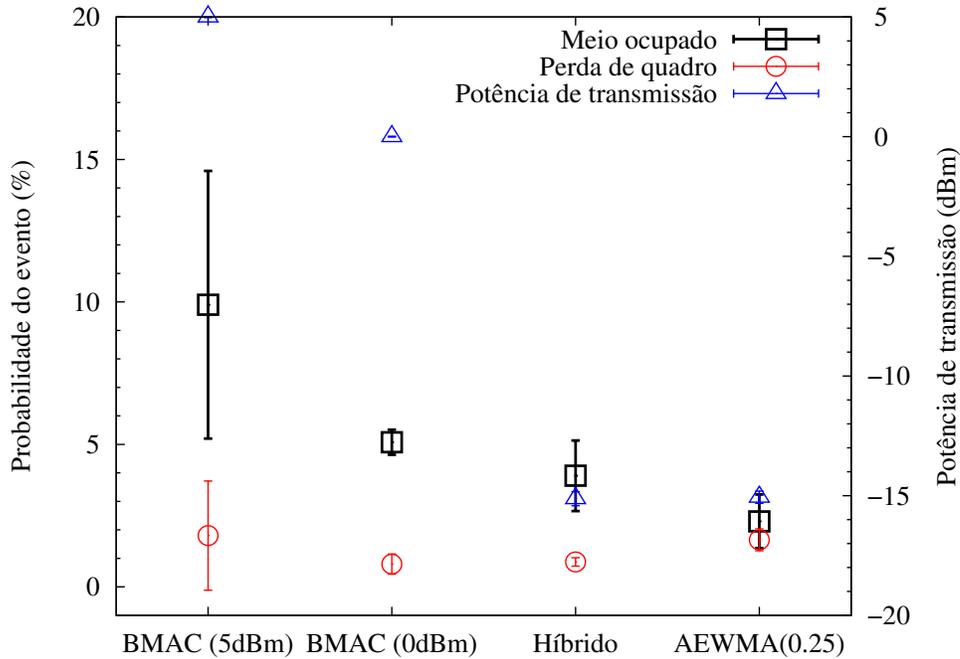


Figura 8.14: Resultados do experimento de reuso do meio.

para todos os protocolos é idêntico à quantidade de quadros perdidos sem transmissões simultâneas, quando comparamos os resultados para o ambiente interno (seção 8.4). Isso ocorre devido ao efeito de captura, conforme observado para os nós da plataforma Mica Mica2 [Polastre et al., 2004, Whitehouse et al., 2005].

8.7 Mobilidade dos Nós

Embora a maioria das aplicações em RSSFs sejam estáticas, alguns cenários requerem aplicações com mobilidade dos nós. Nesses cenários a rede pode sofrer particionamentos quando os nós se movem para distâncias fora do alcance de transmissão previsto. Dessa forma, o ajuste dinâmico da potência de transmissão é necessário para que o nó possa ser alcançado e mantenha a comunicação dentro da área de cobertura máxima permitida pelo rádio do nó. Por outro lado, quando os nós se movem para distâncias próximas entre emissor e receptor, a potência de transmissão pode ser reduzida dinamicamente para diminuir as interferências com outros nós e reduzir o consumo de energia.

Neste experimento temos como objetivo avaliar como os protocolos com CPT se comportam com a mobilidade dos nós. Os protocolos considerados neste ex-

perimento foram o AEWMA e o Híbrido sendo comparados ao B-MAC (5dBm). Neste cenário movimentamos os nós com uma velocidade uniforme de 0,5m/s variando a distância entre os nós de 1 a 15m. A aplicação do nó emissor envia 4 pacotes/segundo durante dois minutos. O nó foi colocado sobre um robô móvel para manter a velocidade constante e evitar qualquer interferência humana na propagação dos sinais. Devido a limitações do robô o experimento foi realizado em uma única velocidade. O nó receptor ficou parado, configurando a comunicação entre um nó móvel e um ponto de acesso estático.

A movimentação foi realizada em duas etapas. Na primeira, um nó se aproxima do nó fixo enquanto que na outra etapa o nó se afasta do nó fixo. Cada experimento foi repetido quatro vezes, sendo realizados em ambientes externo e interno, livres de obstáculos. Os resultados apresentados são a média das repetições dos experimentos e mostram o intervalo de confiança de 95%.

Nos experimentos para os ambientes externo e interno, um nó percorre 15m, pára, aguarda 5s e retorna em direção ao nó fixo. Usamos no experimento somente os protocolos com CPT AEWMA e Híbrido devido às oscilações na potência de transmissão encontrados nos protocolos Iterativo e Atenuação.

Para a movimentação do nó em ambiente externo apresentamos na figura 8.15 a taxa média de entrega em cada momento, para as duas etapas da movimentação. A figura também apresenta a combinação das duas etapas de movimentação neste cenário externo.

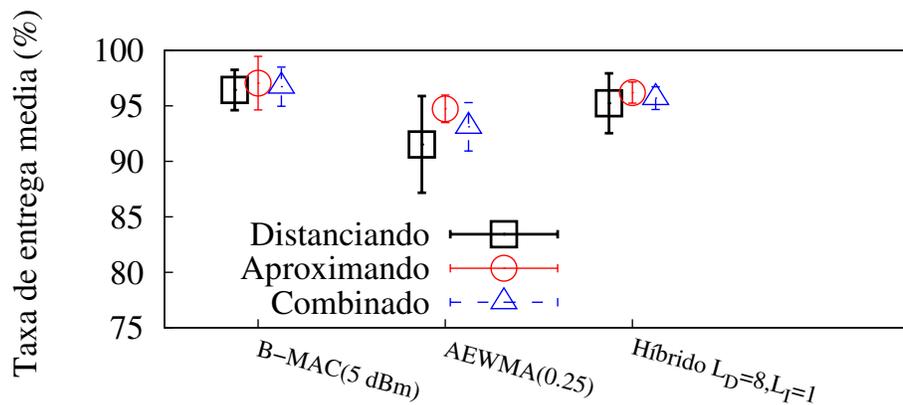


Figura 8.15: Taxa de entrega média para o nó móvel (ambiente externo).

Os protocolos AEWMA e Híbrido apresentaram 5% de quadros perdidos, valores próximos ao do protocolo B-MAC. Os resultados encontrados foram muito similares aos experimentos com nós estáticos. Apesar de não observarmos variações nas taxas de entrega nesse experimento, acreditamos que em velocidades mais altas as perdas de quadros sejam significativas, pois os dois protocolos necessitam de um certo período de tempo para responder a essas variações.

Para o ambiente interno, entretanto, todos os protocolos apresentados na figura 8.16 mostraram uma redução da taxa de entrega. A diferença entre os protocolos B-MAC e os com CPT aumenta cerca de 10% e 20% para os protocolos AEWMA e Híbrido respectivamente. Outra diferença significativa para o ambiente interno é que a taxa de entrega média é maior quando o nó se aproxima do nó fixo do que quando ele se afasta. Para diminuirmos a degradação no desempenho na presença de nós móveis, os protocolos CPT deveriam responder mais rapidamente ao movimento, usando uma amostragem mais freqüente ou aumentando o valor limite da relação do sinal/ruído ($SNR_{threshold}$).

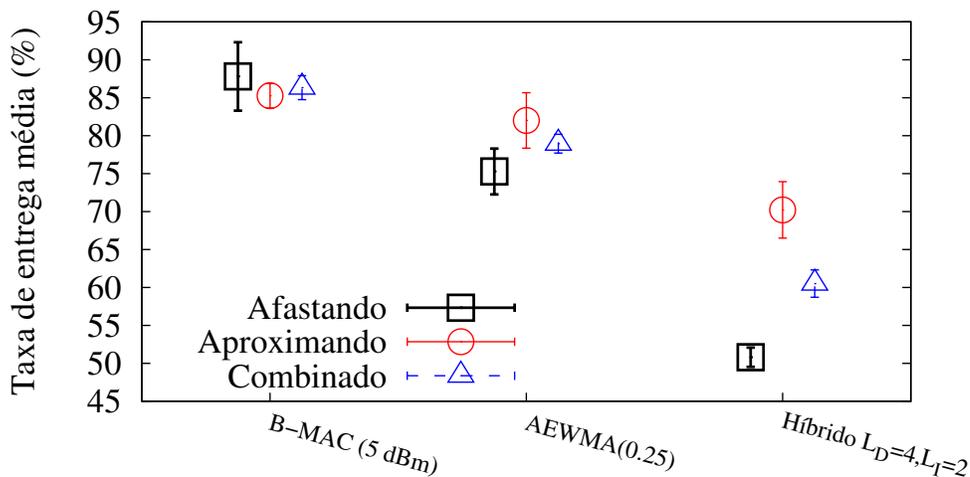


Figura 8.16: Taxa de entrega média para o nó móvel (ambiente interno).

A potência de transmissão é mostrada na figura 8.17 para o ambiente externo e na figura 8.18 para o ambiente interno. Nestas figuras traçamos a potência de transmissão para cada segundo do experimento. À esquerda da linha tracejada os nós estão se afastando, e à direita da linha tracejada, o nó está se aproximando do nó estacionário.

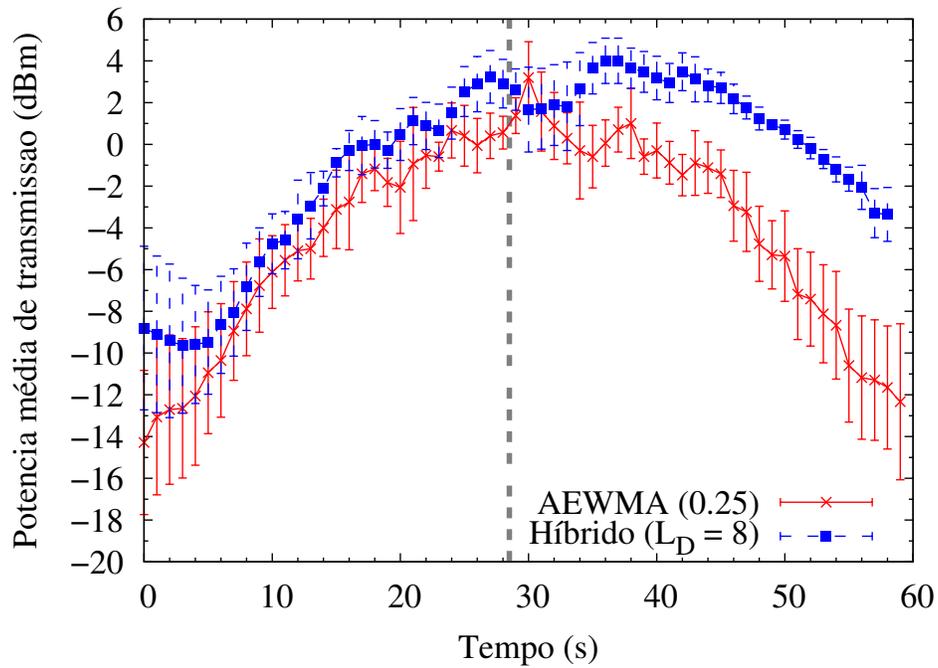


Figura 8.17: Potência média de transmissão para o nó móvel (ambiente externo).

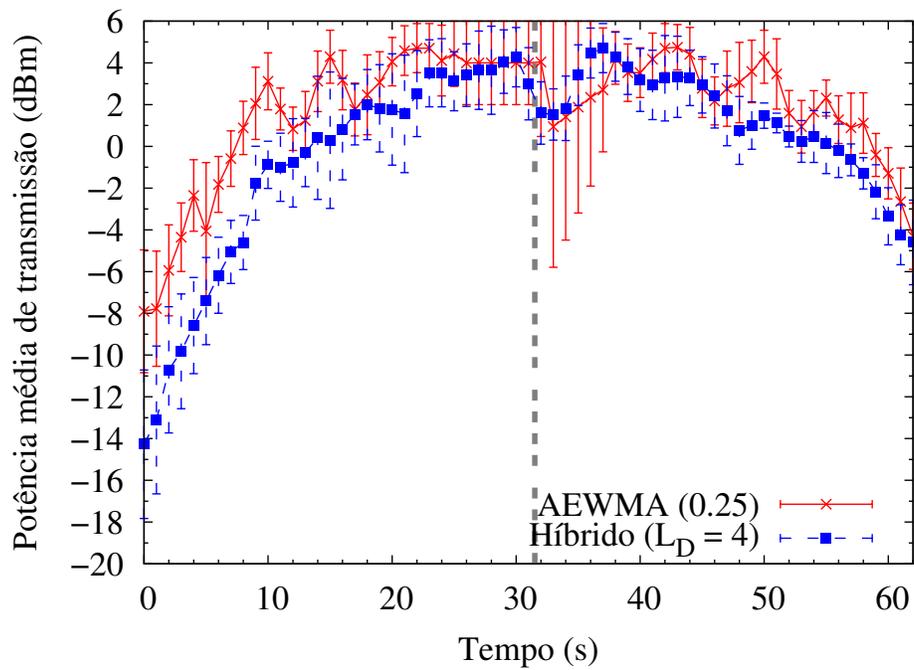


Figura 8.18: Potência média de transmissão para o nó móvel (ambiente interno).

O protocolo AEWMA enviou quadros com menor potência de transmissão do que no protocolo Híbrido, entretanto suas variações foram mais pronunciadas. Diferentemente do protocolo AEWMA, o protocolo Híbrido varia quando o nó está aproximando ou distanciando do receptor. Isso ocorreu por causa do valor alto de L_D (definido neste experimento como 8) quando comparado ao L_A (definido como 2), assim o protocolo reduz a potência de transmissão lentamente, ao passo que os incrementos da potência ocorrem mais rapidamente. Dessa forma, os valores dos parâmetros usados nesse experimento, valores padrão para uma rede estática, não são apropriados para cenários de mobilidade. Comparado ao ambiente externo, a potência de transmissão no ambiente interno é mais dinâmica, como observado pelo alto valor do desvio padrão. Para esse experimento, entretanto, a diferença entre os protocolos CPT é menos pronunciada.

8.8 Conclusões

Os protocolos foram avaliados em diversos cenários, variamos parâmetros tais como o tipo de ambiente (interno e externo), a distância de comunicação entre os nós, a ocorrência de transmissões simultâneas e a mobilidade. Verificamos que os protocolos com CPT aumentam a vazão da rede, incrementam a taxa de entrega e diminuem o consumo de energia.

Os protocolos AEWMA e Híbrido obtiveram um desempenho superior aos apresentados pelos protocolos Iterativo e Atenuação nos cenários externo e interno, melhorando a taxa de entrega média em pelo menos 10%, próxima do valor encontrado quando usamos a potência máxima de transmissão.

Os experimentos mostraram que os protocolos com CPT aumentam a vazão da rede pelo reuso espacial do meio. O uso de potências de transmissão mais baixas reduz a quantidade de *backoffs* necessária para que o nó encontre o meio livre e dessa forma os quadros aguardam menos tempo nas filas. Além disso, os protocolos de CPT devem ser ajustados para se adequarem à mobilidade dos nós, como apresentado na avaliação no último experimento. Nessas situações, a potência de transmissão deve ser ajustada mais freqüentemente, para que os parâmetros dos protocolos forneçam uma resposta mais rápida às mudanças na topologia da rede.

Capítulo 9

Conclusões e Trabalhos Futuros

Este capítulo apresenta as conclusões deste trabalho após o desenvolvimento das técnicas de CPT para protocolos MAC em RSSFs, sua implementação em um plataforma real e avaliação em diversos cenários.

O consumo de energia nos elementos de rede ainda é uma grande limitação na operação das RSSFs. Pesquisas têm sido realizadas para o desenvolvimento de novos dispositivos eletrônicos que consumam menos energia, utilizem modos de gerenciamento de energia e ajustem dinamicamente a potência do sinal transmitido.

A principal fonte de consumo de energia, em geral, está na comunicação entre os nós da rede. As estratégias empregadas para economia de energia em redes móveis, como celulares, WMANs e MANET, são implementadas no protocolo MAC que controla as operações do rádio e ajusta a sua potência de transmissão. Apesar da técnica de controle da potência de transmissão ser empregada com sucesso nessas redes, ela ainda é incipiente nas RSSFs.

Técnicas de CPT

Este trabalho apresentou quatro técnicas para o controle da potência de transmissão para protocolos MAC em RSSFs. Essas técnicas consideram as limitações do hardware dos nós sensores como: processamento, memória e energia para o cálculo da potência mínima de transmissão.

As técnicas propostas nos métodos Iterativo e Híbrido calculam a potência mínima de transmissão por interações sucessivas entre os nós que estimam a

qualidade da comunicação e iteram sobre as potências de transmissão do rádio. Os métodos Atenuação e AEWMA mantêm a qualidade do enlace calculando a potência mínima de transmissão na primeira interação entre os nós.

Avaliamos o protocolo MAC padrão da plataforma comercial de nós sensores Mica Motes2. Essa plataforma foi escolhida por ser, atualmente, a mais utilizada nas aplicações em RSSFs e pela facilidade de desenvolvimento e extensão de seus módulos. O modelo analítico do protocolo B-MAC foi estendido e mostrou que o ajuste dinâmico da potência de transmissão pode proporcionar uma redução no consumo de energia.

Protocolos com CPT

Os quatro métodos de CPT foram implementados sobre o protocolo B-MAC. A implementação dos protocolos com CPT adicionou novas interfaces e componentes para o cálculo e ajuste dinâmico da potência mínima de transmissão.

O protocolo Iterativo, proposto neste trabalho, foi o primeiro protocolo MAC com CPT desenvolvido especificamente para RSSFs. O protocolo Iterativo reduz o consumo de energia ao determinar a potência mínima de transmissão usando estimadores da qualidade do enlace. O protocolo Atenuação calcula por meio de equações e parâmetros empíricos a potência mínima de transmissão na primeira interação entre os nós. Os cálculos realizados por esse protocolo se mostraram precisos e eficientes em consumo de memória e processamento. Apesar de eficientes em energia, esse dois protocolos apresentaram problemas de instabilidade na determinação da potência mínima por reagirem bruscamente às variações de ruído do meio de transmissão.

Para evitar oscilações no cálculo da potência mínima do protocolo Atenuação, implementamos o protocolo AEWMA que adiciona uma função de cálculo de média móvel ponderada exponencial EWMA ao protocolo Atenuação. A função EWMA foi escolhida por apresentar apenas operações simples, rápidas e eficientes em tempo de processamento e consumo de memória.

O quarto protocolo proposto, denominado Híbrido, tem as mesmas características de simplicidade de código do protocolo Iterativo aliada a uma das restrições consideradas no protocolo Atenuação. O protocolo Híbrido mantém a mesma estabilidade fornecida pelo AEWMA, a um custo inferior de processamento. Em todos os protocolos foi inserida uma tabela de vizinhos para evitar repetidos cálculos da potência de transmissão a cada quadro enviado.

Resultados da avaliação dos protocolos com CPT

Os protocolos com CPT, Iterativo, Atenuação, AEWMA e Híbrido, foram avaliados por experimentos realizados na plataforma Mica Motes2. Os protocolos foram avaliados em diversos cenários, variando parâmetros tais como o tipo de ambiente (interno e externo), a distância de comunicação entre os nós, a ocorrência de transmissões simultâneas, a comunicação em caminho multisaltos e a mobilidade. Verificamos que os protocolos com CPT aumentam a vazão da rede, incrementam a taxa de entrega e diminuem o consumo de energia.

Nos cenários externo e interno, os protocolos AEWMA e Híbrido tiveram um desempenho superior a todos os outros protocolos com CPT. Em relação aos protocolos Iterativo e Atenuação, os protocolos AEWMA e Híbrido obtiveram uma taxa de entrega 10% superior, próxima do valor encontrado quando usamos o protocolo B-MAC na potência máxima de transmissão. Além disso, os protocolos AEWMA e Híbrido possuem a melhor relação de energia por quadro entregue.

Na literatura encontramos afirmações que a comunicação na potência mínima de transmissão reduz o alcance de transmissão e diminui as colisões, entretanto esta alternativa não foi confirmada experimentalmente. Os nossos experimentos mostraram que os protocolos com CPT aumentam a vazão da rede pelo reuso espacial do meio. O uso de potências de transmissão mais baixas reduz a quantidade de atrasos necessários para que o nó encontre o meio livre, dessa forma os quadros aguardam menos tempo nas filas. Além disso, observamos pelos experimentos que o percentual de colisões não é alterado quando existem transmissões simultâneas, ao contrário das afirmações encontradas na literatura. A ocorrência desses resultados é justificada ao efeito da captura observada para os nós da plataforma Mica Motes2.

Em redes densas, os protocolos com CPT tendem a estabelecer enlaces entre os nós com a menor potência nominal de transmissão e com uma alta taxa de entrega. Os experimentos realizados em caminho multisaltos demonstraram que os protocolos que empregam uma potência de transmissão fixa, B-MAC com 0 e 5 dBm, consomem mais energia do que os protocolos CPT. Além disso, os protocolos com CPT, AEWMA e Híbrido, obtiveram uma taxa de entrega próxima de 98%.

Os protocolos com CPT devem ser ajustados para se adequar à mobilidade dos nós. Os experimentos avaliaram os protocolos com CPT em apenas uma velocidade. Os resultados encontrados mostram que a potência de transmissão deve ser ajustada mais frequentemente, para que os parâmetros dos protocolos forneçam uma resposta mais rápida às mudanças na topologia da rede.

Observamos pelos resultados obtidos pelos experimentos que os protocolos com CPT podem ser implementados em RSSFs e que reduzem o consumo de energia, melhoram o reuso espacial para transmissões simultâneas e suportam a mobilidade dos nós. Além disso, os protocolos são eficientes em processamento e consumo de memória quando implementados na plataforma Mica Motes2.

9.1 Contribuições

As principais contribuições deste trabalho foram no desenvolvimento e na análise de protocolos MAC com CPT eficientes em energia. Podemos citar como principais contribuições:

- A proposição de quatro técnicas originais de controle da potência de transmissão para protocolos MAC em RSSFs, que possibilitam reduzir significativamente o consumo de energia, manter a qualidade do enlace e aumentar o tempo de vida da rede.
- A especificação do primeiro protocolo MAC para RSSFs que emprega técnicas de CPT [Correia et al., 2005c].
- A especificação e implementação de outros três protocolos MAC para RSSFs que empregam as técnicas de CPT em uma plataforma comercial.
- A avaliação dos quatro protocolos especificados em cenários reais considerando as métricas de consumo de energia, taxa de entrega e potência de transmissão. Nesses cenários são considerados ambientes interno e externo, caminho multisaltos, reuso do meio de transmissão e mobilidade dos nós. Os protocolos propostos são comparados ao protocolo MAC padrão da plataforma comercial [Correia et al., 2006].
- A apresentação de uma taxonomia para análise e classificação dos principais protocolos MAC desenvolvidos para RSSFs. Essa taxonomia caracteriza os protocolos considerando os métodos de alocação de canal, a capacidade de adaptação aos requisitos da aplicação, os mecanismos de qualidade de serviço e outros aspectos da comunicação, tais como coordenação e notificação de transmissão [Correia et al., 2005a].

Outras contribuições relevantes na área de pesquisa e desenvolvimento de protocolos em RSSF podemos citar:

- A especificação de um protocolo de roteamento para redes ad hoc com QoS baseado no CPT e que determina rotas eficientes em energia [Macedo et al., 2006].
- A especificação de um protocolo de roteamento para RSSFs, denominado de PROC (*Proactive ROuting with Coordination*), baseado em regras, que interage com a aplicação [Macedo et al., 2005b, Macedo et al., 2005c].
- Avaliação dos aspectos de tolerância a falhas em protocolos de roteamento para RSSFs. Foram considerados cenários onde as falhas dos nós variam em intensidade, tipo e duração [Macedo et al., 2005a, Macedo et al., 2005d].

Os resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho foram publicados em conferências e periódicos nacionais e internacionais. A lista completa das publicações pode ser encontrada no apêndice A.

9.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros pretendemos continuar o desenvolvimento dos protocolos com CPT, adicionando outras funcionalidades como a interação com protocolos de roteamento e de aplicação em RSSFs. Além disso, pretendemos estender o código dos protocolos propostos para ser utilizado em outras plataformas de nós sensores.

Comparação com outros protocolos MAC

Os experimentos compararam os protocolos com CPT apenas com o protocolo B-MAC. A escolha desse protocolo foi determinada pelo mesmo já estar consolidado em algumas plataformas reais de nós sensores. Muitos outros protocolos apresentam somente resultados simulados e ainda estão em fase de implementação e desenvolvimento para plataformas reais, como o S-MAC, T-MAC e TRAMA. Planejamos no futuro comparar os protocolos com CPT a essas novas implementações.

Ajuste dinâmico de parâmetros

Um desafio é implementar nos protocolos com CPT o ajuste dinâmico dos parâmetros de confirmações perdidas e recebidas em função do ambiente no qual o nó está inserido. Essa melhoria pode representar maior redução do consumo de energia e melhora na taxa de entrega.

Avaliação da mobilidade

Os experimentos avaliaram a mobilidade dos nós em apenas uma velocidade. O desafio em redes móveis é como lidar com o movimento em diferentes velocidades, a qual dita a potência de transmissão. Para diminuirmos a degradação no desempenho de nós móveis, os protocolos com CPT devem responder mais rapidamente ao movimento, usando uma amostragem mais freqüente ou aumentando o valor limite da relação do sinal/ruído. Pretendemos avaliar o comportamento dos protocolos com CPT em diferentes velocidades.

Integração com protocolos de roteamento

Os protocolos de roteamento devem conhecer a potência mínima de transmissão em cada enlace para utilizar somente os enlaces mais eficientes em energia. A integração entre os protocolos de roteamento e MAC é necessária já que os mecanismos que controlam as operações do rádio estão no MAC. Iniciamos esse trabalho desenvolvendo um protocolo de roteamento para redes móveis ad hoc e pretendemos estendê-lo para as RSSFs.

Portabilidade do código

O desenvolvimento dos protocolos com CPT foi realizado para a plataforma Mica Motes2. A portabilidade do código ainda não é possível para outros nós da mesma família. Alguns parâmetros de manipulação da camada física devem ser ajustados. Planejamos implementar o código para o TinyOS 2.0 que possui maior abstração do hardware e possibilita maior portabilidade do código para outras plataformas.

Simulação com mais nós

Os experimentos foram realizados, na sua maioria, usando somente dois nós, um emissor e outro receptor. A realização de outros experimentos com uma quantidade maior de nós pode trazer resultados mais precisos na pesquisa de CPT em RSSFs.

Modelos analíticos para cálculo da energia por bit

O consumo de energia foi obtido somente pelo valor da potência de transmissão. Planejamos desenvolver modelos analíticos para a representação do consumo de energia por bit transmitido, tanto para dados quanto para confirmações.

Os artigos publicados, os resultados dos experimentos e os códigos dos protocolos MAC com CPT para RSSFs estão disponibilizados em:
<http://www.dcc.ufmg.br/~lcorreia>.

Referências Bibliográficas

- [Agarwal et al., 2001] Agarwal, S., Krishnamurthy, S., Katz, R., and Dao, S. (2001). Distributed power control in ad hoc wireless networks. In *in Personal and Indoor Mobile Radio Communication(PIMRC)*, volume 2, pages 59–66. IEEE.
- [Agilent Technologies, 2004] Agilent Technologies (2004). Data Sheet Agilent Technologies Infrared Products. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-0281EN.pdf>. Acessado em novembro de 2006.
- [Ammari and Das, 2005] Ammari, H. M. and Das, S. K. (2005). Trade-off between energy savings and source-to-sink delay in data dissemination for wireless sensor networks. In *MSWiM '05: Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pages 126–133, New York, NY, USA. ACM Press.
- [ANATEL, 2004] ANATEL (Maio, 2004). Agência Nacional de Telecomunicações - Resolução número 365, de 10 de maio de 2004.
- [Atmel, 2006] Atmel, A. (2006). AVR Studio 4. <http://www.atmel.com>. Acessado em novembro de 2006.
- [Avizienis et al., 2004] Avizienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B., and Landwehr, C. (2004). Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. *IEEE Transaction Dependable Security in Computation*, 1(1):11–33.
- [Bambos and Kandukuri, 2000] Bambos, N. and Kandukuri, S. (2000). Power Controlled Multiple Access (PCMA) in Wireless Communication Networks. In *INFOCOM*, pages 386–395.
- [Bharghavan et al., 1994] Bharghavan, V., Demers, A., Shenker, S., and Zhang, L. (1994). Macaw: a media access protocol for wireless lan's. In *Proceedings of the Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications*, pages 212–225. ACM Press.

- [Bhatnagar et al., 2001] Bhatnagar, S., Deb, B., and Nath, B. (2001). Service differentiation in sensor networks. In *Proceedings of the Fourth International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, pages 61–69.
- [Boone, 2004] Boone, G. (2004). Reality mining: Browsing reality with sensor networks. *Sensors Magazine*, September(9):14.
- [Boyle, 2005] Boyle, A. (2005). How high-tech is coming to the rescue. *MSNBC*. Acessado em setembro de 2005.
- [BTNode Project, 2006] BTNode Project (2006). BTnodes - A Distributed Environment for Prototyping Ad Hoc Networks. <http://www.btnode.ethz.ch>. Acessado em novembro de 2006.
- [Callaway et al., 2002] Callaway, E., Gorday, P., Hester, L., Gutierrez, J., Naeve, M., Heile, B., and Bahl, V. (2002). Home networking with IEEE 802.15.4: a developing standard for low-rate wireless personal area networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8):70–77.
- [CC1000, 2006] CC1000 (2006). Chipcon products from texas instruments. CC1000 low power FSK transceiver. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc1000.html>. Acessado em novembro de 2006.
- [CC2420, 2006] CC2420 (2006). Chipcon products from texas instruments. the industry's first single-chip 2.4 ghz ieee 802.15.4 compliant and zigbeeTMready rf transceiver. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc2420.html>. Acessado em novembro de 2006.
- [CENS, 2004] CENS (2004). CENS Center for Embedded Networked Sensing. Medusa Project. http://www.cens.ucla.edu/Project-Descriptions/Sensor_Node_Platforms/.
- [Chatterjea et al., 2004] Chatterjea, S., van Hoesel, L. F. W., and Havinga, P. J. M. (2004). AI-LMAC: An Adaptive, Information-centric and Lightweight MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the DEST International Workshop on Signal Processing for Sensor Networks*, pages 381–388.
- [Chen et al., 2001] Chen, B., Jamieson, K., Balakrishnan, H., and Morris, R. (2001). Span. an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. In *Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom)*, pages 85–96, Rome, Italy. ACM.

- [Clare et al., 1999] Clare, L., Pottie, G., and Agre, J. (1999). Self-Organizing Distributed Sensor Networks. In *Proc. SPIE Conf. Unattended Ground Sensor Technologies and Applications*, pages 229–237.
- [Correia et al., 2005a] Correia, L. H. A., Macedo, D. F., dos Santos, A. L., Nogueira, J. M. S., and Loureiro, A. A. F. (2005a). A taxonomy for medium access control protocols in wireless sensor networks. *Annales des Télécommunications (Annals of telecommunications)*, 60(7-8):944–969.
- [Correia et al., 2006] Correia, L. H. A., Macedo, D. F., dos Santos, A. L., Nogueira, J. M. S., and Loureiro, A. A. F. (2006). Ajustando a Potência de Transmissão em Protocolos MAC para Redes de Sensores Sem Fio. In *24º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pages 589–604.
- [Correia et al., 2005b] Correia, L. H. A., Macedo, D. F., Silva, D. A. C., dos Santos, A. L., Loureiro, A. A. F., and Nogueira, J. M. S. (2005b). Controle da potência de transmissão em protocolos mac para redes de sensores sem fio. In *XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT*, pages 709–714.
- [Correia et al., 2005c] Correia, L. H. A., Macedo, D. F., Silva, D. A. C., dos Santos, A. L., Loureiro, A. A. F., and Nogueira, J. M. S. (2005c). Transmission power control in mac protocols for wireless sensor networks. In *MSWiM '05: Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pages 282–289, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Crossbow, 2004] Crossbow (2004). Mica2: Wireless Measurement System. <http://www.xbow.com>.
- [Crossbow Technology, 2003] Crossbow Technology, I. (2003). MPR/MIB mote user manual. Acessado em novembro de 2006.
- [Dewasurenda and Mishra, 2004] Dewasurenda, D. and Mishra, A. (2004). Design Challenges in Energy-Efficient Medium Access Control for Wireless Sensor Networks. In Ilyas, M. and Mahgoub, I., editors, *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*, volume 1, chapter 28. CRC Press LLC. ISBN 0-8493-1968-4.
- [Dust, 2004] Dust, S. (2004). Smart Dust: Autonomous sensing and communication in a cubic millimeter. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust>. Acessado em novembro de 2006.
- [Ebert et al., 2000] Ebert, J. P., Stremmel, B., Wiederhold, E., and Wolisz, A. (2000). An Energy-efficient Power Control Approach for WLANs. *Journal of Communications and Networks (JCN)*, 2(3):197–206.

- [Echelon Corporation, 2006] Echelon Corporation (2006). The Pyxos Platform. <http://www.echelon.com/products/pyxos/>. Acessado em novembro de 2006.
- [El-Hoiydi and Decotignie, 2004] El-Hoiydi, A. and Decotignie, J. (2004). WiseMAC: An ultra low power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks. In *9th IEEE Symposium on Computer and Communications (ISCC)*, pages 244–251.
- [Enz et al., 2004] Enz, C. C., El-Hoiydi, A., Decotignie, J.-D., and Peiris, V. (2004). Wisenet: An ultralow-power wireless sensor network solution. *Computer*, 37(8):62–70.
- [EYES Project, 2005] EYES Project (2005). EYES – Energy efficient sensor networks. <http://www.eyes.eu.org>. Acessado em novembro de 2006.
- [Foundation, 2004] Foundation, N. S. (2004). Report of the National Science Foundation Workshop on Fundamental Research in Networking. <http://www.cs.virginia.edu/~jorg/workshop>. Acessado em novembro de 2006.
- [Friis, 1946] Friis, H. T. (1946). A note on a simple transmission formula. *Proceeding of IEEE/IRE – Investigative Reporters and Editors*, 34.
- [Ganesan et al., 2004] Ganesan, D., Cerpa, A., Ye, W., Yu, Y., Zhao, J., and Estrin, D. (2004). Networking issues in wireless sensor networks. *Journal of Parallel Distributed Computing*, 64(7):799–814.
- [GATECH, 2004] GATECH (2004). Sensonet project: Protocols for sensor networks. <http://users.ece.gatech.edu/weilian/Sensor/index.html>. Acessado em novembro de 2006.
- [Gomez et al., 2001a] Gomez, J., Campbell, A., Naghshineh, M., and Bisdikian, C. (2001a). Conserving transmission power in wireless ad hoc networks. In *Proceeding of IEEE Conference on Network Protocols (ICNP'01)*, page 24.
- [Gomez and Campbell, 2004] Gomez, J. and Campbell, A. T. (2004). A case for variable-range transmission power control in wireless multihop networks. In *Proceedings of the IEEE Infocom*, volume 2, pages 1425–1436.
- [Gomez et al., 2001b] Gomez, J., Campbell, A. T., Naghshineh, M., and Bisdikian, C. (November, 2001b). Conserving transmission power in wireless ad hoc networks.
- [Gupta and Kumar, 1998] Gupta, P. and Kumar, P. (1998). Critical power for asymptotic connectivity in wireless networks. In *Stochastic Analysis, Control, Optimization and Applications: A Volume in Honor of W.H. Fleming, W.M. McEneaney, G. Yin, and Q. Zhang (Eds.)*.

- [Gupta and Kumar, 2000] Gupta, P. and Kumar, P. (2000). Capacity of wireless networks. *IEEE Transactions of Information Theory*, 46(2):388–404.
- [Haas and Deng, 1999] Haas, Z. and Deng, J. (1999). Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA) - Performance Evaluation. In *IEEE VTC'99*.
- [Hać, 2003] Hać, A. (2003). *Wireless sensor network designs*. John Wiley & Sons, 1 ed. edition.
- [Harvard University, 2006] Harvard University, D. E. . A. S. (2006). CodeBlue: Wireless Sensor Networks for Medical Care. "<http://www.eecs.harvard.edu/mdw/proj/codeblue/>". Acessado em novembro de 2006.
- [Heinzelman et al., 2000] Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, H. (2000). Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*.
- [Hill, 2000] Hill, J. (2000). A software architecture supporting networked sensors. Master's thesis, University of California at Berkeley.
- [Hubert, 2004] Hubert, S. (2004). Malt - motorized active laser transceiver. http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/~mattlast/research/laser_turret.html. Acessado em novembro de 2006.
- [Intel Corporation, 2006] Intel Corporation (2006). Intel Mote Sensor Nets. <http://www.intel.com/research/exploratory/motes.htm>. Acessado em novembro de 2006.
- [JPL, 2002] JPL (2002). JPL Sensor Webs. <http://sensorwebs.jpl.nasa.gov/>. Acessado em novembro de 2006.
- [Jung and Vaidya, 2002] Jung, E.-S. and Vaidya, N. H. (2002). A power control MAC protocol for ad hoc networks. In *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 36–47. ACM Press.
- [Kalidindi et al., 2003] Kalidindi, R., Kannan, R., Iyengar, S. S., and Ray, L. (2003). Distributed energy aware mac layer protocol for wireless sensor networks. In *International Conference on Wireless Networks*, pages 282–286.
- [Karn, 1990] Karn, P. (1990). A New Channel Access Protocol for Packet Radio. In *American Radio Relay League – 9th Computer Networking Conference*.

- [Kawadia and Kumar, 2003] Kawadia, V. and Kumar, P. R. (2003). Power control and clustering in ad hoc networks. *Proceedings of IEEE INFOCOM 2003*, volume 1, pages 459–469.
- [Kawadia and Kumar, 2005] Kawadia, V. and Kumar, P. R. (2005). Principles and protocols for power control in wireless ad hoc networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(1):76–88.
- [Kinney, 2003] Kinney, P. (2003). Zigbee technology: Wireless control that simply works. www.zigbee.org/resources. Whitepaper.
- [Kwiatkowska and Sassone, 2004] Kwiatkowska, M. and Sassone, V. (2004). GC2: science for global ubiquitous computing. In *Grand Challenges in Computing, Proceedings*. The British Computer Society.
- [Lal et al., 2003] Lal, D., Manjeshwar, A., Herrmann, F., Uysal-Biyikoglu, E., and Keshavarzian, A. (2003). Measurement and characterization of link quality metrics in energy constrained wireless sensor networks. In *IEEE GLOBECOM*, pages 172–187.
- [Langendoen and Halkes, 2005] Langendoen, K. and Halkes, G. (2005). Energy-efficient medium access control. In Zurawski, R., editor, *Embedded Systems Handbook*, chapter 34. CRC Press.
- [Lee and Tevfendhart, 1997] Lee, R. C. and Tevfendhart, W. M. (1997). *UML and C++: a practical guide to object-oriented development*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA.
- [Leentvaar and Flint, 1976] Leentvaar, K. and Flint, J. H. (1976). The Capture Effect in FM Receivers. *IEEE Transaction Communication*, COM-24(5):531–539.
- [Lettieri and Srivastava, 1998] Lettieri, P. and Srivastava, M. B. (1998). Adaptive frame length control for improving wireless link throughput, range and energy efficiency. In *INFOCOM (2)*, pages 564–571.
- [Levis et al., 2004a] Levis, P., Madden, S., Gay, D., Polastre, J., Szewczyk, R., Woo, A., Brewer, E., and Culler, D. (2004a). The Emergence of Networking Abstractions and Techniques in TinyOS. In *First Symposium on networked system design and implementation (NSDI04)*, pages 1–14, San Francisco, California, USA.
- [Levis et al., 2004b] Levis, P., Madden, S., Polastre, J., Szewczyk, R., Whitehouse, K., Woo, A., Gay, D., Hill, J., Welsh, M., Brewer, E., and Culler, D. (2004b). TinyOS: An operating system for wireless sensor networks. In W. Weber, J. R. and Aarts, E., editors, *Ambient Intelligence*. Springer-Verlag, New York, NY.

- [Loureiro et al., 2003] Loureiro, A. A. F., Nogueira, J. M. S., Ruiz, L. B., de Freitas Mini, R. A., Nakamura, E. F., and Figueiredo, C. M. S. (2003). Redes de Sensores Sem Fio. In *21º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pages 179 – 226.
- [Lu et al., 2002] Lu, C., Blum, B. M., Abdelzaher, T. F., Stankovic, J. A., and He, T. (2002). Rap: A real-time communication architecture for large-scale wireless sensor networks. In *Proceedings of the Eighth IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS'02)*, page 55. IEEE Computer Society.
- [Luo and Ephremides, 2002] Luo, W. and Ephremides, A. (2002). Power level and packets lengths in random multiple access. *IEEE Transactions on Information Theory*, 48(1):46–58.
- [Macedo, 2006] Macedo, D. F. (2006). Um protocolo de roteamento para redes de sensores sem fio adaptável por regras de aplicação. Master's thesis, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, Brasil.
- [Macedo et al., 2005a] Macedo, D. F., Correia, L. H. A., dos Santos, A. L., Loureiro, A. A., and Nogueira, J. M. (2005a). Avaliando aspectos de tolerância a falhas em protocolos de roteamento para redes de sensores sem fio. In *VI Workshop de Testes e Tolerância a Falhas*, pages 15–26.
- [Macedo et al., 2005b] Macedo, D. F., Correia, L. H. A., dos Santos, A. L., Loureiro, A. A., and Nogueira, J. M. (2005b). A pro-active routing protocol for continuous data dissemination wireless sensor networks. In *10th IEEE Symposium on Computer and Communications (ISCC)*, pages 361–366.
- [Macedo et al., 2005c] Macedo, D. F., Correia, L. H. A., dos Santos, A. L., Loureiro, A. A., and Nogueira, J. M. (2005c). Um protocolo de roteamento configurável baseado em regras para redes de sensores sem fio. In *23º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pages 89–102.
- [Macedo et al., 2005d] Macedo, D. F., Correia, L. H. A., dos Santos, A. L., Loureiro, A. A., Nogueira, J. M., and Pujolle, G. (2005d). Evaluating Fault Tolerance Aspects in Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. In *Fourth Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop*.
- [Macedo et al., 2006] Macedo, D. F., Macedo, P. F., Correia, L. H. A., dos Santos, A. L., Nogueira, J. M. S., and Loureiro, A. A. F. (2006). Um Protocolo de Roteamento para Redes Ad Hoc com QoS Baseado no Controle da Potência de Transmissão. In *24º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pages 605–620.

- [Meguerdichian et al., 2001] Meguerdichian, S., Koushanfar, F., Qu, G., and Potkonjak, M. (2001). Exposure in wireless ad-hoc sensor networks. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 139–150. ACM Press.
- [Mihaela Cardei and Jie Wu, 2004] Mihaela Cardei and Jie Wu (2004). Energy-Efficient Coverage Problems in Wireless Ad Hoc Sensor Networks. *Journal of Computer Communications on Sensor Networks*.
- [Millennial Net, 2004] Millennial Net (2004). Millennial net: Wireless sensor networks. <http://www.millennial.net>. Acessado em novembro de 2006.
- [Monks et al., 2001] Monks, J., Bharghavan, V., and mei W. Hwu, W. (2001). A Power Controlled Multiple Access Protocol for Wireless Packet Networks. In *INFOCOM 2001: Proceedings of 20th Conference of IEEE Communications Society*, pages 219–228.
- [Monks, 2001] Monks, J. P. (2001). *Transmission Power Control for Enhancing the performance of wireless packet data networks*. Doctor of philosophy, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [MoteIV Corporation, 2006] MoteIV Corporation (2006). MoteIV Accelerating Sensor Networking. <http://www.moteiv.com/>. Acessado em novembro de 2006.
- [Motes, 2002] Motes, M. (2002). The commercialization of microsensor motes. <http://www.sensorsmag.com>. Acessado em novembro de 2006.
- [μ AMPS, 2002] μ AMPS (2002). μ AMPS Projet. <http://www-mtl.mit.edu/research/icsystems/uamps>. Acessado em novembro de 2006.
- [Narayanaswamy et al., 2002] Narayanaswamy, S., Kawadia, V., Sreenivas, R. S., and Kumar, P. R. (2002). The COMPOW protocol for power control in ad hoc networks: Theory, architecture, algorithm, implementation, and experimentation. In *European Wireless Conference*.
- [Network Simulator, 2004] Network Simulator (2004). NS-2 simulator. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acessado em novembro de 2006.
- [Ogata, 2004] Ogata, K. (2004). *Engenharia de Controle Moderno*. Pearson Prentice Hall.
- [Oh and Wasserman, 1999] Oh, S.-J. and Wasserman, K. M. (1999). Optimality of greedy power control and variable spreading gain in multi-class cdma mobile networks. In *MobiCom '99: Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 102–112, New York, NY, USA. ACM Press.

- [Ohio State University, 2006] Ohio State University (2006). ExScal: Extreme Scale Wireless Sensor Networking. <http://cast.cse.ohio-state.edu/exscal/>. Acessado em novembro de 2006.
- [Peterson and Davie, 2003] Peterson, L. L. and Davie, B. S. (2003). *Computer Networks: A Systems Approach, 3rd Edition*. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- [Pico, 2003] Pico (2003). Pico Radio. <http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Research>. Acessado em novembro de 2006.
- [Pires et al., 2004] Pires, A. A., Fontes, M. F., and de Rezende, J. F. (2004). Proposta e Avaliação de um Esquema de Controle de Potência com Memória em Redes Ad Hoc 802.11. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, Gramado, RS.
- [Polastre, 2006] Polastre, J. (2006). New Telos Mote enables high bandwidth data processing and transmission through low-power wireless mesh network. <http://www.moteiv.com/pr/2004-12-09-telosb.php>. Acessado em novembro de 2006.
- [Polastre et al., 2004] Polastre, J., Hill, J., and Culler, D. (2004). Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 95–107. ACM Press.
- [Pottie and Kaiser, 2000] Pottie, G. J. and Kaiser, W. J. (2000). Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, 43(5):51–58.
- [Pradhan, 1996] Pradhan, D. K., editor (1996). *Fault-tolerant computer system design*. Prentice-Hall, Inc.
- [Pursley et al., 2000] Pursley, M. B., Russell, H. B., and Wysocarsk, J. S. (2000). Energy-efficient transmission and routing protocols for wireless multiple-hop networks and spread-spectrum radios.
- [Qiao et al., 2003] Qiao, D., Choi, S., Jain, A., and Shin, K. G. (2003). Miser: an optimal low-energy transmission strategy for ieee 802.11a/h. In *MobiCom '03: Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 161–175, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Rajendran et al., 2003] Rajendran, V., Obraczka, K., and Garcia-Luna-Aceves, J. J. (2003). Energy-efficient collision-free medium access control for wireless sensor networks. In *Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 181–192. ACM Press.

- [Ramanathan and Rosales-Hain, 2000] Ramanathan, R. and Rosales-Hain, R. (2000). Topology Control of Multihop Wireless Networks using Transmit Power Adjustment. In *IEEE INFOCOM 2000*, volume 2, pages 404–413, Tel-Aviv, Israel.
- [Rappaport, 2002] Rappaport, T. S. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2nd edition.
- [Rashid-Farrokhi et al., 1997] Rashid-Farrokhi, F., Liu, K., and Tassiulas, L. (1997). Downlink power control and base station assignment. *IEEE Communications Letters*, 1(4):102–104.
- [Reijers et al., 2004] Reijers, N., Halkes, G., and Langendoen, K. (2004). Link layer measurements in sensor networks. In *1st IEEE Int. Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS '04)*, pages 224–234.
- [Rodoplu and Meng, 1998] Rodoplu, V. and Meng, T. (1998). Minimum energy mobile wireless networks. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Communications ICC'98*, volume 3, pages 1633–1639, Atlanta, GA, USA.
- [Ruiz, 2003] Ruiz, L. B. (2003). *MANÁ: Uma Arquitetura para o Gerenciamento de Redes de Sensores Sem Fio*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [Ruiz et al., 2004] 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., Maia, E. H. B., Camara, D., Loureiro, A. A. F., Nogueira, J. M. S., da Silva Jr., D. C., and Fernandes, A. O. (2004). Arquiteturas para Redes de Sensores Sem Fio. In *22º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pages 167 – 218.
- [Ruiz et al., 2003] Ruiz, L. B., Loureiro, A. A. F., and Nogueira, J. M. (2003). Functional and information models for the MANNA architecture. In *GRES03 - Colloque Francophone sur la Gestion de Reseaux et de Services*, pages 455–470.
- [Sankarasubramaniam et al., 2003] Sankarasubramaniam, Y., Özgür B. Akan, and Akyildiz, I. F. (2003). ESRT: event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile ad hoc networking and Computing*, pages 177–188. ACM Press.
- [Schurgers et al., 2002] Schurgers, C., Tsiatsis, V., Ganerival, S., and Srivastava, M. (2002). Optimizing sensor networks in the energy-latency-density space. In *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 1(1):, pages 70–80.
- [SIG, 2004] SIG, B. (2004). Bluetooth.org. <http://www.bluetooth.org>. Acessado em novembro de 2006.

- [Singh and Raghavendra, 1999] Singh, S. and Raghavendra, C. (1999). Pamas: Power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks.
- [Singh and Raghavendra, 1998] Singh, S. and Raghavendra, C. S. (1998). Pamas: Power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 28(3):5–26.
- [Sohrabi and Pottie, 1999] Sohrabi, K. and Pottie, G. J. (1999). Performance of novel self-organization protocol for wireless ad hoc sensor network. In *Proceedings of the IEEE 50th Vehicular Technology conference*, pages 1222–1226.
- [Son et al., 2004] Son, D., Krishnamachari, B., and Heidemann, J. (2004). Experimental study of the effects of transmission power control and blacklisting in wireless sensor networks. In *Proceedings of the First IEEE Conference on Sensor and Adhoc Communication and Networks*, pages 289–298, Santa Clara, California, USA. IEEE.
- [Tanenbaum, 2003] Tanenbaum, A. S. (2003). *Computer networks (4rd ed.)*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA.
- [Tilak et al., 2002] Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N. B., and Heinzelman, W. (2002). Infrastructure tradeoffs for sensor networks. In *Proceedings of the first ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pages 49–58. ACM Press.
- [TinyOS, 2004] TinyOS (May, 2004). Tinyos. <http://webs.cs.berkeley.edu/tos/>. Acessado em novembro de 2006.
- [TinyOS Community Forum, 2006] TinyOS Community Forum (2006). Community projects using TinyOS. http://webs.cs.berkeley.edu/user/select_users.php. Acessado em novembro de 2006.
- [TR 1000, 2004] TR 1000 (2004). ASH Tranceiver TR1000 data sheet. <http://www.rfm.com>. Acessado em novembro de 2006.
- [van Dam and Langendoen, 2003] van Dam, T. and Langendoen, K. (2003). An Adaptive Energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 171–180. ACM Press.
- [van Hoesel et al., 2003] van Hoesel, L., Chatterjea, S., and Havinga., P. (2003). An energy efficient medium access protocol for wireless sensor networks. In *ProRisc Workshop*.

- [van Hoesel and Havinga, 2004] van Hoesel, L. and Havinga, P. (2004). A lightweight medium access protocol (LMAC) for wireless sensor networks. In *Proceedings of the First International Conference on Networked Sensing Systems*.
- [Velloso et al., 2004] Velloso, P., Cunha, D., Junior, A. A., Rubinstein, M., and Duarte, O. C. M. B. (2004). Redes Domiciliares: Princípios e Desafios das Tecnologias sem Novos Fios. In *22º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pages 221 – 268.
- [Vieira, 2004] Vieira, M. A. M. (2004). Embedded system for wireless sensor network. Master’s thesis, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, Brasil.
- [Walke et al., 2001] Walke, B., Esseling, N., Habetha, J., Hettich, A., Kadelka, A., Mangold, S., Peetz, J., and Vornefeld, U. (2001). IP over Wireless Mobile ATM - Guaranteed Wireless QoS by HiperLAN/2. *Proceedings of the IEEE*, 89:21–40.
- [Wan et al., 2002] Wan, C.-Y., Campbell, A. T., and Krishnamurthy, L. (2002). PSFQ: a reliable transport protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pages 1–11. ACM Press.
- [Wattenhofer et al., 2001] Wattenhofer, R., Li, L., Bahl, P., and Wan, Y. (2001). Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless ad hoc networks. *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, pages 1388–1397.
- [Werner-Allen et al., 2005] Werner-Allen, G., Johnson, J., Ruiz, M., Lees, J., and Welsh, M. (2005). Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network. In *Proceedings of the 2nd European Workshop on Sensor Networks (EWSN’05)*.
- [Whitehouse et al., 2005] Whitehouse, K., Woo, A., Polastre, J., and Culler, D. (2005). Exploiting the capture effect for collision detection and recovery. *The Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors*, pages 45–52.
- [WINS, 2003] WINS (2003). Wireless Integrated Network Sensors (WINS). <http://www.janet.ucla.edu/WINS/>. Acessado em novembro de 2006.
- [Woo and Culler, 2001] Woo, A. and Culler, D. E. (2001). A transmission control scheme for media access in sensor networks. In *MobiCom ’01: Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 221–235.

- [Woo et al., 2003] Woo, A., Tong, T., and Culler, D. (2003). Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks. In *Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 14–27. ACM Press.
- [Wu et al., 2001] Wu, S.-L., Tseng, Y.-C., Lin, C.-Y., and Sheu, J.-P. (2001). A multi-channel mac protocol with power control for multi-hop mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing Systems*, page 419. IEEE Computer Society.
- [Xiao, 2004] Xiao, Y. (2004). Ieee 802.11e: A qos provisioning at the mac layer. *IEEE Wireless Communications*, 11(3):72–79.
- [Ye et al., 2002] Ye, W., Heidemann, J., and Estrin, D. (2002). An Energy-Efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the IEEE Infocom*, pages 1567–1576, New York, NY, USA. USC/Information Sciences Institute, IEEE.
- [Younis et al., 2004] Younis, M., Akkaya, K., Eltoweissy, M., and Wadaa, A. (2004). On handling qos traffic in wireless sensor networks. In *HICSS '04: Proceedings of the Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'04) - Track 9*, page 90292.1. IEEE Computer Society.
- [Zheng and Lee, 2004a] Zheng, J. and Lee, M. J. (2004a). A comprehensive performance study of ieee 802.15.4.
- [Zheng and Lee, 2004b] Zheng, J. and Lee, M. J. (2004b). Will IEEE 802.15.4 make ubiquitous networking a reality?: a discussion on a potential low power, low bit rate standard. *IEEE Communications Magazine*, 42(6):277–288.

Apêndice A

Lista de Publicações

As contribuições principais deste trabalho foram publicadas em conferências e periódicos nacionais e internacionais. Foram publicados três artigos completos em conferências nacional, um artigo em conferência internacional e duas publicações em periódico internacional.

1. Luiz H. A. Correia, Daniel F. Macedo, Aldri Luiz dos Santos, Antonio A. Loureiro, José M. Nogueira. Ajustando a Potência de Transmissão em Protocolos MAC para Redes de Sensores Sem Fio. In 24° Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2006), pages 589-604, 2006.
2. Daniel F. Macedo, Pedro F. Macedo, Luiz H. A. Correia, Aldri Luiz dos Santos, Antonio A. Loureiro, José M. Nogueira. Um Protocolo de Roteamento para Redes Ad Hoc com QoS Baseado no Controle da Potência de Transmissão. In 24° Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2006), pages 605-620, 2006.
3. Daniel F. Macedo, Luiz H. A. Correia, Aldri L. dos Santos, Antonio A. F. Loureiro, José M. Nogueira. A Rule-based Adaptive Routing Protocol for Continuous Data Dissemination in WSNs. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 66, no. 4, pp 542-555, April 2006.
4. Luiz H. A. Correia, Daniel F. Macedo, Daniel A. C. Silva, Aldri L. dos Santos, Antônio A. F. Loureiro, and José Marcos S. Nogueira. Transmission power control in mac protocols for wireless sensor networks. In *MSWiM '05: Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pages 282–289, New York, NY, USA, 2005. ACM Press.

5. Luiz Henrique Andrade Correia, Daniel Fernandes Macedo, Aldri Luiz dos Santos, José Marcos S. Nogueira, and Antônio Alfredo Ferreira Loureiro. A taxonomy for medium access control protocols in wireless sensor networks. *Annales des Télécommunications (Annals of telecommunications)*, 60(7-8):944–969, July/August 2005.
6. Luiz H. A. Correia and Daniel Fernandes Macedo and Daniel Andrade Costa Silva and Aldri Luiz dos Santos and Antonio Alfredo Ferreira Loureiro and José Marcos S. Nogueira. Controle de Potência de Transmissão em Protocolos MAC para Redes de Sensores Sem Fio. In *XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT*, pages 709–714, September 2005.

Outras contribuições importantes na área de desenvolvimento de protocolos em RSSFs foram publicadas em conferências nacionais e internacionais. Foram publicados:

1. Daniel F. Macedo, Luiz H. A. Correia, Aldri Luiz dos Santos, Antonio A. Loureiro, and José M. Nogueira. Um protocolo de roteamento configurável baseado em regras para redes de sensores sem fio. In *23º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pages 89–102, May 2005.
2. Daniel F. Macedo, Luiz H. A. Correia, Aldri L. dos Santos, Antônio A. Loureiro, and José M. Nogueira. A pro-active routing protocol for continuous data dissemination wireless sensor networks. In *10th IEEE Symposium on Computer and Communications (ISCC)*, pages 361–366, June 2005.
3. Daniel F. Macedo, Luiz H. A. Correia, Aldri Luiz dos Santos, Antônio A. Loureiro, José M. Nogueira, and Guy Pujolle. *Evaluating Fault Tolerance Aspects in Routing Protocols for Wireless Sensor Networks*. In *Fourth Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop*, June 2005.
4. Daniel F. Macedo, Luiz H. A. Correia, Aldri Luiz dos Santos, Antônio A. Loureiro, and José M. Nogueira. Avaliando aspectos de tolerância a falhas em protocolos de roteamento para redes de sensores sem fio. In *VI Workshop de Testes e Tolerância a Falhas*, pages 15–26, 2005.
5. Daniel Fernandes Macedo, Luiz Henrique Andrade Correia, Antonio Alfredo Ferreira Loureiro, and José Marcos Nogueira. PROC: Um Protocolo Pró-ativo com Coordenação de Rotas em Redes de Sensores sem Fio. In *22º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pages 571 – 574, Maio 2004.

6. Linnyer Beatrys Ruiz, Luiz H. A. Correia, Luiz Filipe M. Vieira, Daniel F. Macedo, Eduardo F. Nakamura, Carlos M. S. Figueiredo, Marcos Augusto M. Vieira, Eduardo Habib B. Maia, Daniel Camara, Antônio A. F. Loureiro, José Marcos S. Nogueira, Diógenes C. da Silva Jr., and Antônio O. Fernandes. Arquiteturas para Redes de Sensores Sem Fio. In *22º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pages 167 – 218, Maio 2004.