



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Dissertação de Mestrado

**Diversidade Cooperativa Adaptativa Aplicada
a Redes de Sensores sem Fio**

Marcelo Portela Sousa

Campina Grande – PB
Setembro - 2009

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Diversidade Cooperativa Adaptativa Aplicada a Redes de Sensores sem Fio

Marcelo Portela Sousa

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como requisito necessário para obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Comunicações.

Marcelo Sampaio de Alencar
Orientador

Waslon Terlizzie Araújo Lopes
Orientador

Campina Grande – PB, Paraíba, Brasil

©Marcelo Portela Sousa

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S725d

2009 Sousa, Marcelo Portela.

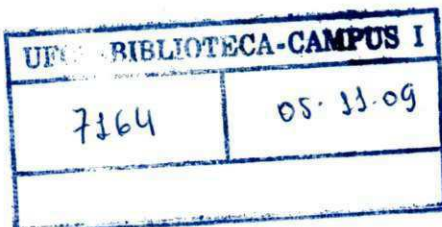
Diversidade cooperativa adaptativa aplicada a redes de sensores sem fio /Marcelo Portela Sousa. — Campina Grande, 2009.
87 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática. Referências.

Orientadores: Prof. Dr. Marcelo Sampaio de Alencar e Prof. Dr. Waslon Terllizzie Araújo Lopes

1. Redes de Sensores sem Fio. 2. Diversidade Cooperativa Adaptativa. 3. Avaliação de Desempenho. . I. Título.

CDU 621.39(043)



**DIVERSIDADE COOPERATIVA ADAPTATIVA APLICADA A REDES
DE SENSOES SEM FIO**

MARCELO PORTELA SOUSA

Dissertação Aprovada em 14.09.2009



MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR, Ph.D., UFCG
Orientador



WASLON TERLLIZZIE ARAÚJO LOPES, D.Sc., ÁREA I FTE
Orientador



JOSÉ EWERTON POMBO DE FARIAS, Dr., UFCG
Componente da Banca



WAMBERTO JOSÉ LIRA DE QUEIROZ, D.Sc., UFC
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
SETEMBRO - 2009

Aos meus pais Emanuel Marcelino e Orieta Portela.

Agradecimentos

- A Deus por me proporcionar o querer, o poder e o conseguir;
- Aos meus pais Emanuel Marcelino e Orieta Portela pelo amor que criou e lapidou;
- Aos meus também pais, Gilmor Farenzena e Dilma Reis pela educação e exemplos de boa conduta;
- Aos meus irmãos que me fazem rir das lembranças de infância, em especial, Matheus Portela;
- Aos demais familiares que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho;
- Aos professores Marcelo Sampaio de Alencar e Waslon Terllizzie Araújo Lopes pela amizade, orientação acadêmica, e pelo compartilhamento de conhecimentos valiosos e ferramentas para a execução deste trabalho;
- Ao professor Eduard Montgomery pela amizade, dicas de programação em C e pelos livros que tanto me ajudaram;
- Ao meu amigo Ajey Kumar pelo companherismo;
- Ao Iecom, que forneceu a infraestrutura necessária para a realização deste trabalho. Agradeço também ao grupo de colaboradores do Instituto, pelos conselhos, suporte técnico e momentos de descontração;
- Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande e à Copele;
- Ao CNPq pelo apoio financeiro, sem o qual seria impossível a realização deste trabalho.

*“And what’s the good of diversity?”
“I don’t know. It’s certainly more ... interesting.”*

—ISHMAEL (Daniel Quinn)

Resumo

Redes de sensores sem fio (RSSFs) têm se tornado populares em diversas áreas de aplicações industriais, civis, multimídia, etc. O desempenho desses sistemas pode ser melhorado pela utilização da técnica de diversidade cooperativa adaptativa (SCA), que é basicamente um projeto de relacionamento entre camadas que combina o ARQ Truncado na camada de enlace e a diversidade cooperativa na camada física. Adicionalmente, o protocolo LEACH provê a vantagem de utilizar a rotação aleatória de coordenadores de grupo locais, para igualmente distribuir a dissipação de energia entre os nós sensores na rede. Este trabalho propõe um sistema integrado, o SCA com LEACH, e avalia seu desempenho em relação ao sistema LEACH com ARQ Truncado. A comparação é baseada no tempo de vida da rede e taxa de perda de pacote do sistema, sob a variação de cenários de propagação, número de retransmissões, energia inicial por nó, comprimento do pacote de dados e tamanho físico da rede. A qualidade de transmissão de imagens usando as duas técnicas também é avaliada. Resultados de simulações mostram um melhor desempenho do sistema proposto.

Palavras-chave: RSSF, Diversidade Cooperativa Adaptativa, SCA, Protocolo LEACH, Avaliação de Desempenho.

Abstract

Wireless sensor networks (WSNs) are becoming popular in many applications, such as industrial, civilian, multimedia, etc. The need to improve the performance of such systems can be attained by using the adaptive cooperative diversity (SCA) technique, which is basically a cross-layer design that combines Truncated ARQ at the link layer and cooperative diversity at the physical layer. In addition, the LEACH protocol has the advantage of utilizing randomized rotation of local cluster-heads to evenly distribute the energy load among the sensors in the network. This dissertation proposes an integrated system, SCA with LEACH and evaluates its performance with LEACH with Truncated ARQ system. A comparison is obtained based on network lifetime and packet loss rate of the system under varying propagation scenarios, number of retransmissions, initial energy by node, packet length and network size. The performance of image transmissions using both techniques is also evaluated. Simulation results show better performances for the proposed system.

Keywords: WSN, Adaptive Cooperative Diversity, SCA, LEACH Protocol, Performance Evaluation.

Sumário

1	Introdução	1
2	Redes de Sensores sem Fio	4
2.1	Introdução	4
2.2	Histórico da Evolução das Redes de Sensores sem Fio	5
2.3	Características dos Nós Sensores	6
2.4	Propriedades das Redes de Sensores sem Fio	10
2.5	Aplicações das Redes de Sensores sem Fio	18
2.5.1	Aplicações Domésticas	18
2.5.2	Aplicações Militares	19
2.5.3	Aplicações Ambientais	20
2.5.4	Aplicações Médicas	22
2.5.5	Aplicações Industriais	23
2.5.6	Aplicações Multimídia	23
2.6	Desafios em Redes de Sensores sem Fio	25
3	O Protocolo LEACH	27
3.1	Introdução	27
3.2	O Funcionamento do Protocolo LEACH	27
3.3	Formação de Grupos	28
3.4	Fusão e Transmissão das Informações Sensoriadas	30
3.5	Múltiplos Grupos	30
3.6	LEACH e Outros Protocolos	31
4	Diversidade Cooperativa Adaptativa Aplicada a Redes de Sensores sem Fio	35
4.1	Introdução	35
4.2	O Desvanecimento em Comunicações sem Fio	36
4.3	Pedido Automático de Repetição Truncado	36
4.4	Diversidade em Redes sem Fio	37
4.5	Diversidade Cooperativa	38

4.5.1	Diversidade Cooperativa Adaptativa	40
4.6	O Sistema Proposto	40
4.6.1	O Modelo do Canal	41
5	Codificação em Bloco Espaço-Temporal	44
5.1	Introdução	44
5.2	O Esquema de Alamouti	44
5.3	O Esquema de Codificação STBC	48
5.3.1	A Codificação para Constelações de Sinais Reais	49
5.3.2	A Codificação para Constelações de Sinais Complexos	52
5.4	O Esquema de Decodificação STBC	54
6	Parâmetros das Simulações e Resultados	59
6.1	Introdução	59
6.2	Parâmetros das Simulações	59
6.3	Desempenho Relativo ao Tempo de Vida da Rede	61
6.4	Desempenho Relativo à Taxa de Perda de Pacote	66
6.5	Desempenho em Redes de Sensores Multimídia sem Fio	70
7	Conclusões e Perspectivas	75
A	Exemplo de Eleição de Coordenadores de Grupo sob o Protocolo LEACH	77
B	Artigos Produzidos	79
	Referências Bibliográficas	81

Lista de Figuras

2.1	Rede de sensores sem fio típica.	7
2.2	Componentes de um nó sensor.	9
2.3	Modelo genérico da pilha de protocolos para RSSFs.	14
2.4	Mapa de energia de uma RSSF.	18
2.5	A cama aquece 01h30 após a pessoa acordar, para matar ácaros.	19
2.6	RSSFs aplicadas à agricultura de precisão.	21
2.7	O nó sensor Mica (esquerda) e o <i>Mica Weather Board</i> para o monitoramento ambiental.	22
2.8	O nó sensor em uma cápsula de acrílico para proteção.	23
2.9	Aplicações em processos industriais.	24
2.10	Rede de sensores multimídia sem fio.	24
3.1	Diferentes formações de grupos em uma RSSF.	29
3.2	Interferência de transmissão entre os nós sensores.	31
3.3	Roteamento por comunicação direta, em que os nós inativos são representados por pontos.	32
3.4	Roteamento por MTE, em que os nós inativos são representados por pontos.	33
3.5	Utilização do protocolo LEACH, em que os nós inativos são representados por pontos.	33
4.1	Diversidade cooperativa em redes sem fio.	39
4.2	Esquema <i>cross-layer</i> da diversidade cooperativa adaptativa.	40
4.3	Operação da diversidade cooperativa adaptativa para RSSFs.	42
4.4	Representação do modelo do canal.	43
5.1	Diagrama de blocos do codificador espaço-temporal de Alamouti.	45
5.2	Diagrama de blocos do receptor de Alamouti.	46
5.3	Diagrama de blocos da codificação STBC.	48
6.1	Taxa de erro de <i>bit</i> como uma função da SNR.	61
6.2	Tempo de vida da rede em função do número máximo de retransmissões.	62

6.3	Tempo de vida da rede para o LEACH com ARQ Truncado.	63
6.4	Tempo de vida da rede para o SCA com LEACH.	63
6.5	Tempo de vida da rede em função da energia inicial permitida por nó.	65
6.6	Tempo de vida da rede em função do tamanho físico da rede.	65
6.7	Tempo de vida da rede em função do comprimento do pacote de dados.	66
6.8	Taxa de perda de pacote em função da energia inicial permitida por nó.	68
6.9	Taxa de perda de pacote em função do número máximo de retransmissões.	68
6.10	Taxa de perda de pacote em função do tamanho físico da rede.	69
6.11	Taxa de perda de pacote em função do comprimento do pacote de dados.	69
6.12	Lena original.	71
6.13	LEACH+T.ARQ, Cenário Um.	72
6.14	SCA+LEACH, Cenário Um.	72
6.15	LEACH+T.ARQ, Cenário Dois.	72
6.16	SCA+LEACH, Cenário Dois.	72
6.17	LEACH+T.ARQ, Cenário Três.	73
6.18	SCA+LEACH, Cenário Três.	73
6.19	LEACH+T.ARQ, Cenário Quatro.	73
6.20	SCA+LEACH, Cenário Quatro.	73
6.21	PSNR da imagem Lena em função do cenário de propagação.	74

Lista de Tabelas

2.1	Possíveis protocolos para RSSFs (camadas inferiores).	14
2.2	Custos de energia de algumas operações no <i>mote</i> Mica.	22
6.1	Tempo de vida usando diferentes quantidades de energia inicial por nó.	60
6.2	Cenários com intervalos de SNR.	61
6.3	Quantidade de ciclos para a inativação do primeiro nó.	64
6.4	Quantidade de ciclos para a inativação do último nó.	64
6.5	Taxa de perda de pacote geral.	67
6.6	Taxa de perda de pacote devido à inativação dos nós.	67
6.7	PSNR da imagem Lena em função do cenário de propagação.	72
A.1	Escolha aleatória de números entre 0 e 1.	78
A.2	Eleição dos coordenadores de grupo.	78

Lista de Siglas

ACK – Acknowledgement
AWGN – Additive White Gaussian Noise
ARQ – Automatic Repeat Request
CSMA – Carrier Sense Multiple Access
C1RSSFs – Categoria 1 RSSFs
C2RSSFs – Categoria 2 RSSFs
CSI – Channel State Information
CDMA – Code Division Multiple Access
COTS – Commercial Off the Shelf
CAD – Conversor Analógico-Digital
CF – Coordenador Fonte
CCPs – Coordenadores Candidatos a Parceiros
CEPs – Coordenadores Eleitos Parceiros
CRC – Cyclic Redundancy Check
DARPA – Defense Advanced Research Projects Agency
FoR – Field of Regard
FoV – Field of View
FEC – Forward Error Correction
GPS – Global Positioning System
GDI – Great Duck Island
ISM – Industrial, Scientific, and Medical
IEEE – Institute of Electrical and Eletronics Engineering
LoS – Line-of-Sight
LANs – Local Area Networks
LEACH – Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
MEMS – Microscale Electro-Mechanical Systems
MTE – Minimum Transmission Energy
MANETs – Mobile Ad hoc Networks
MPEG-4 – Moving Pictures Expert Group 4
MIMO – Multiple-Input Multiple-Output

NEMS – *Nanoscale Electro-Mechanical Systems*
NOAA – *National Oceanographic and Atmospheric Administration*
ND – *Nó Destino*
NACK – *Non-Acknowledgement*
OEMs – *Original Equipment Manufacturers*
OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
PTZ – *Pan-Tilt-Zoom*
PSNR – *Peak Signal-to-Noise Ratio*
PAN – *Personal Area Network*
P&D – *Projeto e Desenvolvimento*
RSD – *Rede de Sensores Distribuídas*
RSSF – *Rede de Sensores sem Fio*
SCA – *Selective Cooperative diversity with ARQ*
STBC – *Space-Time Block Coding*
TI – *Tecnologia da Informação*
TDMA – *Time Division Multiple Access*
T. ARQ – *Truncated ARQ*
VLSI – *Very Large Scale Integration*
Wi-Fi – *Wireless Fidelity*
WMSNs – *Wireless Multimedia Sensor Networks*

Lista de Símbolos

- $T(n)$ – Limiar de decisão para eleição dos coordenadores de grupo
- P – Percentual desejado de coordenadores de grupo
- r – Ciclo corrente
- G – Conjunto de nós que ainda não se tornaram coordenadores nos últimos $\frac{1}{P}$ ciclos
- d_{AB} – Distância do nó A para o nó B
- d_{BC} – Distância do nó B para o nó C
- d_{AC} – Distância do nó A para o nó C
- K – Número de nós sensores da rede
- Q – Número de coordenadores de grupo da rede
- C – Número de *bits* do CRC
- N_r^{\max} – Número máximo de retransmissões
- v – Número de coordenadores parceiros
- P_t – Potência de transmissão por símbolo
- $x_{t_0+\zeta}^s$ – Símbolo que utiliza a modulação M -QAM
- ζ – Número de símbolos por pacote
- h_0 – Variável aleatória que representa o ganho do canal
- σ_0^2 – Variância do ganho do canal
- z_0 – Variável aleatória que representa o ruído AWGN
- δ_0 – Variância do ruído AWGN
- m – Número de *bits* por símbolo
- x – Símbolo modulado no transmissor
- x^* – Conjugado complexo do símbolo
- \mathbf{x} – Sequência de transmissão
- \mathbf{X} – Matriz de código
- t – Instante de tempo
- $h(t)$ – Coeficiente de desvanecimento do canal
- $|h|$ – Ganho de amplitude do percurso
- θ – Mudança de fase do percurso
- T – Duração do símbolo
- n – Amostra de ruído gaussiano branco aditivo

N_0 – Densidade espectral de potência do ruído

\hat{x} – Símbolo disponível a partir da constelação de sinais

\tilde{x} – Estatística de decisão

R – Taxa do código STBC

E_{elec} – Energia gasta por *bit* para a utilização dos circuitos de transmissão e recepção

ϵ_{amp} – Energia gasta por *bit* pelo amplificador de transmissão

E_b – Energia de *bit*

$E_{Tx}(k, d)$ – Energia gasta para transmitir uma mensagem de k *bits* por uma distância d

$E_{Rx}(k)$ – Energia gasta para receber uma mensagem de k *bits*

$G_{\text{CRC16}}(D)$ – Gerador polinomial cíclico de 16 *bits*

L – Comprimento do pacote de dados em *bits*

$P_{\text{máx}}$ – Pico de amplitude do sinal de entrada

$F(l, c)$ – Valor do *pixel* da imagem original na linha l e coluna c

$\hat{F}(l, c)$ – Valor do *pixel* da imagem processada na linha l e coluna c

CAPÍTULO 1

Introdução

Os avanços em tecnologias de sistemas eletromecânicos em escala micrométrica (*Microscale Electro-Mechanical Systems* – MEMS), sistemas eletromecânicos em escala nanométrica (*Nanoscale Electro-Mechanical Systems* – NEMS), comunicações sem fio e componentes eletrônicos digitais têm proporcionado o desenvolvimento de nós sensores de baixo custo e baixo consumo de energia. Uma rede de sensores sem fio (RSSF) consiste de nós sensores depositados sobre uma área geográfica, para o monitoramento de grandezas e fenômenos físicos incluindo temperatura, umidade, vibrações, eventos sísmicos, etc. [1]. Tipicamente, um nó sensor é um dispositivo de tamanho reduzido, que possui três componentes básicos: um subsistema de sensoriamento para a aquisição de dados a partir do ambiente monitorado, um subsistema de processamento para o processamento e armazenamento local dos dados e um subsistema de comunicação sem fio para a transmissão e recepção dos dados. Adicionalmente, uma fonte provê a energia necessária para que o dispositivo desempenhe as tarefas programadas. Essa fonte de energia frequentemente consiste de uma bateria com quantidade de energia limitada. Uma rede de sensores deve apresentar um tempo de vida¹ suficientemente longo para cumprir as necessidades da aplicação projetada [3].

Nós sensores em RSSFs possuem variadas propostas, funções e habilidades. Redes de radar usadas em controle de tráfego aéreo, malhas de rede elétrica e estações de monitoramento e previsão de condições climáticas são exemplos de recentes aplicações das redes de sensores. A pesquisa e desenvolvimento em redes de sensores sem fio é uma área multidisciplinar que envolve, entre outros, sistemas de radiofrequência, operação de redes de dispositivos sem fio, processamento de sinais, inteligência artificial, gerenciamento de banco de dados, arquitetura de sistemas, otimização de recursos, algoritmos de gerenciamento de energia e tecnologias de plataformas (*hardware* e *software*, assim como sistemas operacionais).

¹O tempo de vida de uma rede de sensores é o intervalo de tempo compreendido entre o início da operação dos nós sensores até a rede ser considerada não funcional. Essa consideração depende da aplicação para a qual a rede é projetada [2]. Para redes com formação e operação que apresentem um período ou formação pré-determinada, outras métricas devem ser adotadas.

Os nós de uma RSSF possuem recursos bastante limitados, tais como reduzida capacidade computacional, pouca memória e pequena reserva de energia. Além disso, em muitas aplicações, os nós sensores são colocados em áreas remotas, o que não permite facilmente o acesso a esses elementos para manutenção. Nesse cenário, o tempo de vida da rede depende da quantidade de energia disponível nos nós sensores e, por isso, eles devem balancear seus recursos limitados com o objetivo de aumentar o tempo de vida da rede. Portanto, a conservação de energia é um dos aspectos mais importantes a serem considerados no projeto das RSSFs.

Vários métodos têm sido propostos para aumentar o tempo de vida em redes de sensores sem fio. Protocolos baseados em grupos (*clusters*) se destacam entre os métodos bem sucedidos em economia de energia. Heinzelman *et al* desenvolveram o LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*), um protocolo baseado na formação de grupos, que minimiza o consumo de energia em redes de sensores. O LEACH supera os algoritmos clássicos de formação de grupos, por meio da utilização de grupos adaptativos e da rotatividade dos coordenadores de grupo (*cluster-heads*), permitindo que as demandas de energia do sistema sejam distribuídas por todos os nós da rede. Além disso, o LEACH tem a propriedade de desempenhar o processamento local em cada grupo, para reduzir a quantidade de dados a serem transmitidos ao nó destino (*sink node*). Isso proporciona uma considerável redução na dissipação de energia, pois, de fato, a quantidade de energia requerida pela função processamento é bem menor do que a quantidade de energia requerida pela função de comunicação [4].

Nos canais de comunicações das RSSFs, o desvanecimento causado pelo multipercorso pode degradar o desempenho do sistema de comunicações. O pedido automático de repetição (*Automatic Repeat Request – ARQ*) é uma maneira efetiva para superar o desvanecimento do canal, em que a verificação de redundância cíclica (*Cyclic Redundancy Check – CRC*) é usada para a constatação de erros e retransmissões são requeridas se o pacote for recebido de forma errônea. Se a utilização do ARQ possuir um limite para o máximo número de retransmissões, então a técnica é denominada ARQ truncado (*Truncated ARQ*) [5], [6].

As técnicas de diversidade também podem melhorar o desempenho dos sistemas de comunicações em RSSFs, visto que réplicas dos sinais transmitidos são disponibilizadas para o nó destino [7], [8], [9]. Diversidade espacial, diversidade temporal e diversidade em modulação são exemplos de técnicas de diversidade típicas. Entre as técnicas citadas, a utilização de múltiplas antenas para a viabilização da diversidade espacial apresenta bons resultados no combate ao desvanecimento em comunicações sem fio.

Entretanto, devido ao reduzido tamanho dos nós sensores e das restrições de energia presentes na rede, a aplicação das técnicas de diversidade pelo uso de múltiplas antenas pode ser inviável em alguns tipos de redes de sensores sem fio. Para superar essa limitação novas formas de diversidade espaço-temporal, em que ganhos de diversidade são obtidos por meio da cooperação dos nós, têm sido apresentadas. Lin Dai *et al* propuseram o esquema de diversidade cooperativa seletiva com ARQ (*Selective Cooperative diversity with ARQ – SCA*), no qual o ganho de diversidade cooperativa adaptativa pode ser alcançado e a propagação do erro é evi-

tada [10]. No sistema SCA, para codificar os sinais de forma distribuída entre os nós da rede, foram utilizados blocos espaço-temporais.

A codificação em bloco espaço-temporal (*Space-Time Block Coding – STBC*) é um paradigma para diversidade em comunicações sobre canais com desvanecimento Rayleigh, utilizando múltiplas antenas transmissoras [11]. Os códigos STBCs são uma extensão da proposta apresentada por Alamouti, que projetou um esquema de diversidade para no máximo duas antenas transmissoras e duas antenas receptoras [12]. Na técnica de STBC, os dados codificados em espaço e tempo são divididos em n seqüências que são simultaneamente transmitidas por n antenas. O sinal recebido em cada antena receptora é uma superposição linear dos n sinais transmitidos e perturbados pelos efeitos do canal. Então, é realizada a decodificação por máxima verossimilhança em uma maneira simples, por meio da separação dos sinais transmitidos a partir das diferentes antenas, em vez da detecção conjunta. A técnica de STBC provê a diversidade completa e baixa complexidade nos processos de codificação e decodificação [13].

Neste trabalho, é proposto o desenvolvimento do SCA com LEACH, um sistema que combina a operação do esquema de diversidade cooperativa adaptativa, SCA, com o protocolo LEACH, para redes de sensores sem fio. O sistema de codificação adotado é o STBC. Para avaliar o desempenho do sistema proposto, são utilizados três métricas: o tempo de vida da rede; a taxa de perda de pacote da rede; e a razão sinal-ruído de pico (*Peak Signal-to-Noise Ratio*).

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: o Capítulo 2 faz uma revisão dos principais tópicos e características das RSSFs. O protocolo LEACH, suas fases de iteração e importância em relação à otimização no uso de energia da rede são abordados no Capítulo 3. O Capítulo 4 apresenta algumas características de desvanecimento presentes nos canais de comunicações sem fio e algumas opções para o combate desse efeito. A técnica de diversidade cooperativa adaptativa é detalhada, assim como a sua aplicação e combinação com as RSSFs. O Capítulo 5 discute a codificação em bloco espaço-temporal, incluindo modelos de codificação e decodificação. Os parâmetros adotados nas simulações executadas, assim como os resultados e discussões dessas simulações são mostrados no Capítulo 6. As conclusões e perspectivas de trabalhos futuros estão apresentadas no Capítulo 7.

CAPÍTULO 2

Redes de Sensores sem Fio

2.1 Introdução

Uma rede de sensores sem fio é composta de elementos de sensoriamento, processamento computacional e de comunicações, que viabilizam ao administrador, funcionalidades como instrumentação, monitoramento e reação a eventos e fenômenos em um ambiente específico. O administrador é tipicamente uma entidade civil, governamental, comercial, militar ou industrial. O ambiente pode conter sistemas físicos, químicos ou biológicos, ou uma estrutura de Tecnologia da Informação (TI). Aplicações típicas incluem coleta de dados, monitoramento, vigilância e telemetria médica. Além da capacidade de sensoriamento, as RSSFs podem ser projetadas para prover habilidades de atuação e controle [14]. A habilidade de comunicação em RSSFs não apenas permite que sejam transmitidas informações e dados de controle pela rede, mas que os nós sensores cooperem em desempenhar tarefas mais complexas, como amostragem estatística e agregação de dados [15], [16].

Existem quatro componentes básicos em uma rede de sensores sem fio:

1. Um conjunto de nós sensores distribuídos aleatoriamente ou não;
2. Uma rede de interconexão sem fio;
3. Uma estação central para agrupamento e processamento de informações;
4. Um conjunto de recursos computacionais na estação central para manipular dados, tendência de eventos, solicitações de tarefas, etc.

Devido à considerável quantidade de informações coletadas e à necessidade de autonomia de organização e gerenciamento da energia utilizada [3], algoritmos para o gerenciamento de dados desempenham uma importante função em redes de sensores sem fio. A infraestrutura de computação e comunicação associada com as RSSFs é frequentemente especificada de acordo com o ambiente de implantação. Diferentemente dos outros tipos de rede, o processamento das informações na própria rede (interno) é desejável. As informações coletadas são

tipicamente paramétricas, mas com a disseminação de vídeos de baixas taxas de *bits* (e.g. *Moving Pictures Expert Group 4* – MPEG-4) e novos algoritmos de processamento de imagens, alguns sistemas também suportam esses tipos de mídia.

Este capítulo apresenta as principais características das redes de sensores sem fio. Inicialmente, um breve histórico da evolução das RSSFs é descrito em quatro fases. Na sequência, são apresentadas as tecnologias integrantes e características das RSSFs, assim como alguns tipos de sensores, protocolos de comunicação, aplicações e principais desafios envolvidos.

2.2 Histórico da Evolução das Redes de Sensores sem Fio

Quatro fases caracterizam a evolução das redes de sensores sem fio [17]:

Fase 1: Redes de Sensores na Fase da Guerra Fria – Durante a Guerra Fria, extensivas redes de sensores acústicos foram desenvolvidas pelos Estados Unidos para vigilância submarina. Alguns desses sensores ainda são usados pela NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*) para monitorar atividades sísmicas nos oceanos. Além disso, redes de radar para defesa aérea foram desenvolvidas para cobrir a América do Norte.

Fase 2: Iniciativas da DARPA – Um expressivo incremento em pesquisas em redes de sensores sem fio aconteceu no início da década de 1980, por meio de programas patrocinados pela DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*). As pesquisas em Redes de Sensores Distribuídos (RSDs) objetivavam determinar se novos protocolos TCP-IP e o ARPANet (o antecessor da Internet) poderiam ser usados no contexto de redes de sensores. A pesquisa e desenvolvimento das RSDs proporcionaram a produção de vários nós sensores espacialmente distribuídos de baixo custo para operarem de forma colaborativa, ainda que autônoma. As RSDs focaram em computação distribuída, processamento de sinais e rastreamento. As principais tecnologias incluíam sensores acústicos, protocolos de comunicação em alto nível, processamento de algoritmos (e.g., algoritmos de auto-localização para nós sensores) e programas distribuídos (possibilidade de modificação dinâmica de sistemas distribuídos) [17]. Pesquisadores da Universidade de Carnegie Mellon realizaram projetos para o desenvolvimento de sistemas de rede para acesso transparente flexível visando distribuir recursos; pesquisadores do Instituto Tecnológico de Massachusetts focaram em técnicas baseadas em processamento de sinais. Testes foram desenvolvidos para o rastreamento de múltiplos alvos em um ambiente distribuído e todos os componentes foram projetados e fabricados especificamente para esses testes. Outros trabalhos ao longo da década de 1980 resultaram no desenvolvimento de um algoritmo de rastreamento de múltiplas hipóteses para solucionar problemas envolvendo alta densidade de alvos, detecções perdidas e alarmes falsos [14].

Fase 3: Aplicações Militares nas décadas de 1980 e 1990 – Essa fase é a primeira geração relativa a produtos comerciais ligados a tecnologias de RSSFs. Baseado nos resultados gerados pelas pesquisas e os testes desenvolvidos pela DARPA em RSDs, projetistas militares decidiram nas décadas de 1980 e 1990 adotar a tecnologia de redes de sensores, tornando-a um fator importante em cenários de guerra. Um esforço foi feito para iniciar o emprego das tecnologias COTS (*Commercial Off the Shelf*)¹ e interfaces de redes comuns, de modo a reduzir o custo e tempo de desenvolvimento. Em ambientes de guerra, as redes de sensores podem melhorar o desempenho de detecção e rastreamento, com o uso de múltiplas observações, diversidade geométrica e fenomenológica, região de detecção estendida e tempo de resposta mais rápido [17]. Nessa geração, o tempo de vida médio de operação das redes de sensores era constituído por horas até dias.

Fase 4: Redes de Sensores sem Fio na Época Atual – É conhecida como a segunda geração comercial de redes de sensores sem fio. Avanços nos sistemas de comunicações e de processamento computacional que ocorreram no fim da década de 1990 e começo da década de 2000 resultaram em uma nova geração de tecnologias de redes de sensores. A evolução das redes de sensores sem fio está relacionada à evolução dos sensores tradicionais. Sensores compactos e de baixo custo baseado em um número de tecnologias de alta densidade, incluindo MEMS e NEMS surgiram nessa fase. Avanços em redes baseadas no IEEE 802.11 a/b/g e outros sistemas sem fio, como o Bluetooth [18], ZigBee [19] e WiMax [20] facilitam a conectividade de forma confiável e pervasiva. Processadores de baixo custo que possuem requisitos de baixo consumo de energia tornam possível a aplicação dos sensores em diversos contextos. O tempo de vida médio de operação das RSSFs nessa fase compreende o intervalo de dias até semanas.

A terceira geração comercial de redes de sensores sem fio acontece no fim da década de 2000, sendo acompanhada de um aumento no tempo de vida médio de operação das redes de sensores (meses a anos) e de um avanço no desenvolvimento das tecnologias embarcadas para as aplicações projetadas.

2.3 Características dos Nós Sensores

Uma rede de sensores é composta de um número de nós sensores que são densamente depositados em ambientes específicos. Cada nó sensor possui a função de coletar dados, analisá-los e roteá-los para um nó destino designado. A Figura 2.1 ilustra o contexto de uma RSSF típica. No cenário apresentado, sensores remotos desempenham a função de monitoramento e detecção de eventos e transmitem as informações coletadas para o coordenador de grupo. Essa transmissão ocorre por saltos múltiplos, ou por saltos únicos, dependendo de diversos fatores

¹O termo COTS é usado para tecnologias de equipamentos e produtos de computação em geral, que estão à venda, financiados ou licenciados para o público geral.

do projeto (e.g., distância entre os nós envolvidos, nível de energia, atendimento às solicitações, etc.). O coordenador de grupo desempenha funções mais robustas, processando e agregando os dados de seu grupo, assim como realizando transmissões por maiores distâncias dos dados processados. Essa diferenciação na hierarquia funcional da rede resulta em um maior consumo de energia por parte do coordenador de grupo e pode conter características diferenciadas referentes aos equipamentos e programas. O nó destino recebe as informações resultantes dos diversos coordenadores de grupo distribuídos pela rede.

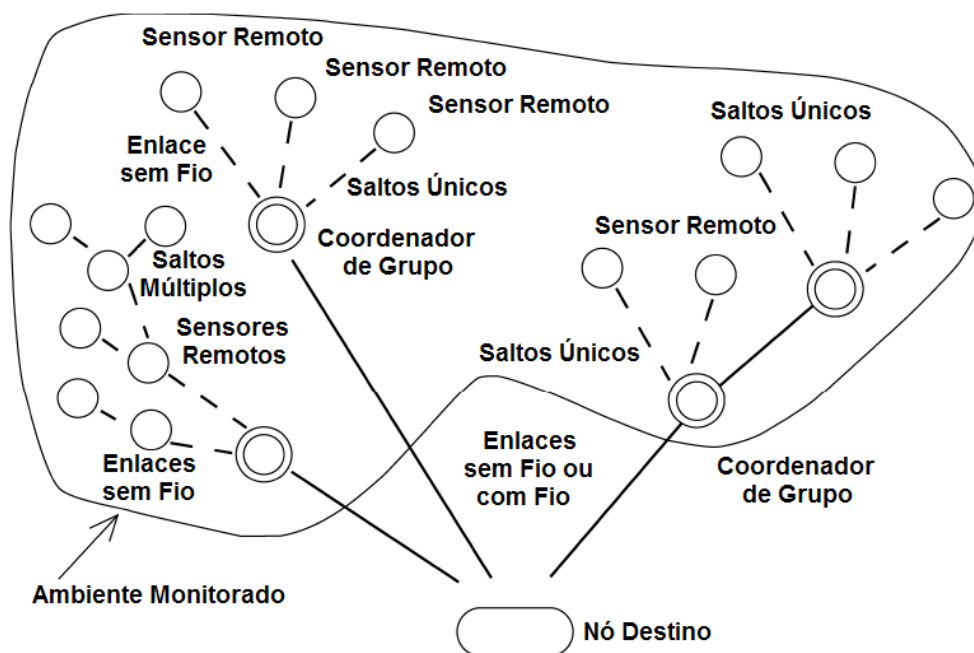


Figura 2.1 Rede de sensores sem fio típica.

Se os nós sensores possuem as mesmas características de equipamentos e programas, então a RSSF é classificada como uma rede homogênea. Por outro lado, se a rede possui nós com diferentes capacidades e funções, então ela é dita heterogênea. As RSSFs também podem ser classificadas em relação à mobilidade dos nós sensores. A maior parte das aplicações envolve redes estáticas, em que os nós sensores são projetados para ocupar posições fixas no ambiente monitorado. Entretanto, existem aplicações em que os nós sensores possuem mobilidade espacial oferecida pela própria constituição mecânica do nó sensor (e.g., redes de robôs móveis para interação com ambientes de incêndio), ou pela dinâmica do ambiente monitorado (e.g., redes de sensores depositadas em rios, para o monitoramento da qualidade da água).

Nós sensores possuem capacidades de processamento e armazenamento embarcados e contêm um ou mais sensores operando em domínios acústico, sísmico, radar, infravermelho, óptico, magnético, químico, biológico, etc. Também é possível que seja embarcado um mecanismo de identificação do auto-posicionamento e localização dos nós, adquirido por meio de um sistema de posicionamento global (*Global Positioning System* – GPS) ou um algoritmo de posicionamento local.

Um das tarefas dos nós sensores é localizar eventos, em que é necessário o rastreamento em três coordenadas espaciais (e.g., Em qual andar e em que quadrante está a fumaça detectada? Qual a temperatura atmosférica à altura h ?) e sobre uma topografia maior, acessar níveis de detecção por meio de um conjunto (matriz) de sensores (e.g., Qual é a direção do vento, contendo partículas contaminadas nas posições $i, i + 1, i + 2$, etc., ao longo de uma rodovia ocupada?). Distribuições de nós espacialmente e temporalmente densas são comuns.

Os sensores podem ser dispositivos passivos ou ativos. Sensores passivos, em forma de elementos, incluem dispositivos de medidas sísmicas, acústicas, pressão, umidade e temperatura. Sensores passivos, em forma de matriz, incluem dispositivos ópticos (visível, infravermelho-1 mm, infravermelho-10 mm) e dispositivos de medições bioquímicas. Sensores passivos tendem a ser dispositivos de baixo consumo de energia. Sensores ativos incluem radares e sonares, que tendem a ser sistemas de alto consumo de energia. A tecnologia VLSI (*Very Large Scale Integration*) é uma tendência de uso para os dispositivos sensores, assim como optoeletrônica integrada e nanotecnologia. Conforme ilustrado na Figura 2.2, os componentes de um nó sensor incluem:

- Unidade de sensoriamento e/ou atuação (elemento ou matriz);
- Unidade de processamento;
- Unidade de comunicação;
- Unidade de fornecimento de energia;
- Outras unidades dependentes da aplicação projetada.

A tecnologia para sensoriamento e controle inclui sensores de campos magnéticos; sensores de frequência de ondas de rádio; sensores ópticos, eletro-ópticos e infravermelhos; radares; *lasers*; sensores de navegação e localização; sensores sísmicos e de pressão; sensores de parâmetros ambientais (e.g., vento, umidade, temperatura, etc.); e sensores bioquímicos orientados à segurança nacional. Os modernos sensores são dispositivos de baixo custo, inteligentes e equipados com múltiplos elementos de sensoriamento embarcados.

Os sensores são identificados em diversas ordens de magnitude de tamanho físico. Eles variam de dispositivos de escala nanoscópica à escala mesoscópica, para um segmento de sensores, e de escala microscópica à escala macroscópica, para o outro segmento. Sensores nanoscópicos são dispositivos da ordem de 1 a 100 nm de diâmetro e sensores mesoscópicos possuem a ordem entre 100 a 10000 nm de diâmetro. A escala microscópica compreende dispositivos que variam de 10 a 1000 μm e a escala macroscópica varia no intervalo de milímetros a metros. No primeiro segmento (menor escala), sensores biológicos e microsensores pequenos e passivos (tais como o *Smart Dust*²) compõem essa classe. No outro segmento (maior escala) são citados

²O *Smart Dust* é um sistema de sensoriamento, comunicação e processamento computacional autônomo, que utiliza o espectro visível óptico para as transmissões [21].

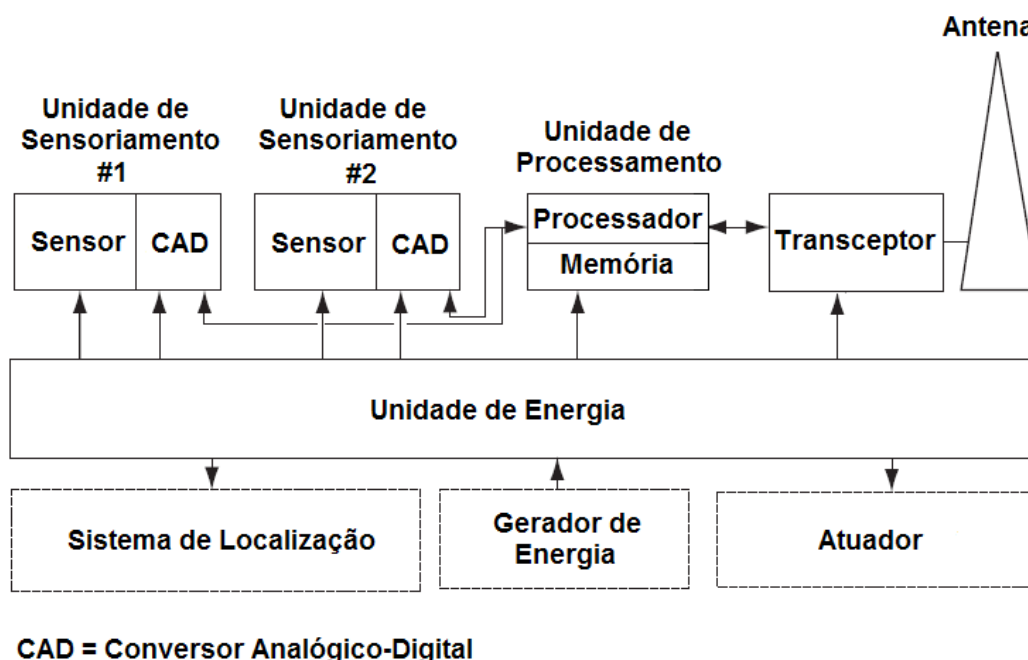


Figura 2.2 Componentes de um nó sensor.

dispositivos de coleta de dados em pedágios e estações de previsão de condições climáticas, etiquetas de identificação, sensores de bioterrorismo, radares e sensores para o tráfego submarino baseados em sonar.

Os nós sensores são equipados com um ou mais sensores de aplicações específicas e com capacidade de processamento de sinais para a extração e manipulação das informações do ambiente físico. O sensoriamento por redes embarcadas se refere à cooperação de microsensores em estruturas ou ambientes; o sensoriamento embarcado habilita o monitoramento espacial e temporalmente denso do sistema considerado (e.g., um ambiente, uma construção, um campo de batalhas). Os sensores podem ser passivos e/ou possuir alimentação própria de energia, de modo que em algumas aplicações eles podem requerer um baixo fornecimento de energia [22]; em outras (e.g., radares), uma maior dissipação de energia deve ser prevista pelo projetista.

Sensores facilitam a instrumentação e controle de fábricas, escritórios, residências, veículos, cidades e ambientes, principalmente com a tecnologia COTS sendo disseminada. Com a tecnologia de rede de sensores, navios, aeronaves e construções podem auto-detectar falhas estruturais (e.g., rachaduras induzidas por sobrecarga). Estabelecimentos com reuniões públicas podem ser capacitados para detectar agentes aéreos, tais como toxinas, e localizar a fonte da contaminação presente (isso também pode ser feito para eventos em solo e subsolo). Sensores orientados para terremotos podem localizar potenciais sobreviventes em construções e auxiliar no acesso às estruturas danificadas; sensores para alerta de *tsunamis* são úteis para nações com costas marítimas extensas. Sensores também encontram grande aplicabilidade em campos de batalhas para reconhecimento e vigilância [23].

2.4 Propriedades das Redes de Sensores sem Fio

Pesquisadores identificam as RSSFs como um domínio emergente de sistemas *motest*³ sem fio, de baixa potência, com reduzida capacidade de memória e processamento e que têm a potencialidade de sensoriamento de alta resolução de ambientes [24]. A efetiva disseminação da Internet, os avanços nas tecnologias de comunicações e os desenvolvimentos em TI agregados aos recentes avanços em engenharia viabilizam a produção de uma nova geração de sensores de baixo custo e atuadores, que são capazes de alcançar alta resolução temporal e espacial.

Existe um grande interesse na linha de pesquisa de redes de sensores sem fio, não apenas por parte das universidades e governos, mas também de desenvolvedores, fabricantes, investidores e OEMs (*Original Equipment Manufacturers*). Relatórios mercadológicos indicam que mais de meio bilhão de nós sensores serão usados em aplicações de redes de sensores sem fio até 2010, envolvendo um custo de mais de 7 bilhões de dólares [25].

A implementação das RSSFs precisa superar desafios técnicos. Um desafio de Projeto e Desenvolvimento (P&D) é desenvolver comunicações de baixo consumo de energia, baixo custo de processamento embarcado, protocolos e conectividade auto-organizáveis. Outro desafio crítico é a necessidade de operação temporal estendida da rede de sensores, já que tipicamente as RSSFs possuem restrições em recursos de energia. Em particular, a arquitetura do rádio, incluindo os circuitos de baixa potência, precisa ser selecionada apropriadamente. Em termos práticos isso implica em baixo consumo para transmissão sobre canais de pequena largura de banda e baixo consumo de potência para o pré-processamento ou compressão de dados. Sistemas de comunicações sem fio eficientes em consumo de energia são questões típicas no estudo das RSSFs. O baixo consumo de potência é um fator importante para garantir longos períodos de operação aos sistemas que são alimentados por baterias. A eficiência no consumo de energia em redes de sensores sem fio é geralmente abordada em três maneiras:

1. Operação em baixo ciclo de processamento;
2. Processamento local (interno à rede) para reduzir o volume de dados e o tempo de transmissão;
3. Redes em múltiplos saltos reduzem a necessidade de longas distâncias para transmissões. Cada nó na rede pode atuar como um repetidor, reduzindo a potência necessária para transmissão.

As redes de sensores sem fio podem ser classificadas em duas categorias [14]:

- RSSFs Categoria 1 (C1RSSFs): sistemas em malha com conectividade de rádio por múltiplos saltos entre os nós sensores, utilizando roteamento dinâmico na rede. Sistemas de aplicações militares pertencem a essa categoria.

³Os termos nó sensor, nó sem fio, e *mote* são utilizados de forma intercambiável nessa dissertação.

- RSSFs Categoria 2 (C2RSSFs): sistemas ponto-a-ponto ou multiponto-a-ponto (baseados em arquitetura em estrela), geralmente com conectividade de único salto para os nós sensores, utilizando roteamento estático sobre a rede sem fio. Sistemas de controle residencial pertencem a essa categoria.

As C1RSSFs apoiam aplicações com nós sensores altamente distribuídos (e.g., monitoramento ambiental, sistemas de segurança nacional). As C2RSSFs apoiam espaços de curta abrangência, como uma residência, uma fábrica, uma construção, ou um corpo humano. As C1RSSFs tendem a ser empregadas em sistemas de larga escala, multi-ponto a multi-ponto e maiores fluxos de dados, enquanto as C2RSSFs tendem a ser aplicadas em menor escala, ponto-a-ponto, e transmissões nó fonte-nó destino.

No começo da década de 2000, fornecedores de dispositivos sensores pesquisaram maneiras para implementar a padronização. Os nós sensores geralmente transmitem pequenos volumes de dados simples (e.g., “A temperatura está no nível desejado ou em um nível menor?”). Para aplicações de menor escala, projetistas traçaram os padrões Wi-Fi (*Wireless Fidelity*, IEEE 802.11b) que apresentam demasiada complexidade e maior largura de banda do que é efetivamente necessário para a operação de nós sensores típicos. Sistemas de infravermelho requerem linha de visada, o que nem sempre é alcançado; a tecnologia Bluetooth (IEEE 802.15.1) foi considerada inicialmente uma possibilidade, mas logo foi caracterizada como complexa e cara. Diante dessas incompatibilidades, um novo padrão foi proposto, o IEEE 802.15.4, representado pelo protocolo ZigBee. As C2RSSFs possuem camadas mais baixas da pilha de protocolos de comunicações (Camadas Física e Controle de Acesso ao Meio), que é comparável à pilha de protocolos de uma rede de área pessoal (*Personal Area Network – PAN*), definido no padrão IEEE 802.15. A operação do IEEE 802.15.4 é na faixa de rádio industrial, científica e médica (*Industrial, Scientific, and Medical – ISM*) de 2,4 GHz e suporta taxas de transmissão de dados até 250 kbits/s, sobre um alcance aproximado de 10 a 60 metros. O ZigBee/IEEE 802.15.4 é projetado para complementar tecnologias sem fio tais como Bluetooth, Wi-Fi e *Ultrawideband* (UWB), e tem como objetivo o uso em aplicações em que conexões cabeadas não são possíveis e em que o consumo reduzido de potência e baixo custo são requisitos [25].

Com o surgimento do padrão ZigBee/IEEE 802.15.4, é esperado que os sistemas transitem para abordagens com base em padrões, permitindo a transferência de informações de sensores de forma padronizada. Aplicações C2RSSFs que operam fora de um edifício e sobre uma vasta área geográfica podem fazer uso de outras tecnologias padronizadas de rádio. É previsto que aplicações C2RSSFs (baixa taxa de dados) cresçam significativamente em um futuro próximo. O volume de dispositivos sem fio de baixa taxa de dados está previsto para ser três vezes a quantidade representada pelo Wi-Fi, até o início da presente década, devido ao desenvolvimento esperado dos sistemas baseados na norma ZigBee/IEEE 802.15.4.

Existe também uma considerável pesquisa na área das redes móveis *ad hoc* (*Mobile Ad hoc Networks – MANETs*). RSSFs são semelhantes às MANETs em alguns aspectos como, por exemplo, comunicações por múltiplos saltos. No entanto, os requisitos das aplicações e técnicas

para os dois sistemas são significativamente diferentes em vários aspectos, conforme descrito a seguir:

- O modo típico de transmissão em RSSFs acontece a partir de múltiplas fontes para um receptor de dados (algo como um *multicast* reverso) em vez da comunicação entre um par de nós. Em outras palavras, nós sensores usam principalmente difusão por espalhamento ou comunicação por *multicast*, enquanto a maioria das MANETs se baseia em comunicações ponto-a-ponto;
- Na maioria dos cenários (aplicações) os sensores não são móveis (embora os fenômenos sensoriados possam ser), o que implica uma dinâmica diferente nos dois tipos de redes;
- Uma vez que os dados coletados por vários sensores são baseados em um fenômeno comum, há potencialmente um grau de redundância nos dados que estão sendo comunicados pelas diversas fontes em RSSFs; esse não é geralmente o caso em MANETs;
- Uma vez que os dados coletados por vários sensores são baseados em um fenômeno comum, há potencialmente alguma dependência na geração de tráfego de eventos em RSSFs, de tal forma que alguns modelos de protocolos de acesso aleatório podem ser inadequados para análise de filas; esse não é geralmente o caso em MANETs;
- Uma restrição crítica de recursos em RSSFs é a energia, o que nem sempre é o caso das MANETs, em que os dispositivos de comunicação utilizados pelos usuários podem ser substituídos ou recarregados com relativa frequência. A escala de RSSFs (especialmente em CIRSSFs), e para a necessidade de operação autônoma em períodos atingindo semanas ou meses, implica recursos de energia geridos de maneira criteriosa. Isto, por sua vez, se opõe a alta taxa de transmissão de dados;
- O número de nós sensores em uma rede pode ser várias ordens de magnitude superior ao número de nós em uma rede MANET.

Redes de sensores embarcadas devem ter três predicados: embarcar, conectar e sensoriar. Embarcar implica na incorporação de numerosos dispositivos distribuídos para monitorar o mundo físico e interagir com ele. Conectar é prover a conectividade física e lógica. A conectividade física é usualmente baseada em um enlace de rádio sem fio, enquanto a conectividade lógica objetiva suportar a coordenação e outras funções de alto nível. Sensoriar implica medir parâmetros do ambiente desejado. Algumas das propriedades características das redes de sensores incluem:

- Os nós sensores são densamente depositados;
- Os nós sensores são resistentes a falhas;
- A topologia de uma rede de sensores muda frequentemente;

- Os nós sensores são limitados em potência, capacidades computacionais e memória;
- Os nós sensores podem não possuir uma identificação global, por causa da grande quantidade de informações de cabeçalho (*overhead*) e o grande número de sensores.

Conjunto de Programas

Para suportar as operações do nós sensores é importante existir um sistema operacional de plataforma aberta (livre) projetado especificamente para a atuação em redes de sensores sem fio. Tais sistemas operacionais utilizam uma arquitetura baseada no componente que habilita a implementação rápida e inovação enquanto minimizam o tamanho do código conforme requerido pelas restrições de memória em redes de sensores. TinyOS é um exemplo de padrão de sistema operacional para nós sensores em RSSFs, mas não é o único. As bibliotecas que compõem o TinyOS incluem protocolos de rede, serviços distribuídos, *drivers* de sensores e ferramentas para aquisição de dados, além de possuir uma variedade de modos compatíveis com diferentes tipos de sensores. O modelo de execução de eventos do TinyOS habilita o preciso gerenciamento de consumo de energia e permite a flexibilidade de agendamento necessária, devido à natureza imprevisível das comunicações sem fio e interfaces com o mundo físico. É um sistema utilizado em simulações e experimentos para desenvolver e testar algoritmos e protocolos, de modo que vários grupos têm contribuído com códigos para estabelecer um padrão de serviços de rede interoperável [26].

Padrões para Protocolos de Comunicações

Os projetistas de redes de sensores sem fio devem desenvolver soluções de rede sem fio de baixo custo, baseadas em padrões, que suportem baixas taxas de transmissão de dados, possuam baixo consumo de energia e que garantam segurança e confiabilidade ao sistema de comunicações e sensoriamento. A posição dos nós sensores não precisa ser pré-determinada, permitindo a deposição aleatória em terrenos inacessíveis ou soluções dinâmicas. Isso significa que os algoritmos e protocolos de redes de sensores necessitam apresentar capacidades de auto-organização. Para aplicações militares e de segurança nacional, os dispositivos sensores devem ser habilitados para o rápido posicionamento, que precisa suportar uma operação *ad hoc*.

Pesquisadores têm desenvolvido vários novos protocolos especificamente projetados para RSSFs, em que a eficiência na utilização da energia é uma consideração essencial. O foco tem sido o projeto de protocolos de roteamento, já que eles precisam ser diferentes dos protocolos das redes tradicionais (dependendo da aplicação e da arquitetura de rede). A conectividade é um importante componente no projeto de redes sensores sem fio, de modo que os padrões desenvolvidos precisam ter essa questão como uma das prioridades na relação custo-eficiência. A Figura 2.3 mostra um modelo genérico da pilha de protocolos que pode ser utilizada para descrever o sistema de comunicações. Alguns protocolos típicos de camadas inferiores, aplicáveis a RSSFs, são mostrados na Tabela 2.1.

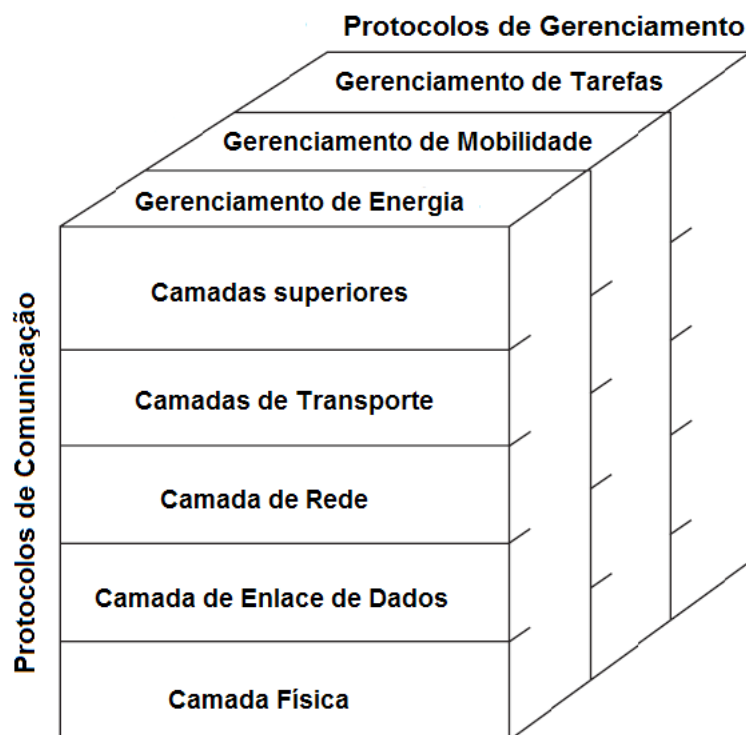


Figura 2.3 Modelo genérico da pilha de protocolos para RSSFs.

Tabela 2.1 Possíveis protocolos para RSSFs (camadas inferiores).

	GPRS/GSM 1xRTT/CDMA	IEEE 802.11b/g	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4
Nome Comercial	2,5G/3G	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee
Tipo de Rede	WAN/MAN	WLAN	PAN e DAN	RSSF
Aplicação Alvo	Regiões Vastas Voz e Dados	Aplicações Empresariais	Substituição	Monitoramento
Taxa de Transmissão (Mbits/s)	0,064-0,128+	11-54+	0,7+	0,020-0,25+
Alcance (m)	1000+	100+	10+	100+

Embora os dispositivos eletrônicos inclusos nos sensores estejam tendo seus custos barateados, observadores identificam a carência de padrões de rede como um fator retardante no posicionamento comercial das redes de sensores sem fio. Pelo fato de atualmente existirem numerosos protocolos proprietários de rede, desenvolvedores têm criado produtos específicos sob demanda, o que aumenta o custo financeiro das soluções que são adaptáveis aos produtos de outros desenvolvedores. A evolução de padrões pode prover uma estrutura comum em que os desenvolvedores estejam aptos a criar aplicações que influenciem nos avanços de *hardware*, como dispositivos de rádio e sensores. O objetivo da implementação de padrões é que se torne viável projetar soluções que reduzam os custos de desenvolvimento, instalação e manutenção para os tipos de aplicações utilizadas em redes de sensores sem fio [25]. Como um exemplo de padrão aplicável, particularmente para os tipos de rede C2RSSFs, a especificação IEEE 802.15.4 nas camadas físicas, de acesso ao meio e de enlace de dados foi formalmente sancionada. Os membros da ZigBee Alliance⁴ desenvolveram uma especificação global para aplicações sem fio de baixa energia e custo efetivo, baseada no padrão IEEE 802.15.4. Outro padrão de potencial interesse é o IEEE 802.16, também conhecido como WiMax.

Disseminação e Roteamento de Dados

A disseminação e roteamento de dados estão relacionados a mecanismos de disseminação em redes sem fio de larga-escala, difusão direta, roteamento de dados de forma centralizada (também conhecido como agregação de dados), roteamento adaptativo e outros mecanismos de roteamento especializados. Os protocolos de roteamento em redes de sensores sem fio são divididos em três categorias: agregação de dados, hierárquica e baseada em localização. O conceito de agregação de dados é combinar os dados recebidos a partir de diferentes fontes de dados, ao longo da rota. Isso permite ao sistema a eliminação de redundâncias, a minimização do número requerido de transmissões e a otimização do consumo de energia. Esse tipo de roteamento muda a proposta da abordagem baseada em endereçamento (busca pelas menores rotas entre os nós envolvidos) para uma abordagem baseada na centralização dos dados (busca por rotas a partir de múltiplas fontes até um único nó destino), o que permite o tratamento dos dados redundantes de maneira interna à rede.

Em RSSFs, existe um interesse na manipulação e processamento de dados de forma interna à rede. A utilização dos enlaces de transmissão pode apresentar um alto custo (não apenas por uma perspectiva do espectro eletromagnético, mas também em termos do suporte operacional da infra-estrutura requerida). A largura de banda e a disponibilidade de energia geralmente são limitadas e pode ser inviável suportar um enlace de alta capacidade e alimentar uma antena de alta potência. Então, uma alternativa é a realização do processamento dos dados

⁴A ZigBee Alliance [27] é um consórcio industrial de desenvolvedores de semicondutores, tecnologias, OEMs e usuários distribuídos pelo mundo. A associação a esse consórcio é aberta a todos e os membros estão definindo uma especificação global para aplicações sem fio confiáveis, de baixa potência e custo reduzido baseado no padrão IEEE 802.15.4. Entre as companhias envolvidas estão Honeywell, Invensys, Mitsubishi, Motorola, Philips e Samsung.

de maneira interna à rede e transmitir por maiores distâncias apenas a informação resultante, agregada e fundida.

O tipo de roteamento hierárquico é baseado na operação do roteamento por agregação de dados, entretanto permite a expansão para outros grupos de rede. Desse modo, o nó destino de um grupo pode ser um dos nós fontes de outro grupo.

O roteamento também pode ser realizado com base na localização dos nós sensores, com o objetivo de achar a rota que proporcione o menor consumo de energia com as transmissões.

Organização em Redes de Sensores sem Fio

Áreas de interesse de pesquisas em RSSFs incluem a organização e rastreamento em redes, abrangendo o gerenciamento distribuído de grupos (organização e manutenção em redes de sensores de larga escala). Nesse contexto estão inclusos os campos de pesquisa em técnicas de auto-organização, autenticação e registro, detecção de alvos, classificação e rastreamento. A alocação dinâmica de sensores, ou seja, como lidar com sensores não funcionais ou com o sensoriamento deteriorado, está relacionada à organização em RSSFs e abrange os seguintes aspectos: área de cobertura (porção da área topográfica que é coberta pelos sensores); detectabilidade (probabilidade que o sensor detecte um evento, assim como uma variação de valor ou um objeto em movimento); e cobertura de nós (porção da população de sensores que é coberta de uma maneira redundante). No caso de uma rede de controle e atuação, é importante a identificação de onde a rede precisa da adição de novos nós (ou reorientar um dispositivo de medição) para a cobertura ótima, ou até a movimentação autônoma de um sensor para melhor organizar a rede.

Processamento Computacional

O processamento computacional se relaciona com a agregação de dados, fusão de dados, análise de dados, hierarquia computacional, computação distribuída e processamento de sinais. Nesse contexto é observado que apesar da expressiva importância da função de processamento computacional nos nós sensores individuais, é desejável a utilização de protocolos de centralização de dados, que suportem o processamento interno à rede, pois a centralização permite uma melhor interpretação de dados e eventos distribuídos espacialmente. A rede precisa ser projetada para o processamento baseado na origem dos dados e as solicitações de processamento nos nós individuais devem ser direcionadas automaticamente para o nó ou nós que possuam a melhor visão do sistema, sob a perspectiva do ambiente em que as solicitações de processamento são feitas. Uma potencial linha de pesquisa é o processamento dos dados internos à rede, de modo a extrair informações úteis, confiáveis e distribuídas, de forma temporal e otimizada em redes de sensores sem fio. Isso implica a necessidade de um ambiente de computação distribuída, criado pelos nós sensores para o processamento de sinais e de processos dinâmicos e interativos de solicitações e atribuições de tarefas aos nós sensores que compõem a rede [14].

Limitação da Energia Disponível

Em muitas aplicações, os nós sensores são colocados em áreas remotas, o que não permite facilmente o acesso a esses elementos para manutenção. Nesse cenário, o tempo de vida de um nó sensor depende da quantidade de energia disponível. Aplicações, protocolos, e algoritmos para RSSFs não podem ser escolhidos considerando apenas sua capacidade, mas definitivamente a quantidade de energia consumida. Assim, o projeto de soluções para esse tipo de rede deve considerar o consumo, o modelo de energia e o mapa de energia, que é uma forma de visualização de como estão distribuídos os níveis de energia na rede [28].

O modelo de energia representa os recursos físicos de um sensor, que consomem energia e interagem com um modelo de funções. O modelo pode ser visto como um provedor de energia para elementos consumidores, que depende de uma bateria que tem uma capacidade finita de energia armazenada. Os consumidores de energia são os modelos de rádio, processador e elementos que fazem o sensoriamento do ambiente (sensores). Nesse modelo, a quantidade de energia gasta pelo rádio é muito maior que a quantidade gasta pelos outros dispositivos consumidores de energia. Estudos indicam que a execução de 3000 instruções gasta a mesma quantidade de energia que enviar 1 *bit* a 100 m via rádio [29]. Cada entidade consumidora notifica ao provedor seu consumo de energia que, por sua vez, informa a quantidade de energia disponível. Os elementos que compõem o modelo de energia são [30]:

Bateria – É responsável pelo armazenamento de energia do nó sensor e tem uma capacidade finita, assim como uma demanda de consumo específica;

Rádio – É formado pelos sistemas de transmissão e recepção, amplificador e antena. O consumo de energia depende da operação efetuada. A transmissão de dados consome mais energia que a recepção;

Processador – É o elemento de processamento central do nó sensor. O consumo depende da frequência do relógio (quanto maior a frequência, maior o consumo). O consumo pode ser medido pelo número de ciclos de relógio para diferentes tarefas como o processamento de sinais, verificação de código de erro, etc;

Sensores – São os dispositivos de sensoriamento. O consumo depende principalmente do tipo de grandeza medida.

A partir do modelo de energia dos nós individuais, é possível fazer um levantamento do mapa de energia da rede. A Figura 2.4 mostra um mapa de energia que, uma vez obtido, pode ser usado para tomar uma decisão mais apropriada do que deve ou pode ser feito na rede. Quanto mais escura é a região, mais energia ela contém.

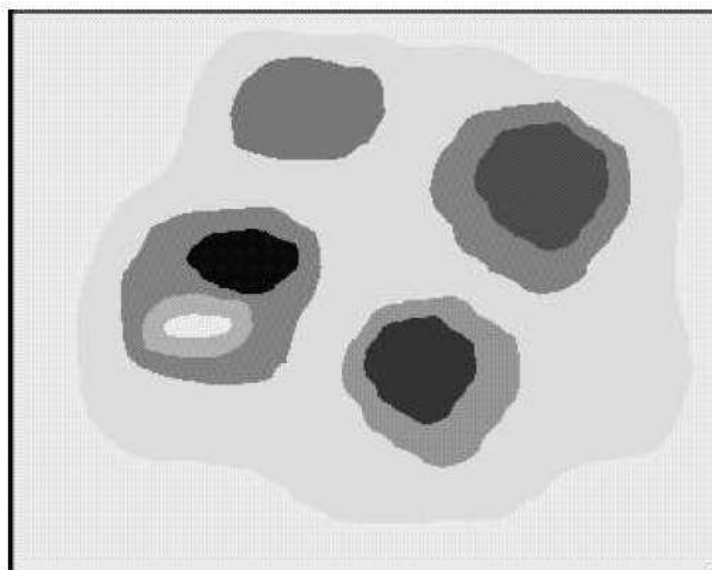


Figura 2.4 Mapa de energia de uma RSSF.

Gerenciamento de Dados

O gerenciamento de dados está relacionado com a arquitetura computacional empregada, gerenciamento de banco de dados e mecanismos de solicitações de tarefas e armazenamento de dados. Em ambientes de redes de computadores tradicionais, os dados são centralizados em um servidor para armazenamento. Em ambientes mais elaborados, um mecanismo para o armazenamento distribuído de dados é necessário.

2.5 Aplicações das Redes de Sensores sem Fio

Algumas aplicações de destaque em RSSFs são descritas a seguir.

2.5.1 Aplicações Domésticas

As redes de sensores sem fio vêm sendo cada vez mais utilizadas nas residências, com funções diversas, entre elas [31]:

Automação de Tarefas Domésticas – Por meio da instalação de sensores em equipamentos utilizados de forma cotidiana, é possível automatizar tarefas comuns, como iluminação e controle de equipamentos como geladeiras, fornos de microondas e aparelhos de ar condicionado;

Segurança – Uma das aplicações domésticas de maior interesse é voltada para a área de segurança. A distribuição de sensores de temperatura e de movimento pela residência permite a detecção de incêndios e invasões, além do controle de movimentos de crianças e idosos pela área monitorada;

Desenvolvimento de Ambientes Inteligentes – Um dos principais atrativos das redes de sensores sem fio é o desenvolvimento de um ambiente doméstico inteligente. A rede permite a integração dos diversos equipamentos nos quais são instalados sensores, viabilizando o controle por voz, telefone, etc. A integração de câmeras em redes desse tipo permite que os moradores visualizem o que está acontecendo em um determinado local da residência, assim que algum sensor detectar qualquer irregularidade. A integração da linha telefônica permite que a polícia, os bombeiros ou hospitais sejam avisados automaticamente em caso de invasões ou acidentes. Sensores de intensidade luminosa podem apagar as luzes durante o dia e acendê-las à noite. A Figura 2.5 mostra um exemplo de aplicação doméstica de RSSFs.



Figura 2.5 A cama aquece 01h30 após a pessoa acordar, para matar ácaros.

2.5.2 Aplicações Militares

As aplicações militares das redes de sensores sem fio são bastante comuns, principalmente pelas características dos ambientes de guerra referentes à dificuldade na definição de infra-estrutura de redes de comunicações. Além de exigir demasiada quantidade de tempo, a instalação de uma infra-estrutura central tornaria a rede vulnerável (a destruição da central desativaria a rede). As redes de sensores são utilizadas em programas C4ISRT (*Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance, and Targeting* – Comando, Controle, Comunicações, Computadores, Inteligência, Vigilância, Reconhecimento e Mira). As principais aplicações nesta área são [31]:

Localização de Soldados – Sensores instalados nos uniformes dos soldados permitem à central monitorar a posição e os movimentos de cada soldado. Este monitoramento pode até mesmo ser visualizado por um comandante em campo de batalha, por meio de um visor;

Controle de Equipamentos e Munição – A instalação de sensores nos equipamentos e armas que os soldados carregam tornam possível o controle da munição ou outros equipamentos disponíveis;

Reconhecimento de Inimigos – Por meio do espalhamento de sensores em um campo de batalha é possível monitorar e mapear os movimentos das tropas inimigas;

Detecção de Ataques Nucleares, Biológicos ou Químicos – O sensoriamento do solo permite a detecção desses tipos de ataques ou de minas instaladas na região.

2.5.3 Aplicações Ambientais

No monitoramento de condições ambientais, as redes de sensores sem fio também são bastante úteis pois, em determinados casos, condições de relevo irregulares e vegetação densa são desfavoráveis para a instalação de estruturas tradicionais de monitoramento. Exemplos de aplicações nessa área são [31]:

Detecção de Incêndios – A distribuição de sensores em uma floresta permite que incêndios sejam detectados em pouco tempo e sejam localizados imediatamente e com precisão, o que possibilita o controle dos incêndios rapidamente, antes que se espalhem por uma área de maior proporção;

Detecção de Enchentes – Utilizando o mesmo princípio descrito na detecção de incêndios, é possível controlar enchentes, mesmo em locais de difícil acesso;

Agricultura de Precisão – Uma das aplicações viabilizadas pelas redes de sensores sem fio é o monitoramento de ambientes agrícolas, em especial, a agricultura de precisão (AP) [32], [33], [34], [35]. Por meio dessa técnica, é possível obter informações sobre estimativa de área plantada, produção agrícola, vigor vegetativo das culturas, além de fornecer subsídios para o manejo agrícola no País, estado, município ou ainda na microbacia hidrográfica ou fazenda [36]. A utilização de redes de sensores sem fio nas técnicas de agricultura de precisão possibilita um monitoramento com melhor resolução espacial e temporal do que, por exemplo, o monitoramento por satélites [37]. Entre os aspectos que justificam essa superioridade, citam-se a possibilidade de aquisição de dados de solo e vegetais, assim como temperatura, pH, condutividade elétrica do solo e umidade em diversas profundidades [38], [39]. O tipo de transmissão das RSSFs sem a utilização de cabos ou pares de fios trançados é uma característica desejável para o monitoramento de ambientes agrícolas, já que, de outro modo, mudanças significativas na estrutura das áreas observadas seriam necessárias, acarretando maiores investimentos e uma maior interferência no desenvolvimento das culturas ali presentes. Uma vantagem adicional para o monitoramento em rede é que, embora individualmente, os microsensores não possuam uma precisão tão

representativa como os macrosensores, a agregação de diversos dados distribuídos possibilita a alta qualidade na aquisição de informações sobre o ambiente monitorado. Um exemplo dessa aplicação é ilustrado na Figura 2.6.



Figura 2.6 RSSFs aplicadas à agricultura de precisão.

Monitoramento de *Habitats* – Redes de sensores representam um avanço significativo sobre os métodos invasivos de monitoramento tradicionais. Os sensores podem ser depositados antes do início da estação de reprodução ou outro período sensível (para o caso de animais), ou enquanto plantas estão germinando ou o solo está congelado (em caso de estudos botânicos). Adicionalmente, a deposição dos nós sensores em determinados ambientes pode representar um método substancialmente mais econômico para a condução de estudos a médio e longo prazo, comparada com métodos em que há a necessidade do estabelecimento de infra-estrutura para abrigar os pesquisadores envolvidos em projetos de monitoramento ambiental.

Uma aplicação de monitoramento de *habitat* utilizando RSSFs é apresentada em [40], em que o objetivo é o estudo de algumas características no desenvolvimento de colônias de passáros, na costa de Maine [41] (*Great Duck Island – GDI*). O projeto utiliza os *motes* da UC Berkeley como nós sensores da rede, mais especificamente o Mica *mote* [42], que possui um único canal de rádio e opera na frequência de 916 MHz. O projeto provê comunicação bidirecional a 40 *kbits/s* e utiliza um microcontrolador Atmel Atmega 103, operando a 4 MHz. O armazenamento não volátil é proporcionado com uma capacidade de 512 kB. Um par de baterias AA é utilizado como fonte de energia e o tamanho físico do *mote* é relativamente pequeno ($5,1 \times 3,8 \times 1,3$ centímetros). Foi desenvolvida uma placa de sensoriamento e monitoramento ambiental, a *Mica Weather Board*, ilustrada na Figura 2.7, que inclui sensores de temperatura, umidade, pressão barométrica e lumino-

sidade. Atentos às limitações de energia causadas pelo uso de baterias AA, os autores estimaram alguns custos de energia na operação do *mote* Mica. Esses custos são dados em nano-ampère-hora e estão apresentados na Tabela 2.2.

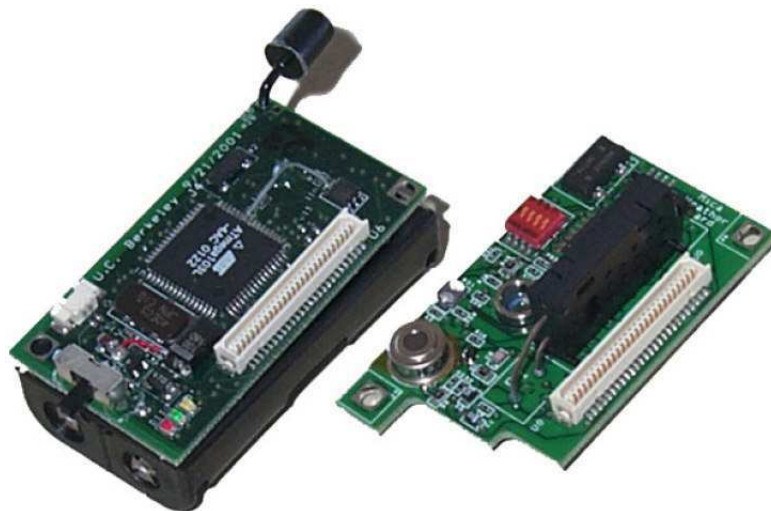


Figura 2.7 O nó sensor Mica (esquerda) e o *Mica Weather Board* para o monitoramento ambiental.

Tabela 2.2 Custos de energia de algumas operações no *mote* Mica.

Operação	nAh
Transmitir um pacote	20,000
Receber um pacote	8,000
Escutar o canal por 1 ms	1,250
Sensoriamento de uma amostra (analógica)	1,080
Sensoriamento de uma amostra (digital)	0,347
Leitura de uma amostra no CAD	0,011

Uma cápsula de acrílico foi utilizada para proteger o *mote* Mica e está ilustrada na Figura 2.8.

2.5.4 Aplicações Médicas

Na área de saúde, as redes de sensores sem fio podem ser utilizadas para:

Monitoramento de Pacientes – Sensores podem ser utilizados em hospitais para monitorar os movimentos dos pacientes ou controlar determinadas funções do corpo, como os batimentos cardíacos ou a pressão arterial;

Administração de Medicamentos – Torna-se possível o controle da quantidade de medicamentos utilizados por cada paciente;



Figura 2.8 O nó sensor em uma cápsula de acrílico para proteção.

Rastreamento de Médicos – Permite a localização precisa e imediata de médicos em um hospital, em casos emergenciais.

2.5.5 Aplicações Industriais

Sensores sem fio podem ser utilizados para monitorar processos de produção industrial ou até mesmo para monitorar as condições de funcionamento de um determinado equipamento industrial. Plantas químicas ou refinarias podem ter quilômetros de tubulações instrumentadas e monitoradas com a utilização de redes de sensores sem fio. Pequenos sensores podem monitorar certos fatores e equipamentos no campo industrial e alertarem uma falha iminente. Esse monitoramento reduz significativamente os custos de serviços e manutenção, aumenta o tempo de vida das máquinas, além de evitar acidentes. A Figura 2.9 mostra um exemplo de aplicação industrial, em que níveis de pressão são monitorados e transmitidos para uma estação base de supervisão.

2.5.6 Aplicações Multimídia

A maior disponibilidade e avanços no desenvolvimento de dispositivos de *hardware*, tais como câmeras e microfones que são habilitados a capturar de forma pervasiva o conteúdo a partir do ambiente têm possibilitado o desenvolvimento de Redes de Sensores Multimídia sem Fio (*Wireless Multimedia Sensor Networks* – WMSNs) [43], [44], [45], [46], [47]. As WMSNs são redes de sensores sem fio que permitem o monitoramento por meio da captura de vídeo, áudio e imagem estática, conforme mostrado no esquema da Figura 2.10.

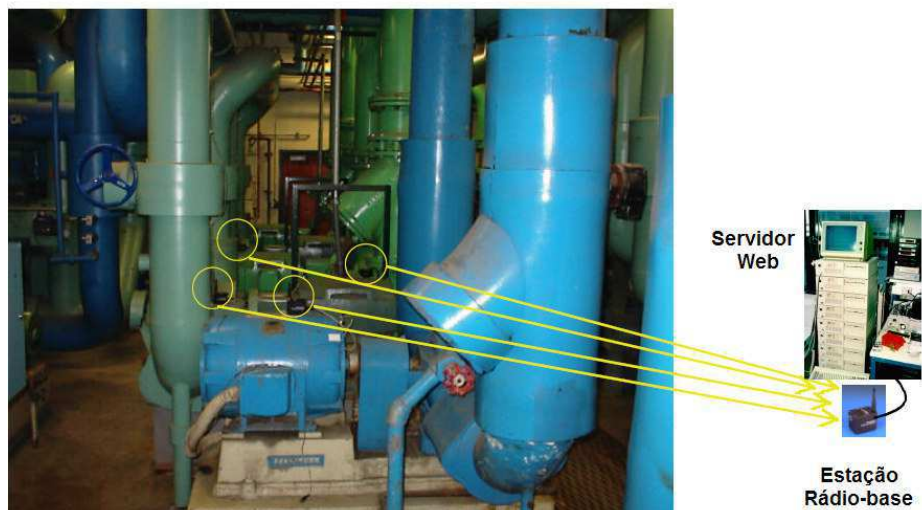


Figura 2.9 Aplicações em processos industriais.

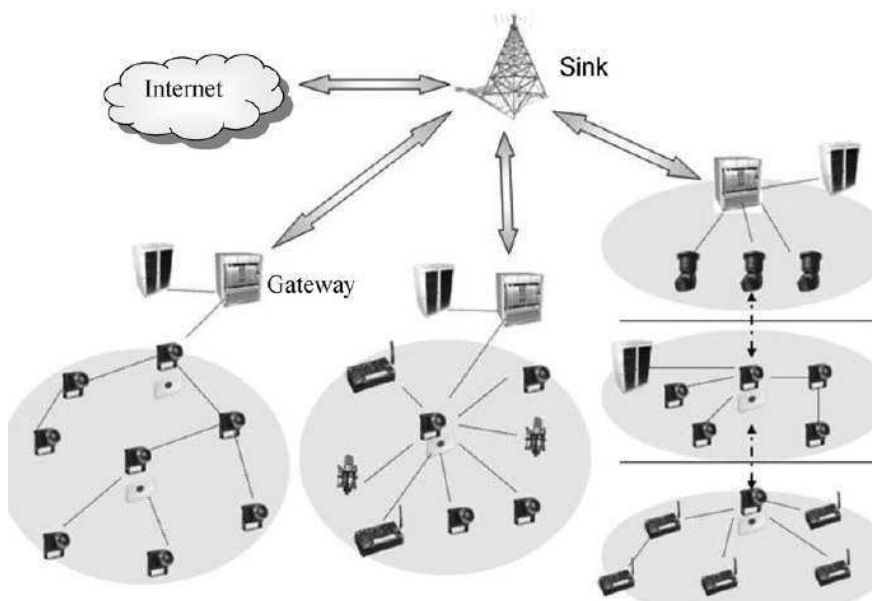


Figura 2.10 Rede de sensores multimídia sem fio.

As WMSNs podem prover melhor qualidade na captação e processamento das informações monitoradas. Alguns exemplos dessa melhoria são [48], [49], [50]:

Expansão da Captura – O campo de visão (*Field of View* – FoV) de uma única câmera, ou o campo de consideração (*Field of Regard* – FoR) de uma única câmera com movimentação (*Pan-Tilt-Zoom* – PTZ) é limitado. Por outro lado, um sistema distribuído de múltiplas câmeras e sensores habilita a percepção do ambiente a partir de diversos pontos de vista e evita efeitos de oclusão;

Melhoramento da Captura – A redundância introduzida por múltiplas câmeras, que podem ser heterogêneas e sobrepostas, melhora o reconhecimento e distinção do ambiente, já que diferentes pontos de captura de uma mesma área ou alvo podem ser disponibilizados;

Habilitação de Captura com Multi-resolução – Sequências heterogêneas de mídia com diferentes granularidades podem ser adquiridas a partir de um mesmo ponto de vista, para prover descrições com multi-resolução da cena e múltiplos níveis de abstração. Uma câmera estática de resolução média pode ter sua captura melhorada por uma câmera com *zoom*, que provê uma captura de maior resolução de uma região de interesse. Tal facilidade pode ser aplicada no reconhecimento de pessoas, com base em suas características faciais [43].

2.6 Desafios em Redes de Sensores sem Fio

Desafios e limitações em redes de sensores sem fio incluem os seguintes tópicos:

Consumo de Energia – O tempo de vida de um nó sensor exibe uma forte dependência do tempo de vida da bateria. Em vários casos, o nó sensor sem fio possui uma fonte de energia limitada (e.g., ≤ 500 mAh, 1,5 V) e a recarga ou substituição dessa fonte também pode ser limitada ou inviável. A operação das baterias para sensores usadas em aplicações comerciais é baseada no uso de duas células alcalinas AA ou uma célula de lítio AA. O gerenciamento e conservação de energia são funções críticas em redes de sensores e há a necessidade de projetos de algoritmos e protocolos que otimizem a utilização de energia nos nós sensores. O consumo de energia pode ser atribuído a três domínios funcionais: sensoriamento, comunicação e processamento de dados, cada um dos quais precisa de otimização.

Custo dos Nós Sensores – Para aplicações em larga escala, as redes de sensores tendem a possuir um conjunto bastante populoso de nós sensores. O custo individual do nó sensor é crítico para o custo financeiro total da rede de sensores, de modo que o custo de cada nó sensor precisa ser baixo para a métrica global da rede ser aceitável. Sistemas de sensores

atuais baseados na tecnologia Bluetooth custam cerca de US\$ 10,00. Entretanto, o objetivo é atingir o custo de nós sensores menor que US\$ 1,00, que é bem mais baixo que a atual tecnologia permite;

Canais de Transmissão – Redes de sensores sem fio normalmente operam em meios de comunicações sem fio com restrições de largura de banda, em enlaces de rádio, infravermelho, etc. Alguns dispositivos de nós sensores são baseados em um único canal RF operando em 916 MHz. Há sensores que utilizam um transceptor compatível com a tecnologia Bluetooth em 2,4 GHz, com um sintetizador de frequência integrado. Outros sistemas utilizam também 2,4 GHz (tecnologia IEEE 802.11b), 5,0 GHz (tecnologia IEEE 802.11a), ou possivelmente outras bandas (IEEE 802.15.4 ou IEEE 802.16). Para facilitar a operação global dessas redes o canal de transmissão selecionado precisa estar disponível em abrangência mundial;

Padrões – Um conjunto de protocolos e padrões abertos é necessário nas camadas física, enlace, rede e transporte. Adicionalmente, outros protocolos de gerenciamento são requeridos. Os padrões estão começando a ser incorporados em redes de sensores e o maior grau de padronização tem ocorrido nas camadas inferiores. As RSSFs de menor abrangência geográfica tendem a utilizar o padrão ZigBee/IEEE 802.15.4. Já as RSSFs de maior abrangência geográfica e externas a construções devem utilizar outras tecnologias. Em particular, padrões IEEE de redes de área local (*Local Area Networks* – LANs) têm sido considerados. O IEEE 802.11 suporta a transmissão de 1 ou 2 *Mbits/s* na banda de 2,4 GHz utilizando espalhamento espectral por sequência direta ou por salto em frequência. O IEEE 802.11a é uma extensão do 802.11 que provê uma taxa de transmissão máxima de 54 *Mbits/s* na banda de 5 GHz e utiliza a codificação ortogonal por multiplexação em divisão por frequência (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – OFDM). O IEEE 802.11b é uma extensão do 802.11 que provê transmissões em 11 *Mbits/s* na banda de 2,4 GHz usando o espalhamento espectral em sequência direta. O IEEE 802.11g provê a máxima taxa de 54 *Mbits/s* na banda de 2,4 GHz. Outro método de transmissão sem fio é a transmissão óptica, operando no comprimento de onda de 1 mm (infravermelho). A transmissão por infravermelho opera em linha de visada direta com pequeno alcance (300 a 3000 m). O padrão WiMax (IEEE 802.16) pode ser útil para ambientes metropolitanos.

CAPÍTULO 3

O Protocolo LEACH

3.1 Introdução

Redes de sensores sem fio requerem sistemas de sensoriamento que possuam longo período de funcionamento e resiliência aos ambientes. O consumo de energia é frequentemente uma questão que precisa ser considerada como uma prioridade de projeto. Na maioria dos casos, os circuitos de comunicações e antenas são os elementos primários que consomem a maior parte da energia [51].

Diversos protocolos têm sido projetados para a otimização do padrão de dissipação de energia em RSSFs. Um método de destaque é o *Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH), um protocolo de formação de grupos adaptativos e auto-organizáveis, que usa a aleatorização dessa formação para distribuir o consumo de energia pelos nós sensores na rede. No LEACH, os nós se organizam em grupos locais, em que um nó atua como o coordenador do grupo correspondente. Adicionalmente, no LEACH é desempenhada a fusão local de dados para comprimir a quantidade de informação enviada a partir do grupo até o nó destino, o que reduz a dissipação de energia e aumenta o tempo de vida da rede [4]. Neste capítulo, a operação do protocolo LEACH, assim como o detalhamento do algoritmo de funcionamento, é apresentado. O Apêndice A complementa o capítulo por meio da apresentação de um exemplo ilustrativo de formação de grupos e eleição de seus coordenadores.

3.2 O Funcionamento do Protocolo LEACH

No LEACH os nós sensores realizam uma auto-eleição para se tornarem coordenadores de grupo em algum momento, com uma certa probabilidade. Esses coordenadores de grupo comunicam que assumiram a função de coordenador aos outros nós sensores da rede. Cada nó sensor determina a qual grupo pertencerá pela verificação de qual coordenador de grupo requer

a mínima energia consumida para a transmissão dos dados¹. Quando todos os nós estiverem organizados em grupos, cada coordenador de grupo cria um agendamento para os nós sensores pertencentes ao seu grupo. Isso permite que os componentes de rádio de todos os nós sensores (exceto os coordenadores de grupo) sejam desligados enquanto os intervalos de tempo agendados para o processo de comunicação não sejam os correspondentes para uso naquele momento. Quando os coordenadores possuírem todos os dados oriundos dos nós sensores de seu grupo, eles processam e agregam essas informações e então transmitem essas informações para o nó destino. A distância entre o nó destino e os coordenadores é grande, comparada aos nós sensores presentes no grupo, de modo que essa transmissão requer um consumo de energia significativo. Entretanto, como há menos coordenadores do que nós sensores de menor hierarquia, isso afeta um número pequeno de nós na rede [4].

Um coordenador de grupo consome mais energia do que os outros nós sensores da rede. De modo a uniformizar o consumo de energia na rede, sobre os nós restantes, a função de coordenação não é fixa para determinados nós; em vez disso, essa função é auto-eleita em diferentes intervalos. Então, um conjunto de C nós precisa auto-eleger coordenadores de grupo no instante de tempo t_1 , mas no instante de tempo t_2 , um novo conjunto C' deve ser eleito, conforme ilustrado na Figura 3.1.

Para cada formação representada na Figura 3.1 estão presentes cinco grupos com seus respectivos coordenadores (representados em destaque pelos círculos pretos com pontos azuis no centro). Os outros nós também estão distribuídos de forma aleatória e cada grupo é identificado por uma cor diferente. Os grupos mudam de configuração para cada formação, mudando também os nós que exercem a função de coordenação.

O protocolo LEACH provê o conceito de ciclo (*round*) e contém dois estados: o de configuração dos grupos e o de transmissão dos dados. No primeiro há a formação dos grupos em um modo auto-adaptativo. No segundo há a transferência dos dados para o nó destino [52].

3.3 Formação de Grupos

Inicialmente, quando os grupos estão sendo criados, cada nó decide se será um coordenador de grupo no correspondente ciclo. Essa decisão é baseada no percentual sugerido de coordenadores de grupo para a rede (determinada *a priori*) e no número de vezes que o nó já se tornou um coordenador. A decisão é feita quando o nó n escolhe um número aleatório entre 0 e 1. Se o número é menor que um limiar $T(n)$, o nó se torna um coordenador de grupo para o correspondente ciclo. O limiar é dado por [4]

¹Tipicamente, a menor distância entre o nó sensor e os coordenadores de grupo provê a menor energia consumida para comunicação. Entretanto, se existe algum obstáculo impedindo a comunicação entre dois nós espacialmente próximos (e.g., um prédio, uma árvore, etc.) de modo que essa comunicação com outro coordenador de grupo, mesmo que localizado espacialmente mais distante, é mais viável, o nó sensor escolherá o coordenador de grupo que está espacialmente mais distante e mais próximo no sentido de comunicação.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \cdot (r \bmod \frac{1}{P})}, & \text{se } n \in G, \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (3.1)$$

em que P é o percentual desejado de coordenadores de grupo (e.g., $P = 0.05$), r é o ciclo corrente e G é o conjunto de nós que ainda não se tornaram coordenadores de grupo nos últimos $\frac{1}{P}$ ciclos. Utilizando esse limiar cada nó se torna um coordenador de grupo em algum momento dentro de $\frac{1}{P}$ ciclos. Durante o ciclo zero ($r = 0$), cada nó possui uma probabilidade P de se tornar um coordenador de grupo. Os nós que são coordenadores no ciclo zero não podem ser coordenadores nos próximos $\frac{1}{P}$ ciclos. Então, a probabilidade de os outros nós sensores se tornarem coordenadores é incrementada, já que menos nós são candidatos a assumir essa função. Após $\frac{1}{P} - 1$ ciclos, $T = 1$ para aqueles nós que ainda não foram coordenadores, e após $\frac{1}{P}$ ciclos, todos os nós são novamente candidatos a se tornar coordenadores de grupo. O exemplo apresentado no Apêndice A torna mais elucidativo o processo de eleição de coordenadores de grupo.

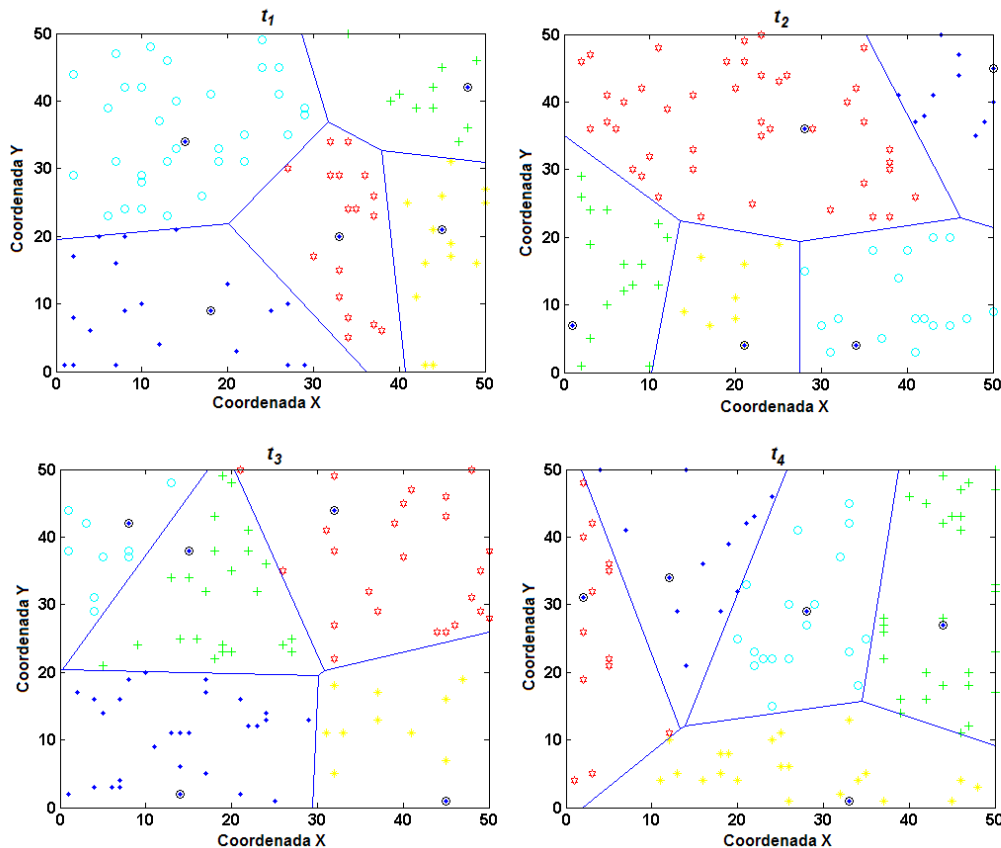


Figura 3.1 Diferentes formações de grupos em uma RSSF.

Cada nó que se elegeru um coordenador de grupo para o corrente ciclo comunica uma mensagem de notificação para o resto dos nós. Para a transmissão dessa mensagem, os coordenadores utilizam um protocolo *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA), em que antes de

transmitir, verificam se o canal de comunicações já está sendo utilizado e transmitem quando o canal estiver disponível. Nessa fase de notificação, os nós sensores que não são coordenadores precisam manter seus receptores de rádio ligados, para identificar as notificações de todos os coordenadores. Após essa fase, cada nó sensor não coordenador decide o grupo a que pertencerá naquele ciclo. Essa decisão é baseada na potência dos sinais recebidos na fase de notificação.

Após cada nó ter decidido a qual grupo pertencer, ele informa ao seu coordenador, que será um membro daquele grupo. Isso também é feito utilizando um protocolo CSMA. Durante essa fase, todos os coordenadores de grupo precisam manter seus receptores ligados. Na sequência, baseado no número de nós pertencentes ao grupo, o coordenador cria (e transmite aos outros nós do grupo) um agendamento *Time Division Multiple Access* (TDMA), que indica quando cada nó irá transmitir a correspondente informação sensoriada.

3.4 Fusão e Transmissão das Informações Sensoriadas

Uma vez que os grupos tenham sido criados e o agendamento TDMA realizado, a fase de fusão e transmissão das informações sensoriadas pode começar. O coordenador recebe as informações sensoriadas a partir dos outros nós sensores pertencentes ao seu grupo e executa rotinas de processamento dos sinais recebidos para comprimí-los em um único sinal resultante. Por exemplo, se as informações sensoriadas são compostas de sinais sísmicos ou de áudio, o coordenador pode empregar uma conformação de feixes dos sinais individuais para gerar um sinal composto.

O sinal composto gerado pela fusão das informações sensoriadas é transmitido para o nó destino. Então, o próximo ciclo inicia com cada nó determinando se será um coordenador de grupo para aquele ciclo e propagando essa decisão para o resto da rede.

3.5 Múltiplos Grupos

Nas redes de sensores sem fio consideradas, a transmissão em um grupo afeta e degrada o processo de comunicações nos grupos próximos. Por exemplo, a Figura 3.2 mostra a interferência de transmissão para três nós sensores. As transmissões do nó A para o nó B interferem em transmissões que envolvem o nó C. Para reduzir esse tipo de interferência, cada grupo se comunica utilizando diferentes códigos *Code Division Multiple Access* – CDMA. Então, quando um código decide se tornar um coordenador de grupo, ele escolhe a partir de uma lista os códigos de espalhamento e comunica a todos os nós sensores pertencentes ao grupo que usem esses códigos nas suas transmissões.

Utilizar códigos CDMA, apesar de não ser necessariamente a opção mais eficaz no aproveitamento da largura de banda, soluciona o problema de múltiplo acesso de uma maneira distribuída, além de prover maior segurança à transmissão das informações.

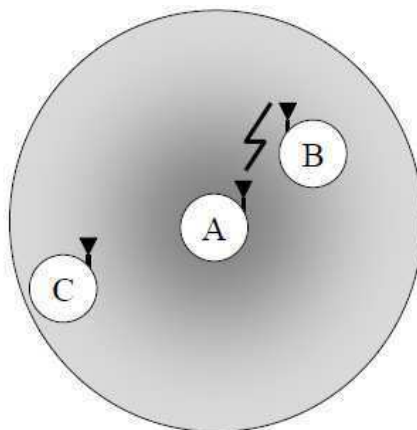


Figura 3.2 Interferência de transmissão entre os nós sensores.

3.6 LEACH e Outros Protocolos

Uma comparação entre o desempenho do protocolo LEACH e outros protocolos de roteamento é apresentada em [4]. A seguir são descritas as principais características de dois desses protocolos.

Comunicação Direta – Em um protocolo de comunicação direta, cada sensor envia seus dados de maneira direta para o nó destino. Se o nó destino está muito distante dos nós sensores, a comunicação direta requer uma alta potência de transmissão de cada nó. Isso faz com que a energia da bateria de cada nó seja rapidamente consumida e reduz o tempo de vida do sistema. Portanto, as recepções de dados nesse protocolo ocorrem apenas no nó destino, de modo que se o nó destino estiver próximo aos nós sensores, ou a energia requerida para a recepção de dados for muito expressiva, esse protocolo pode ser um método de comunicação aceitável (e possivelmente ótimo) [4].

Rota de Mínima Energia – Denominado *Minimum Transmission Energy* (MTE), nesse protocolo o roteamento dos dados é realizado por meio de nós sensores intermediários entre o nó fonte e o nó destino. Entretanto, para que um nó intermediário seja eleito um nó roteador é necessário que a energia consumida ao realizar tal roteamento seja menor do que a energia consumida no modo de transmissão direta. Como exemplo, considere um nó fonte **A**, um nó intermediário **B** e um nó destino **C**. Considere a distância de **A** para **B**, dada por d_{AB} ; a distância de **B** para **C**, dada por d_{BC} ; e a distância de **A** para **C**, dada por d_{AC} . Então, o nó **A** transmite um pacote para o nó **C** por meio do nó **B**, apenas se $d_{AB}^2 + d_{BC}^2 \leq d_{AC}^2$.

No roteamento MTE os nós mais próximos ao nó destino são utilizados para rotar um grande número de mensagens de dados. Esses nós se tornam inativos mais rapidamente, causando um aumento na energia requerida para que os dados sejam transmitidos ao nó destino

e a inativação de mais nós sensores. O resultado é um efeito cascata que diminui o tempo de vida da rede.

As Figuras 3.3 e 3.4 mostram uma comparação de desempenho entre os protocolos de roteamento por comunicação direta e pelo MTE. Os nós que permanecem ativos são representados por círculos. Esses resultados estão demonstrados em [4], com a consideração de cada nó conter uma energia inicial de 0,5 J e para um estágio de 180 ciclos. O nó destino está localizado nas coordenadas $(x = 0, y = -100)$. Os nós sensores mais próximos ao nó destino são os primeiros a se tornar inativos (representados por pontos) no roteamento MTE, enquanto que os nós sensores mais distantes do nó destino são os primeiros a se tornar inativos no roteamento por comunicação direta. Esse é um resultado esperado, já que os nós próximos ao nó destino são os mais utilizados como roteadores no esquema MTE, e os nós mais distantes do nó destino gastam mais energia no esquema de comunicação direta.

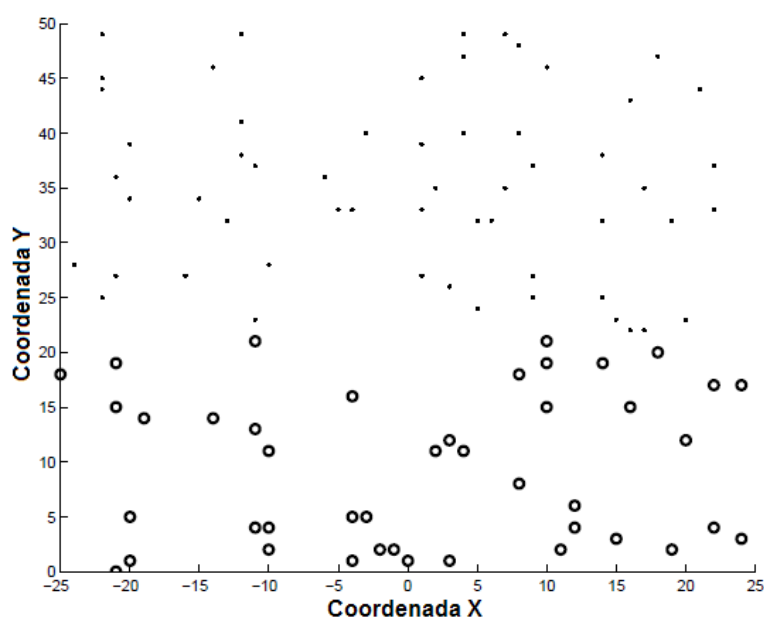


Figura 3.3 Roteamento por comunicação direta, em que os nós inativos são representados por pontos.

A Figura 3.5 mostra os resultados que os autores de [4] obtiveram com a simulação do protocolo LEACH. Os nós sensores se tornam inativos de forma aleatória, o que é mais desejável em relação aos cenários polarizados das Figuras 3.3 e 3.4. Com a inativação aleatória dos nós sensores, regiões não sensoriadas no ambiente possuem menor ocorrência, já que a dissipação de energia pela rede é mais uniforme. Assim como nos resultados das Figuras 3.3 e 3.4, foi utilizada uma energia inicial de 0,5 J, entretanto o desempenho foi observado em um estágio de 1200 ciclos e o nó destino posicionado nas mesmas coordenadas. Mesmo com uma diferença de 1020 ciclos, o protocolo LEACH visivelmente apresenta menos nós inativos, o que comprova que além de prover um esquema de consumo de energia mais uniforme, também aumenta o tempo de vida da rede.

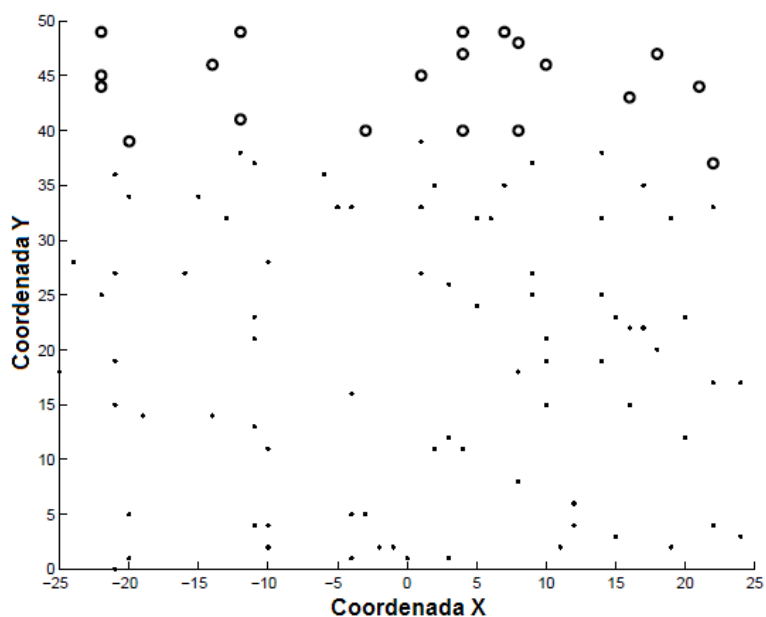


Figura 3.4 Roteamento por MTE, em que os nós inativos são representados por pontos.

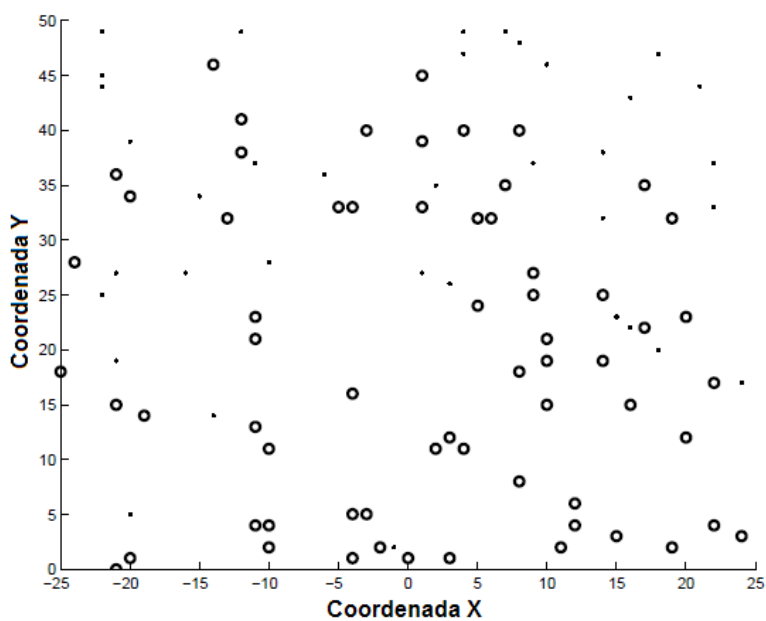


Figura 3.5 Utilização do protocolo LEACH, em que os nós inativos são representados por pontos.

Em redes de sensores sem fio, se for considerado apenas a energia de transmissão como elemento principal no modelo de dissipação de energia da rede, transmissões de curta distância poderiam ser classificadas como a melhor opção adotada pelo projetista. Entretanto, se o consumo de energia envolvido nos elementos de circuitos eletrônicos dos nós sensores é considerado, então a distância de transmissão ótima não é necessariamente a menor. Em vez disso, deve ser determinado o consumo de energia por salto, assim como o número de saltos. Como um exemplo, no protocolo LEACH são utilizadas transmissões de curta distância até que seja completada a fusão de dados no coordenador de grupo, enquanto que transmissões de longa distância são exploradas para o envio dos dados fundidos ao nó destino, reduzindo assim o número de saltos [53]. Por essa e outras razões, a adoção do protocolo LEACH é uma boa opção para alguns casos de projeto em RSSFs. Embora existam vários outros protocolos de roteamento, o LEACH suporta de maneira satisfatória a transmissão cooperativa, devido à formação de grupos e seus coordenadores [54].

CAPÍTULO 4

Diversidade Cooperativa Adaptativa Aplicada a Redes de Sensores sem Fio

4.1 Introdução

Diversos trabalhos têm sido propostos para a utilização da transmissão cooperativa em RSSFs. Os autores de [55] projetaram um paradigma de RSSF em que os nós sensores são organizados em grupos e os coordenadores de grupo formam um *backbone* de múltiplos saltos. Para melhorar a eficiência no consumo de energia e a confiabilidade do sistema, um esquema Múltiplas-Entradas Múltiplas-Saídas (*Multiple-Input Multiple-Output* – MIMO) foi adotado em cada transmissão envolvendo os coordenadores. Resultados de simulações mostram a eficiência do protocolo na minimização do consumo de energia [55].

Um esquema de transmissão que usa dois nós transmissores e a codificação em bloco espaço temporal para prover a diversidade de transmissão em redes de sensores sem fio distribuídas foi proposto em [56]. Além de combater o desvanecimento do canal, os resultados mostram a otimização na utilização da energia nos nós sensores. Um outro esquema de diversidade cooperativa foi proposto em [54], em que os autores combinam a operação do protocolo LEACH e da codificação STBC para demonstrar a melhoria no sistema de transmissão e o prolongamento do tempo de vida da rede.

Neste capítulo, um sistema que combate o desvanecimento presente no canal de comunicações de RSSFs (por meio do uso da cooperação entre os nós) e aumenta o tempo de vida da rede (por meio de uma arquitetura hierárquica de baixa energia) é apresentado. A técnica é chamada de diversidade cooperativa adaptativa, pois além de usar a capacidade colaborativa da rede, também seleciona as melhores condições de propagação. O sucesso dos resultados obtidos na literatura com a combinação entre LEACH e STBC é repetido aqui, já que se torna viável a utilização de grupos e seus coordenadores para alcançar a diversidade completa de transmissão. O esquema proposto difere do anterior por utilizar a capacidade adaptativa e seletiva provida pelo uso do ARQ Truncado na camada de enlace, o que otimiza o desempenho da rede.

Inicialmente, são descritas as principais características de desvanecimento presentes no canal de comunicações sem fio, e em seguida, algumas formas para combatê-lo. A diversidade cooperativa é explorada e sua aplicação a redes de sensores sem fio é detalhada com a caracterização do sistema proposto.

4.2 O Desvanecimento em Comunicações sem Fio

A transmissão de sinais em sistemas de comunicações sem fio é vulnerável a diversos efeitos presentes no correspondente canal. Dentre eles, o desvanecimento e os percursos múltiplos são caracterizados a seguir [57]:

Desvanecimento – caracteriza a existência de variações aleatórias ao longo do tempo da intensidade do sinal recebido. A variação tem como referência o valor de campo recebido em espaço livre. As causas do desvanecimento se encontram no meio de propagação;

Percursos Múltiplos – o sinal resultante recebido é a soma de um raio direto entre as antenas e outros raios que seguem trajetórias distintas do raio direto. Os trajetos distintos, designados como percursos múltiplos, são originados das refrações e reflexões (ainda que de pequena intensidade) resultantes de irregularidades na constante dielétrica da atmosfera com a altitude. A energia transportada por meio dos percursos múltiplos é, em geral, bem inferior àquela associada ao feixe principal. Entretanto, quando o feixe principal por um motivo qualquer (obstrução parcial, interferência por reflexão no terreno) sofre uma atenuação considerável, a energia recebida por meio dos percursos múltiplos passa a desempenhar um papel importante, dando origem a fenômenos de interferência apreciáveis.

O desvanecimento de multipercurso, devido às reflexões nos edifícios e obstáculos naturais, ou nas paredes, teto e piso de instalações, provoca uma série de aprofundamentos no espectro do sinal recebido. O padrão assim obtido representa a assinatura do desvanecimento seletivo, podendo ser previsto por meio de uma análise acurada do canal. Nesse tipo de propagação por múltiplos percursos, cada caminho apresenta um ganho, fase e atraso associado. Os sinais de multipercurso se recombinaem no receptor, de forma que o sinal recebido é uma versão distorcida do que foi transmitido.

4.3 Pedido Automático de Repetição Truncado

O pedido automático de repetição (*Automatic Repeat Request* – ARQ) é uma maneira efetiva para minimizar as perdas causadas pelo desvanecimento do canal. Atuando na camada de enlace, a técnica ARQ possibilita que o receptor verifique se a mensagem transmitida está correta e comunique o resultado dessa verificação ao transmissor. Mensagens de reconhecimento são enviadas em um enlace reverso (receptor-transmissor) e de acordo com o resultado

da verificação essa mensagem é um ACK (*Acknowledgement*), para mensagens transmitidas corretamente, ou um NACK (*Non-Acknowledgement*), para mensagens corrompidas. Quando um ACK é recebido pelo transmissor, um novo pacote pode ser enviado. Entretanto, se um NACK é recebido o pacote de dados correspondente deve ser retransmitido. Se um número limite de retransmissões é imposto, então a técnica é chamada de Pedido Automático de Repetição Truncado (ARQ Truncado), o que evita maiores atrasos no sistema geral de transmissão.

A maioria dos métodos de detecção de erros se baseia em realizar operações matemáticas com os dados antes da transmissão e enviar ao receptor um pacote contendo os dados e o resultado dessas operações. Ao receber o pacote, o mesmo cálculo é feito pelo receptor. Se o resultado for diferente, significa que o dado transmitido foi modificado durante seu trajeto. O ARQ normalmente utiliza a verificação de redundância cíclica (CRC) para a detecção de erros nas mensagens transmitidas. A operação do CRC é baseada na divisão da sequência de *bits* de dados a serem transmitidos por uma outra sequência de *bits* e na utilização do resto dessa divisão como registro de verificação. As sequências de *bits* são tratadas como polinômios de coeficientes de 0 e 1. Um quadro de k *bits* é considerado como o conjunto de coeficientes de um polinômio de k termos e ordem $k - 1$. Por exemplo, 110001 representa o polinômio $x^5 + x^4 + x^0$.

Outra maneira eficaz para combater a degradação por desvanecimento dos sinais transmitidos é a utilização das técnicas de diversidade, caracterizadas na seção seguinte.

4.4 Diversidade em Redes sem Fio

Diversidade em redes sem fio, algumas vezes referida como diversidade de canal ou diversidade de enlace, está relacionada com o fenômeno em que transmissões por diferentes canais, por exemplo, faixa de frequência, período de tempo, e outros, possuem diferentes condições de recepção. Um esquema de diversidade utiliza tal fenômeno para transmissões de melhor qualidade. Alguns tipos de diversidade são discutidos a seguir [58].

Diversidade Temporal – Um sistema de comunicações sem fio pode operar em um ambiente dinâmico devido à mobilidade de ambos os transmissores ou de algum obstáculo. Então, o ganho do canal é um processo estocástico centrado em um valor médio. Desse modo, amostras de transmissões a diferentes intervalos de tempo podem ter variações significativas no nível de atenuação, mesmo se o transmissor e o receptor estiverem estáticos. Numa situação extrema, tal variação pode ser observada mesmo com uma única transmissão. Para combater esse fenômeno, mensagens idênticas podem ser transmitidas por múltiplos instantes de tempo, provendo maior robustez ao sistema. Alternativamente, a codificação de correção de erro progressiva (*Forward Error Correction* – FEC) pode ser utilizada para espalhar a informação sobre um período mais longo de tempo de transmissão. Essa é a primeira forma de diversidade de canal utilizada em comunicações;

Diversidade em Frequência – A propagação de sinais em diferentes frequências experimenta diferenças em reflexão, difração e espalhamento, ainda que seja considerado o mesmo instante de tempo e localização. Algum canal sem fio é afetado pelo desvanecimento seletivo em frequência, que é a variação do ganho do canal no domínio da frequência. Medidas corretivas para esse tipo de desvanecimento incluem transmissões simultâneas por múltiplas subportadoras (e.g., OFDM);

Diversidade Espacial – Entre um transmissor e um receptor podem existir múltiplos percursos para o sinal se propagar, com uma componente de linha de visada (*Line-of-Sight* – LOS) ou não. A composição desses percursos de propagação depende das exatas posições do transmissor, receptor e todos os obstáculos. Então, uma pequena mudança de posição desses elementos pode variar significativamente a assinatura do canal. Para utilizar a diversidade espacial, múltiplos transmissores (i.e., diversidade de transmissão) ou múltiplos receptores (i.e., diversidade de recepção) podem ser empregados para a transmissão conjunta da mesma mensagem. Múltiplas antenas podem viabilizar esse tipo de diversidade. Sistemas MIMO e de codificação espaço-temporal são exemplos de utilização dessa técnica. Dependendo da distância entre os transmissores ou entre os receptores, em relação ao comprimento de onda da portadora do sinal, a diversidade espacial pode ainda ser classificada como microdiversidade e macrodiversidade;

Diversidade por Multipercurso – Em uma rede sem fio de múltiplos saltos, um determinado par de nó fonte e nó destino pode ser conectado por meio de múltiplos percursos na rede. As propriedades desses percursos variam em diversas maneiras e são ainda induzidas e sintetizadas a partir da diversidade dos enlaces que envolvem esses percursos;

Diversidade em Modulação – Esta técnica consiste em introduzir redundância por meio de uma escolha criteriosa do ângulo de referência de uma constelação de sinais, combinada com o entrelaçamento independente das componentes dos símbolos a serem transmitidos [9].

Outra técnica de diversidade que vem atraindo a atenção da comunidade científica e empresas é a diversidade cooperativa. Nesse tipo de diversidade, a implementação em sua forma mais básica é a adoção de um modelo de colaboração entre três terminais: o nó fonte, o nó parceiro e o nó destino, conforme é ilustrado na Figura 4.1. A técnica de diversidade cooperativa é explicada com mais detalhes na próxima seção.

4.5 Diversidade Cooperativa

A diversidade cooperativa é uma tecnologia de consideráveis potencialidades para o combate ao desvanecimento provocado pelo multipercurso em um meio de propagação sem fio. Com a habilitação de um conjunto de nós parceiros para encaminhar a informação recebida, esse

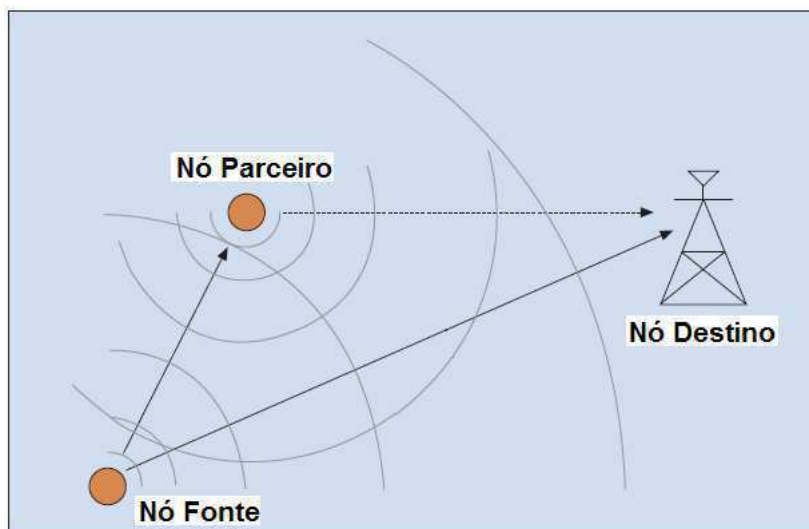


Figura 4.1 Diversidade cooperativa em redes sem fio.

sistema explora a diversidade espacial por meio da cooperação entre as antenas distribuídas, pertencentes ao múltiplos terminais em redes sem fio [59].

Tradicionalmente, nós parceiros têm sido usados para estender a abrangência dos sistemas de comunicações sem fio. Desse modo, nos últimos anos, diversas aplicações de comunicações viabilizadas por nós parceiros têm emergido. Uma dessas aplicações é a assistência na comunicação entre os terminais fonte e destino, com o uso de algum protocolo de cooperação. Por meio do controle de acesso ao meio entre fonte e terminais parceiros, associado aos esquemas de modulação ou codificação apropriados em tais esquemas cooperativos, tem sido comprovado que a diversidade dos sistemas de comunicações pode ser melhorada.

Em sistemas multi-usuários, diferentes usuários podem também atuar como parceiros cooperativos ou nós para compartilhar recursos e assistir outros nós nas transmissões de informações, criando uma rede cooperativa. Uma outra aplicação emergente é a troca de informações entre múltiplos usuários por meio de nós parceiros. Nesse caso, a vazão (*throughput*) dos sistemas de comunicações pode ser consideravelmente aumentada.

Para a técnica de diversidade cooperativa, a camada de controle de acesso ao meio possui propriedades diferenciadas. O controle de acesso ao meio é relacionado com mais de um salto no processo de comunicação, é distribuído, cooperativo e funciona em transmissões multi-ponto a multi-ponto. O controle de acesso ao meio também precisa do conhecimento sobre a topologia e mobilidade da rede.

Com os benefícios a serem obtidos com o emprego e desenvolvimento das técnicas de comunicação cooperativa, diversos grupos de padronização, tais como o IEEE 802.16 e IEEE 802.11, têm iniciado processos de padronização para incluir tais tecnologias nos formatos existentes.

4.5.1 Diversidade Cooperativa Adaptativa

Diversidade cooperativa seletiva com ARQ truncado (SCA), também denominada diversidade cooperativa adaptativa, compreende um projeto de relacionamento entre camadas (*cross-layer*), que combina o ARQ truncado na camada de enlace e diversidade cooperativa na camada física [10]. Esse esquema de relacionamento entre camadas é apresentado na Figura 4.2. Com essa combinação, o ganho da diversidade cooperativa adaptativa pode ser alcançado. Além disso, a qualidade do canal é melhor aproveitada nas retransmissões, por meio da utilização de nós parceiros, de modo que ganhos substanciais de vazão podem ser obtidos [10].

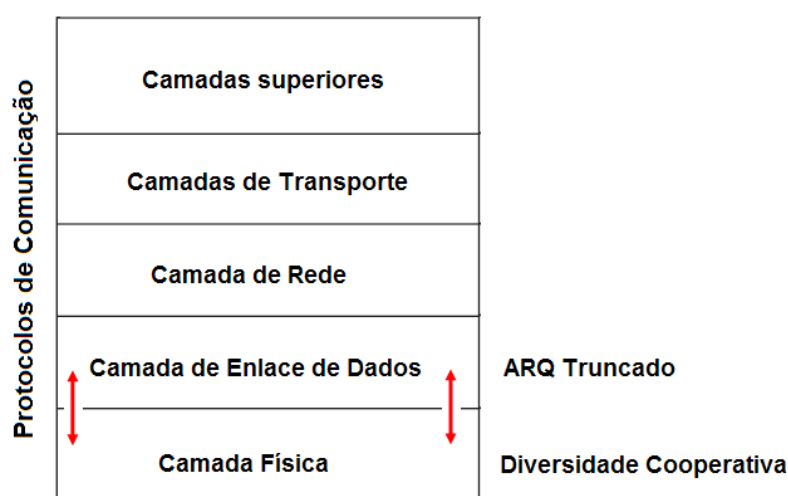


Figura 4.2 Esquema *cross-layer* da diversidade cooperativa adaptativa.

O SCA utiliza a transmissão cooperativa ortogonal para alcançar o ganho de diversidade. Cada nó possui um ou vários parceiros. O nó e seus parceiros são responsáveis pela transmissão de não apenas suas próprias informações, mas também a dos parceiros. Portanto um arranjo virtual de antenas é obtido com o uso da antena de cada parceiro, sem demasiada complexidade no processamento dos sinais e sem a necessidade de adicionar mais de uma antena a cada nó [10].

Nesse esquema, a propagação de erros pode ser evitada, já que apenas os parceiros candidatos que detectam corretamente o pacote de dados são selecionados a se tornar nós parceiros para a etapa de retransmissão. Além disso, a cooperação dos nós é habilitada apenas quando o receptor falha ao receber um pacote corretamente, de modo que a diversidade cooperativa é empregada de maneira adaptativa e seletiva.

4.6 O Sistema Proposto

O sistema proposto, SCA com LEACH [60], [61], [62] é uma combinação do protocolo LEACH e o esquema cooperativo SCA, apresentados anteriormente. Considere uma rede de sensores sem fio homogênea, sem mobilidade, com roteamento hierárquico e pertencente à

classe CIRSSF, de acordo com as características expostas no Capítulo 2. A rede possui K nós e cada nó é equipado com uma antena. Entre os K nós, Q nós são os coordenadores de grupo do ciclo corrente, selecionados por meio do algoritmo LEACH; $Q - 1$ coordenadores de grupo ficam disponíveis para se candidatarem a se tornar possíveis nós parceiros do coordenador fonte (*source cluster-head*) durante a transmissão do pacote. O coordenador fonte transmite um pacote de dados com um CRC de C bits anexado e o nó destino detecta esse CRC. Então, uma mensagem de reconhecimento, positiva (ACK) ou negativa (NACK), é enviada a partir do nó destino até o coordenador fonte. Ao mesmo tempo, todos os $Q - 1$ candidatos a parceiros (*relay candidates*) conferem o CRC e aqueles que possuírem resultados positivos são selecionados a se tornar coordenadores parceiros (*relay cluster-heads*). Se o pacote é corretamente detectado pelo nó destino (com um retorno ACK), o coordenador fonte continua a transmissão de novos pacotes e o processo é repetido. Caso contrário, uma retransmissão é iniciada. Ambos os coordenadores fonte e parceiros transmitirão conjuntamente o pacote. A retransmissão continua até o pacote ser entregue corretamente, ou se o número de retransmissões exceder N_r^{\max} , que é um parâmetro pré-selecionado, que indica o número máximo de retransmissões permitidas por pacote. Esse algoritmo está ilustrado no diagrama de blocos da Figura 4.3. O esquema de diversidade adotado é a codificação em bloco espaço-temporal, que está detalhada no Capítulo 5.

4.6.1 O Modelo do Canal

O modelo do canal considerado é baseado no modelo proposto em [10] e está representado na Figura 4.4. A comunicação entre o coordenador de grupo fonte e o nó destino acontece por um canal com desvanecimento Rayleigh plano e é facilitada por ν coordenadores parceiros, que são selecionados a partir de $Q - 1$ coordenadores candidatos. Adicionalmente, admita o perfeito conhecimento do estado do canal no receptor.

Nos períodos de tempo $t_0 + 1, \dots, t_0 + \zeta$, o coordenador fonte envia um pacote

$$x_{t_0+1}^s, \dots, x_{t_0+\zeta}^s, \quad (4.1)$$

com potência de transmissão P_t por símbolo, em que $x_{t_0+i}^s$ é um símbolo que utiliza a modulação M -QAM e $\zeta = L/b$ é o número de símbolos por pacote com um tamanho total do pacote de L bits e um nível de modulação de $b = \log_2 M$ bits. O sinal recebido pelo nó destino no período de tempo $t_0 + i, i = 1, \dots, \zeta$, é dado por

$$y_{t_0+i}^d = h_0 x_{t_0+i}^s + z_0, \quad (4.2)$$

em que o ganho do canal h_0 é uma variável aleatória gaussiana complexa com média nula e variância σ_0^2 , em que σ_0^2 incorpora o efeito de atenuação em larga escala e sombreamento. O ruído gaussiano branco aditivo (*Additive White Gaussian Noise – AWGN*) com média nula

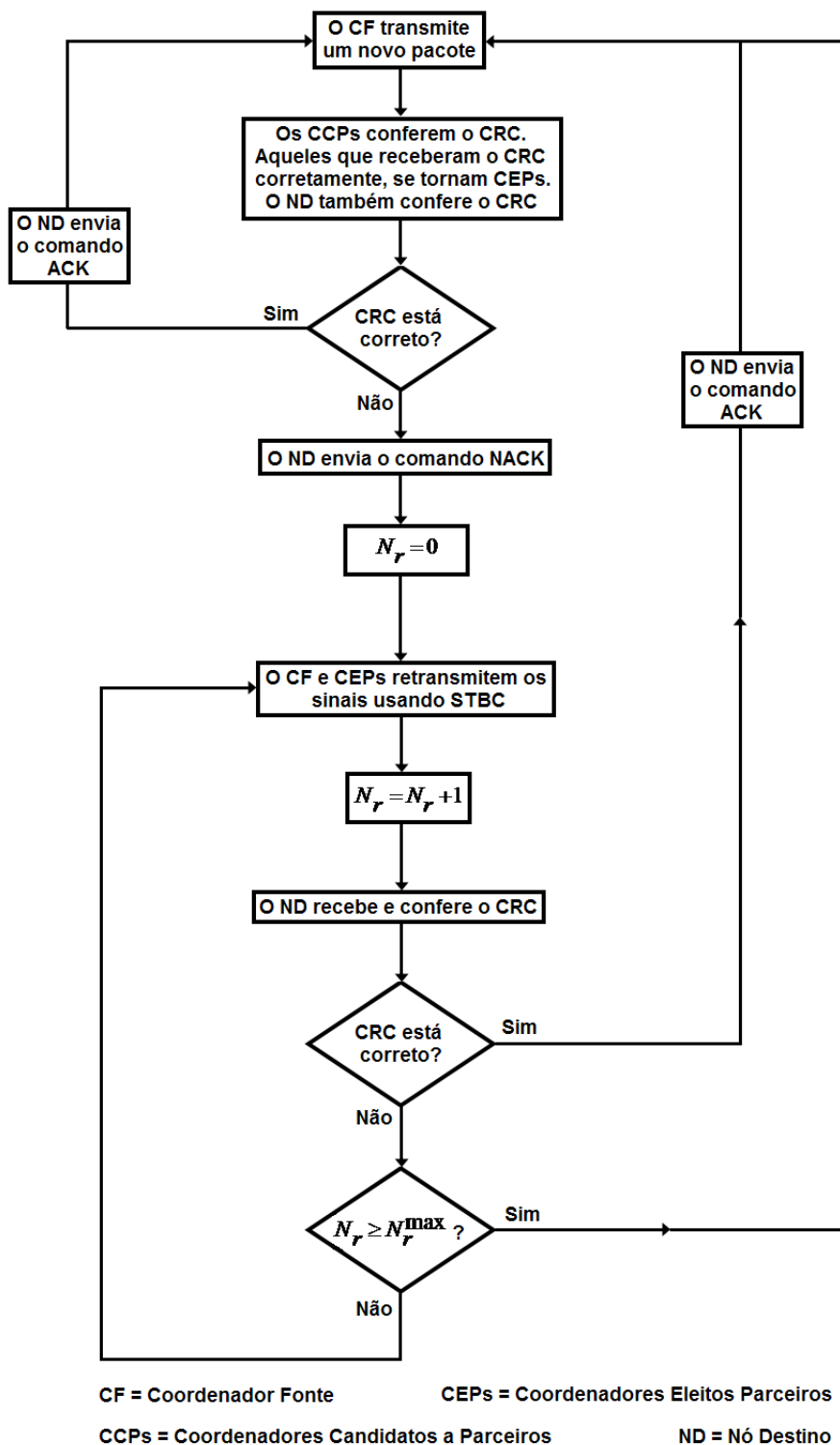


Figura 4.3 Operação da diversidade cooperativa adaptativa para RSSFs.

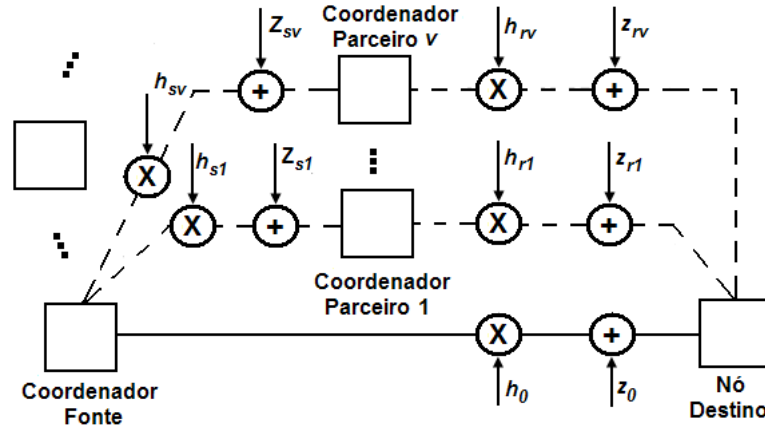


Figura 4.4 Representa o do modelo do canal.

e variância δ_0 é representado por z_0 . No j -ésimo coordenador candidato a parceiro, em que $j = 1, \dots, Q - 1$, o sinal recebido é dado por

$$y_{t_0+1}^{rj} = h_{sj}x_{t_0+1}^s + z_{sj}, \quad (4.3)$$

em que o ruído z_{sj} e os coeficientes do desvanecimento h_{sj} são variáveis aleatórias gaussianas complexas com média nula e variâncias δ_0 e $\sigma_{s_j}^2$, respectivamente, em que $j = 1, \dots, Q - 1$. Na seq ncia, o pacote $x_{t_0+1}^s, \dots, x_{t_0+\zeta}^s$ é transmitido diretamente.

Se o não destino falha na detec o correta do pacote, o processo de retransmissão é iniciado no período de tempo $t_L + 1$. Admita que N_r   o número de retransmissões, de modo que $1 \leq N_r \leq N_r^{\max}$. O sinal recebido no não destino no período de tempo $t_L + i$ é dado por

$$y_{t_L+i}^d = h_0x_{t_L+i}^s + z_0 + \sum_{j=1}^v h_{rj}x_{t_L+i}^{rj} + z_{rj}, \quad (4.4)$$

para $i = 1, \dots, N_r\zeta/R$, em que R   a taxa do código STBC utilizado. Os símbolos $x_{t_L+i}^s$ e $x_{t_L+i}^{rj}$ são os códigos STBCs transmitidos pelo coordenador fonte e os j -ésimos coordenadores parceiros, com potência de transmissão $P_t/(v+1)$, respectivamente. O ruído aditivo z_{rj} e os coeficientes do desvanecimento h_{rj} são variáveis aleatórias gaussianas complexas com média nula e variâncias δ_0 e $\sigma_{r_j}^2$, respectivamente, em que $j = 1, \dots, v$.

O próximo capítulo detalha a opera o dos códigos STBCs utilizados como esquema de codifica o para prover o ganho de diversidade cooperativa adaptativa do sistema proposto.

CAPÍTULO 5

Codificação em Bloco Espaço-Temporal

5.1 Introdução

A eficiência em energia de transmissão em RSSFs pode ser alcançada pelas técnicas de diversidade com arranjos de antenas, em que os códigos de bloco espaço-temporais são atrativos por causa do tipo de complexidade linear. Para terminais desprovidos de múltiplas antenas, STBCs com esquemas de transmissão cooperativa têm sido propostos [56], [63], [64], [65]. A codificação STBC cooperativa não apenas melhora a eficiência em energia de transmissão, mas também distribui o consumo de energia sobre vários sensores, resultando em um equilíbrio nos tempos de vida individuais dos nós sensores da rede.

Este capítulo detalha a operação da codificação em bloco espaço-temporal, começando com uma descrição do esquema de Alamouti e se estendendo com a abordagem para mais de duas antenas no transmissor e receptor. Os algoritmos de codificação e decodificação são descritos para ambos os esquemas. Vale ressaltar que apesar da abordagem de descrição dos algoritmos de codificação e decodificação tratar a diversidade espacial como sendo realizada por diferentes antenas (i.e., em um único terminal), no esquema SCA com LEACH a utilização da codificação em bloco espaço-temporal é viabilizada pela cooperação dos coordenadores individuais. Cada coordenador é provido apenas de uma antena e a colaboração de vários coordenadores forma um arranjo virtual de antenas, o que resulta na diversidade espacial projetada.

5.2 O Esquema de Alamouti

O esquema de Alamouti é historicamente o primeiro¹ código em bloco espaço-temporal a prover diversidade completa de transmissão com duas antenas transmissoras [66]. A Figura 5.1 mostra o diagrama de blocos do codificador espaço-temporal de Alamouti, em que um esquema de modulação M -ária é utilizado. No codificador espaço-temporal de Alamouti,

¹Apesar desse marco histórico ser bastante difundido, V. M. DaSilva e E. S. Sousa apresentaram em [7] um esquema de diversidade espacial anterior à proposta de Alamouti.

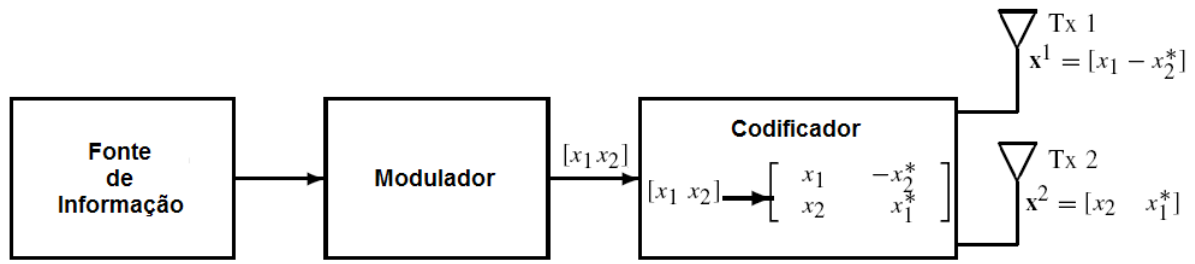


Figura 5.1 Diagrama de blocos do codificador espaço-temporal de Alamouti.

primeiramente cada grupo de m bits de informação é modulado, em que $m = \log_2 M$. Então, o codificador aloca um bloco de dois símbolos modulados x_1 e x_2 em cada operação de codificação e os mapeia para serem transmitidos de acordo com uma matriz código, dada por

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{pmatrix}. \quad (5.1)$$

As saídas do codificador são transmitidas em dois períodos de transmissão consecutivos a partir de duas antenas transmissoras. Durante o primeiro período de transmissão, dois sinais x_1 e x_2 são transmitidos simultaneamente a partir da antena 1 e antena 2, respectivamente. No segundo período de transmissão, o sinal $-x_2^*$ é transmitido a partir da antena 1 e o sinal x_1^* a partir da antena 2, em que x_1^* é o conjugado complexo de x_1 . Desse modo, fica claro que a codificação é feita em ambos os domínios de espaço e tempo.

Admita que as sequências de transmissão a partir das antenas 1 e 2 são denotadas por \mathbf{x}^1 e \mathbf{x}^2 , respectivamente, de modo que:

$$\mathbf{x}^1 = [x_1, -x_2^*], \quad (5.2)$$

$$\mathbf{x}^2 = [x_2, x_1^*]. \quad (5.3)$$

A principal propriedade do esquema de Alamouti é que as sequências de transmissão provenientes das duas antenas transmissoras são ortogonais, já que o produto interno das sequências \mathbf{x}^1 e \mathbf{x}^2 é zero, i.e.

$$\mathbf{x}^1 \cdot (\mathbf{x}^2)^H = x_1 x_2^* - x_2^* x_1 = 0, \quad (5.4)$$

em que $(\mathbf{x}^2)^H$ denota transposição hermitiana. A matriz de código possui a seguinte propriedade

$$\mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^H = \begin{bmatrix} |x_1|^2 + |x_2|^2 & 0 \\ 0 & |x_1|^2 + |x_2|^2 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$= (|x_1|^2 + |x_2|^2) \mathbf{I}_2, \quad (5.6)$$

em que \mathbf{I}_2 é uma matriz identidade 2×2 .

Admita que uma antena é utilizada no receptor. O diagrama de blocos do receptor para o esquema de Alamouti é mostrado na Figura 5.2. Os coeficientes de desvanecimento do canal, a partir da primeira e segunda antenas transmissoras até a antena receptora no instante de tempo t são denotados por $h_1(t)$ e $h_2(t)$, respectivamente. Admitindo que os coeficientes de desvanecimento são constantes entre dois períodos consecutivos de transmissão de símbolos, eles podem ser expressos como:

$$h_1(t) = h_1(t + T) = h_1 = |h_1|e^{j\theta_1} \quad (5.7)$$

e

$$h_2(t) = h_2(t + T) = h_2 = |h_2|e^{j\theta_2}, \quad (5.8)$$

em que $|h_i|$ e $\theta_i, i = 1, 2$, são o ganho de amplitude e a mudança de fase para o percurso a partir da antena transmissora i até a antena receptora e T é a duração do símbolo.

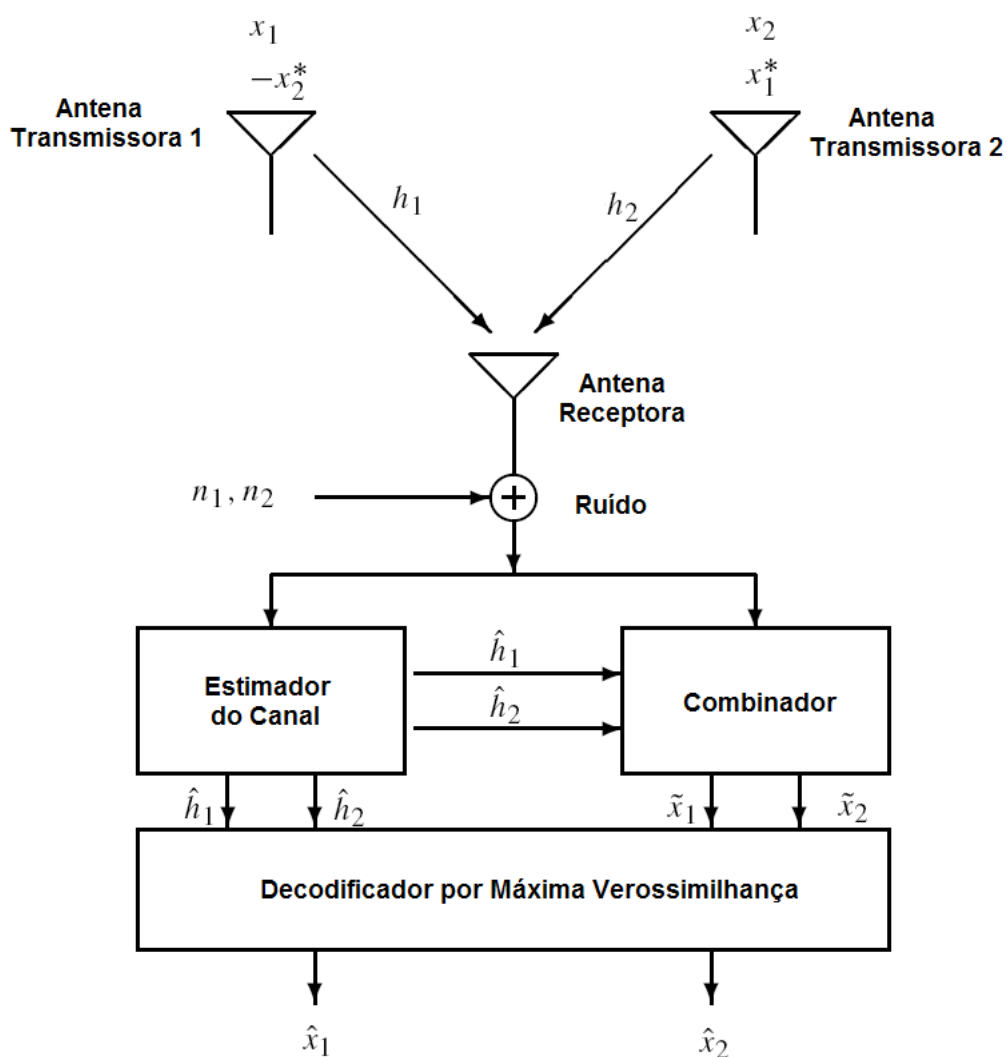


Figura 5.2 Diagrama de blocos do receptor de Alamouti.

Na antena receptora, os sinais recebidos em dois períodos de símbolos consecutivos, denotados por r_1 e r_2 para o tempo t e $t + T$, respectivamente, podem ser expressos por:

$$r_1 = h_1 x_1 + h_2 x_2 + n_1, \quad (5.9)$$

$$r_2 = -h_1 x_2^* + h_2 x_1^* + n_2, \quad (5.10)$$

em que n_1 e n_2 são variáveis aleatórias complexas independentes com média nula e densidade espectral de potência $N_0/2$ por dimensão, representando as amostras de ruído gaussiano branco aditivo, nos tempos t e $t + T$, respectivamente.

Se os coeficientes de desvanecimento do canal, h_1 e h_2 , puderem ser perfeitamente recuperados no receptor, o decodificador os usará como informação do estado do canal (*Channel State Information* – CSI). Admitindo que todos os símbolos na constelação da modulação são equiprováveis, um decodificador de máxima verossimilhança escolhe um par de sinais (\hat{x}_1, \hat{x}_2) a partir da constelação de modulação do sinal para minimizar a métrica de distância

$$d^2(r_1, h_1 \hat{x}_1 + h_2 \hat{x}_2) + d^2(r_2, -h_1 \hat{x}_2^* + h_2 \hat{x}_1^*) =$$

$$|r_1 - h_1 \hat{x}_1 - h_2 \hat{x}_2|^2 + |r_2 + h_1 \hat{x}_2^* - h_2 \hat{x}_1^*|^2 \quad (5.11)$$

sobre todos os possíveis valores de \hat{x}_1 e \hat{x}_2 . Substituindo (5.9) e (5.10) em (5.11), a decodificação por máxima verossimilhança pode ser representada como

$$(\hat{x}_1, \hat{x}_2) = \arg \min_{(\hat{x}_1, \hat{x}_2) \in C} (|h_1|^2 + |h_2|^2 - 1)(|\hat{x}_1|^2 + |\hat{x}_2|^2) + d^2(\tilde{x}_1, \hat{x}_1) + d^2(\tilde{x}_2, \hat{x}_2), \quad (5.12)$$

em que C é o conjunto de todos os valores possíveis de pares de símbolos modulados (\hat{x}_1, \hat{x}_2) , \tilde{x}_1 e \tilde{x}_2 são duas estatísticas de decisão contruídas pela combinação dos sinais recebidos com a informação de estado de canal. As estatísticas de decisão são dadas por:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= h_1^* r_1 + h_2 r_2^*, \\ \tilde{x}_2 &= h_2^* r_1 - h_1 r_2^*. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Substituindo r_1 e r_2 provenientes de (5.9) e (5.10), respectivamente, em (5.13), as estatísticas de decisão são escritas como:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= (|h_1|^2 + |h_2|^2)x_1 + h_1^* n_1 + h_2 n_2^*, \\ \tilde{x}_2 &= (|h_1|^2 + |h_2|^2)x_2 - h_1 n_2^* + h_2^* n_1. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Para uma dada realização do canal h_1 e h_2 , as estatísticas de decisão $\tilde{x}_i, i = 1, 2$, são apenas funções de $x_i, i = 1, 2$. Então, a regra de decodificação por máxima verossimilhança, (5.12) pode ser separada em duas regras de decodificação independentes para x_1 e x_2 , dadas por:

$$\hat{x}_1 = \arg \min_{\hat{x}_1 \in S} (|h_1|^2 + |h_2|^2 - 1)|\hat{x}_1|^2 + d^2(\tilde{x}_1, \hat{x}_1) \quad (5.15)$$

e

$$\hat{x}_2 = \arg \min_{\hat{x}_2 \in S} (|h_1|^2 + |h_2|^2 - 1)|\hat{x}_2|^2 + d^2(\tilde{x}_2, \hat{x}_2), \quad (5.16)$$

respectivamente. Para constelações de sinais M -PSK, $(|h_1|^2 + |h_2|^2 - 1)|\hat{x}_i|^2, i = 1, 2$, são constantes para todos os pontos do sinal, dados os coeficientes de desvanecimento do canal. Portanto, as regras de decisão em (5.15) e (5.16) podem ser simplificadas ainda mais para:

$$\hat{x}_1 = \arg \min_{\hat{x}_1 \in S} d^2(\tilde{x}_1, \hat{x}_1) \quad (5.17)$$

e

$$\hat{x}_2 = \arg \min_{\hat{x}_2 \in S} d^2(\tilde{x}_2, \hat{x}_2). \quad (5.18)$$

5.3 O Esquema de Codificação STBC

A Figura 5.3 mostra a estrutura de codificador STBC. Um código de bloco espaço-temporal é definido por uma matriz de transmissão \mathbf{X} com n_T linhas e p colunas. O número de antenas transmissoras é representado por n_T e o número de períodos de tempo é representado por p , para a transmissão de um bloco de símbolos codificados.

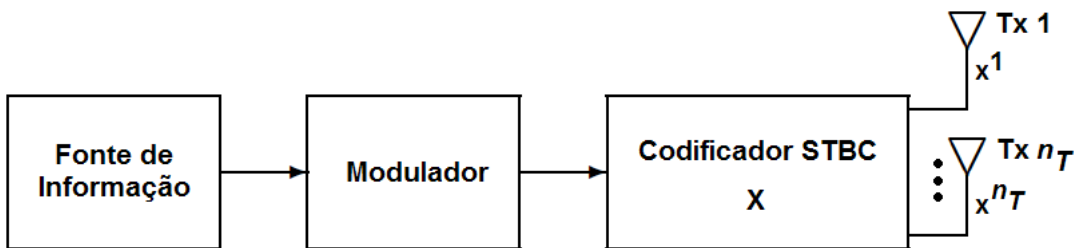


Figura 5.3 Diagrama de blocos da codificação STBC.

Admita que a constelação dos sinais consiste em 2^m pontos. Para cada operação de codificação, um bloco de km bits de informação é mapeado na constelação do sinal para selecionar k sinais modulados x_1, x_2, \dots, x_k , em que cada grupo de m bits seleciona um sinal da constelação. Os k sinais modulados são codificados por um codificador em bloco espaço-temporal para gerar n_T seqüências paralelas de sinais de tamanho p de acordo com a matriz de transmissão \mathbf{X} . Essas seqüências são transmitidas por meio de n_T antenas transmissoras simultaneamente em p períodos de tempo.

Nos códigos STBCs, o número de símbolos que o codificador aloca como suas entradas em cada operação de codificação é k . O número de períodos de transmissão requerido para transmitir os símbolos codificados, por meio de múltiplas antenas transmissoras é p . A taxa de um código STBC é definida como a razão entre o número de símbolos que o codificador aloca como suas entradas e o número de símbolos codificados em STBC, transmitidos a partir de cada antena e é dada por

$$R = \frac{k}{p}. \quad (5.19)$$

As entradas da matriz de transmissão \mathbf{X} são combinações lineares dos k símbolos modulados x_1, x_2, \dots, x_k e seus conjugados $x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*$. Para alcançar a diversidade de transmissão completa de n_T , a matriz de transmissão \mathbf{X} é construída baseada em um projeto ortogonal, de modo que [11]

$$\mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^H = c(|x_1|^2 + |x_2|^2 + \dots + |x_k|^2) \mathbf{I}_{n_T}, \quad (5.20)$$

em que c é uma constante, \mathbf{X}^H é o operador Hermitiano de \mathbf{X} e \mathbf{I}_{n_T} é uma matriz identidade $n_T \times n_T$. A i -ésima linha de \mathbf{X} representa os símbolos transmitidos a partir da i -ésima antena transmissora consecutivamente em p períodos de transmissão, enquanto a j -ésima coluna de \mathbf{X} representa os símbolos transmitidos simultaneamente por meio de n_T antenas transmissoras no tempo j . A j -ésima coluna de \mathbf{X} é reconhecida como o símbolo espaço-temporal transmitido no tempo j . O elemento de \mathbf{X} da i -ésima e j -ésima coluna $x_{i,j}$, $i = 1, 2, \dots, n_T$, $j = 1, 2, \dots, p$, representa o sinal transmitido a partir da antena i no tempo j .

A taxa do código STBC com diversidade de transmissão completa é $R \leq 1$ [11]. O código com uma taxa completa $R = 1$ não requer expansão de largura de banda, enquanto que um código com taxa $R \leq 1$ requer uma expansão de largura de banda de $1/R$. Para os códigos STBCs com n_T antenas transmissoras, a matriz de transmissão é denotada por \mathbf{X}_{n_T} . O código é chamado de código de bloco espaço-temporal de tamanho n_T .

Observe que os projetos ortogonais são aplicados para a construção dos códigos STBCs. As linhas da matriz de transmissão \mathbf{X}_{n_T} são ortogonais umas às outras. Isso significa que em cada bloco, as sequências de sinais a partir de duas antenas transmissoras são ortogonais. Por exemplo, se $\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j^T = \sum_{t=1}^p x_{i,t} \cdot x_{j,t}^* = 0$, $i \neq j$, $i, j \in \{1, 2, \dots, n_T\}$, em que $\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j^T$ denota o produto interno entre as sequências \mathbf{x}_i e \mathbf{x}_j . A ortogonalidade possibilita que a diversidade de transmissão completa para um dado número de antenas transmissoras seja alcançada. Adicionalmente, ela permite que o receptor decodifique os sinais transmitidos por diferentes antenas, em que a decisão por máxima verossimilhança é utilizada, baseando-se em um processamento linear dos sinais recebidos.

5.3.1 A Codificação para Constelações de Sinais Reais

Baseado nos tipos das constelações dos sinais, os códigos de bloco espaço-temporais são classificados em STBCs para sinais reais e STBCs para sinais complexos.

Se uma matriz \mathbf{X}_{n_T} de transmissão real e dimensão $n_T \times p$, com variáveis x_1, x_2, \dots, x_k satisfaz

$$\mathbf{X}_{n_T} \cdot \mathbf{X}_{n_T}^T = c(|x_1|^2 + |x_2|^2 + \dots + |x_k|^2) \mathbf{I}_{n_T}, \quad (5.21)$$

o código de bloco espaço-temporal pode prover a diversidade de transmissão completa de n_T com uma taxa de código de k/p .

Por simplicidade, inicialmente são considerados os códigos STBCs com matriz de transmissão quadrada \mathbf{X}_{n_T} . Para uma constelação arbitrária de sinais, os códigos STBCs para uma matriz de transmissão quadrada e dimensão $n_T \times n_T$ existem, se e somente se, o número de antenas transmissoras for $n_T = 2, 4$ ou 8 [11]. Esses códigos são de taxa completa $R = 1$ e oferecem a diversidade completa de transmissão n_T . As matrizes de transmissão são dadas por

$$\mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2 \\ x_2 & x_1 \end{bmatrix}, \quad (5.22)$$

para $n_T = 2$ antenas transmissoras,

$$\mathbf{X}_4 = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2 & -x_3 & -x_4 \\ x_2 & x_1 & x_4 & -x_3 \\ x_3 & -x_4 & x_1 & x_2 \\ x_4 & x_3 & -x_2 & x_1 \end{bmatrix}, \quad (5.23)$$

para $n_T = 4$ antenas transmissoras, e

$$\mathbf{X}_8 = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2 & -x_3 & -x_4 & -x_5 & -x_6 & -x_7 & -x_8 \\ x_2 & x_1 & -x_4 & x_3 & -x_6 & x_5 & x_8 & -x_7 \\ x_3 & x_4 & x_1 & -x_2 & -x_7 & -x_8 & x_5 & x_6 \\ x_4 & -x_3 & x_2 & x_1 & -x_8 & x_7 & -x_6 & x_5 \\ x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_1 & -x_2 & -x_3 & -x_4 \\ x_6 & -x_5 & x_8 & -x_7 & x_2 & x_1 & x_4 & -x_3 \\ x_7 & -x_8 & -x_5 & x_6 & x_3 & -x_4 & x_1 & x_2 \\ x_8 & x_7 & -x_6 & -x_5 & x_4 & x_3 & -x_2 & x_1 \end{bmatrix}, \quad (5.24)$$

para $n_T = 8$ antenas transmissoras.

As matrizes de transmissão quadradas possuem linhas ortogonais com entradas

$$\pm x_1, \pm x_2, \dots, \pm x_k. \quad (5.25)$$

A partir das matrizes, é observado que para um bloco de k símbolos de mensagens moduladas, ambos o número de antenas transmissoras n_T e o número de períodos de tempo p requeridos para transmitir o bloco codificado são iguais ao bloco da mensagem de comprimento k . Por exemplo, considere um código de bloco espaço-temporal, especificado por \mathbf{X}_4 , com quatro an-

tenas transmissoras. O codificador aloca $k = 4$ símbolos reais modulados x_1, x_2, x_3 e x_4 como suas entradas e gera a sequência de códigos. No período de tempo $t = 1$, os sinais x_1, x_2, x_3 e x_4 são transmitidos a partir das antenas 1 até 4, respectivamente. No período de tempo $t = 2$, os sinais $-x_2, x_1, -x_4$ e x_3 são transmitidos a partir das antenas 1 até 4, respectivamente, e assim por diante. Para esse exemplo quatro antenas transmissoras e quatro períodos de tempo são necessários para transmitir quatro símbolos de mensagens. Portanto, não é necessária a expansão de largura de banda para esse código, de modo que uma taxa de código de 1 é alcançada. É desejável construir esquemas de transmissão de taxa de código completa $R = 1$ para qualquer número de antenas transmissoras, visto que códigos de taxa completa são eficientes na utilização da largura de banda. Para qualquer número de n_T antenas transmissoras, o mínimo valor de períodos de transmissão p para alcançar a taxa completa é dado por [11]

$$\min(2^{4c+d}), \quad (5.26)$$

em que a minimização é considerada sobre

$$c, d \mid 0 \leq c, 0 \leq d \leq 4, \text{ e } 8c + 2^d \geq n_T. \quad (5.27)$$

Para $n_T \leq 8$, o mínimo valor de p é dado por

$$\begin{aligned} n_T = 2, \quad p = 2 \\ n_T = 3, \quad p = 4 \\ n_T = 4, \quad p = 4 \\ n_T = 5, \quad p = 8 \\ n_T = 6, \quad p = 8 \\ n_T = 7, \quad p = 8 \\ n_T = 8, \quad p = 8 \end{aligned} \quad (5.28)$$

Esses valores guiam a construção de códigos STBCs com taxa completa. De acordo com esses valores, matrizes de transmissão não quadradas $\mathbf{X}_3, \mathbf{X}_5, \mathbf{X}_6$, e \mathbf{X}_7 são construídas baseadas em projetos ortogonais para códigos STBCs de taxa completa e diversidade completa com tamanhos de 3, 5, 6 e 7, respectivamente. Essas matrizes são dadas por [11]

$$\mathbf{X}_3 = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2 & -x_3 & -x_4 \\ x_2 & x_1 & x_4 & -x_3 \\ x_3 & -x_4 & x_1 & x_2 \end{bmatrix}, \quad (5.29)$$

$$\mathbf{X}_5 = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2 & -x_3 & -x_4 & -x_5 & -x_6 & -x_7 & -x_8 \\ x_2 & x_1 & -x_4 & x_3 & -x_6 & x_5 & x_8 & -x_7 \\ x_3 & x_4 & x_1 & -x_2 & -x_7 & -x_8 & x_5 & x_6 \\ x_4 & -x_3 & x_2 & x_1 & -x_8 & x_7 & -x_6 & x_5 \\ x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_1 & -x_2 & -x_3 & -x_4 \end{bmatrix}, \quad (5.30)$$

$$\mathbf{X}_6 = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2 & -x_3 & -x_4 & -x_5 & -x_6 & -x_7 & -x_8 \\ x_2 & x_1 & -x_4 & x_3 & -x_6 & x_5 & x_8 & -x_7 \\ x_3 & x_4 & x_1 & -x_2 & -x_7 & -x_8 & x_5 & x_6 \\ x_4 & -x_3 & x_2 & x_1 & -x_8 & x_7 & -x_6 & x_5 \\ x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_1 & -x_2 & -x_3 & -x_4 \\ x_6 & -x_5 & x_8 & -x_7 & x_2 & x_1 & x_4 & -x_3 \end{bmatrix}, \quad (5.31)$$

$$\mathbf{X}_7 = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2 & -x_3 & -x_4 & -x_5 & -x_6 & -x_7 & -x_8 \\ x_2 & x_1 & -x_4 & x_3 & -x_6 & x_5 & x_8 & -x_7 \\ x_3 & x_4 & x_1 & -x_2 & -x_7 & -x_8 & x_5 & x_6 \\ x_4 & -x_3 & x_2 & x_1 & -x_8 & x_7 & -x_6 & x_5 \\ x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_1 & -x_2 & -x_3 & -x_4 \\ x_6 & -x_5 & x_8 & -x_7 & x_2 & x_1 & x_4 & -x_3 \\ x_7 & -x_8 & -x_5 & x_6 & x_3 & -x_4 & x_1 & x_2 \end{bmatrix}. \quad (5.32)$$

O número de símbolos que o codificador aloca como suas entradas é igual ao número de períodos de tempo requeridos para transmitir esses símbolos.

5.3.2 A Codificação para Constelações de Sinais Complexos

Se uma matriz \mathbf{X}_{n_T} de transmissão complexa e dimensão $n_T \times p$, com variáveis x_1, x_2, \dots, x_k satisfaz

$$\mathbf{X}_{n_T} \cdot \mathbf{X}_{n_T}^H = c(|x_1|^2 + |x_2|^2 + \dots + |x_k|^2) \mathbf{I}_{n_T}, \quad (5.33)$$

o código de bloco espaço-temporal pode prover a diversidade de transmissão completa de n_T com uma taxa de código de k/p .

$$\mathbf{X}_2^c = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix}. \quad (5.34)$$

Esse esquema provê a diversidade completa de 2 e a taxa completa de 1.

O esquema de Alamouti é o único que tem a propriedade da representação de uma matriz de transmissão complexa, de dimensão $n_T \times n_T$, para alcançar a taxa completa [11]. Se o número de antenas transmissoras é maior que dois, o objetivo do projeto do código é construir matrizes $G_{n_T}^c$ de transmissão complexa de maior taxa, com baixa complexidade de decodificação

e que alcancem a diversidade completa. Adicionalmente, similar aos projetos ortogonais reais, o valor de p precisa ser minimizado, com o objetivo de reduzir o atraso de decodificação.

Para uma constelação de sinais complexos, existem códigos STBCs que podem alcançar uma taxa de $1/2$ para qualquer número de antenas transmissoras. Por exemplo, sejam as matrizes de transmissão complexas \mathbf{X}_3^c e \mathbf{X}_4^c projetos ortogonais para códigos STBCs com três e quatro antenas, respectivamente. Esses códigos possuem a taxa de $1/2$ e as matrizes \mathbf{X}_3^c e \mathbf{X}_4^c são dadas por [11]:

$$\mathbf{X}_3^c = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2 & -x_3 & -x_4 & x_1^* & -x_2^* & -x_3^* & -x_4^* \\ x_2 & x_1 & x_4 & -x_3 & x_2^* & x_1^* & x_4^* & -x_3^* \\ x_3 & -x_4 & x_1 & x_2 & x_3^* & -x_4^* & x_1^* & x_2^* \end{bmatrix}, \quad (5.35)$$

$$\mathbf{X}_4^c = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2 & -x_3 & -x_4 & x_1^* & -x_2^* & -x_3^* & -x_4^* \\ x_2 & x_1 & x_4 & -x_3 & x_2^* & x_1^* & x_4^* & -x_3^* \\ x_3 & -x_4 & x_1 & x_2 & x_3^* & -x_4^* & x_1^* & x_2^* \\ x_4 & x_3 & -x_2 & x_1 & x_4^* & x_3^* & -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix}. \quad (5.36)$$

Pode ser mostrado que o produto interno de quaisquer duas linhas dessas matrizes é zero, o que prova a ortogonalidade dessas estruturas. Com a matriz \mathbf{X}_3^c , quatro símbolos complexos são alocados e transmitidos por três antenas transmissoras em oito períodos de símbolo; portanto a taxa de transmissão é $1/2$. Com relação à matriz \mathbf{X}_4^c , quatro símbolos complexos são alocados e transmitidos por quatro antenas transmissoras em oito períodos de símbolo, resultando em uma taxa de transmissão de $1/2$.

Um maior processamento linear envolvido resulta em uma maior taxa para os códigos STBCs com uma constelação complexa e mais de duas antenas. As duas seguintes matrizes \mathbf{X}_3^h e \mathbf{X}_4^h são projetos ortogonais complexos para códigos STBCs com taxa de $3/4$ [11]

$$\mathbf{X}_3^h = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* & \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} \\ x_2 & x_1^* & \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{-x_3^*}{\sqrt{2}} \\ x_3 & \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{(-x_1 - x_1^* + x_2 - x_2^*)}{2} & \frac{(x_2 + x_2^* + x_1 - x_1^*)}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & & \end{bmatrix}, \quad (5.37)$$

$$\mathbf{X}_4^h = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2 & \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} \\ x_2 & x_1 & \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{-x_3^*}{\sqrt{2}} \\ x_3 & \frac{x_3}{\sqrt{2}} & \frac{(-x_1 - x_1^* + x_2 - x_2^*)}{2} & \frac{(x_2 + x_2^* + x_1 - x_1^*)}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & & \\ x_3 & \frac{-x_3}{\sqrt{2}} & \frac{(-x_2 - x_2^* + x_1 - x_1^*)}{2} & \frac{-(x_1 + x_1^* + x_2 - x_2^*)}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & & \end{bmatrix}. \quad (5.38)$$

Outro código STBC de taxa de 3/4 com três antenas transmissoras sobre constelações de sinais complexos é dado por [67]

$$\mathbf{X}_3^{h'} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2^* & x_3^* & 0 \\ -x_2 & x_1^* & 0 & -x_3^* \\ x_3 & 0 & x_1^* & x_2^* \end{bmatrix}. \quad (5.39)$$

5.4 O Esquema de Decodificação STBC

A decodificação dos códigos STBCs é considerada nesta seção. Por simplicidade, a abordagem é iniciada com um código STBC representado por uma matriz de transmissão quadrada, sobre uma constelação de sinais reais, tais como \mathbf{X}_2 , \mathbf{X}_4 e \mathbf{X}_8 . Nesse caso, a primeira coluna da matriz de transmissão é um vetor $[x_1, x_2, \dots, x_{n_T}]^T$. As outras colunas de \mathbf{X}_{n_T} são todas permutações da primeira coluna com possíveis diferentes sinais. Admita que ε_t denota as permutações dos símbolos a partir da primeira coluna até a t -ésima coluna. A posição da linha de x_i na t -ésima coluna é representada por $\varepsilon_t(i)$ e o sinal de x_i na t -ésima coluna é representado por $\text{sgn}_t(i)$.

Admita que os coeficientes do canal $h_{j,i}(t)$ são constantes sobre p períodos de símbolo, de modo que

$$h_{j,i}(t) = h_{j,i}, \quad t = 1, 2, \dots, p. \quad (5.40)$$

Adotando a decodificação por máxima verossimilhança, semelhante ao utilizado no esquema de Alamouti, é possível construir as estatísticas de decisão para o sinal transmitido x_i , como [66]

$$\tilde{x}_i = \sum_{t=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_R} \text{sgn}_t(i) \cdot r_t^j \cdot h_{j,\varepsilon_t(i)}^*, \quad (5.41)$$

em que $i = 1, 2, \dots, n_T$. Devido à ortogonalidade das linhas formadas por pares da matriz de transmissão, minimizar a métrica de máxima verossimilhança [66]

$$\sum_{t=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_R} \left| r_t^j - \sum_{i=1}^{n_T} h_{j,i} x_t^i \right|^2 \quad (5.42)$$

é equivalente a minimizar a métrica de decisão conjunta

$$\sum_{i=1}^{n_T} \left[|\tilde{x}_i - x_i|^2 + \left(\sum_{t=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_R} |h_{j,t}|^2 - 1 \right) |x_i|^2 \right]. \quad (5.43)$$

Desde que o valor de \tilde{x}_i apenas depende do símbolo de código x_i , dados os sinais recebidos, os coeficientes do percurso e a estrutura da matriz de transmissão ortogonal, minimizar a métrica de decisão conjunta é equivalente a minimizar cada métrica de decisão individual [66]

$$|\tilde{x}_i - x_i|^2 + \left(\sum_{t=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_R} |h_{j,t}|^2 - 1 \right) |x_i|^2. \quad (5.44)$$

Esse algoritmo simplifica a detecção conjunta, por meio da decodificação separada de cada sinal transmitido. Devido à ortogonalidade, as estatísticas de decisão para os sinais transmitidos x_i são independentes dos outros sinais transmitidos $x_j, j = 1, 2, \dots, n_T, j \neq i$. A métrica de decisão para cada sinal x_i é baseada no processamento linear de suas estatísticas de decisão \tilde{x}_i .

Para o código STBC com uma matriz de transmissão não quadrada sobre uma constelação de sinais reais, tais como $\mathbf{X}_3, \mathbf{X}_5, \mathbf{X}_6$ e \mathbf{X}_7 , as estatísticas de decisão no receptor podem ser construídas como

$$\tilde{x}_i = \sum_{t \in \eta(i)} \sum_{j=1}^{n_R} \text{sgn}_t(i) \cdot r_t^j \cdot h_{j, \varepsilon_t(i)}^*, \quad (5.45)$$

em que $i = 1, 2, \dots, p$, e $\eta(i)$ é o conjunto das colunas da matriz de transmissão, em que x_i aparece. Por exemplo, considere a matriz \mathbf{X}_3 com três antenas transmissoras

$$\begin{aligned} \eta(1) &= \{1, 2, 3\}; & \eta(2) &= \{1, 2, 4\}; \\ \eta(3) &= \{1, 3, 4\}; & \eta(4) &= \{2, 3, 4\}. \end{aligned} \quad (5.46)$$

A métrica de decisão para cada sinal x_i individual é dada por

$$|\tilde{x}_i - x_i|^2 + \left(\sum_{t=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_R} |h_{j,t}|^2 - 1 \right) |x_i|^2. \quad (5.47)$$

Algoritmos de decodificação semelhantes podem ser derivados para códigos STBCs com constelações de sinais complexos. Para o STBC com taxa de 1/2 \mathbf{X}_3^c e \mathbf{X}_4^c , as estatísticas de decisão \tilde{x}_i podem ser representadas por [66]

$$\tilde{x}_i = \sum_{t \in \eta(i)} \sum_{j=1}^{n_R} \text{sgn}_t(i) \cdot \tilde{r}_t^j(i) \cdot \tilde{h}_{j, \varepsilon_t(i)}, \quad (5.48)$$

em que

$$\tilde{r}_t^j(i) = \begin{cases} r_t^j & \text{se } x_i \text{ pertence à } t\text{-ésima coluna de } \mathbf{X}_{n_T}^c \\ (r_t^j)^* & \text{se } x_i^* \text{ pertence à } t\text{-ésima coluna de } \mathbf{X}_{n_T}^c \end{cases} \quad (5.49)$$

e

$$\tilde{h}_{j, \varepsilon_t(i)} = \begin{cases} h_{j, \varepsilon_t}^*(i) & \text{se } x_i \text{ pertence à } t\text{-ésima coluna de } \mathbf{X}_{n_T}^c \\ h_{j, \varepsilon_t}(i) & \text{se } x_i^* \text{ pertence à } t\text{-ésima coluna de } \mathbf{X}_{n_T}^c. \end{cases} \quad (5.50)$$

A métrica de decisão é dada por

$$|\tilde{x}_i - x_i|^2 + \left(2 \sum_{t=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_R} |h_{j,t}|^2 - 1 \right) |x_i|^2. \quad (5.51)$$

Como um exemplo, considere as estatísticas de decisão para o STBC \mathbf{X}_3^c e \mathbf{X}_4^c . De acordo com 5.48, as estatísticas de decisão para \mathbf{X}_3^c podem ser expressas como:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= \sum_{j=1}^{n_R} (r_1^j h_{j,1}^* + r_2^j h_{j,2}^* + r_3^j h_{j,3}^* + (r_5^j)^* h_{j,1} + (r_6^j)^* h_{j,2} + (r_7^j)^* h_{j,3}) \\ &= \rho_3 x_1 + \sum_{j=1}^{n_R} (n_1^j h_{j,1}^* + n_2^j h_{j,2}^* + n_3^j h_{j,3}^* + (n_5^j)^* h_{j,1} + (n_6^j)^* h_{j,2} + (n_7^j)^* h_{j,3}) \\ \tilde{x}_2 &= \sum_{j=1}^{n_R} (r_1^j h_{j,2}^* - r_2^j h_{j,1}^* + r_4^j h_{j,3}^* + (r_5^j)^* h_{j,2} - (r_6^j)^* h_{j,1} + (r_8^j)^* h_{j,3}) \\ &= \rho_3 x_2 + \sum_{j=1}^{n_R} (n_1^j h_{j,2}^* - n_2^j h_{j,1}^* + n_4^j h_{j,3}^* + (n_5^j)^* h_{j,2} - (n_6^j)^* h_{j,1} + (n_8^j)^* h_{j,3}) \\ \tilde{x}_3 &= \sum_{j=1}^{n_R} (r_1^j h_{j,3}^* - r_3^j h_{j,1}^* - r_4^j h_{j,2}^* + (r_5^j)^* h_{j,3} - (r_7^j)^* h_{j,1} - (r_8^j)^* h_{j,2}) \\ &= \rho_3 x_3 + \sum_{j=1}^{n_R} (n_1^j h_{j,3}^* - n_3^j h_{j,1}^* - n_4^j h_{j,2}^* + (n_5^j)^* h_{j,3} - (n_7^j)^* h_{j,1} - (n_8^j)^* h_{j,2}) \\ \tilde{x}_4 &= \sum_{j=1}^{n_R} (-r_2^j h_{j,3}^* + r_3^j h_{j,2}^* - r_4^j h_{j,1}^* - (r_6^j)^* h_{j,3} + (r_7^j)^* h_{j,2} - (r_8^j)^* h_{j,1}) \\ &= \rho_3 x_4 + \sum_{j=1}^{n_R} (-n_2^j h_{j,3}^* + n_3^j h_{j,2}^* - n_4^j h_{j,1}^* - (n_6^j)^* h_{j,3} + (n_7^j)^* h_{j,2} - (n_8^j)^* h_{j,1}) \end{aligned}$$

em que

$$\rho_3 = 2 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{n_R} |h_{j,i}|^2. \quad (5.52)$$

As estatísticas de decisão para \mathbf{X}_4^c podem ser expressas como:

$$\begin{aligned}
\tilde{x}_1 &= \sum_{j=1}^{n_R} (r_1^j h_{j,1}^* + r_2^j h_{j,2}^* + r_3^j h_{j,3}^* + r_4^j h_{j,4}^* + (r_5^j)^* h_{j,1} + (r_6^j)^* h_{j,2} + (r_7^j)^* h_{j,3} + (r_8^j)^* h_{j,4}) \\
&= \rho_4 x_1 + \sum_{j=1}^{n_R} (n_1^j h_{j,1}^* + n_2^j h_{j,2}^* + n_3^j h_{j,3}^* + n_4^j h_{j,4}^* + (n_5^j)^* h_{j,1} + (n_6^j)^* h_{j,2} + (n_7^j)^* h_{j,3} + (n_8^j)^* h_{j,4}) \\
\tilde{x}_2 &= \sum_{j=1}^{n_R} (r_1^j h_{j,2}^* - r_2^j h_{j,1}^* - r_3^j h_{j,4}^* + r_4^j h_{j,3}^* + (r_5^j)^* h_{j,2} - (r_6^j)^* h_{j,1} - (r_7^j)^* h_{j,4} + (r_8^j)^* h_{j,3}) \\
&= \rho_4 x_2 + \sum_{j=1}^{n_R} (n_1^j h_{j,2}^* - n_2^j h_{j,1}^* - n_3^j h_{j,4}^* + n_4^j h_{j,3}^* + (n_5^j)^* h_{j,2} - (n_6^j)^* h_{j,1} - (n_7^j)^* h_{j,4} + (n_8^j)^* h_{j,3}) \\
\tilde{x}_3 &= \sum_{j=1}^{n_R} (r_1^j h_{j,3}^* + r_2^j h_{j,4}^* - r_3^j h_{j,1}^* - r_4^j h_{j,2}^* + (r_5^j)^* h_{j,3} + (r_6^j)^* h_{j,4} - (r_7^j)^* h_{j,1} - (r_8^j)^* h_{j,2}) \\
&= \rho_4 x_3 + \sum_{j=1}^{n_R} (n_1^j h_{j,3}^* + n_2^j h_{j,4}^* - n_3^j h_{j,1}^* - n_4^j h_{j,2}^* + (n_5^j)^* h_{j,3} + (n_6^j)^* h_{j,4} - (n_7^j)^* h_{j,1} - (n_8^j)^* h_{j,2}) \\
\tilde{x}_4 &= \sum_{j=1}^{n_R} (-r_1^j h_{j,4}^* - r_2^j h_{j,3}^* + r_3^j h_{j,2}^* - r_4^j h_{j,1}^* - (r_5^j)^* h_{j,4} - (r_6^j)^* h_{j,3} + (r_7^j)^* h_{j,2} - (r_8^j)^* h_{j,1}) \\
&= \rho_4 x_4 + \sum_{j=1}^{n_R} (-n_1^j h_{j,4}^* - n_2^j h_{j,3}^* + n_3^j h_{j,2}^* - n_4^j h_{j,1}^* - (n_5^j)^* h_{j,4} - (n_6^j)^* h_{j,3} + (n_7^j)^* h_{j,2} - (n_8^j)^* h_{j,1})
\end{aligned}$$

em que

$$\rho_4 = 2 \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{n_R} |h_{j,i}|^2. \quad (5.53)$$

Para decodificar o código \mathbf{X}_3^h de taxa de 3/4, o receptor constrói as estatísticas de decisão da seguinte forma

$$\begin{aligned}
\tilde{x}_1 &= \sum_{j=1}^{n_R} \left(r_1^j h_{j,1}^* + (r_2^j)^* h_{j,2} + \frac{(r_4^j - r_3^j) h_{j,3}^*}{2} - \frac{(r_4^j - r_3^j)^* h_{j,3}}{2} \right) \\
\tilde{x}_2 &= \sum_{j=1}^{n_R} \left(r_1^j h_{j,2}^* + (r_2^j)^* h_{j,1} + \frac{(r_4^j + r_3^j) h_{j,3}^*}{2} + \frac{(-r_3^j + r_4^j)^* h_{j,3}}{2} \right) \\
\tilde{x}_3 &= \sum_{j=1}^{n_R} \left(\frac{(r_1^j + r_2^j) h_{j,3}^*}{\sqrt{2}} + \frac{(r_3^j)^* (h_{j,1} + h_{j,2})}{\sqrt{2}} + \frac{(r_4^j)^* (h_{j,1} - h_{j,2})}{\sqrt{2}} \right).
\end{aligned}$$

Similarmente, para decodificar o código \mathbf{X}_4^h de taxa 3/4, o receptor constrói as estatísticas de decisão da seguinte forma

$$\begin{aligned}\tilde{x}_1 &= \sum_{j=1}^{n_R} \left(r_1^j h_{j,1}^* + (r_2^j)^* h_{j,2} + \frac{(r_4^j - r_3^j)(h_{j,3}^* - h_{j,4}^*)}{2} - \frac{(r_3^j + r_4^j)^*(h_{j,3} + h_{j,4})}{2} \right) \\ \tilde{x}_2 &= \sum_{j=1}^{n_R} \left(r_1^j h_{j,2}^* - (r_2^j)^* h_{j,1} + \frac{(r_4^j + r_3^j)(h_{j,3}^* - h_{j,4}^*)}{2} + \frac{(-r_3^j + r_4^j)^*(h_{j,3} + h_{j,4})}{2} \right) \\ \tilde{x}_3 &= \sum_{j=1}^{n_R} \left(\frac{(r_1^j + r_2^j)h_{j,3}^*}{\sqrt{2}} - \frac{(r_1^j - r_2^j)h_{j,4}^*}{\sqrt{2}} + \frac{(r_3^j)^*(h_{j,1} + h_{j,2})}{\sqrt{2}} + \frac{(r_4^j)^*(h_{j,1} - h_{j,2})}{\sqrt{2}} \right).\end{aligned}$$

CAPÍTULO 6

Parâmetros das Simulações e Resultados

6.1 Introdução

Diversos testes de avaliação de desempenho foram realizados com o objetivo de medir a eficácia do sistema proposto. Neste capítulo são apresentados os parâmetros das simulações executadas e seus resultados. Três métricas de desempenho foram utilizadas: o tempo de vida da rede, a taxa de perda de pacote e a razão sinal-ruído de pico de imagens transmitidas em redes de sensores multimídia sem fio.

6.2 Parâmetros das Simulações

O modelo de dissipação de energia consumida pelo rádio transceptor, utilizado para as simulações, é baseado no modelo proposto em [4]. O rádio gasta $E_{\text{elec}} = 50 \text{ nJ/bit}$ para a utilização dos circuitos de transmissão e recepção e $\epsilon_{\text{amp}} = 100 \text{ pJ/bit/m}^2$ para o amplificador de transmissão alcançar uma determinada energia por *bit* aceitável $\frac{E_b}{N_0}$ (é assumida a perda de energia relacionada com o quadrado da distância, devida ao canal de comunicações). Usando esse modelo de rádio, para transmitir uma mensagem de $k \text{ bits}$ por uma distância d , o rádio gasta [4]

$$E_{Tx}(k, d) = E_{\text{elec}} \cdot k + \epsilon_{\text{amp}} \cdot k \cdot d^2 \quad (6.1)$$

e para receber essa mensagem, o rádio gasta

$$E_{Rx}(k) = E_{\text{elec}} \cdot k. \quad (6.2)$$

A rede de sensores é formada por 100 nós, com cinco grupos, cada um com um coordenador de grupo diferente por ciclo. Então, na Expressão (3.1), $P = 0.05$ e em pelo menos 20 ciclos cada nó se torna um coordenador de grupo em algum ciclo. Inicialmente, os nós são depositados aleatoriamente em uma área de 50×50 metros. O nó destino é posicionado nas coordenadas $x = 25$ e $y = 150$ metros.

Heinzelman *et al* não mencionaram se utilizaram algum esquema de ARQ para o protocolo LEACH original. Entretanto, de modo a avaliar o desempenho do sistema proposto (SCA com LEACH) é desejável compará-lo com o LEACH com ARQ Truncado, em vez de apenas o LEACH. Essa combinação de LEACH com ARQ Truncado consiste em um sistema baseado na operação do LEACH, mas o ARQ Truncado é especificado para ser utilizado como um protocolo da camada de enlace. Então, as retransmissões são permitidas em uma maneira direta, sem o uso de técnicas de diversidade. Esse sistema apenas anexa o esquema de ARQ Truncado ao protocolo LEACH originalmente proposto. O número máximo de retransmissões pode mudar, baseado nas necessidades do projeto.

Mesmo acrescentando o esquema de ARQ Truncado ao LEACH para tornar viável as comparações entre os sistemas, é necessário calibrar o sistema proposto, tomando como referencial o protocolo LEACH original. Na Tabela 6.1 é mostrada uma comparação entre alguns resultados relacionados ao tempo de vida da rede, entre o LEACH original [4] e o LEACH implementado nas presentes simulações. É possível perceber uma diferença pequena entre os resultados dos dois sistemas, o que habilita a utilização do LEACH implementado nas simulações seguintes.

Tabela 6.1 Tempo de vida usando diferentes quantidades de energia inicial por nó.

Energia (J/nó)	Protocolo	Ciclos para a primeira inativação	Ciclos para a última inativação
0,25	LEACH original	394	665
	LEACH simulado	383	649
0,50	LEACH original	932	1312
	LEACH simulado	953	1397

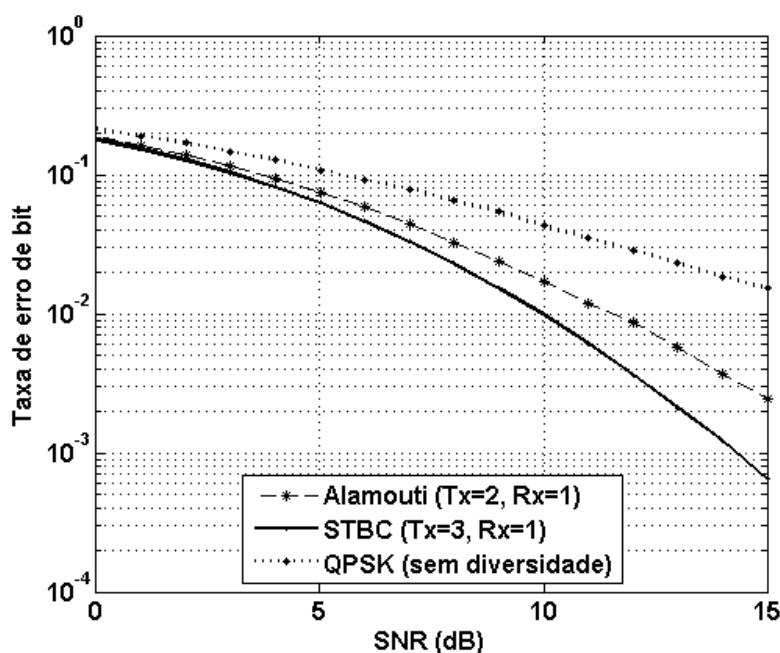
Ambos os sistemas avaliados utilizam um esquema de ARQ Truncado. Um CRC com $C = 16$ bits é adotado com um gerador polinomial cíclico de $G_{\text{CRC16}}(D) = D^{16} + D^{12} + D^5 + 1$. O comprimento do pacote L é 120 bits e é utilizado o esquema de modulação QPSK. Todos os programas para as simulações foram desenvolvidos utilizando o Matlab 7.

Quatro ambientes diferentes de propagação foram usados para as simulações, de acordo com intervalos de distribuições aleatórias de SNR dos percursos de propagação. Quando o coordenador fonte transmite o sinal, ele se propaga por cinco diferentes percursos (quatro candidatos a parceiro e um nó destino). O primeiro cenário compreende o seguinte intervalo de SNR: [4 8 12 16 20] dB. Esses valores são atribuídos aleatoriamente a cada percurso, em cada ciclo. Os outros cenários com seus correspondentes intervalos de SNR, são mostrados na Tabela 6.2. É esperado que melhores desempenhos possam ser alcançados à medida que os últimos cenários se tornem a opção de transmissão adotada para a simulação, porque desse modo é mais provável a escolha de valores de SNR mais altos e que eles tenham melhores condições de propagação que os primeiros cenários.

Tabela 6.2 Cenários com intervalos de SNR.

Cenário	Intervalo SNR (dB)
Um	[4 8 12 16 20]
Dois	[5 10 15 20 25]
Três	[6 12 18 24 30]
Quatro	[7 14 21 28 35]

Para comparar a taxa de erro de *bit* entre os esquemas com e sem diversidade, a Figura 6.1 traça um comportamento dessa métrica de avaliação. Os resultados são bastante similares àqueles encontrados em [13]. O melhor desempenho é para o esquema STBC, com três transmissores e um receptor, seguido pelo esquema de Alamouti [68], com dois transmissores e um receptor. Eles são utilizados para o estágio de transmissão em diversidade. O pior desempenho corresponde ao esquema QPSK, que é utilizado no estágio de transmissão direta (sem diversidade). O modelo do canal considera o desvanecimento Rayleigh e ruído AWGN.

**Figura 6.1** Taxa de erro de *bit* como uma função da SNR.

6.3 Desempenho Relativo ao Tempo de Vida da Rede

O tempo de vida de uma rede de sensores é o intervalo de tempo compreendido entre o início da operação dos nós sensores até a rede ser considerada não funcional. Essa consideração depende da aplicação para a qual a rede é projetada. Pode ser, por exemplo, o instante em que o primeiro nó se torna inativo (utiliza toda a energia necessária para seu funcionamento), um

percentual de sensores inativos, grupos existentes na rede, ou quando há uma perda de cobertura de sensoriamento [2]. Neste trabalho, a medida para o tempo de vida da rede é baseada na quantidade de ciclos (unidades de tempo) que o primeiro ou último sensor se torna inativo. Cada nó possui uma energia inicial de 3 mJ.

Avaliar o desempenho relativo ao tempo de vida da rede é importante, pois é uma métrica capaz de indicar a eficiência do modelo de consumo de energia da rede, que é uma questão primordial no projeto de RSSFs. Nesta seção, o desempenho do tempo de vida de RSSFs é comparado entre dois sistemas: o SCA com LEACH (sistema proposto) e o LEACH com ARQ Truncado, em função de diversos parâmetros.

O tempo de vida da rede relacionado com número máximo de retransmissões é mostrado na Figura 6.2. O ciclo em que o nó se torna inativo, tanto o último como o primeiro, é levado em consideração. Avaliando a inativação do primeiro nó, o esquema LEACH com ARQ Truncado é melhor do que o SCA com LEACH até $N_r^{\max} = 2$. A partir de $N_r^{\max} = 3$, o último sistema supera o primeiro. Se o momento de inativação do último nó é observado, o LEACH com ARQ Truncado é melhor que o SCA com LEACH até $N_r^{\max} = 3$. A partir de $N_r^{\max} = 4$, o SCA com LEACH apresenta um melhor desempenho.

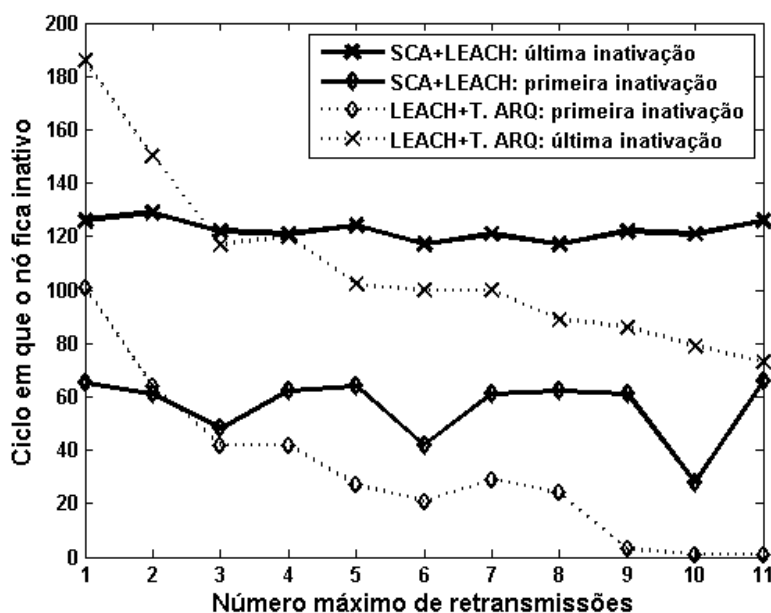


Figura 6.2 Tempo de vida da rede em função do número máximo de retransmissões.

As Figuras 6.3 e 6.4 mostram um comportamento geral do desempenho do tempo de vida da rede de sensores como uma função das condições de propagação presentes nos quatro cenários considerados na Tabela 6.2. Para melhores condições do canal (cenários três e quatro), o tempo de vida da rede é estendido, desde que menos erros ocorrem e menos retransmissões são necessárias. Comparando as Figuras 6.3 e 6.4, pode ser observado que o SCA com LEACH apresenta melhores resultados do que o sistema LEACH com ARQ Truncado. Comportamentos específicos contendo a quantidade de ciclos para que seja atingida a inativação do primeiro e

último nó são mostrados nas Tabelas 6.3 e 6.4. O número máximo de retransmissões usado nessa simulação é $N_r^{\max} = 4$.

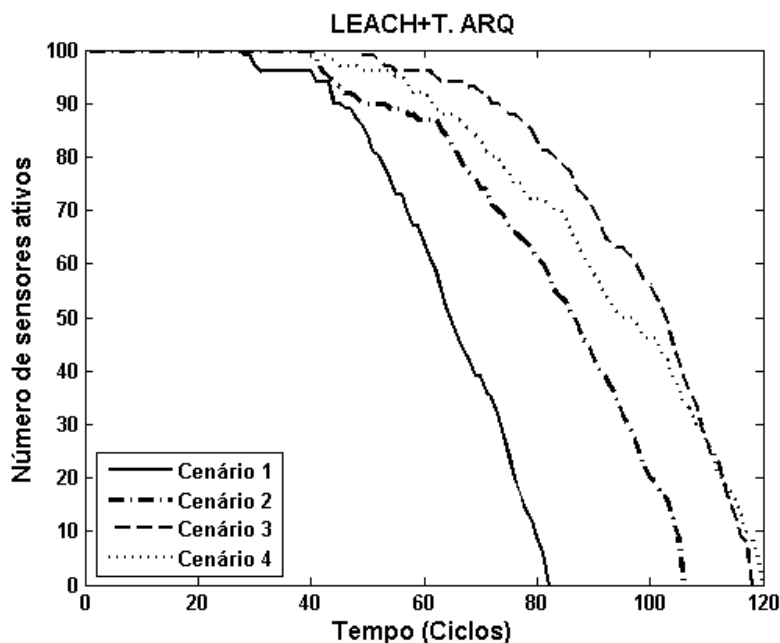


Figura 6.3 Tempo de vida da rede para o LEACH com ARQ Truncado.

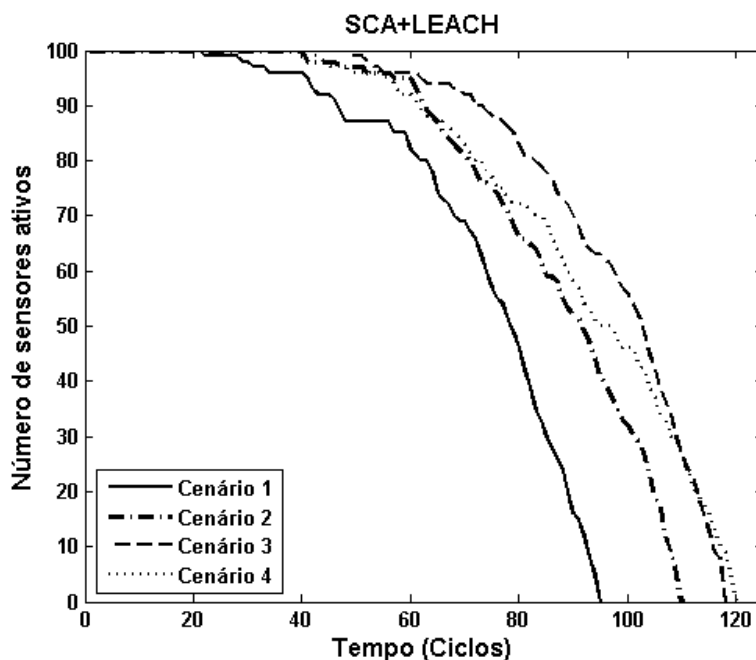


Figura 6.4 Tempo de vida da rede para o SCA com LEACH.

A relação entre o tempo de vida da rede e a energia inicial por nó é mostrada na Figura 6.5. O primeiro valor do intervalo é 3 mJ e o último valor é 30 mJ. Conforme esperado, aumentando a energia inicial permitida por nó, a quantidade de ciclos relacionados à inativação dos nós se torna maior, desde que os nós possuem mais energia para o consumo e operação

Tabela 6.3 Quantidade de ciclos para a inativação do primeiro nó.

Cenário	Ciclos para a inativação do primeiro nó	
	LEACH+T.ARQ	SCA+LEACH
Um	28	22
Dois	41	41
Três	41	49
Quatro	42	62

Tabela 6.4 Quantidade de ciclos para a inativação do último nó.

Cenário	Ciclos para a inativação do último nó	
	LEACH+T.ARQ	SCA+LEACH
Um	82	95
Dois	96	110
Três	106	118
Quatro	120	121

na rede. Avaliando a inativação do primeiro nó, o esquema SCA com LEACH é melhor do que o LEACH com ARQ Truncado para todos os valores de energia inicial considerados, o que indica que para esse parâmetro, os nós no último esquema se tornam inativos antes que os nós no primeiro esquema. Se a inativação do último nó é avaliada, o desempenho do LEACH com ARQ Truncado é semelhante ao desempenho do SCA com LEACH.

Na Figura 6.6, a avaliação de desempenho do tempo de vida da rede relacionado ao tamanho da rede é apresentado. O tamanho da rede varia de um valor de 2500 m² até 62500 m². Conforme esperado, aumentando o tamanho da rede, a quantidade de ciclos relacionados à inativação dos nós se torna menor, já que mais energia é requerida para a transmissão entre maiores distâncias. Considerando a inativação do primeiro nó, o esquema SCA com LEACH é melhor do que o LEACH com ARQ Truncado. Quando a inativação do último nó é observada, o desempenho do LEACH com ARQ Truncado é semelhante em média ao desempenho do SCA com LEACH.

A Figura 6.7 mostra o tempo de vida da rede como uma função do comprimento do pacote (variando de 120 *bits*/pacote até 3000 *bits*/pacote). Os desempenhos dos dois esquemas são similares.

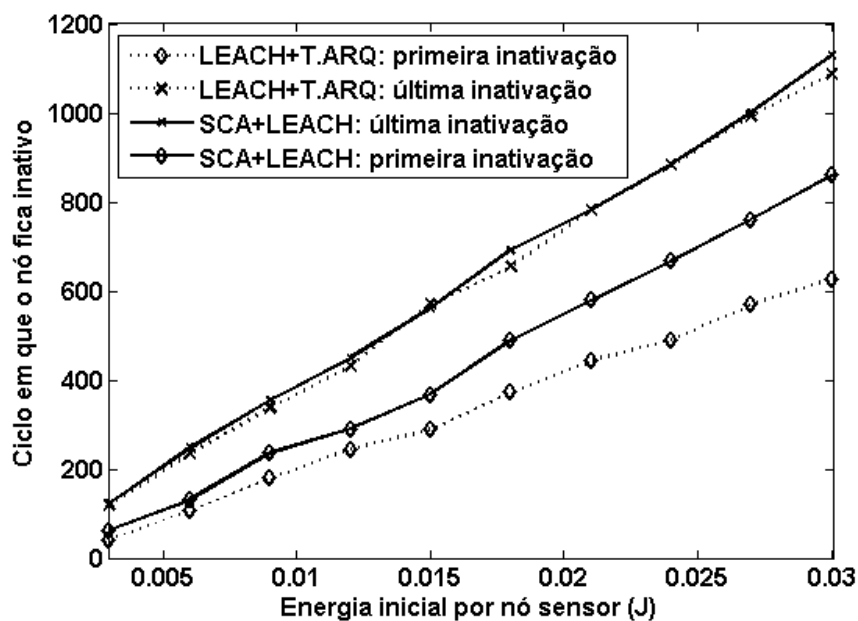


Figura 6.5 Tempo de vida da rede em função da energia inicial permitida por nó.

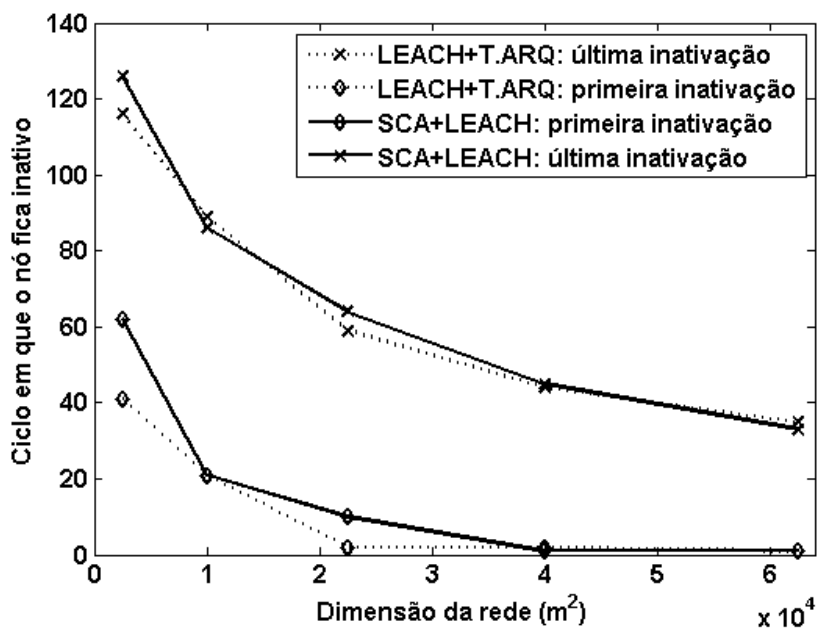


Figura 6.6 Tempo de vida da rede em função do tamanho físico da rede.

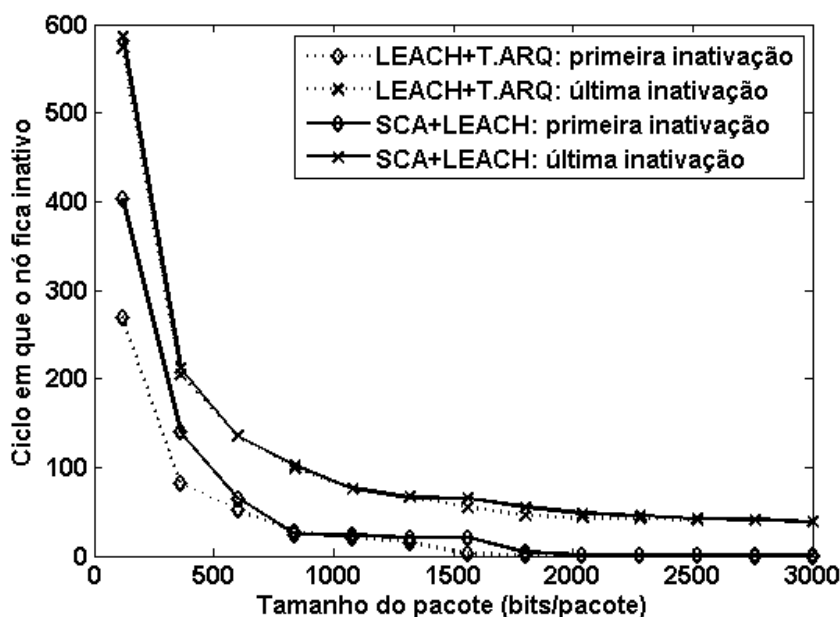


Figura 6.7 Tempo de vida da rede em função do comprimento do pacote de dados.

6.4 Desempenho Relativo à Taxa de Perda de Pacote

A taxa de perda de pacote (TPP) mostra o comportamento do sistema em relação à capacidade de transmitir corretamente os pacotes gerados. Na avaliação de desempenho de redes de sensores sem fio é uma métrica importante, já que pode indicar o grau de confiabilidade da rede. A TPP geral da rede de sensores é dada por

$$TPP = \frac{\text{Número de pacotes perdidos}}{\text{Número de pacotes gerados}} \quad (6.3)$$

e é avaliada na Tabela 6.5, como uma função dos quatro cenários de propagação. Conforme esperado, a taxa de perda de pacote diminui à medida que a qualidade do canal se torna melhor. Para todos os cenários, o SCA com LEACH supera o LEACH com ARQ Truncado. A taxa de perda de pacote média para o primeiro sistema é igual a 0,1697 e para o último, é igual a 0,4939, que é aproximadamente três vezes maior. Em (6.3), a TPP contabiliza as perdas devido ao processo de comunicações (quando o número máximo de retransmissões é ultrapassado), assim como as perdas devido à inativação de nós (quando um pacote é gerado pelos nós sensores em um grupo, mas o coordenador de grupo se torna inativo). Na Tabela 6.6, a TPP devido, exclusivamente, à inativação dos nós é avaliada. O SCA com LEACH apresenta, nos cenários dois, três e quatro, um resultado que atribui todas as perdas de pacote à inativação dos nós. Isso comprova a eficácia do sistema de comunicações proposto, desde que indica que quando retransmissões são necessárias, os pacotes conseguem ser entregues ao receptor, com sucesso, até o número máximo de retransmissões, diferentemente do LEACH com ARQ Truncado.

Tabela 6.5 Taxa de perda de pacote geral.

Cenário	Taxa de perda de pacote	
	LEACH+T.ARQ	SCA+LEACH
Um	0,6537	0,2105
Dois	0,5042	0,1655
Três	0,4208	0,1492
Quatro	0,3967	0,1537

Tabela 6.6 Taxa de perda de pacote devido à inativação dos nós.

Cenário	Taxa de perda de pacote devido à inativação dos nós	
	LEACH+T.ARQ	SCA+LEACH
Um	0,3657	0,9500
Dois	0,3967	1,0000
Três	0,4305	1,0000
Quatro	0,4076	1,0000

A taxa de perda de pacote como uma função da energia inicial permitida por nó é mostrada na Figura 6.8. Pode ser percebido que o esquema proposto supera o LEACH com ARQ Truncado para todos os valores permitidos de energia inicial. Além disso, a taxa de perda de pacote do esquema proposto, diferente do LEACH com ARQ Truncado, decresce conforme os valores permitidos de energia inicial crescem. Esse é um resultado esperado, já que a maior parte da perda de pacotes no SCA com LEACH ocorre devido à inativação dos nós.

Na Figura 6.9, a taxa de perda de pacote como uma função do número máximo de retransmissões é apresentada. Para todos os valores de N_r^{\max} , o desempenho do SCA com LEACH é melhor. Esse é um resultado importante, já que permite ao projetista de uma RSSF lidar com uma relação de compromisso entre o tempo de vida da rede, taxa de perda de pacote e número máximo de retransmissões.

A TPP como uma função do tamanho da rede é mostrada na Figura 6.10. Nessa avaliação de desempenho, um importante limiar foi alcançado. A TPP do SCA com LEACH possui um melhor desempenho até o valor de tamanho da rede de $5,6 \times 10^4 \text{ m}^2$. A partir desse limiar, o LEACH com ARQ Truncado supera o SCA com LEACH.

Na Figura 6.11, a taxa de perda de pacote como uma função do comprimento do pacote é avaliada. Conforme esperado, aumentando o comprimento do pacote, a TPP aumenta. O desempenho do SCA com LEACH é melhor até o comprimento de 2900 *bits*/pacote.

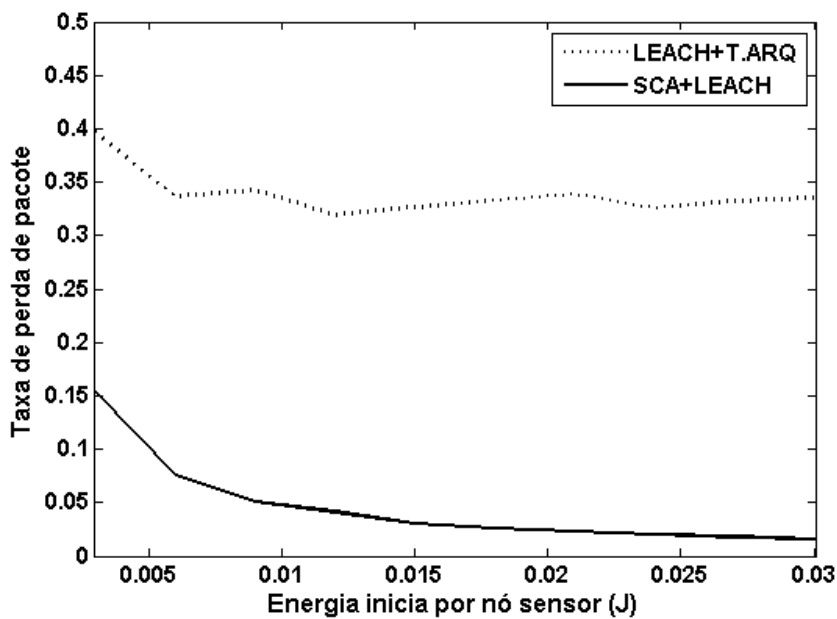


Figura 6.8 Taxa de perda de pacote em função da energia inicial permitida por nó.

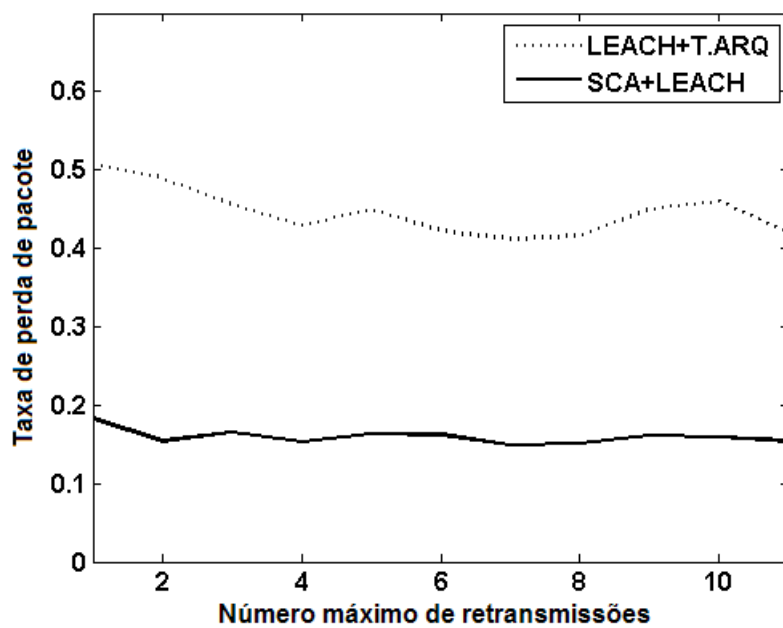


Figura 6.9 Taxa de perda de pacote em função do número máximo de retransmissões.

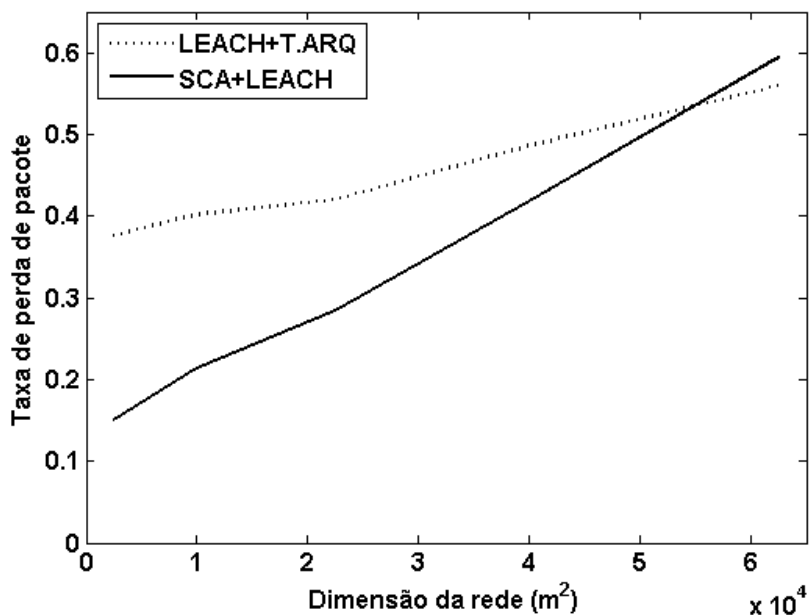


Figura 6.10 Taxa de perda de pacote em função do tamanho físico da rede.

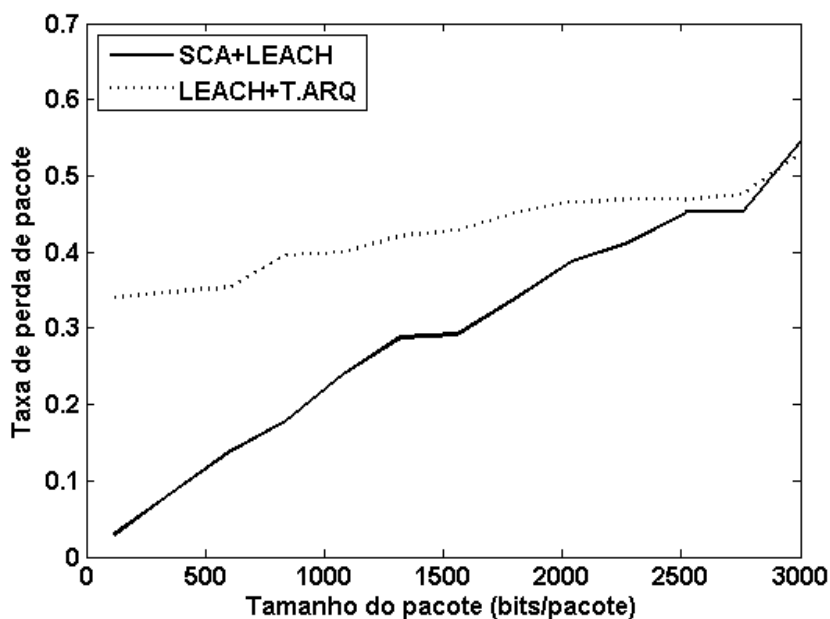


Figura 6.11 Taxa de perda de pacote em função do comprimento do pacote de dados.

6.5 Desempenho em Redes de Sensores Multimídia sem Fio

Conforme abordado no Capítulo 2, as Redes de Sensores Multimídia sem Fio oferecem diversas potencialidades para o monitoramento e captura de dados de interesse em ambientes, campos, prédios, etc. Uma das principais aplicações que viabilizam a utilização desse tipo de rede é a captura, tratamento e transmissão de imagens estáticas. Desse modo, o desempenho do sistema proposto é avaliado nesta seção no contexto de uma rede de sensores multimídia sem fio. A simulação admite que câmeras digitais integradas aos nós são espalhadas sobre um ambiente monitorado e capturam as informações desejadas, de maneira que as imagens de um determinado grupo são agregadas e fundidas no coordenador do grupo. Essa avaliação de desempenho não considera o processo de fusão e processamento da imagem, mas apenas a imagem que será transmitida, partindo do coordenador de grupo até o nó destino. As condições do canal de transmissão e características dos sistemas SCA com LEACH e LEACH com ARQ Truncado são as mesmas consideradas nas simulações anteriores. A métrica de desempenho avaliada é a razão sinal-ruído de pico (*Peak Signal-to-Noise Ratio*–PSNR) em função dos cenários de propagação da Tabela 6.2.

A PSNR é definida como 10 vezes o logaritmo na base 10 da razão entre o quadrado do pico de amplitude do sinal de entrada $P_{\text{máx}}$ e o erro médio quadrático (*Mean Square Error* – MSE):

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{máx}}^2}{\text{MSE}} \right). \quad (6.4)$$

Em se tratando de imagens digitais, o MSE é dado pela diferença entre a imagem original e a imagem processada:

$$\text{MSE} = \frac{1}{L \cdot C} \sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C [F(l, c) - \hat{F}(l, c)]^2, \quad (6.5)$$

em que $F(l, c)$ e $\hat{F}(l, c)$ representam os valores de *pixels*¹ das imagens original e processada, l designa a l -ésima linha e c denota a c -ésima coluna de uma imagem (matriz) $L \times C$.

O valor do pico de amplitude $P_{\text{máx}}$ corresponde ao maior valor que o *pixel* da imagem pode assumir. É pela quantidade de *pixels* de uma imagem que é definida sua resolução, ou seja, a tonalidade e a cor de uma imagem estão contidas nos seus *pixels*. Para se determinar a quantidade de tonalidades diferentes que um *pixel* pode assumir, calcula-se [69]

$$t = 2^b, \quad (6.6)$$

em que t é a quantidade de tons que o *pixel* pode assumir e b é o número de *bits* por *pixel*.

¹Um *pixel* (abreviação do termo inglês *picture element*) é o menor ponto representativo de uma imagem digital.

Nessa simulação foi utilizada a imagem Lena (Figura 6.12), que possui 8 *bits* por *pixel* e 256 possíveis níveis de cinza *grayscale*, ou seja, $b = 8$ e $t = 256$. A imagem considerada possui 256 linhas e 256 colunas, de modo que $L = 256$ e $C = 256$.

A imagem Lena foi gerada no coordenador fonte e a avaliação de desempenho de sua transmissão até o nó destino foi comparada entre o sistema proposto e o LEACH com ARQ Truncado. Para cada cenário foram realizadas duas transmissões usando os sistemas referidos. As imagens recebidas pelo nó destino estão apresentadas a partir da Figura 6.13 até a Figura 6.20. É perceptível que a imagem transmitida pelo sistema proposto apresenta uma qualidade subjetiva² maior para todos os cenários considerados. A avaliação objetiva pela métrica da PSNR tem seu comportamento apresentado no gráfico da Figura 6.21 e a comparação dos valores resultantes está na Tabela 6.7. Para todos os cenários o SCA com LEACH possui um melhor desempenho do que o LEACH com ARQ Truncado, já que maiores valores de PSNR indicam a superioridade de desempenho na relação entre a potência do sinal e a potência do ruído.



Figura 6.12 Lena original.

²As medidas de distorção subjetivas são interpretações das respostas individuais de cada pessoa participante dos testes de visualização de imagens [70]. Em trabalhos futuros, o autor pretende submeter os resultados obtidos a testes de avaliação subjetiva, como o Escore de Opinião Média (*Minimum Opinion Score – MOS*).



Figura 6.13 LEACH+T.ARQ, Cenário Um.



Figura 6.14 SCA+LEACH, Cenário Um.



Figura 6.15 LEACH+T.ARQ, Cenário Dois.



Figura 6.16 SCA+LEACH, Cenário Dois.

Tabela 6.7 PSNR da imagem Lena em função do cenário de propagação.

Cenário	PSNR da imagem transmitida (dB)	
	LEACH+T.ARQ	SCA+LEACH
Um	14,72	16,81
Dois	22,58	35,56
Três	32,08	42,72
Quatro	39,83	42,77



Figura 6.17 LEACH+T.ARQ, Cenário Três.



Figura 6.18 SCA+LEACH, Cenário Três.



Figura 6.19 LEACH+T.ARQ, Cenário Quatro.



Figura 6.20 SCA+LEACH, Cenário Quatro.

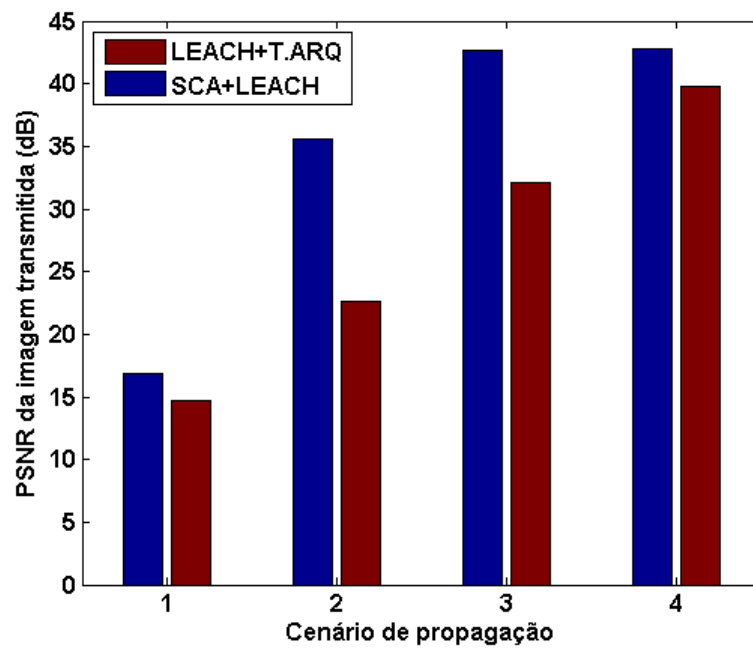


Figura 6.21 PSNR da imagem Lena em função do cenário de propagação.

CAPÍTULO 7

Conclusões e Perspectivas

As redes de sensores sem fio têm demandado expressivo interesse em pesquisa e desenvolvimento, por apresentarem potencialidades em sensoriamento distribuído de ambientes e de alta resolução, possuindo aplicações em diversas áreas. Como são compostas de múltiplos nós sensores, é importante que mecanismos de barateamento de produção e instalação dos nós sejam previstos, de modo a possibilitar a implementação de RSSFs em larga escala. Portanto, os nós sensores são dispositivos de baixas capacidades de processamento, memória e armazenamento de energia. Baterias, que são dificilmente trocadas ou recarregadas, são a fonte de energia de uso mais disseminado em nós sensores, o que torna a otimização do consumo de energia um dos principais desafios no desenvolvimento de RSSFs. Uma rede com maior tempo de vida, além estender as operações de monitoramento e controle, também apresenta menor perda das informações sensoriadas, por meio da redução da taxa de perda de pacote de dados. Essa taxa é influenciada pelo tempo de vida da rede, assim como pela qualidade do canal de comunicações, que, por sua vez, é afetada por efeitos como o desvanecimento e sombreamento.

Esta dissertação apresentou um sistema integrado de redes de sensores sem fio, o SCA com LEACH, que combina o uso da diversidade cooperativa adaptativa (SCA) com o protocolo LEACH. A principal contribuição do trabalho é o projeto, implementação e avaliação de desempenho do sistema proposto, que combate o desvanecimento do canal, pela cooperação dos nós sensores e a seleção das melhores condições de transmissão, além de aumentar o tempo de vida usando o protocolo LEACH. O projeto do sistema é baseado em uma arquitetura formada por gupos e para cada ciclo cinco coordenadores de grupo são eleitos seguindo a operação do algoritmo LEACH. O SCA com LEACH garante que a diversidade cooperativa seja implementada apenas se o nó destino receber um pacote errado a partir do coordenador de grupo fonte. A análise de desempenho e simulações consideraram um canal com desvanecimento Rayleigh e o esquema de diversidade utilizado foi a codificação STBC, utilizando dois ou três coordenadores parceiros. Foi considerada uma rede de nós sensores sem mobilidade, homogênea e de roteamento hierárquico. Os resultados de desempenho dos sistemas SCA com LEACH e do LEACH utilizando o ARQ Truncado foram comparados e parâmetros envolvendo as métricas tempo

de vida da rede, taxa de perda de pacote e razão sinal-ruído de pico de imagens transmitidas mostram resultados superiores para o sistema proposto.

Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, o autor pretende:

- Combinar o esquema de diversidade cooperativa adaptativa com outros protocolos, tornando o sistema ainda mais eficiente;
- Implementar um simulador com interface gráfica, que possibilite ao projetista de redes de sensores sem fio, uma melhor visualização do processo e dos resultados obtidos;
- Expandir a operação do SCA com LEACH para redes de sensores móveis sem fio, em que outros efeitos poderão ser observados (e.g., efeito Doppler);
- Pesquisar efeitos de transmissão mais característicos do ambiente de redes de sensores sem fio [71] (e.g., características do desvanecimento causado pela proximidade e absorção do solo), assim como a utilização de outros modelos de canal;
- Utilizar outros tipos de codificação (e.g., codificação convolucional);
- Avaliar quais aplicações, de fato, teriam a restrição da dificuldade de utilização de múltiplas antenas em um nó sensor. Pretende-se abranger nesse estudo questões relacionadas à complexidade de processamento, capacidade de memória, custo de produção e implementação do SCA com LEACH e compará-lo a outros esquemas de diversidade;
- Implementar fisicamente o SCA com LEACH.

APÊNDICE A

Exemplo de Eleição de Coordenadores de Grupo sob o Protocolo LEACH

Considere uma rede de sensores sem fio composta de 20 nós sensores e que, em (3.1), $P = 0,1$. Isso significa que 10% dos nós sensores são eleitos coordenadores de grupo em cada ciclo. Então, para o primeiro ciclo ($r = 0$)

$$T(n) = \begin{cases} \frac{0,1}{1 - 0,1 \times (0 \bmod \frac{1}{0,1})} = 0,1, & \text{se } n \in G, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Cada nó escolhe aleatoriamente um número entre 0 e 1, conforme mostrado na Tabela A.1

Já que no primeiro ciclo todos os nós pertencem a G , eles possuem a mesma probabilidade (0,1) de se tornarem coordenadores e os dois nós eleitos são aqueles que escolheram um número menor do que o limiar de valor 0,1. Esses nós são aqueles identificados pelos números 8 e 19, na Tabela A.1.

No segundo ciclo ($r = 1$), o limiar de decisão é dado por

$$T(n) = \begin{cases} \frac{0,1}{1 - 0,1 \times (1 \bmod \frac{1}{0,1})} = 0,1111, & \text{se } n \in G, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

Para o segundo ciclo, o conjunto G é formado pelos nós que não foram coordenadores no primeiro ciclo. Para esses nós, $T = 0,1111$ e, para os nós 8 e 19, $T = 0$. Então, pela Tabela A.1, verifica-se que os nós 6 e 15 escolheram números menores que $T = 0,1111$, o que os torna coordenadores de grupo para o segundo ciclo. Os nós 8 e 19 não possuem números escolhidos menores do que $T = 0$, o que os impossibilita se elegerem coordenadores para esse ciclo.

A Tabela A.2 mostra os resultados do processo de eleição de coordenadores de grupo, até o décimo ciclo ($r = 9$).

Tabela A.1 Escolha aleatória de números entre 0 e 1.

Nó n	Número escolhido
1	0,1297
2	0,1743
3	0,9501
4	0,1176
5	0,4332
6	0,1096
7	0,2100
8	0,0089
9	0,1244
10	0,1947
11	0,2785
12	0,2576
13	0,1525
14	0,1419
15	0,1017
16	0,7624
17	0,3812
18	0,2451
19	0,0093
20	0,1603

Tabela A.2 Eleição dos coordenadores de grupo.

Ciclo r	$T(n)$	Coordenadores Eleitos (n)
0	0,1000	8 e 19
1	0,1111	15 e 6
2	0,1250	9 e 4
3	0,1429	1 e 14
4	0,1667	13 e 20
5	0,2000	2 e 10
6	0,2500	7 e 18
7	0,3333	11 e 12
8	0,5000	17 e 5
9	1,0000	16 e 3

APÊNDICE B

Artigos Produzidos

Artigos Produzidos Durante o Mestrado em Engenharia Elétrica

1. SOUSA, M. P. ; ALENCAR, M. S. ; VASCONCELOS JUNIOR, C. A. V. ; LOPES, W. T. A. . Equalização de Histograma para Melhoria de Contraste de Imagens Digitais Codificadas pela Técnica de Quantização Vetorial. In: XXI Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (Sibgrapi 2008) – Workshop of Undergraduate Work, 2008, Campo Grande. Proceedings of the XXI Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (Sibgrapi 2008) – Workshop of Undergraduate Work, 2008.
2. SOUSA, M. P. ; KUMAR, A. ; ALENCAR, M. S. ; LOPES, W. T. A. . Low-Energy Adaptive Cooperative Diversity Applied to Wireless Sensor Networks. In: XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT 2009), 2009, Blumenau, SC. Proceedings of XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT 2009), 2009.
3. SOUSA, M. P. ; KUMAR, A. ; ALENCAR, M. S. ; LOPES, W. T. A. . Performance Evaluation of a Selective Cooperative Scheme for Wireless Sensor Networks. In: The Sixth ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks (PE-WASUN'2009), 2009, Tenerife, Canary Islands. Proceedings of The Sixth ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks (PE-WASUN'2009), 2009.
4. SOUSA, M. P. ; KUMAR, A. ; ALENCAR, M. S. ; LOPES, W. T. A., Scalability in an Adaptive Cooperative System for Wireless Sensor Networks. In: IEEE SASN'09 The International Workshop on Scalable Ad Hoc and Sensor Networks, 2009. St. Petersburg, Russia, 2009.
5. ALVES, M. J. L. ; ALENCAR, M. S. ; SOUSA, M. P. . Resposta Espacial de uma Antena Inteligente Linear sob os Efeitos do Acoplamento Mútuo. In: XXVII Simpósio

Brasileiro de Telecomunicações (SBrT 2009), 2009, Blumenau, SC. Anais do XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT 2009), 2009.

6. COSTA, M. A. D. ; MEDEIROS, W. G. ; REGIS, C. D. M. ; NASCIMENTO, A. R. Z. ; SILVA, E. F. ; SOUSA, M. P. ; ALENCAR, M. S. . Interface para Auxílio à Comunicação Alternativa de Imagens e Dados. In: V Congresso sobre tencnologías de apoyo a la discapacidad, 2008, Bogotá. Anais do V Congresso sobre tencnologías de apoyo a la discapacidad, 2008.
7. ARAUJO, R. C. C. ; SANTOS, J. L. A. ; L. FILHO, A. C. ; BELO, F. A. ; LIMA, J. A. G. ; SOUSA, M. P. ; KUMAR, A. ; ALENCAR, M. S. ; LOPES, W. T. A. . RailBee: A Rail Monitoring System using ZigBee. In: The 1st International Conference on Sensor Networks Applications, Experimentation and Logistics (SENSAPPEAL 2009), 2009, Athens. Proceedings of The 1st International Conference on Sensor Networks Applications, Experimentation and Logistics (SENSAPPEAL 2009), 2009.

Referências Bibliográficas

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38:393–422, 2002.
- [2] Y. Chen and Q. Zhao. On the lifetime of wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 9(11):976–978, November 2005.
- [3] G. Anastasi, M. Conti, M. Francesco, and A. Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 7(3):537–568, May 2009.
- [4] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *In Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2:10 pp., Jan. 2000.
- [5] E. Malkamaki and H. Leib. Performance of truncated type-II hybrid ARQ schemes with noisy feedback over block fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, 48(9):1477–1487, Sep 2000.
- [6] Q. Liu, S. Zhou, and G. B. Giannakis. Cross-Layer combining of adaptive modulation and coding with truncated ARQ over wireless links. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 3(5):1746–1755, Sept. 2004.
- [7] V. M. DaSilva and E. S. Sousa. Fading-resistant modulation using several transmitter antennas. *IEEE Transactions on Communications*, 45(10):1236–1244, Oct 1997.
- [8] J. H. Winters, J. Salz, and R. D. Gitlin. The impact of antenna diversity on the capacity of wireless communication systems. *IEEE Transactions on Communications*, 42(234):1740–1751, Feb/Mar/Apr 1994.
- [9] W. T. A. Lopes and M. S. Alencar. Space-time coding performance improvement using a rotated constellation. *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT'2000)*, Gramado, RS, Brasil, Setembro 2000.
- [10] Lin Dai and K. Letaief. Throughput maximization of ad-hoc wireless networks using adaptive cooperative diversity and truncated ARQ. *IEEE Transactions on Communications*, 56(11):1907–1918, November 2008.

-
- [11] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank. Space-time block codes from orthogonal designs. *IEEE Transactions on Information Theory*, 45:1456–1467, 1999.
- [12] S. M. Alamouti. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16(8):1451–1458, 1998.
- [13] H. Jafarkhani. *Space-time coding. Theory and Practice*. Cambridge University Press, 2005.
- [14] K. Sohraby, D. Minoli, and T. Znati. *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. John Wiley & Sons, 2007.
- [15] D. Estrin, L. Girod, G. Pottie, and M. Srivastava. Instrumenting the world with wireless sensor networks. In *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2001)*, pages 2033–2036, 2001.
- [16] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar. Next century challenges: scalable coordination in sensor networks. In *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '99)*, pages 263–270, New York, NY, USA, 1999.
- [17] Chee-Yee Chong and S. P. Kumar. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges. *Proceedings of the IEEE*, 91(8):1247–1256, 2003.
- [18] IEEE Std 802.15.1 IEEE Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between systems- Local and metropolitan area networks- Specific requirements Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs). *IEEE Std 802.15.1-2002*, 2002.
- [19] IEEE standard for information technology - telecommunications and information exchange between systems - local and metropolitan area networks specific requirements part 15.4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs). *IEEE Std 802.15.4-2003*, 2003.
- [20] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. *IEEE Std 802.16-2009 (Revision of IEEE Std 802.16-2004)*, 29 2009.
- [21] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister. Next century challenges: mobile networking for "smart dust". In *MobiCom '99: Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 271–278, New York, NY, USA, 1999.

-
- [22] M. Kubisch, H. Karl, A. Wolisz, L. C. Zhong, and J. Rabaey. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'2003)*, volume 1, pages 558–563, March 2003.
- [23] T. Clouqueur, V. Phipatanasuphorn, P. Ramanathan, and K. Saluja. Sensor deployment strategy for target detection. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications (WSNA'02)*, pages 42–48, New York, NY, USA, 2002.
- [24] M. Welsh, D. Malan, B. Duncan, T. Fulford-Jones, and S. Moulton. *Wireless Sensor Networks for Emergency Medical Care*. Presented at GE Global Research Conference, Harvard University and Boston University School of Medicine, Boston, MA, Mar. 8, 2004.
- [25] M. Hatler. *Wireless Sensor Networks: Mass Market Opportunities*. ONWorld, Inc., San Diego, CA, Feb. 22, 2004.
- [26] A. Deshpande, C. Guestrin, S. Madden, J. Hellerstein, and W. Hong. Model-driven data acquisition in sensor networks. In *Proceedings of the Thirtieth international conference on Very large data bases (VLDB '04)*, pages 588–599, 2004.
- [27] ZigBee Alliance. Available at. <http://www.zigbee.org/>. Accessed on August 2009.
- [28] R. A. F. Mini, B. Nath, and A. A. F. Loureiro. Prediction-based approaches to construct the energy map for wireless sensor networks. In *21 Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, 2003.
- [29] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 6(2):28–36, 2002.
- [30] A. Boukerche, H. A. B. F. Oliveira, E. F. Nakamura, and A. A. F. Loureiro. A novel lightweight algorithm for time-space localization in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems (MSWiM '07)*, pages 336–343, 2007.
- [31] teleco.com.br. Available at. <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrssf/default.asp>. Accessed on August 2009.
- [32] T. M. Johnson e M. Margalho. Redes de Sensores Sem Fio para Monitoramento Agro-Climatológico na Amazônia. Universidade da Amazônia (UNAMA), Belém/PA - Brasil.
- [33] J. Burrell, T. Brooke, and R. Beckwith. Vineyard computing: Sensor networks in agricultural production. *IEEE Pervasive Computing*, 3(1):38–45, 2004.

-
- [34] K. Langendoen, A. Baggio, and O. Visser. Murphy loves potatoes: experiences from a pilot sensor network deployment in precision agriculture. In *20th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'2006)*, April 2006.
- [35] T. Wark, P. Corke, P. Sikka, L. Klingbeil, Y. Guo, C. Crossman, P. Valencia, D. Swain, and G. Bishop-Hurley. Transforming agriculture through pervasive wireless sensor networks. *IEEE Pervasive Computing*, 6(2):50–57, 2007.
- [36] B. F. T. Rudorff e M. A. Moreira. *Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2002.
- [37] J. Giacomini and F. Vasconcelos. Wireless Sensor Network as a Measurement Tool in Precision Agriculture. *XVIII IMEKO World Congress, Metrology for a Sustainable Development*, 17 – 22, September, 2006, Rio de Janeiro.
- [38] V. I. Adamchuk et al. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44:71–91, 2004.
- [39] V. I. Adamchuk et al. Report from the field: Results from an agricultural wireless sensor network. *Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN'04)*, pages 471–478, 2004.
- [40] A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications (WSNA'02)*, pages 88–97, New York, NY, USA, 2002.
- [41] J. G. T. Anderson. Pilot survey of mid-coast maine seabird colonies: an evaluation of techniques. Technical report, *Report to the State of Maine Dept. of Inland Fisheries and Wildlife*, Bangor, ME, 1995.
- [42] J. L. Hill and D. E. Culler. Mica: A wireless platform for deeply embedded networks. *IEEE Micro Magazine*, 22(6):12–24, 2002.
- [43] I. F. Akyildiz, T. Melodia, and K. R. Chowdhury. A survey on wireless multimedia sensor networks. *Computer Networks*, 51(4):921 – 960, 2007.
- [44] W. Feng, B. Code, E. Kaiser, M. Shea, W. Feng, and L. Bavoil. Panoptes: scalable low-power video sensor networking technologies. In *Proceedings of the 11th ACM international conference on Multimedia (MULTIMEDIA'03)*, pages 562–571, Berkeley, CA, USA, 2003.
- [45] P. Kulkarni, D. Ganesan, P. Shenoy, and Q. Lu. Senseye: a multi-tier camera sensor network. In *Proceedings of the 13th ACM international conference on Multimedia (MULTIMEDIA'05)*, pages 229–238, Hilton, Singapore, 2005.

-
- [46] C. B. Margi, V. Petkov, K. Obraczka, and R. Manduchi. Characterizing energy consumption in a visual sensor network testbed. In *2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (TRIDENT-COM 2006)*, pages 8 pp.–339, 2006.
- [47] M. Wu and C. Chen. Collaborative image coding and transmission over wireless sensor networks. *EURASIP Journal on Embedded Systems*, pages 223–223, 2007.
- [48] R. Cucchiara. Multimedia surveillance systems. In *Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Video surveillance and sensor networks (VSSN '05)*, pages 3–10, Hilton, Singapore, 2005.
- [49] I. Downes, L. B. Rad, and H. Aghajan. Development of a mote for wireless image sensor networks. *Proceedings of COGNITIVE systems with Interactive Sensors (COGIS)*, 2006.
- [50] S. Hengstler and H. Aghajan. Application development in vision-enabled wireless sensor networks. In *Proceedings of the International Conference on Systems and Networks Communication (ICSNC '06)*, page 30, Papeete, Tahiti, French Polynesia, 2006.
- [51] J. Zhu and S. Papavassiliou. On the connectivity modeling and the tradeoffs between reliability and energy efficiency in large scale wireless sensor networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'2003)*, volume 2, pages 1260–1265, New Orleans, Louisiana, USA, March 2003.
- [52] F. Xiangning and S. Yulin. Improvement on LEACH Protocol of Wireless Sensor Network. In *International Conference on Sensor Technologies and Applications (SensorComm'2007)*, pages 260–264, Valencia, Spain, October. 2007.
- [53] W. Liu, X. Li, and M. Chen. Energy efficiency of MIMO transmissions in wireless sensor networks with diversity and multiplexing gains. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '05)*, volume 4, pages 897–900, Philadelphia, USA, March 2005.
- [54] X. Li, M. Chen, and W. Liu. Application of STBC-encoded cooperative transmissions in wireless sensor networks. *IEEE Signal Processing Letters*, 12(2):134–137, Feb. 2005.
- [55] Y. Yuan, Z. He, and M. Chen. Virtual MIMO-based cross-layer design for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 55(3):856–864, May 2006.
- [56] X. Li. Energy efficient wireless sensor networks with transmission diversity. *Electronics Letters*, 39(24):1753–1755, 2003.
- [57] M. S. Alencar. *Telefonia Celular Digital*. Érica, 2004.

-
- [58] Y. Chen, J. Zhang, and I. Marsic. Link-layer-and-above diversity in multihop wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 47(2):118–124, February 2009.
- [59] P. Larsson. Selection diversity forwarding in a multihop packet radio network with fading channel and capture. In *Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing (MobiHoc '01)*, pages 279–282, Long Beach, CA, USA, 2001.
- [60] Marcelo P. Sousa, Ajey Kumar, Marcelo S. Alencar, and Waslon T. A. Lopes. Low-energy adaptive cooperative diversity applied to wireless sensor networks. In *SBrT 2009*, sep 2009.
- [61] Marcelo P. Sousa, Marcelo S. Alencar, Ajey Kumar, and Waslon T. A. Lopes. Performance evaluation of a selective cooperative scheme for wireless sensor networks. *The Sixth ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks – ACM PE-WASUN*, 2009.
- [62] Marcelo P. Sousa, Ajey Kumar, Marcelo S. Alencar, and Waslon T. A. Lopes. Scalability in an adaptive cooperative system for wireless sensor networks. In *IEEE SASN '09 The International Workshop on Scalable Ad Hoc and Sensor Networks*, St. Petersburg, Russia.
- [63] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang. User Cooperation Diversity - Part I: System Description. *IEEE Transactions on Communications*, 51:1927–1938, 2003.
- [64] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang. User Cooperation Diversity - Part II: Implementation Aspects and Performance Analysis. *IEEE Transactions on Communications*, 51:1939–1948, 2003.
- [65] J. N. Laneman and G. W. Wornell. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 49(10):2415–2425, 2003.
- [66] B. Vucetic and J. Yuan. *Space-time Coding*. John Wiley & Sons, 2003.
- [67] L. Yang and Lajos Hanzo. Adaptive space-time-spreading-assisted wideband CDMA systems communicating over dispersive Nakagami-m fading channels. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2005(2):216–230, 2005.
- [68] M. Ju, H. Song, and I. Kim. Exact BER analysis of distributed alamouti's code for cooperative diversity networks. *IEEE Transactions on Communications*, 57(8):2380–2390, Aug. 2009.
- [69] Y. Linde, A. Buzo, and R. Gray. An algorithm for vector quantizer design. *IEEE Transactions on Communications*, 28(1):84–95, 1980.

- [70] W. T. A. Lopes. *Diversidade em Modulação Aplicada a Transmissão de Imagens em Canais com Desvanecimento*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, Junho 2003.
- [71] B. Liu, B. Otis, S. Challa, P. Axon, C. Chou, and S. Jha. On the fading and shadowing effects for wireless sensor networks. In *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS'06)*, pages 51–60, Oct. 2006.