



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

Tese de Doutorado

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

Marcelo Portela Sousa

Campina Grande – PB  
Julho - 2013

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

## **Diversidade Cooperativa Aplicada a Redes de Sensores sem Fio Cognitivas**

Marcelo Portela Sousa

Tese de Doutorado 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 Doutor em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Comunicações.

Marcelo Sampaio de Alencar  
Orientador

Waslon Terlizzie Araújo Lopes  
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S725d

Sousa, Marcelo Portela.

Diversidade cooperativa aplicada a redes de sensores sem fio cognitivas / Marcelo Portela Sousa. – Campina Grande, 2013.  
128 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2013.

"Orientação: Prof. Dr. Marcelo Sampaio de Alencar, Prof. Dr. Waslon Terllizzie Araújo Lopes".

Referências.

1. Redes de Sensores Sem Fio. 2. Diversidade em Modulação Cooperativa. 3. Acesso Oportunístico. 4. Otimização por Colônia de Formigas. 5. Lógica Nebulosa. I. Alencar, Marcelo Sampaio de. II. Lopes, Waslon Terllizzie Araújo. III. Título.

CDU 621.39(043)

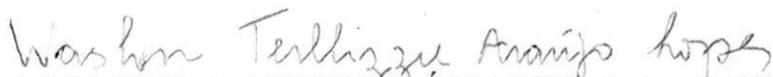
**"DIVERSIDADE COOPERATIVA APLICADA A REDES DE SENSORES SEM FIO  
COGNITIVAS"**

**MARCELO PORTELA SOUSA**

**TESE APROVADA EM 02/07/2013**



**MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR, Ph.D., UFCG**  
**Orientador(a)**



**WASLON TERLLIZZIE ARAÚJO LOPES, D.Sc., UFCG**  
**Orientador(a)**



**ANTONIO ALFREDO FERREIRA LOUREIRO, Ph.D., UFMG**  
**Examinador(a)**



**JOSÉ EWERTON POMBO DE FARIAS, Dr., UFCG**  
**Examinador(a)**



**FRANCISCO MADEIRO BERNARDINO JÚNIOR, D.Sc, UPE**  
**Examinador(a)**



**WAMBERTO JOSÉ LIRA DE QUEIROZ, D.Sc**  
**Examinador(a)**

**CAMPINA GRANDE - PB**

*A Eduardo Souto Portela, inspiração para toda a vida.*

---

---

# Agradecimentos

---

- A Deus por me proporcionar o querer, o poder e o conseguir;
- Ao meu filho Eduardo Souto Portela, pelo sorriso, saúde e vida de cada manhã;
- À minha esposa Angélica, pela paciência, companheirismo e amor, que foram fundamentais para a produção desta Tese.
- 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;
- Aos demais familiares que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho;
- Ao professor Marcelo Sampaio de Alencar pela amizade, orientação acadêmica, e pelo compartilhamento de conhecimentos valiosos e ferramentas para a execução deste trabalho. É um privilégio poder usufruir da rica bagagem científica e de desenvolvimento humano que o professor Marcelo proporciona;
- Ao professor Waslon Terllizzie, que quando me convidou a participar do primeiro P&D estava proporcionando as ferramentas necessárias a trilhar a carreira acadêmica. Durante esses anos de graduação, mestrado e doutorado, agradeço ao professor Waslon por toda a orientação científica, profissional e de vida;
- Aos professores Antônio Loureiro, Francisco Madeiro, Wamberto Queiroz e Ewerton Farias, pelas contribuições, críticas e conselhos apresentados no momento do Exame de Qualificação e durante todo o tempo de execução deste trabalho. Meus esforços foram árduos para cumprir o cronograma;
- 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;

- À Faculdade ÁREA1, onde tudo começou, na Sala de Pesquisa Avançada, com meu grande amigo Carlos Vasconcelos (*in memoriam*). Agradeço também a toda a equipe da Coelba, com quem aprendi bastante, em especial a Caetano Pugliese, Luiz Carlos e Erisvaldo;
- Aos amigos do ISBA, aos amigos dos congressos, das viagens e do IEEE. A Mab Alencar, Quelle Sousa, Évio Rocha, Vinícius Rodrigues, Ajey Kumar, Eduard Montgomery, Lucas Portela, Lucy Portela, Ana Francisca Sousa, Marcelo Alencar, Waslon e Riuzuani Lopes e à família de Angélica;
- Aos professores, colegas e amigos do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande e à Copele;
- Aos colegas, amigos e alunos do Instituto Federal da Paraíba;
- Ao CNPq pelo apoio financeiro.

*“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 monitoramento, de vigilância, de cuidados médicos, entre outras. O desempenho desses sistemas pode ser melhorado pela utilização da técnica de diversidade cooperativa, para o combate ao desvanecimento provocado pelos multipercursos em canais sem fio. Com a habilitação de um conjunto de nós parceiros para encaminhar a informação, esse sistema explora a diversidade espacial por meio da cooperação entre as antenas distribuídas, localizadas nos múltiplos terminais. Nesta Tese, o autor propõe três esquemas de diversidade cooperativa para redes de sensores sem fio dotadas de características cognitivas, seja pela capacidade de gerenciamento espectral dinâmico, ou pelo uso de técnicas de inteligência computacional e computação bioinspirada. As contribuições vão desde a proposta de novos protocolos de agrupamento, como o LF-Ant e o LF-Ant Cognitivo, até um novo esquema de colaboração, que envolve a diversidade em modulação cooperativa com sensoriamento espectral. Para os protocolos de agrupamento propostos, a eleição de líderes de grupo é inspirada no comportamento organizado de colônias de formigas, com a informação heurística modelada por um sistema de inferência nebulosa. Além disso, é apresentado um protocolo inspirado por experimentos com pernas de formigas desérticas, para alocar recursos de acordo com o grau de emergência de pacientes em redes de cuidados médicos cognitivas. Os resultados de simulação mostram a diminuição do atraso médio, à medida que a probabilidade de acesso oportunístico aumenta, o que privilegia o relato de emergência de pacientes com maior prioridade de acesso aos recursos. O impacto dos erros de estimação do canal, do fator de energia e da profundidade de entrelaçamento é avaliado para redes heterogêneas. A informação de energia residual da rede é utilizada por meio de mapas de energia para eleger os vice-líderes de grupo e distribuir melhor o consumo de energia pela rede, que também é beneficiada pelo acesso espectral oportunístico.

**Palavras-chave:** Diversidade em Modulação Cooperativa, Otimização por Colônia de Formigas, Lógica Nebulosa, Acesso Oportunístico, Redes de Cuidados Médicos, Fator de Energia.

---

---

# Abstract

---

Wireless sensor networks (WSNs) are becoming popular in many applications, such as monitoring, surveillance, healthcare, among others. The performance of those systems can be improved by the use of the cooperative diversity technique, to mitigate the fading caused by multipath in wireless channels. By enabling a set of partner nodes to relay the received information, this system exploits the spatial diversity by the cooperation between the distributed antennas, located at the multiple terminals. In this Thesis, the author presents three schemes of cooperative diversity for wireless sensor networks with cognitive characteristics, either by the capabilities related to the dynamic spectrum management, or by the use of computational intelligence and bio-inspired computing. The contributions range from the proposal of techniques to novel clustering protocols, including the LF-Ant and Cognitive LF-Ant, and a novel cooperative scheme, which involves the cooperative modulation diversity with spectrum sensing. Regarding the proposed clustering protocols, the election of cluster-heads is inspired by the organized behaviour of ant colonies, with the heuristic information modelled by a fuzzy inference system. Furthermore, a new protocol, inspired by experiments with legs of desert ants, to allocate resources in accordance to the emergency degree of patients in cognitive healthcare networks is presented. Simulation results show the decrease of the average delay as the probability of opportunistic access increases, that privileges the emergency reporting of patients with higher priority to access the resources. The impact of the channel estimation errors, of the energy factor, and of the interleaving depth is evaluated for heterogeneous networks. The information of the network residual energy is used by energy maps to elect the vice cluster-heads and to better distribute the energy consumption over the network, which is also benefited by the opportunistic spectrum access.

**Keywords:** Cooperative Modulation Diversity, Ant Colony Optimization, Fuzzy Logic, Opportunistic Access, Healthcare Networks, Energy Factor.

---

---

# Sumário

---

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Principais Contribuições . . . . .	3
1.2	Organização da Tese . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Redes de Sensores sem Fio</b>	<b>6</b>
2.1	Evolução das Redes de Sensores sem Fio . . . . .	7
2.2	Características dos Nós Sensores . . . . .	8
2.3	Propriedades das Redes de Sensores sem Fio . . . . .	11
2.4	Agrupamento em RSSFs . . . . .	19
2.4.1	Elementos de um Grupo . . . . .	19
2.4.2	Tipos de Grupo . . . . .	20
2.5	Desafios em Redes de Sensores sem Fio . . . . .	22
2.6	Conclusão . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Redes Cognitivas para as Comunicações sem Fio</b>	<b>24</b>
3.1	Arquitetura Geral das Redes Cognitivas . . . . .	26
3.1.1	Funcionalidades das Redes Cognitivas . . . . .	28
3.2	Projeto da Camada Física . . . . .	30
3.2.1	Sensoriamento Espectral . . . . .	31
3.3	Controle de Acesso ao Meio . . . . .	32
3.3.1	Gerenciamento Espectral em Redes Cognitivas . . . . .	32
3.3.2	Acesso ao Meio . . . . .	33
3.4	Camada de Rede e Camadas Superiores . . . . .	33
3.5	Aplicações das Redes Cognitivas . . . . .	35
3.6	Redes de Sensores sem Fio Cognitivas . . . . .	36
3.6.1	Características e Desafios . . . . .	37
3.7	Conclusão . . . . .	39
<b>4</b>	<b>LF-Ant: Um Protocolo Bio-inspirado para Redes de Sensores sem Fio</b>	<b>40</b>
4.1	Trabalhos Relacionados . . . . .	41

---

4.2	O Protocolo LF-Ant . . . . .	43
4.2.1	Informação Heurística Nebulosa . . . . .	45
4.3	Diversidade em Modulação Cooperativa . . . . .	47
4.3.1	O Estágio de Difusão . . . . .	49
4.3.2	O Estágio de Retransmissão . . . . .	50
4.3.3	O Modelo do Canal e o Sistema de Decodificação . . . . .	51
4.4	Avaliação de Desempenho . . . . .	52
4.5	Conclusão . . . . .	56
<b>5</b>	<b>Uma Abordagem Cognitiva para o Protocolo LF-Ant</b>	<b>58</b>
5.1	Trabalhos Relacionados . . . . .	59
5.2	Considerações sobre a Rede . . . . .	60
5.3	O Protocolo LF-Ant Cognitivo . . . . .	61
5.4	O Relato de Emergência . . . . .	63
5.5	Diversidade em Modulação Cooperativa com Sensoriamento Espectral . . . . .	66
5.6	Análise de Desempenho . . . . .	67
5.7	Conclusão . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Diversidade Cooperativa Aplicada a Redes de Sensores sem Fio Heterogêneas</b>	<b>73</b>
6.1	Trabalhos Relacionados . . . . .	74
6.2	Impacto dos Erros de Estimção do Canal . . . . .	76
6.2.1	O Estimador de Módulo . . . . .	76
6.2.2	O Estimador de Fase . . . . .	77
6.2.3	Avaliação de Desempenho . . . . .	78
6.3	Impacto do Fator de Energia e da Profundidade de Entrelaçamento . . . . .	78
6.3.1	O Fator de Energia (NBAT) . . . . .	79
6.3.2	A Profundidade de Entrelaçamento ( $K$ ) . . . . .	80
6.3.3	Avaliação de Desempenho . . . . .	81
6.4	Eleição por Mapa de Energia e Acesso Oportunístico . . . . .	87
6.5	Conclusão . . . . .	94
<b>7</b>	<b>Considerações Finais e Perspectivas</b>	<b>95</b>
7.1	Propostas para Trabalhos Futuros . . . . .	97
<b>A</b>	<b>Otimização por Colônia de Formigas</b>	<b>99</b>
A.1	Experimentos com Pontes Duplas . . . . .	101
A.2	Um Modelo Estocástico . . . . .	102
A.3	Colônias de Formigas Artificiais . . . . .	103
A.4	Formigas Artificiais e Percursos de Custo Mínimo . . . . .	105
A.5	Experimentos de Manipulação de Pernas de Formigas Desérticas . . . . .	106

<b>B Biografia e Publicações</b>	<b>109</b>
----------------------------------	------------

<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>114</b>
-----------------------------------	------------

---

---

# Lista de Figuras

---

2.1	Rede de sensores sem fio típica. . . . .	9
2.2	Componentes de um nó sensor. . . . .	10
2.3	Modelo genérico da pilha de protocolos para RSSFs. . . . .	14
2.4	Mapa de energia de uma RSSF. . . . .	18
3.1	Funcionalidades de comunicação de uma rede cognitiva. . . . .	26
3.2	Arquitetura de redes cognitivas. . . . .	27
3.3	Representação de lacunas espectrais. . . . .	31
3.4	Arquitetura de uma rede de sensores sem fio cognitiva. . . . .	37
4.1	Funções de pertinência para a variável <code>distancia_local</code> . . . . .	46
4.2	Funções de pertinência para a variável <code>dispersao_CHs</code> . . . . .	47
4.3	Funções de pertinência para a variável <code>eta</code> . . . . .	47
4.4	Diagrama de constelação QPSK sem rotação. . . . .	48
4.5	Diagrama de constelação QPSK rotacionado. . . . .	48
4.6	Probabilidade de erro de <i>bit</i> para o esquema de diversidade em modulação em função da razão sinal-ruído ( $E_b/N_0$ ) para a constelação QPSK considerada. . .	49
4.7	Cinco líderes de grupo (representados em círculos) eleitos pelo protocolo de agrupamento proposto. . . . .	53
4.8	O processo de agregação, que reduz a quantidade de informação necessária a ser transmitida para o nó destino. . . . .	53
4.9	O mapa de energia da rede de sensores, utilizando o protocolo LEACH. . . . .	54
4.10	O mapa de energia da rede de sensores, utilizando o protocolo proposto. . . . .	54
4.11	Avaliação do tempo de vida da rede. O protocolo proposto supera o desempenho de um protocolo clássico de agrupamento. . . . .	55
4.12	A comparação de desempenho do tempo de vida da rede entre o protocolo proposto e o SCA com LEACH. Em todos os casos, o LF-Ant apresenta melhores resultados, com uma maior quantidade de rodadas necessárias para a inativação do último nó. . . . .	56
4.13	Comparação da taxa de perda de pacote como uma função da qualidade do canal. . . . .	56

5.1	Distribuição de probabilidade de um nó apresentar um grau de emergência específico. . . . .	69
5.2	Tempo de atraso médio como uma função da probabilidade de acesso oportunista do espectro, sobre uma TCB igual a 0,4. . . . .	70
5.3	Tempo de atraso médio como uma função da taxa de comprimento de bloco, sobre $P_{ao} = 0,6$ . . . . .	70
5.4	Taxa de perda de pacote para os nós com GE Baixo, como função da SNR média. . . . .	71
5.5	Taxa de perda de pacote para os nós com GE Alto, como função da SNR média. . . . .	72
5.6	Taxa de perda de pacote para os nós com GE Crítico, como função da SNR média. . . . .	72
6.1	Diagrama de blocos do sistema de comunicações considerado. . . . .	77
6.2	Taxa de perda de pacote como função da SNR do canal. . . . .	79
6.3	Rodada para a primeira inativação de nó como função da SNR do canal. . . . .	79
6.4	Rodada para a última inativação de nó como função da SNR do canal. . . . .	80
6.5	Mapa de localização dos nós sensores na rede. . . . .	82
6.6	Avaliação da taxa de perda de pacote, como uma função do fator de energia (NBAT), para a rede sem o modo de diversidade cooperativa. . . . .	83
6.7	Avaliação da taxa de perda de pacote, como uma função do fator de energia (NBAT), para $K = 1$ . . . . .	84
6.8	Tempo de vida de cada nó sensor da rede, para SNR = 10 dB e NBAT = 4. . . . .	85
6.9	Tempo de vida de cada nó sensor da rede, para SNR = 10 dB e NBAT = 5. . . . .	85
6.10	Tempo de vida de cada nó sensor da rede, para SNR = 10 dB e NBAT = 6. . . . .	86
6.11	Avaliação da taxa de perda de pacote, como uma função do fator de energia (NBAT), para $K = 60$ . . . . .	87
6.12	[Número de retransmissões utilizadas por cada nó sensor.]Número de retransmissões utilizadas por cada nó sensor. O cenário considerado possui SNR do canal igual a 5 dB e NBAT = 3. . . . .	88
6.13	Taxa de perda de pacote como função da SNR do canal. . . . .	89
6.14	Mapas de energia para a rede com eleição contínua (sequencial). . . . .	91
6.15	Mapas de energia para a rede com eleição por retroalimentação da informação de energia residual. . . . .	92
6.16	Mapas de energia para a rede com acesso espectral oportunístico. . . . .	93
A.1	Identificação da melhor rota entre o formigueiro (N) e o alimento (F). . . . .	100
A.2	Identificação da melhor rota entre o formigueiro (N) e o alimento (F). . . . .	100
A.3	Experimentos com pontes duplas: (a) os ramos possuem o mesmo comprimento; (b) os ramos possuem comprimentos diferentes. . . . .	102
A.4	Grafos equivalentes ao modelo experimental da Figura A.3(b). . . . .	103
A.5	Soluções construídas por formigas, isto é, percursos entre um nó fonte e um nó destino. . . . .	105

---

A.6	Diagrama que representa as calhas e os procedimentos de treinamento e teste, aplicados à formiga <i>Cataglyphis fortis</i> . . . . .	107
A.7	Representação das manipulações das pernas das formigas. . . . .	107
A.8	Resultados referentes às distâncias das formigas experimentais, testadas imediatamente após o comprimento de suas pernas terem sido modificados. . . . .	108
B.1	Citações das publicações do autor até maio de 2013. . . . .	113

---

---

## Lista de Tabelas

---

2.1	Possíveis protocolos para RSSFs (camadas inferiores). . . . .	15
4.1	Regras Nebulosas utilizadas no protocolo LF-Ant. . . . .	46
4.2	O processo de entrelaçamento para dois símbolos, no protocolo LF-Ant. . . . .	51
5.1	O entrelaçamento de dois símbolos no protocolo LF-Ant Cognitivo. . . . .	67
6.1	Definição do fator de energia, representado pela variável NBAT. A rede é considerada homogênea para $N_{BAT} = 1$ . . . . .	80
6.2	Representação da alocação das componentes de dois símbolos, para uma profundidade de entrelaçamento $K = 1$ . . . . .	80
6.3	Representação da alocação das componentes de quatro símbolos, para uma profundidade de entrelaçamento $K = 2$ . . . . .	81

---

---

# Lista de Algoritmos

---

5.1	A eleição do líder de grupo e do vice-líder. . . . .	62
5.2	O relatório de emergência realizado no interior de um grupo. . . . .	64
5.3	A comunicação entre os grupos. A diversidade em modulação cooperativa é solicitada se erros ocorrerem. . . . .	67

---

---

# Lista de Siglas

---

ACK – *Acknowledgement*

ACO – *Ant Colony Optimization*

ARQ – *Automatic Repeat Request*

AWGN – *Additive White Gaussian Noise*

BER – *Bit Error Rate*

C1RSSFs – *Categoria 1 RSSFs*

C2RSSFs – *Categoria 2 RSSFs*

CCC – *Canal de Controle Comum*

CDMA – *Code Division Multiple Access*

CH – *Cluster-Head*

CHEF – *Cluster-Head Election mechanism using Fuzzy logic*

CO – *Combinatorial Optimization*

CoA – *Center of Area*

COTS – *Commercial Off the Shelf*

CRC – *Cyclic Redundancy Check*

CSMA/CA – *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*

DARPA – *Defense Advanced Research Projects Agency*

DHCP – *Dynamic Host Configuration Protocol*

DMC – *Diversidade em Modulação Cooperativa*

EPLR – *Energy Packet Loss Rate* FCC – *Federal Communications Commission*

GE – *Grau de Emergência*

GPS – *Global Positioning System*

HART – *Highway Addressable Remote Transducer*

IEEE – *Institute of Electrical and Eletronics Engineering*

ISM – *Industrial, Scientific, and Medical*

LANs – *Local Area Networks*

LE – *Lacuna Espectral*

LEACH – *Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*

LF-Ant – *Linguistic Fuzzy Ant*

MAC – *Medium Access Control*

---

MANNA – *Management Architecture for Wireless Sensor Networks*  
MEMS – *Microscale Electro-Mechanical Systems*  
MIMO – *Multiple-Input Multiple-Output*  
MPEG-4 – *Moving Pictures Expert Group 4*  
NACK – *Non-Acknowledgement*  
NEMS – *Nanoscale Electro-Mechanical Systems*  
NOAA – *National Oceanographic and Atmospheric Administration*  
OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*  
PAN – *Personal Area Network*  
PSNR – *Peak Signal-to-Noise Ratio*  
QCIF – *Quarter Common Intermediate Format*  
QoS – *Quality of Service*  
QPSK – *Quadrature Phase Shift Keying*  
RF – *Radiofrequência*  
RFC – *Request For Comment*  
RSDs – *Rede de Sensores Distribuídas*  
RSSF – *Rede de Sensores sem Fio*  
RSSFC – *Redes de Sensores sem Fio Cognitivas*  
RSVSF – *Redes de Sensores de Vídeo sem Fio*  
SCA – *Selective Cooperative diversity with ARQ*  
SE – *Sensoriamento Espectral*  
SNR – *Signal-to-Noise Ratio*  
STBC – *Space-Time Block Codes*  
TCB – *Taxa de Comprimento de Bloco*  
TDMA – *Time Division Multiple Access*  
TI – *Tecnologia da Informação*  
TPLR – *Transmission Packet Loss Rate* TPP – *Taxa de Perda de Pacote*  
TSP – *Travelling Salesman Problem*  
UWB – *Ultrawideband*  
VLSI – *Very Large Scale Integration*

---

---

# Lista de Símbolos

---

- $T(n)$  – Limiar de decisão para eleição dos líderes de grupo
- $P$  – Percentual desejado de líderes de grupo
- $R$  – Rodada correspondente
- $G$  – Conjunto de nós que ainda não se tornaram líderes nas últimas  $\frac{1}{P}$  rodadas
- $K$  – Número de nós sensores da rede
- $Q$  – Número de líderes de grupo da rede
- $\mathcal{H}$  – Conjunto de saltos a partir do líder fonte
- $\Lambda$  – Nó sorvedouro
- $\mathcal{S}$  – Conjunto de líderes de grupo
- $C$  – Número de *bits* do CRC
- $N_r^{\max}$  – Número máximo de retransmissões
- $P_t$  – Potência de transmissão por símbolo
- $x_{t_0+i}^{\mathcal{S}_\omega}$  – Símbolo que utiliza a modulação QPSK
- $\varsigma$  – Número de símbolos por pacote
- $h_0$  – Variável aleatória que representa o ganho do canal
- $\sigma_0^2$  – Variância do ganho do canal
- $z_0$  – Variável aleatória que representa o ruído AWGN
- $N_0$  – Variância do ruído AWGN
- $\mathcal{S}_\omega$  – Líder de grupo fonte
- $r_j$  – Líder de grupo parceiro
- $\mathcal{C}$  – Palavra código STBC
- $E_{\text{elec}}$  – Energia gasta por *bit* para a utilização dos circuitos de transmissão e recepção
- $\epsilon_{\text{amp}}$  – 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*
- $\tau$  – Quantidade de feromônio
- $\eta$  – Informação heurística

---

$\Delta\tau^k$  – Variável de atualização do feromônio

$w$  – Fator de peso

$p_s^k$  – Regra de decisão para eleição a líder

$\varepsilon_s$  – Energia residual do nó sensor

$\zeta_s$  – Quantidade de energia consumida pelo nó sensor na última rodada

$\Gamma_s$  – Número total de transmissões realizadas pelo nó sensor na rodada anterior

$\alpha_s$  – Número total de lacunas espectrais detectadas até a rodada anterior

$N_s$  – Número total de rodadas em que o sensoriamento espectral foi necessário

$\theta$  – Ângulo de rotação da constelação QPSK

TCB – Taxa de Comprimento de Bloco

$CB_A$  – Comprimento do bloco para transmissão permitida para um nó com GE Alto

$CB_C$  – Comprimento do bloco para transmissão de dados de um nó com GE Crítico

$P_{ao}$  – Probabilidade de acesso oportunístico

## CAPÍTULO 1

---

---

# Introdução

---

As redes de sensores sem fio (RSSFs) apresentam desafios relacionados ao projeto de algoritmos, protocolos de rede e programação para o desenvolvimento de aplicações baseadas em dispositivos sensores. As RSSFs são compostas por nós cooperativos que podem perceber o ambiente para monitorar fenômenos físicos e eventos de interesse. Elas são projetadas para aplicações, que incluem o monitoramento ambiental, industrial, de *habitat*, entre outras, que apresentam potenciais benefícios para a sociedade [1].

Diversos padrões de comunicação de redes de sensores sem fio operam em faixas espectrais não-licenciadas e estão sujeitos à interferência causada por outras redes que compartilham as mesmas faixas de frequência. Por outro lado, apesar da grande demanda pelo espectro licenciado, estudos indicam sua subutilização [2]. A limitada disponibilidade de faixas espectrais e a ineficiência de seu uso demandam novos mecanismos e paradigmas para explorar o espectro de maneira dinâmica. Nesse contexto, as Redes Cognitivas possibilitam um melhor aproveitamento de faixas de frequência alocadas, pelo acesso espectral oportunístico. A capacidade cognitiva também pode ser adicionada às redes de sensores sem fio, por meio de técnicas de inteligência computacional e de inspiração em comportamentos biológicos, com o objetivo de otimizar algum processo de interesse. As RSSFs dotadas de capacidade cognitiva são denominadas Redes de Sensores sem Fio Cognitivas (RSSFC) [3, 4].

Os nós de uma RSSF possuem recursos limitados, em capacidade computacional, memória e suprimento de energia. Além disso, em muitas aplicações, os nós sensores são colocados em áreas remotas, o que dificulta o acesso a esses elementos para manutenção. Nesse cenário, o tempo de vida da rede depende da quantidade de energia disponível e, por isso, os nós devem equilibrar o uso dos recursos com o objetivo de prolongar a operação 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 dessas redes, com destaque para os protocolos de agrupamento [5].

Em protocolos de agrupamento, o processo de eleição de um líder de grupo é uma questão fundamental e tem impacto significativo no consumo geral de energia. Sistemas de inferência

nebulosa (*fuzzy inference systems*) são ferramentas importantes na otimização de algoritmos de agrupamento, pois pela inferência de parâmetros que são genuinamente imprecisos, conseguem eleger os líderes de grupo mais preparados. Técnicas baseadas no comportamento organizado de formigas sociais, pelo uso de Otimização por Colônia de Formigas, também apresentam um potencial expressivo para o projeto de protocolos de agrupamento em redes de sensores sem fio [6, 7].

Os sistemas bio-inspirados também podem ser usados no projeto de algoritmos de roteamento e na formação de estruturas hierárquicas em protocolos de controle de acesso ao meio. Em [8] os autores realizaram experimentos para testar a hipótese do “pedômetro”, em que formigas desérticas utilizam um mecanismo de odômetro para otimizar o percurso entre o alimento e o formigueiro. É possível estabelecer um paralelo (e uma inspiração de projeto de protocolo) entre os diferentes comprimentos das pernas das formigas utilizadas nesses experimentos, com diferentes comprimentos de bloco utilizados no acesso espectral oportunístico, em redes de sensores sem fio cognitivas.

Nos canais de comunicações das RSSFC, o desvanecimento causado pelo multipercurso pode degradar o desempenho do sistema de comunicações. As técnicas de diversidade visam mitigar os efeitos nocivos do desvanecimento, visto que réplicas dos sinais transmitidos são disponibilizadas para o nó destino. Diversidade espacial, diversidade temporal e diversidade em modulação são exemplos de técnicas típicas, e a utilização de múltiplas antenas, para a viabilização da diversidade espacial, apresenta bons resultados no combate ao desvanecimento em comunicações sem fio [9, 10].

Entretanto, devido ao reduzido tamanho dos nós sensores e às restrições de energia presentes na rede, a aplicação das técnicas de diversidade pelo uso de múltiplas antenas é recomendável. Para superar essa limitação novas formas de diversidade espaço-temporal, em que ganhos de diversidade são encontrados por meio da cooperação dos nós, têm sido apresentadas. A diversidade cooperativa é uma tecnologia de considerável potencial 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 sistema explora a diversidade espacial com a cooperação entre as antenas distribuídas, pertencentes aos múltiplos terminais [11–13].

Nesta Tese são apresentados os resultados provenientes do desenvolvimento de protocolos para redes de sensores sem fio cognitivas, tanto do ponto de vista de gerenciamento espectral dinâmico, quanto do ponto de vista da otimização de processos, por meio do uso de inteligência computacional e de inspiração em comportamentos biológicos. A diversidade cooperativa guia a operação dos protocolos desenvolvidos, por três maneiras distintas: diversidade em modulação cooperativa; diversidade em modulação cooperativa com sensoriamento espectral; e diversidade associada ao contexto heterogêneo.

## 1.1 Principais Contribuições

As principais contribuições desta Tese são:

- Projeto e avaliação de desempenho de um novo protocolo de agrupamento, o LF-Ant, baseado no comportamento organizado de formigas argentinas, da espécie *Iridomyrmex humilis*. O protocolo LF-Ant opera para a eleição de líderes de grupo, na camada de rede, e para o controle de possíveis retransmissões com a técnica de diversidade em modulação cooperativa, nas camadas de enlace e física. A eleição do nó sensor mais preparado para líder de grupo equivale à escolha do percurso de custo mínimo, pela formiga. A informação heurística nebulosa também aparece como uma das contribuições, pois a modelagem nebulosa dos parâmetros relativos à estimação de distância (equilíbrio entre concentração dos nós e dispersão dos líderes) melhorou o desempenho global do protocolo proposto. O LF-Ant aumentou o tempo de vida da rede, diminuiu a taxa de perda de pacote e apresentou um maior equilíbrio relativo ao consumo de energia entre os nós, quando comparado com outro esquema cooperativo (o SCA com LEACH);
- Extensão do protocolo LF-Ant para contemplar a operação cognitiva relacionada ao gerenciamento espectral oportunista. A inserção da componente cognitiva na regra de decisão permitiu privilegiar os nós que conseguem identificar mais oportunidades de acesso espectral oportunista. O protocolo de agrupamento derivado, denominado LF-Ant Cognitivo, foi decisivo para o processo de eleição de líderes de grupo da rede de sensores sem fio cognitiva considerada.
- Um novo protocolo projetado para o relato intra-grupo em redes de cuidados médicos, baseado nos resultados de experimentos realizados com formigas desérticas, da espécie *Cataglyphis fortis*. A manipulação das pernas das formigas nesses experimentos inspirou o projeto de uma estrutura hierárquica de controle de acesso ao meio, para atribuir prioridades no relato do *status* de emergência e dos dados medidos, de acordo com o grau de emergência de cada paciente. Os pacientes com maior valor de grau de emergência são tratados com a maior prioridade e podem ter mais oportunidades de acesso à rede e aos recursos. De fato, os diferentes comprimentos de perna das formigas, utilizados nos experimentos para o teste da hipótese do pedômetro, foram mapeados para diferentes comprimentos de bloco transmitidos de maneira oportunística no espectro primário. O protocolo foi avaliado por meio de simulações, que demonstraram menor atraso médio no relato ao nó sorvedouro à medida que o grau de emergência do paciente aumenta e que mais oportunidades espectrais são identificadas;
- A diversidade em modulação cooperativa com sensoriamento espectral foi proposta para atuar no repasse inter-grupos da informação monitorada. Os períodos de sensoriamento espectral permitiram a identificação de requisições por relato de emergência sobre as

oportunidades espectrais primárias. Além disso, a taxa de perda de pacote também foi diminuída;

- Avaliação do impacto dos erros de estimação da diversidade em modulação cooperativa, com relação a redes de sensores heterogêneas;
- Avaliação do impacto do fator de energia e da profundidade de entrelaçamento da diversidade em modulação cooperativa, com relação a redes de sensores heterogêneas;
- Utilização dos mapas de energia como método de eleição de vice-líderes de grupo, por meio da retroalimentação da informação de energia residual da rede;
- Avaliação de desempenho da capacidade cognitiva em uma rede de sensores heterogênea, dotada do mecanismo de acesso espectral oportunístico.

## 1.2 Organização da Tese

Os capítulos subsequentes estão organizados da seguinte maneira:

- Um breve histórico das redes de sensores sem fio, assim como conceitos, características e desafios envolvidos com o projeto e implementação das RSSFs são apresentados no Capítulo 2;
- Os paradigmas de redes cognitivas e de redes de sensores sem fio cognitivas são discutidos no Capítulo 3, com foco em arquiteturas de rede, gerenciamento espectral, aplicações e caracterização das camadas pertencentes à pilha de protocolos;
- Um novo protocolo de agrupamento, o LF-Ant, é apresentado no Capítulo 4, e utiliza a otimização por colônia de formigas, com a informação heurística nebulosa, para guiar a eleição de líderes de grupo em uma rede de sensores sem fio. A diversidade em modulação cooperativa e a avaliação de desempenho também são apresentadas;
- Uma estrutura hierárquica de alocação dinâmica de recursos para redes de cuidados médicos, inspirada nos testes da hipótese do pedômetro, é proposta no Capítulo 5. O algoritmo de diversidade em modulação cooperativa com sensoriamento espectral também é apresentado. O protocolo de agrupamento derivado, o LF-Ant Cognitivo, é caracterizado, assim como é feita a avaliação de desempenho da técnica proposta;
- A avaliação do impacto dos erros de estimação do canal, do fator de energia e da profundidade de entrelaçamento é realizada no Capítulo 6, que também apresenta o método de eleição de vice-líderes, por mapa de energia e considera a capacidade cognitiva da rede heterogênea;
- As considerações finais e propostas de trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 7;

- Alguns aspectos relativos ao comportamento organizado de formigas, incluindo os experimentos de ponte dupla e do teste da hipótese do pedômetro são apresentados no Apêndice A.
- A biografia e produção científica do autor são apresentadas no Apêndice B.

## CAPÍTULO 2

---

---

# Redes de Sensores sem Fio

---

Uma rede de sensores sem fio é composta de elementos de sensoriamento, processamento computacional e de comunicação, 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 realizar 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 e protocolos de comunicação;
3. Uma ou mais estações de controle para agrupamento e processamento de informações;
4. Um conjunto de recursos computacionais nas estações de controle para manipular dados, tendência de eventos, solicitações de tarefas etc.

Devido à considerável quantidade de informação coletada e à necessidade de autonomia na organização e gerenciamento da energia utilizada [5], algoritmos para o gerenciamento de dados realizam uma função importante em redes de sensores sem fio. A infraestrutura de computação e comunicação associada às RSSFs é frequentemente especificada de acordo com o ambiente de aplicação. O processamento das informações na própria rede (interno) é desejável. As informações coletadas são tipicamente paramétricas, mas, com a disseminação de vídeos de baixa taxa 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.

Neste contexto, este capítulo apresenta as principais características das redes de sensores sem fio. Inicialmente, um breve histórico da evolução das RSSFs é apresentado em quatro fases. Na sequência, são mostradas as tecnologias integrantes e características das RSSFs, assim como alguns tipos de sensores, protocolos de comunicação e principais desafios envolvidos. As principais etapas de funcionamento do protocolo LEACH são brevemente apresentadas, de modo a contribuir com a explicação do funcionamento do protocolo SCA com LEACH, utilizado como comparação de desempenho no Capítulo 4.

## 2.1 Evolução das Redes de Sensores sem Fio

Em [17], quatro fases foram especificadas para representar a evolução das RSSFs, de acordo com o período de desenvolvimento, com as aplicações, nicho de comercialização e características operacionais:

**Fase 1: Redes de Sensores na Fase da Guerra Fria** – Durante a Guerra Fria, principalmente na década de 1970, longas 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 aumento expressivo em pesquisas sobre 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 Distribuídas (RSDs) tinham como objetivo 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 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 [17]. Pesquisadores da Universidade de Carnegie Mellon realizaram projetos para o desenvolvimento de sistemas de rede para acesso transparente flexível visando distribuir recursos [18]. Pesquisadores do Instituto Tecnológico de Massachusetts desenvolveram técnicas baseadas em processamento de sinais [19]. Testes foram feitos para o rastreamento de múltiplos alvos em um ambiente distribuído e todos os componentes foram projetados e fabricados especificamente para isso. 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** – Baseados nos resultados gerados pelas pesquisas e nos testes desenvolvidos pela DARPA em RSDs, projetistas militares decidiram adotar a tecnologia de redes de sensores, tornando-a um parâmetro importante em cenários de guerra. 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 menor tempo de resposta [17]. Nesta mesma fase, um esforço foi feito para iniciar o emprego das tecnologias COTS (*Commercial Off the Shelf*)<sup>1</sup> e interfaces de redes comuns, de modo a reduzir o custo e tempo de desenvolvimento. Essa é considerada a primeira geração de produtos comerciais ligados a tecnologias de RSSFs. Nessa geração, o tempo de vida médio de operação das redes de sensores variava de horas até dias.

**Fase 4: Redes de Sensores sem Fio na década de 2000** – 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 RSSFs está relacionada à evolução dos dispositivos tradicionais. Sensores compactos e de baixo custo baseados em tecnologias de alta densidade, incluindo MEMS (*Microscale Electro-Mechanical Systems*) e NEMS (*Nanoscale Electro-Mechanical Systems*) surgiram nessa fase. Avanços em redes baseadas no padrão IEEE<sup>2</sup> 802.11 a/b/g e outros sistemas sem fio, como o Bluetooth [20,21], ZigBee [22,23] e WiMAX [24,25] facilitam a conectividade de forma confiável e pervasiva. Processadores de custo reduzido 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 vai de dias até semanas.

A terceira geração comercial de redes de sensores sem fio acontece desde o 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 do maior desenvolvimento das tecnologias embarcadas para as aplicações projetadas.

## 2.2 Características dos Nós Sensores

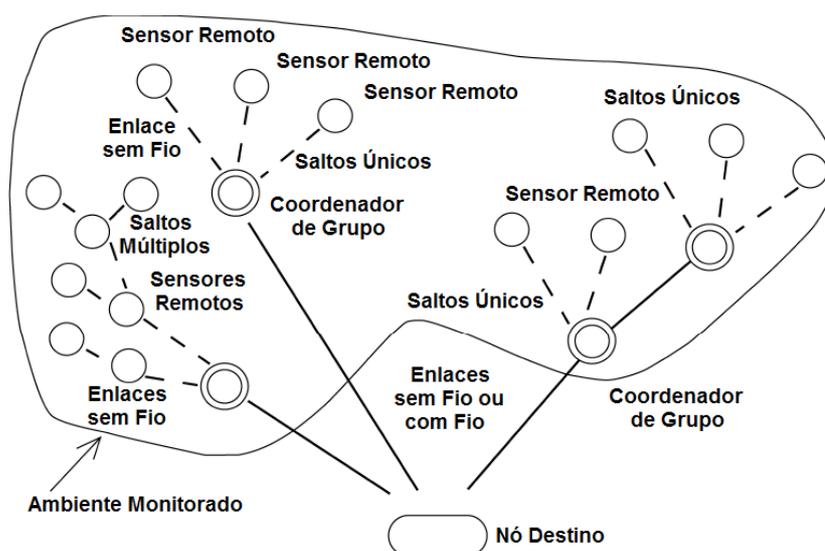
Uma rede de sensores é composta de um número de nós depositados em ambientes específicos. Cada nó sensor tipicamente possui a função de coletar dados, analisá-los e roteá-los para um nó destino designado. A Figura 2.1 ilustra o esquema de uma RSSF típica. No cenário apresentado, sensores remotos realizam a função de monitoramento e detecção de eventos e

---

<sup>1</sup>O termo COTS é usado para tecnologias de equipamentos e produtos de computação em geral, que estão à venda, financiados ou licenciados para a população.

<sup>2</sup>IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineering*.

transmitem as informações coletadas para o coordenador de grupo. Essa transmissão ocorre por múltiplos saltos, ou por salto único, dependendo de diversos fatores do projeto (e.g., distância entre os nós envolvidos, nível de energia, atendimento às solicitações etc.). O coordenador de grupo realiza funções mais robustas, processa e agrega os dados de seu grupo, e transmite os dados processados por distâncias maiores. 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 na rede.



**Figura 2.1** Rede de sensores sem fio típica [14].

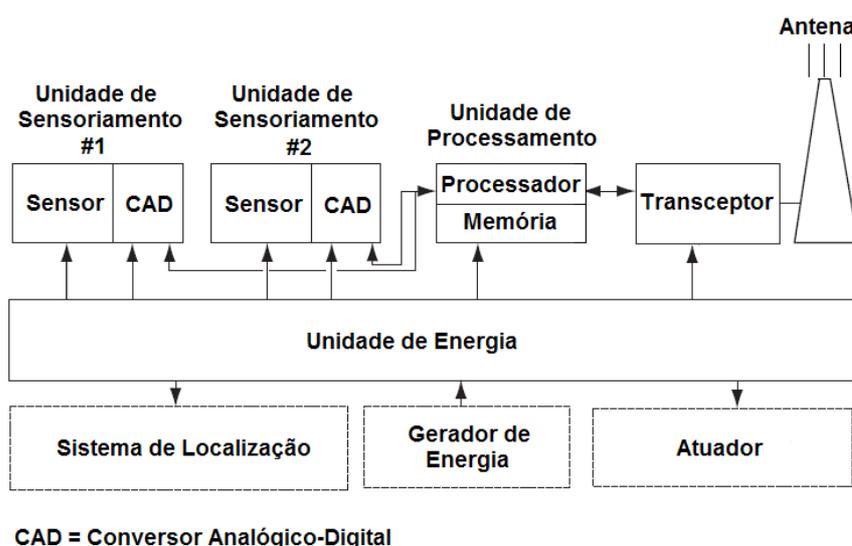
Se os nós sensores possuem os mesmos equipamentos e programas, então a RSSF é classificada como homogênea. Por outro lado, se a rede possui nós com diferentes capacidades e funções, ela é dita heterogênea. As RSSFs também podem ser classificadas em relação à mobilidade dos nós sensores. A maior parte 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 para a medição de campos magnéticos [26]), ou pela dinâmica do ambiente monitorado (e.g., redes de sensores depositadas em rios, para o monitoramento da qualidade da água [27]).

Os nós sensores possuem capacidades de processamento e armazenamento embarcados e contêm um ou mais sensores operando em domínios tais como acústico, sísmico, radar, infravermelho, óptico, magnético, químico e biológico. Também é possível que um mecanismo de identificação do auto-posicionamento e localização dos nós seja embarcado, adquirido por meio de um sistema de posicionamento global (*Global Positioning System* – GPS) ou um algoritmo de posicionamento local [28].

Um das tarefas dos nós sensores é localizar eventos, quando 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?).

Os sensores podem ser dispositivos passivos ou ativos. Sensores passivos, em forma de elementos, incluem dispositivos de medições sísmicas, acústicas, pressão, umidade e temperatura. Sensores passivos, em forma de matriz, incluem dispositivos ópticos e de medições bioquímicas. Sensores passivos tendem a ser dispositivos de baixo consumo de energia, enquanto os ativos incluem radares e sonares, que apresentam 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 ou atuação (elemento ou matriz);
- Unidade de processamento;
- Unidade de comunicação;
- Unidade de fornecimento de energia;
- Outras unidades dependentes da aplicação projetada.



**Figura 2.2** Componentes de um nó sensor [14].

Os sensores podem ter diferentes tamanhos físicos e 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; sensores mesoscópicos estão entre 100 a 10000 nm de diâmetro; a escala microscópica compreende dispositivos que variam de 10 a 1000  $\mu\text{m}$ ; e a escala macroscópica varia no intervalo de milímetros a metros. No primeiro segmento (menor escala), sensores biológicos e microsensores passivos (tais como o *Smart Dust*<sup>3</sup>) compõem essa classe. No outro segmento (maior escala) são citados 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).

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 públicos podem ser instrumentados 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 longas. Na área de cuidados médicos, os 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. É possível o controle da quantidade de medicamentos utilizados por cada paciente. Além disso, os sensores permitem a localização precisa e imediata de médicos em um hospital, em casos emergenciais.

## 2.3 Propriedades das Redes de Sensores sem Fio

Pesquisadores identificam as RSSFs como um domínio emergente de sistemas *motest*<sup>4</sup> sem fio, de baixa potência, com reduzida capacidade de memória e processamento e que têm o potencial de sensoriamento de alta resolução de ambientes [30]. 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 e atuadores de baixo custo, que são capazes de alcançar alta resolução temporal e espacial.

<sup>3</sup>O *Smart Dust* é um sistema de sensoriamento, comunicação e processamento computacional autônomo, que utiliza o espectro visível óptico para as transmissões [29].

<sup>4</sup>Os termos nó sensor, nó sem fio, e *mote* são utilizados de forma intercambiável neste texto.

A implementação das RSSFs precisa superar desafios técnicos, como o desenvolvimento de comunicações de baixo consumo de energia, baixo custo de processamento embarcado, protocolos e conectividade auto-organizáveis. Outro desafio crítico é a necessidade da duração de operação estendida, pois, 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 baixo consumo para transmissão sobre canais de pequena largura de banda e baixo consumo de energia para o pré-processamento ou compressão de dados. Sistemas de comunicações sem fio eficientes em consumo de energia são questões típicas 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 (*clock*) 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 transmissões por longas distâncias. Cada nó na rede pode atuar como um repetidor, ou ponto de repasse (*relay*), 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.
- 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.

As C1RSSFs viabilizam aplicações com nós sensores altamente distribuídos (e.g., monitoramento ambiental, sistemas de segurança nacional). As C2RSSFs viabilizam aplicações em espaços de curta abrangência, como residências, fábricas, construções, ou o corpo humano. As C1RSSFs tendem a ser empregadas em sistemas de larga escala e com maiores fluxos de dados, enquanto as C2RSSFs tendem a ser aplicadas em menor escala e com transmissões nó fonte-nó destino. 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 [14].

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

802.11) 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) comparáveis 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 ocorre na faixa de rádio industrial, científica e médica (*Industrial, Scientific, and Medical – ISM*) de 2,4 GHz e permite taxas de transmissão de dados até 250 kbit/s. 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 requeridos [31].

## Conjunto de Programas

Para viabilizar as operações dos 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. O TinyOS é um exemplo de padrão de sistema operacional para nós sensores. 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 permite o gerenciamento de consumo de energia preciso e a flexibilidade de agendamento necessária, em vista da 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 [32].

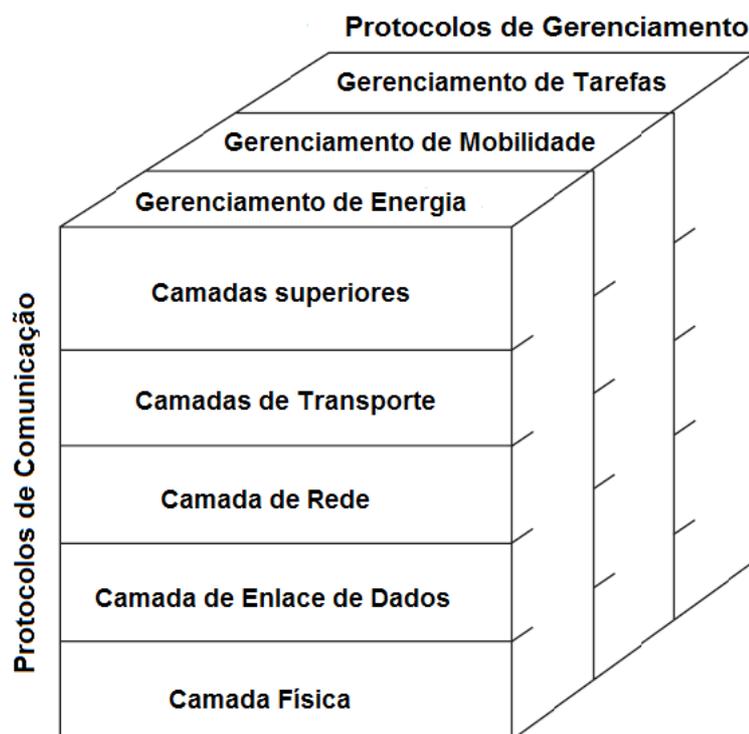
Um outro sistema é o Contiki [33], desenvolvido para uso em plataformas com restrições de capacidade de memória. Apesar de prover multitarefa e ser baseado na pilha TCP/IP, o Contiki precisa de pouca memória RAM (um sistema completo com interface gráfica precisa de cerca de 30 kB de RAM).

O Nano-RK [34] é um sistema operacional desenvolvido por pesquisadores da Carnegie Mellon para micro-controladores de uso em redes de sensores sem fio. O termo Nano é devido ao reduzido uso de memória RAM e de memória Flash. O sistema provê reservas de como os recursos podem ser utilizados. Por exemplo, uma tarefa pode ser permitida a transmitir apenas dez pacotes de rede a cada minuto. Essa e outras reservas ocorrem a partir de um gerenciador

de energia virtual de modo a garantir que um nó da rede atenda ao tempo de operação projetado, assim como evita que um nó com falhas de operação gere tráfego de pacote excessivo [35].

## Padrões para Protocolos de Comunicações

Pesquisadores têm desenvolvido diversos 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, pois eles precisam ser diferentes dos protocolos das redes tradicionais (dependendo da aplicação e da arquitetura de rede). A conectividade é um fator importante, 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 [14].

Embora o custo dos dispositivos eletrônicos inclusos nos sensores tenha diminuído, identifica-se a carência de padrões de rede como um fator de atraso 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 os 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

**Tabela 2.1** Possíveis protocolos para RSSFs (camadas inferiores). Adaptação de [14].

	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 ( <i>Mbits/s</i> )	0,064-0,128+	11-54+	24+	0,020-0,25+
Alcance (m)	1000+	100+	100+	100+

custos de desenvolvimento, instalação e manutenção para os tipos de aplicações utilizadas em redes de sensores sem fio [31]. 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 Alliance<sup>5</sup> desenvolveram uma especificação global para aplicações sem fio de baixa energia e custo efetivo, baseada no padrão IEEE 802.15.4.

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. Há também o padrão IEEE 802.11n, que prevê taxas de transmissão entre 65 *Mbits/s* e 300 *Mbits/s*, em 2,4 GHz ou 5 GHz, com o uso de técnicas de diversidade. Outro método de transmissão sem fio é a transmissão óptica, operando no comprimento de onda de 1 mm (infravermelho) [37].

O ANT [38] é um protocolo proprietário para redes de sensores sem fio, para rádios que operam na banda ISM, projetado e comercializado pela Dynastream Innovations [39]. O protocolo possui uma eficiência de taxa de cabeçalho/dados de 47% e uma taxa máxima de transmissão de 1 *Mbit/s*. O protocolo ANT pode ser configurado para utilizar longos períodos no modo de hibernação. Ele prevê três tipos de mensagem:

<sup>5</sup>A ZigBee Alliance [36] é um consórcio industrial de desenvolvedores de semicondutores, tecnologias 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.

- Difusão (*Broadcast*) – comunicação de via única a partir de um nó. O nó receptor não transmite mensagens de reconhecimento. Esse tipo é apropriado para o relato das informações dos sensores e é o método mais econômico de operação;
- Reconhecimento (*Acknowledgment*) – confirma o recebimento dos pacotes de dados. O nó transmissor é informado sobre o sucesso ou não da recepção, embora retransmissões não sejam previstas. Esse tipo de mensagem é apropriado para aplicações de controle;
- Rajada (*Burst*) – confirma o recebimento dos pacotes de dados, mas há retransmissão dos pacotes corrompidos. Os pacotes são numerados em sequência e esse tipo de mensagem é apropriado para aplicações que necessitam de alta confiabilidade na transmissão dos dados.

O 6LoWPAN [40] é um grupo de trabalho com protocolo baseado na RFC<sup>6</sup> 4944 e funciona com o princípio de que o Protocolo de Internet pode e deve operar mesmo em dispositivos reduzidos e de baixa potência, para possibilitar participação na Internet das Coisas [41]. O grupo 6LoWPAN definiu mecanismos de encapsulamento e compressão que permitem que pacotes IPv6 sejam enviados e recebidos sobre redes baseadas no IEEE 802.15.4.

O protocolo WirelessHart [42] é baseado na tecnologia HART (*Highway Addressable Remote Transducer*) e utiliza uma topologia em malha e características de sincronização temporal, auto-organização e auto-recuperação. O protocolo é projetado para a banda ISM, sobre o IEEE 802.15.4. Cada dispositivo na rede em malha pode servir como um roteador para as mensagens oriundas de outros nós. Em outras palavras, um dispositivo não precisa comunicar diretamente com um *gateway*, mas apenas repassar suas mensagens para o nó mais próximo. Isso estende o alcance da rede e provê rotas de comunicação redundante para aumentar a confiabilidade

## 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 de sensores que é coberta de uma maneira redundante). No caso de uma rede de controle e atuação, é importante a identificação

---

<sup>6</sup>A RFC (*Request For Comment*) descreve as regras de funcionamento de um protocolo a ser considerado em um padrão de rede.

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 está ligado à agregação, fusão e análise de dados, à hierarquia computacional, à computação distribuída, e ao processamento de sinais. Observa-se 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. A rede precisa ser projetada para o processamento baseado na origem da informação 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 otimizada. Isso requer um ambiente de computação distribuída, criado pelos nós sensores para o processamento de sinais e de esquemas 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 [43].

O modelo de energia representa os recursos físicos de um sensor, que consomem energia e interagem com um modelo de funções [44]. O modelo pode ser visto como um provedor de energia para elementos consumidores, que dependem de baterias com capacidade finita de energia armazenada. Os consumidores de energia são o rádio, processador e elementos que fazem o sensoriamento do ambiente (sensores). Cada entidade consumidora notifica ao provedor seu consumo de energia que, por sua vez, informa o nível residual. Os elementos que compõem o modelo de energia são [44, 45]:

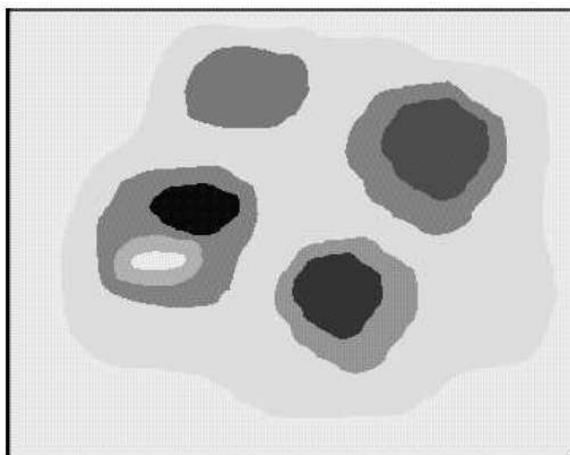
**Bateria** – Representa o armazenamento de energia do nó sensor, que tem uma capacidade finita e uma taxa de consumo específica;

**Rádio** – Representa o sistema de transmissão e recepção, amplificador e antena. O consumo de energia depende da operação efetuada e a transmissão de dados consome mais energia do que a recepção;

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

**Sensores** – Representam 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, menos energia ela contém [43, 44].



**Figura 2.4** Mapa de energia de uma RSSF [43].

A utilização de técnicas de gerenciamento de energia e de controle de topologia podem também viabilizar a recuperação da capacidade da bateria dos nós de uma RSSF. A utilização de simuladores de redes de sensores têm contado com diversas simplificações, e uma delas, frequentemente utilizada, é a adoção de um modelo simples de descarga de energia (i.e., modelo linear), que, entre outros problemas, não considera o efeito de recuperação da bateria. Essa abordagem pode ocasionar interpretações equivocadas na avaliação do desempenho dos protocolos, especialmente naqueles que levam em conta o tempo de vida da rede. O efeito de recuperação ocasiona o incremento na capacidade da bateria de um nó sensor e ocorre durante períodos de tempo em que existe a redução da corrente solicitada. Tal redução possibilita a recuperação na capacidade da bateria em decorrência da reorganização dos íons em regiões que estavam esgotadas [46, 47].

## 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. 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.

Um exemplo de sistema de gerenciamento de dados em RSSFs é a arquitetura MANNA (*Management Architecture for Wireless Sensor Networks*). Ela adquire as informações dinâmicas a partir da rede de sensores e mapeia essas informações em modelos ou mapas de rede, que disponibiliza uma visão global de certos parâmetros da rede e seu estado. Além disso, a informação coletada e suas relações são definidas em uma base de gerenciamento distribuído de informações [48].

## 2.4 Agrupamento em RSSFs

Um dos mecanismos utilizados para prolongar o tempo de vida em redes de sensores sem fio é o agrupamento (*clustering*). Por meio de regras de hierarquia pertinentes a um grupo, os nós sensores podem otimizar o gerenciamento das atividades que realizam e reduzir o consumo de energia. Entretanto, a decisão de quando atuar como um provedor de dados (economizando energia) e quando atuar como um *gateway* (*cluster-head*) entre os nós e a estação base (*sink node*) não é uma tarefa trivial [49].

Os protocolos de agrupamento são apropriados para aplicações que exigem escalabilidade de centenas ou milhares de nós. Escalabilidade, nesse contexto, implica a necessidade de equilíbrio de carga, utilização eficaz dos recursos e agregação dos dados [50]. Além disso, diversos protocolos de roteamento podem utilizar algum esquema de agrupamento para criar uma estrutura hierárquica e minimizar o custo das rotas de comunicação com a estação base.

Em várias aplicações de RSSFs, em que a agregação de dados e o processamento podem ser realizados *in situ*, essa abordagem hierárquica é um método promissor para organizar eficientemente a rede. Adicionalmente, diversos algoritmos de processamento de sinais usados para a extração da informação monitorada resultante são apropriados para o processamento local interno aos grupos.

### 2.4.1 Elementos de um Grupo

Três elementos principais podem ser identificados na composição de grupos em RSSFs:

- Nós sensores;
- Estação base, ou nó destino, ou nó sorvedouro (*sink node*);

- Coordenadores de grupo, ou líderes de grupo (*Cluster-Heads* – CHs).

Os nós sensores são um conjunto de *motes* presentes na rede, configurados de modo a sensoriar o ambiente e coletar dados. A principal tarefa de um nó sensor é detectar eventos, realizar processamento local de dados e transmiti-los. Diante das respectivas tarefas, a maior restrição de um nó sensor é o consumo de energia, causado pelas funções de sensoriamento e comunicação (transmissão e recepção) de dados. O nó sorvedouro é o terminal de processamento dos dados recebidos a partir dos nós sensores, no qual os dados são acessados pelo usuário final. O líder de grupo atua como um *gateway* entre os nós sensores e o nó sorvedouro. Ele realiza funções comuns para todos os nós do grupo, como agregar os dados antes de enviar ao nó sorvedouro. Essa estrutura formada entre os nós sensores, o nó sorvedouro e os líderes de grupo pode ser replicada tantas vezes quanto necessário, o que gera diferentes níveis de hierarquia nas RSSFs.

### 2.4.2 Tipos de Grupo

Existem diferentes formas para classificar grupos em redes de sensores. As classificações mais comuns são grupos homogêneos ou heterogêneos e grupos estáticos ou dinâmicos.

Em redes heterogêneas, existem dois tipos de nós sensores [51]

- Nós com alta capacidade de processamento e *hardware* complexo, utilizados geralmente para criar um tipo de *backbone* na rede. Eles operam como coletores de dados e centrais de processamento de informações relatadas por outros nós sensores;
- Sensores participantes, com uma capacidade de processamento menor, utilizados para medir as grandezas de interesse e inerentes ao ambiente monitorado.

Em redes homogêneas, todos os nós possuem as mesmas características de *hardware*, *software* e armazenamento de energia. Essa classificação é típica para aplicações militares e de emergência (*e.g.*, redes que monitoram regiões de desastres naturais, ataques terroristas etc.). Nesse caso, qualquer nó sensor pode se tornar um líder de grupo.

Grupos estáticos geralmente estão vinculados a redes heterogêneas e a aplicações em que os projetistas planejam criar grupos em torno de nós mais robustos computacionalmente. Nesse caso, os grupos são compostos no momento da formação da rede. Os atributos de cada grupo, tais como o tamanho do grupo, a escolha dos líderes, o número de sensores participantes e a área que eles sensoriam são estáticos. Grupos estáticos são fáceis de implementar, mas seu uso é apenas apropriado para cenários limitados, em que o ambiente de monitoramento é previsível, os alvos a serem monitorados não se movem e em cenários em que a manutenção da rede, *i.e.*, a reposição de nós sensores, é facilmente executada.

Arquiteturas dinâmicas de grupos realizam uma melhor utilização das potencialidades das redes de sensores sem fio. Os sensores não pertencem estaticamente a um grupo e suportam diferentes formações ao longo do tempo. Esse esquema de comunicação geralmente é utilizado

em redes RSSFs homogêneas. A formação dos grupos pode ser ativada pela utilização de uma mensagem especial enviada para a rede periodicamente, ou pela ocorrência de eventos específicos (*e.g.*, a detecção de uma mudança significativa nos valores das grandezas monitoradas). Nenhum líder de grupo definitivo é requerido e isso diminui o número de mensagens trocadas no período de estabelecimento da rede. Entretanto, um método de eleição de líder de grupo, um método de formação do grupo e métodos de manutenção do grupo precisam ser previstos no projeto de grupos dinâmicos. O agrupamento dinâmico também é mais apropriado para o monitoramento de alvos móveis, devido à possibilidade de reconfiguração da rede.

No momento em que a rede é dividida em grupos, as comunicações entre os nós podem ocorrer nas formas intra-grupo ou entre-grupos. As comunicações intra-grupo contemplam as trocas de mensagens entre os nós participantes e o líder de grupo. Por outro lado, as comunicações entre-grupos são realizadas entre líderes, ou entre líderes e o nó sorvedouro.

## O Protocolo LEACH

O LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) [52] é um protocolo de formação de grupos adaptativos e auto-organizáveis, que usa a aleatorização dessa formação para tentar distribuir o consumo de energia pelos nós sensores em redes homogêneas. No LEACH, os nós se organizam em grupos locais, em que um nó atua como o líder do grupo correspondente. Adicionalmente, no LEACH é realizada a fusão local de dados para comprimir a quantidade de informação enviada a partir do grupo até o nó destino.

O protocolo LEACH provê o conceito de rodada (*round*) e contém dois estados: o de configuração dos grupos (*cluster set-up state*) e o de relato dos dados (*steady state*). No primeiro há a formação dos grupos em um modo auto-adaptativo e no segundo há a transferência dos dados para o nó destino.

Inicialmente, quando os grupos estão sendo criados, cada nó decide se será um líder de grupo, na correspondente rodada. Essa decisão é baseada no percentual sugerido de líderes de grupo para a rede (determinado *a priori*) e no número de vezes que o nó já se tornou um líder. 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 líder de grupo para a correspondente rodada. O limiar é dado por [52]

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \cdot (R \bmod \frac{1}{P})}, & \text{se } n \in G, \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (2.1)$$

em que  $P$  é o percentual desejado de líderes de grupo,  $R$  é a rodada correspondente e  $G$  é o conjunto de nós que ainda não se tornaram líderes de grupo nas últimas  $\frac{1}{P}$  rodadas. O operador *módulo* é representado por  $\bmod$ . Por meio desse limiar cada nó se torna um líder de grupo em algum momento dentro de  $\frac{1}{P}$  rodadas.

Uma vez que os grupos estão criados, um agendamento por acesso múltiplo por divisão de tempo (*Time Division Multiple Access* – TDMA) é realizado e a transmissão dos dados é iniciada. Então, a próxima rodada inicia com cada nó determinando se será um líder de grupo para aquela rodada e divulgando essa decisão para o resto da rede.

O protocolo LEACH garante a eleição de todos os nós para líder de grupo, em um número específico de rodadas. Entretanto, métricas de desempenho importantes, como energia residual e nível de concentração de nós, não são consideradas no projeto do protocolo [52].

## 2.5 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 com o tempo de vida da bateria. Em vários casos, o nó sensor sem fio possui uma fonte de energia limitada e a recarga ou substituição dessa fonte também pode ser limitada ou inviável. A operação das baterias para sensores usados em aplicações comerciais é baseada no uso de duas células alcalinas AA ou uma célula de lítio AA [53]. 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;

**Custo dos Nós Sensores** – Para aplicações em larga escala, as redes de sensores tendem a possuir um conjunto bastante numeroso de nós sensores. O custo individual do nó é crítico para o custo financeiro geral de uma rede de sensores, de modo que o custo de cada dispositivo 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 [14];

**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. Outros sistemas também utilizam 2,4 GHz (tecnologia IEEE 802.11b), 5,0 GHz (tecnologia IEEE 802.11a) [54], ou possivelmente outras bandas (IEEE 802.15.4). Para facilitar a operação global dessas, redes o canal de transmissão selecionado precisa estar disponível em abrangência mundial;

**Padrões** – Os projetistas de redes de sensores sem fio devem desenvolver soluções de baixo custo, baseadas em padrões, que suportem baixas taxas de transmissão de dados, possuam baixo consumo de energia e garantam segurança e confiabilidade ao sistema de comunicações e sensoriamento. A posição dos nós sensores não precisa ser pré-determinada,

permitindo a implantação aleatória em terrenos inacessíveis ou soluções dinâmicas. Isso significa que os algoritmos e protocolos de redes de sensores necessitam apresentar capacidades de auto-organização. 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 [55]. Por outro lado, 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.

## 2.6 Conclusão

Este capítulo apresentou uma visão geral sobre as redes de sensores sem fio, características e desafios. Essa tecnologia tem desencadeado 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 efetuados, de modo a possibilitar a implementação de RSSFs em larga escala. Portanto, os nós sensores são dispositivos de baixa capacidade 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 ao desenvolvimento de RSSFs. O próximo capítulo descreve alguns desafios relativos à ocupação espectral por dispositivos de comunicação sem fio e características das redes cognitivas.

## CAPÍTULO 3

---

# Redes Cognitivas para as Comunicações sem Fio

---

Os serviços de comunicações sem fio têm sido usados em diferentes contextos, provendo desde comunicações celulares até o compartilhamento de dados em redes de computadores sem fio. Para evitar interferência entre os sinais de rádio transmitidos, as agências governamentais estabelecem políticas de alocação do espectro de radiofrequência (RF) [56, 57], que estão geralmente vinculadas ao pagamento de licenças de uso.

A considerável quantidade de serviços de comunicações criados nos últimos anos tem sido responsável pela demanda por alocação do espectro de RF junto às agências de regulamentação, levando à escassez de recursos espectrais em diversas localidades. Com a maior parte do espectro de rádio já alocado, destinar faixas livres para novos serviços ou melhorar os já existentes tem se tornado uma tarefa difícil [58].

Apesar da grande procura por algumas faixas de espectro, estudos indicam uma subutilização delas. Uma pesquisa realizada pela Força Tarefa em Políticas de Espectro da Comissão de Comunicações Federal (*Federal Communications Commission* – FCC) aponta uma considerável variação temporal e geográfica no uso do espectro alocado (entre 15 e 85%) [59].

A limitada disponibilidade de espectro e a ineficiência de sua utilização geram demandas por mecanismos alternativos e paradigmas de comunicações que explorem o espectro existente de maneira mais eficaz [60]. As Redes Cognitivas, também denominadas Redes de Rádio Cognitivo ou Redes sem fio de Próxima Geração [7, 61, 62], representam uma tecnologia de rede que aumenta a eficiência da alocação espectral, por meio do acesso oportunista às faixas de frequência.

A rede cognitiva foi primeiramente definida por Thomas *et al.* como [62]:

*... uma rede dotada de capacidade cognitiva, que pode perceber as condições atuais do ambiente e então planejar, decidir e atuar sobre essas condições. A rede pode aprender a partir dessas adaptações e utilizar essas informações para tomar*

*futuras decisões, enquanto leva em consideração os objetivos de transmissão fim-a-fim.*

As redes cognitivas fornecem aos usuários largura de banda por meio do uso de técnicas de acesso dinâmico ao espectro sobre arquiteturas heterogêneas de redes sem fio. Essa nova tecnologia permite uma utilização mais eficiente do espectro, provendo acesso oportunista às faixas licenciadas sem, no entanto, interferir nos usuários primários. Entretanto, o desenvolvimento de tecnologias de redes cognitivas impõe desafios de pesquisa, devido à grande faixa espectral a ser gerenciada e aos diversos requisitos de qualidade de serviço das aplicações.

A principal tecnologia empregada no desenvolvimento da infraestrutura de redes cognitivas são os Rádios Cognitivos [63,64]. Assim como as redes cognitivas, os rádios cognitivos também fornecem a capacidade de utilizar ou compartilhar o espectro de uma maneira oportunística. No entanto, enquanto os rádios cognitivos atuam apenas nas camadas física e de enlace do modelo de referência ISO/OSI, as redes cognitivas cobrem todas as camadas deste modelo.

Mais especificamente, a tecnologia de rádio cognitivo permite aos seus usuários:

1. Determinar quais faixas do espectro estão disponíveis e detectar a presença de usuários primários, quando há comunicação em uma faixa licenciada (sensoriamento espectral);
2. Selecionar o melhor canal disponível para transmissão (gerenciamento espectral);
3. Compartilhar o acesso a esse canal com outros usuários (compartilhamento espectral);
4. Disponibilizar o canal quando um usuário primário é detectado, mantendo a comunicação enquanto migra para outra faixa (mobilidade espectral ou *handoff* espectral).

Para realizar as funções apresentadas é necessário que os protocolos de comunicação sejam capazes de se adaptar à disponibilidade de faixas espectrais. Dessa forma, os rádios cognitivos utilizam métricas de desempenho das condições atuais de cada camada da pilha de protocolos para determinar a configuração ótima de operação da rede. Portanto, as redes cognitivas necessitam utilizar uma abordagem de projeto de relacionamento cruzado entre camadas (*cross-layer design*), com vistas à obtenção de um desempenho ótimo.

Os componentes de comunicação de uma rede cognitiva e suas interações são ilustradas na Figura 3.1. As funções de sensoriamento e compartilhamento espectral comunicam entre si para melhorar a eficiência da alocação de faixas do espectro, interagindo com as camadas física e de enlace. Por sua vez, as funções de gerenciamento e mobilidade espectral atuam sobre todas as camadas do modelo OSI, obtendo informações e mudando suas configurações de acordo com a natureza dinâmica do espectro.

Os protocolos de comunicação tradicionais [65, 66] não são adequados para aplicação em redes cognitivas, pois a utilização dinâmica do espectro pode causar efeitos adversos em seu desempenho, principalmente aos protocolos sensíveis à latência (*e.g.*, *streaming* multimídia). Assim, é necessário que sejam desenvolvidos esquemas que, baseados nas informações sobre

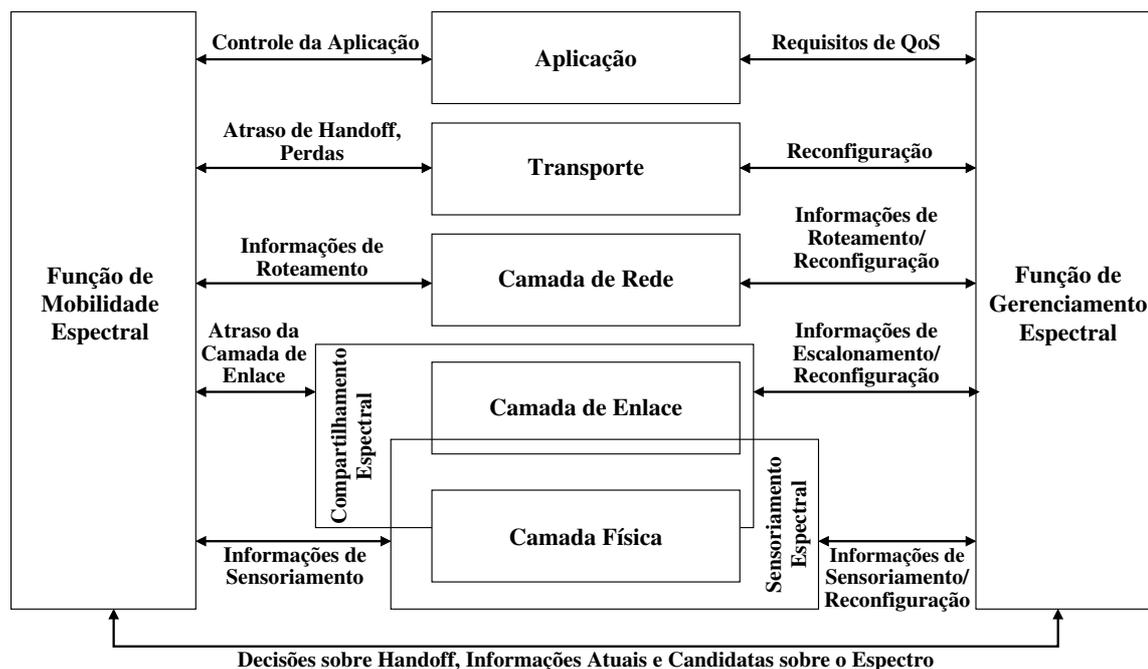


Figura 3.1 Funcionalidades de comunicação de uma rede cognitiva [61].

o estado atual do espectro, possam modificar automaticamente sua tecnologia de transmissão e parâmetros de configuração em função da ocupação espectral. Esse é um importante tópico de pesquisa da área de redes cognitivas.

Neste capítulo, os principais conceitos relacionados à tecnologia e arquitetura de redes cognitivas são apresentados para fundamentar o tema. Além disso, as redes de sensores sem fio cognitivas são discutidas, de modo a caracterizar seus principais desafios de implementação e projeto de protocolos. Uma perspectiva diferente sobre a capacidade cognitiva de um nó sensor, além das habilidades de gerenciamento espectral, também é apresentada.

### 3.1 Arquitetura Geral das Redes Cognitivas

Diversos protocolos e as tecnologias de redes sem fio existentes apresentam limitações em relação à sua capacidade de adaptação [67]. Essa adaptação é tipicamente reativa, sendo executada após a ocorrência de algum evento. Além disso, os nós da rede geralmente não realizam trocas de informações sobre seu estado atual e desconhecem as condições experimentadas por outros elementos, o que inviabiliza a criação de uma visão geral sobre o estado da rede, resultando em comunicação com desempenho sub-ótimo.

A Figura 3.2 apresenta a arquitetura geral das redes cognitivas proposta por Akyildiz *et al.* [61]. Em um ambiente de redes cognitivas, algumas porções do espectro estão licenciadas para diferentes propósitos, enquanto outras permanecem não-licenciadas. Dessa forma, as componentes da arquitetura geral de redes cognitivas podem ser classificadas como primárias ou licenciadas e cognitivas ou não-licenciadas.

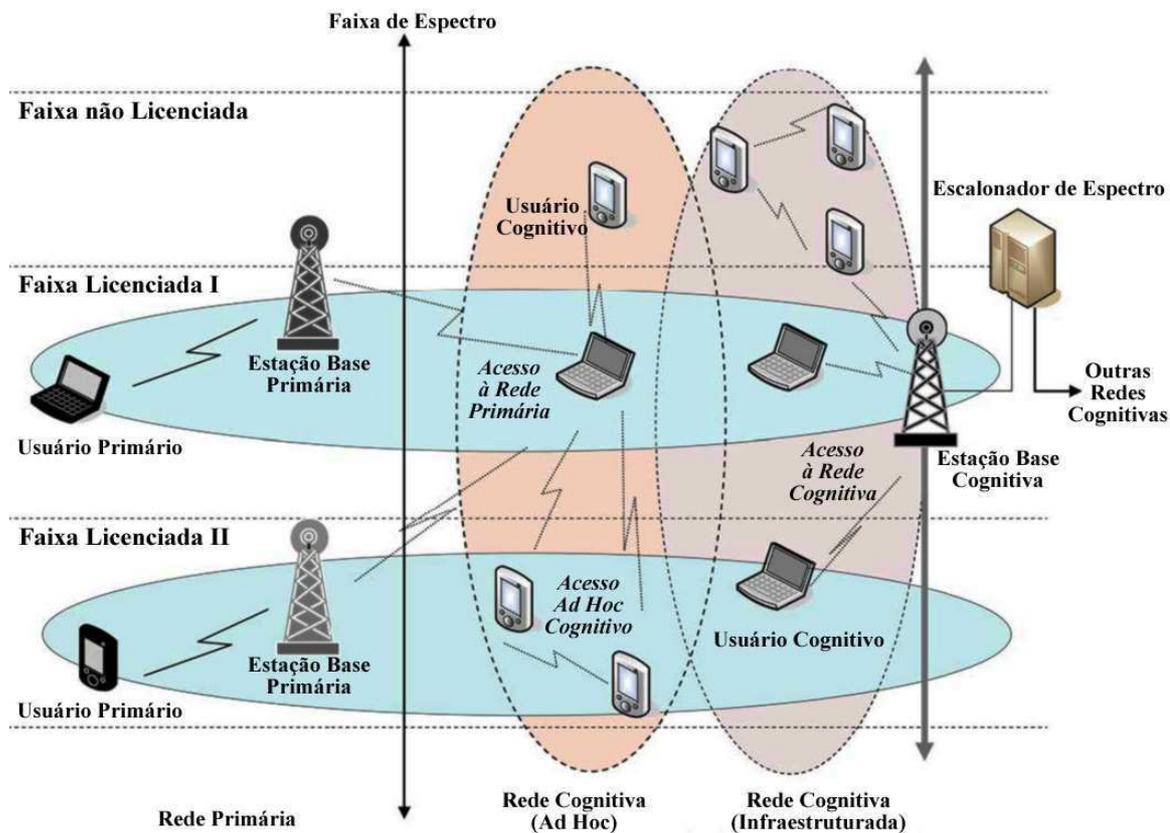


Figura 3.2 Arquitetura de redes cognitivas [61].

Os elementos básicos das redes primárias e cognitivas são definidos a seguir:

- **Rede Primária** – infraestrutura de rede já existente e que tem direitos de acesso exclusivos a uma certa faixa do espectro (*e.g.*, redes celulares e de televisão). Os componentes de uma rede primária são:
  - Usuário Primário: um usuário primário (ou licenciado) tem licença para operar em uma determinada faixa do espectro. Seu acesso não deve ser afetado por transmissões de usuários não-licenciados. Esses usuários não necessitam modificar sua infraestrutura para coexistir com estações radiobase e usuários cognitivos;
  - Estação Radiobase Primária: componente fixo da infraestrutura de rede que tem licença de acesso ao espectro (*e.g.*, transceptor de uma estação radiobase em um sistema celular). A estação radiobase primária não apresenta capacidade cognitiva para o compartilhamento do espectro com usuários cognitivos;
- **Rede Cognitiva ou Secundária** – infraestrutura de rede que não tem licença para operar em uma determinada faixa. Seu acesso ao espectro é realizado somente de maneira oportunística. As redes cognitivas podem operar em modo infraestruturado ou *ad hoc*. Os componentes de uma rede cognitiva são:

- Usuário Cognitivo, Secundário ou não Licenciado: usuário que não tem licença de uso do espectro. Esses usuários utilizam as funcionalidades de compartilhamento de faixas licenciadas do espectro para realizar comunicações;
- Estação Radiobase Cognitiva, Secundária ou não Licenciada: componente fixa da infraestrutura da rede cognitiva. A estação radiobase cognitiva fornece mecanismos de conexão de salto único aos usuários cognitivos. Por meio das estações base, um usuário cognitivo pode ter acesso à rede fixa e a outras redes cognitivas;
- Escalonador de Espectro: os dispositivos de uma rede cognitiva capturam sua visão local da atividade espectral. Essa informação pode ser diretamente compartilhada entre eles ou agregada em uma base de dados central que provê informações sobre os emissores locais, as políticas de acesso e a área em que os sinais são transmitidos [68]. O escalonador de espectro é uma entidade central da rede responsável pelo armazenamento dessas informações, além de organizar o acesso aos recursos espectrais entre diferentes redes cognitivas. Ele é um gerenciador de informações de recursos espectrais, e permite a coexistência entre múltiplas redes cognitivas [69, 70].

A arquitetura de referência das redes cognitivas apresentada na Figura 3.2 consiste em diferentes tipos de redes: (a) uma rede primária, (b) uma rede cognitiva infraestruturada e (c) uma rede cognitiva *ad hoc*. As redes cognitivas operam em um ambiente heterogêneo que consiste em faixas licenciadas e não-licenciadas. Além disso, os usuários cognitivos podem se comunicar uns com os outros por meio de múltiplos saltos ou estações radiobase.

Nas redes cognitivas existem três diferentes formas de acesso:

- Redes de Acesso Cognitivas – os usuários cognitivos podem acessar as estações base cognitivas em faixas licenciadas ou não-licenciadas;
- Redes Cognitivas *Ad hoc* – os usuários cognitivos podem se comunicar com outros usuários cognitivos por meio de conexões *ad hoc* em faixas licenciadas ou não-licenciadas;
- Redes de Acesso Primárias – os usuários cognitivos podem ainda acessar as estações radiobase primárias por meio de faixas licenciadas para fazer uso de seus serviços.

De acordo com a arquitetura de referência, diversos mecanismos são necessários para permitir a heterogeneidade em redes cognitivas. A seção a seguir aborda as funcionalidades necessárias à operação das redes cognitivas.

### 3.1.1 Funcionalidades das Redes Cognitivas

As redes cognitivas podem operar tanto em faixas licenciadas quanto não-licenciadas. Consequentemente, as funcionalidades requeridas pelas redes cognitivas variam de acordo com o tipo de faixa acessada.

### Operação de Rede Cognitiva em Faixa Licenciada

Conforme discutido, existe uma considerável variação na utilização do espectro de radio-frequência licenciado. Consequentemente, as redes cognitivas podem explorar essas faixas do espectro de maneira oportunística, por meio do uso de técnicas de acesso dinâmico ao espectro. Assim, as redes cognitivas devem ter mecanismos que permitam sua coexistência com redes primárias na mesma faixa do espectro.

Os desafios para a operação de redes cognitivas em faixas licenciadas derivam da existência de usuários primários nestas faixas. Ao operar em faixas licenciadas, as redes cognitivas devem detectar os usuários primários, visto que a capacidade de transmissão dos canais não-alocados do espectro depende da interferência dos usuários primários próximos. Portanto, evitar interferência com os usuários primários é um dos aspectos mais importantes da arquitetura das redes cognitivas. Além disso, se um usuário primário começar a utilizar uma faixa do espectro alocada por um usuário cognitivo, este deve imediatamente desocupar a faixa atual e migrar para outra faixa disponível (*i.e.*, realizar *handoff* espectral).

### Operação de Rede Cognitiva em Faixa não-Licenciada

A política de abertura de determinadas faixas do espectro, que iniciou com a banda industrial, científica e médica (*Industrial, Scientific and Medical* – ISM), permitiu o desenvolvimento de uma variedade de importantes tecnologias e aplicações inovadoras. Entretanto, a utilização da banda ISM por tecnologias de rede heterogêneas tem reduzido a disponibilidade espectral desta faixa, levando ao aumento de interferências. A capacidade de acesso ao espectro aberto e a qualidade de serviço que essas tecnologias podem oferecer dependem das técnicas de projeto empregadas pelos rádios para alocação eficiente do espectro.

As redes cognitivas podem ser projetadas para operação em faixas não-licenciadas, melhorando a eficiência nesta porção do espectro. Dado que não existem proprietários de licenças, todos os nós da rede têm os mesmos direitos de acesso às faixas do espectro. Múltiplas redes cognitivas podem coexistir na mesma área e se comunicar utilizando as mesmas faixas do espectro. Algoritmos de compartilhamento espectral inteligente podem melhorar a eficiência no uso do espectro e fornecer uma alta qualidade de serviço.

Nessa arquitetura os usuários cognitivos detectam as transmissões de outros usuários cognitivos. Diferentemente das operações em faixas licenciadas, um *handoff* espectral não é provocado pelo aparecimento de outros usuários primários. Entretanto, dado que todos os usuários cognitivos têm os mesmos direitos de acesso ao espectro, eles devem competir entre si pelas mesmas faixas não-licenciadas. Assim, nessa arquitetura, métodos de compartilhamento do espectro devem ser empregados pelos usuários cognitivos.

## 3.2 Projeto da Camada Física

Os avanços na tecnologia de rádio têm permitido o desenvolvimento de técnicas de acesso dinâmico ao espectro eletromagnético e de configuração adaptativa dos enlaces e protocolos de comunicação. A utilização dessas técnicas permite às aplicações se beneficiarem de canais de comunicação com melhor desempenho e menor interferência. Nesse contexto, os rádios cognitivos representam um novo paradigma para as comunicações sem fio, no qual os nós da rede são dotados da capacidade de modificar seus parâmetros de transmissão e recepção, de forma a tornar a comunicação mais eficiente, evitando interferência com usuários licenciados e não-licenciados. Por meio da tecnologia de rádio cognitivo é possível ter acesso à comunicação confiável, quando e onde for necessário, e ainda tornar mais eficiente a utilização do espectro de rádio [71].

Segundo Haykin, as faixas do espectro de RF podem ser classificadas de acordo com o espectro de potência dos sinais de rádio presentes nelas. Essa classificação é apresentada a seguir [71]:

- Espaços negros (*black spaces*): faixas ocupadas por interferências locais, temporárias e de alta potência;
- Espaços cinzas (*gray spaces*): faixas parcialmente ocupadas por interferências de baixa potência;
- Espaços brancos (*white spaces*): faixas livres de interferências de RF, exceto pelo ruído do ambiente (*e.g.*, ruído térmico, ruído impulsivo).

A tecnologia de rádio cognitivo utiliza espaços brancos (também denominados lacunas espectrais, ou oportunidades espectrais) em faixas licenciadas e não-licenciadas de maneira oportunística para realizar a transmissão de informações [72, 73]. Caso essas faixas passem a ser usadas por um usuário licenciado, o rádio cognitivo deve mudar seu canal de operação para outra lacuna espectral, ou permanecer na mesma faixa, alterando sua potência de transmissão ou esquema de modulação, de forma a evitar interferências. Esse esquema é ilustrado na Figura 3.3.

Para permitir uma utilização eficaz do espectro, evitando interferências com usuários primários, é necessário identificar, com confiabilidade, espaços brancos no espectro, em termos de frequência, tempo e espaço [58]. Por conta de seu baixo custo e sua compatibilidade com sistemas primários legados, o sensoriamento espectral tem recebido forte atenção da comunidade científica [58]. Essa técnica tem sido a principal alternativa considerada para inclusão em padrões que utilizam a tecnologia de rádio cognitivo, como o padrão IEEE 802.22 [74, 75]. Por outro lado, uma desvantagem dessa abordagem é que os dados de utilização do espectro dos sistemas primários não estão disponíveis *a priori*. Além disso, os usuários secundários de-

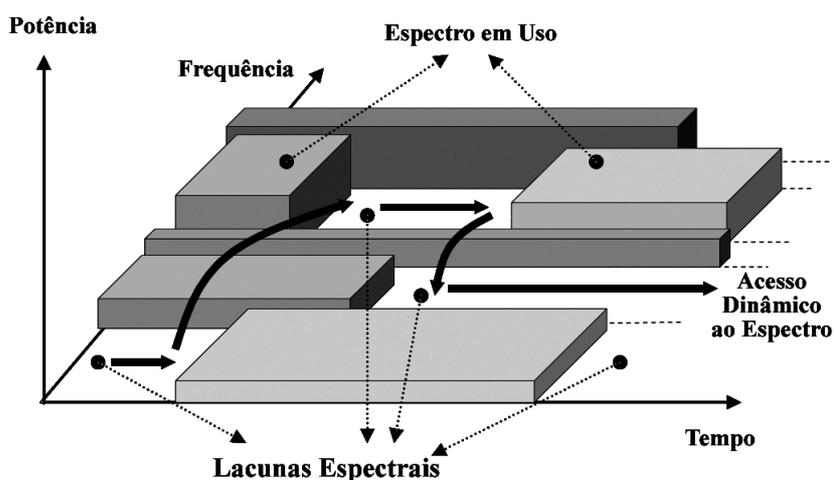


Figura 3.3 Representação de lacunas espectrais [61].

vem sensoriar continuamente as faixas licenciadas enquanto as utilizam, de forma a perceber o retorno dos usuários primários às faixas licenciadas.

### 3.2.1 Sensoriamento Espectral

A modificação dos parâmetros de transmissão, realizada pelos rádios cognitivos, é baseada no monitoramento ativo de diversos fatores externos e internos ao ambiente de rádio, como a ocupação do espectro de RF, o comportamento do usuário e o estado da rede. Esses e outros fatores compõem o conhecimento contextual do ambiente de rádio.

Para manter sua ciência sobre a ocupação do espectro de RF, os rádios cognitivos necessitam verificar frequentemente os canais disponíveis em um amplo espectro. No entanto, esse processo nem sempre resulta em estimativas confiáveis, uma vez que ele se baseia na observação local de sinais cuja potência recebida pode ser baixa, ou mesmo não detectável. Erros nas estimativas espectrais podem levar à ocorrência de interferências entre as transmissões. Além disso, durante o sensoriamento espectral, a transmissão de dados pelas aplicações não é possível (sensoriamento silencioso), resultando em atrasos adicionais e em uma redução na disponibilidade de largura de banda para o tráfego das aplicações [76].

Dado que os rádios cognitivos são considerados usuários de menor prioridade do espectro licenciado, um requisito fundamental é evitar interferências com potenciais usuários primários em sua vizinhança. Por outro lado, sistemas primários não precisam modificar sua infraestrutura para o compartilhamento do espectro com redes cognitivas. Os rádios cognitivos devem ser capazes de detectar a presença de usuários primários por meio de um processo contínuo de sensoriamento.

Considerando que diversas lacunas espectrais podem estar disponíveis, é necessário que os rádios cognitivos tomem ciência desta diversidade de oportunidades para selecionar o melhor canal disponível [76]. Assim, um dos desafios de projeto é a construção de protocolos de rede que se adaptem dinamicamente à faixa de espectro selecionada.

### 3.3 Controle de Acesso ao Meio

Em redes cognitivas, identificar os recursos espectrais disponíveis por meio de técnicas de sensoriamento, decidir os períodos ótimos para transmissão e a coordenação do acesso espectral com outros usuários são funções importantes para os protocolos de acesso ao meio (*Medium Access Control* – MAC).

#### 3.3.1 Gerenciamento Espectral em Redes Cognitivas

As faixas espectrais ociosas detectadas pela fase de sensoriamento espectral apresentam características diferentes, tanto pela natureza variante do ambiente de rádio, quanto por parâmetros da faixa espectral, como frequência de operação e largura de banda. Portanto, as redes cognitivas devem decidir pela melhor faixa espectral de modo a atender os requisitos de QoS e funções específicas de gerenciamento de espectro são necessárias. Essas funções são classificadas como sensoriamento espectral, análise espectral e decisão espectral. Enquanto o sensoriamento espectral (descrito na Seção 3.2) está relacionado principalmente com a camada física, a análise e decisão espectral estão relacionadas a camadas superiores da pilha de protocolos [61].

##### Análise Espectral

As lacunas espectrais apresentam características diferentes que variam no tempo. A análise espectral habilita a caracterização de diferentes faixas, que podem ser exploradas para a verificação da faixa espectral apropriada, com o intuito de atender os requisitos do usuário. Dessa forma, é essencial definir parâmetros como nível de interferência, taxa de erro do canal, perda por percurso e tempo de espera, que podem representar a qualidade de uma faixa de espectro particular [7].

##### Decisão Espectral

Quando todas as faixas do espectro estiverem caracterizadas, operações apropriadas devem ser estabelecidas para a transmissão correspondente, considerando os requisitos de QoS e as características do espectro. Dessa forma, a função de gerenciamento do espectro precisa estar ciente dos requisitos de QoS do usuário. Parâmetros tais como taxa de dados, taxa aceitável de erros, limitante de atraso, modo de transmissão, e largura de banda da transmissão podem ser determinados. De acordo com as regras de decisão, o conjunto de faixas espectrais apropriadas pode ser escolhido.

Após selecionar os recursos espectrais por meio das funções de gerenciamento do espectro, o esquema de acesso espectral adequado precisa ser executado. Essa é a principal função do protocolo MAC em redes cognitivas.

### 3.3.2 Acesso ao Meio

O projeto de protocolos MAC para redes cognitivas tem seguido duas propostas distintas [77]. A primeira abordagem está focada principalmente em redes infraestruturadas, em que um coordenador central ou uma estação radiobase gerencia a alocação espectral e compartilha a informação de alocação espectral com os usuários secundários. Eles, entretanto, podem participar da função de sensoriamento espectral e disponibilizam informações do canal para o controlador central. Os esforços pela padronização levam a uma uniformidade, de modo a permitir que múltiplos operadores de rádio cognitivo coexistam de forma independente.

Por outro lado, a segunda abordagem é otimizada para um tipo particular de ambiente, ou para um objetivo de aplicação específica do usuário. Essa abordagem tem sido bastante usada em protocolos distribuídos, que operam sem o suporte de uma entidade de controle centralizada. Como um exemplo, os nós em uma rede *ad hoc* podem exibir elevados graus de mobilidade, o que dificulta a coordenação do sensoriamento. Para tais casos, o protocolo MAC pode identificar a mobilidade com o objetivo de determinar quais regiões (cobertas pelo nó durante seu movimento) exibem altos níveis de atividade de usuários primários.

Tanto para redes infraestruturadas, quanto para redes *ad hoc*, os protocolos MAC são classificados em três categorias: acesso aleatório, acesso agendado e acesso híbrido [77]. Os protocolos de acesso aleatório não necessitam de sincronização temporal e são geralmente baseados no princípio de detecção de portadora de múltiplo acesso com prevenção de colisão (*Collision Sense Multiple Access with Collision Avoidance* – CSMA/CA). O usuário secundário monitora as faixas espectrais para detectar quando não há transmissões provenientes de outros usuários secundários e transmite após um determinado intervalo, para prevenir transmissões simultâneas.

Os protocolos de acesso agendado necessitam de sincronização da rede, em que o tempo é dividido em períodos para canal de controle e transmissão dos dados. Os protocolos de acesso híbrido utilizam transmissões parcialmente agendadas, em que a sinalização de controle ocorre geralmente em períodos sincronizados. Entretanto, a transmissão de dados possui esquemas de acesso aleatório ao canal, sem sincronização temporal. Em uma abordagem diferenciada, as fases de controle para transferência de dados possuem durações pré-definidas constituindo um *superframe* comum a todos os usuários da rede. Dentro de cada fase de controle e transferência dos dados o acesso ao canal pode ser aleatório.

## 3.4 Camada de Rede e Camadas Superiores

A maioria das pesquisas em redes cognitivas se concentra em cenários de salto único, lidando com questões relacionadas à camada física (PHY) ou de controle de acesso ao meio (MAC), o que inclui o sensoriamento espectral efetivo, as técnicas de decisão espectral e de compartilhamento espectral. Recentemente, a comunidade acadêmica começou a observar os potenciais das redes de múltiplos saltos, que podem lançar novas possibilidades de serviços, o

que permite uma ampla variedade de aplicações de comunicações pervasivas. De fato, o paradigma cognitivo pode ser aplicado em diferentes cenários de redes sem fio de múltiplos saltos. Alguns exemplos são as redes de malha cognitivas, caracterizadas por uma arquitetura de rede semi-estática e as redes de sensores sem fio cognitivas, caracterizadas por uma arquitetura auto-configurável, composta de usuários cognitivos que comunicam uns com os outros por conexões *ad hoc*. Para obter benefícios efetivos desses paradigmas cognitivos, novos desafios precisam ser resolvidos. Em particular, soluções de roteamento precisam ser integradas aos trabalhos já desenvolvidos para as camadas inferiores, enquanto consideram as propriedades peculiares dos ambientes cognitivos. A inteligência computacional e os protocolos bio-inspirados também têm sido projetados para protocolos de roteamento em uma maneira cognitiva, e compõem estratégias de relacionamento cruzado entre as camadas (*cross-layer*) [78].

As funções de gerenciamento espectral *cross-layer* permitem que informações das camadas PHY e MAC sejam trocadas simultaneamente com a camada de rede, de modo que essa última esteja habilitada a gerenciar os recursos de diversas camadas da pilha OSI, para auxiliar a reconfigurar a rede. Com essa informação, os protocolos da camada de rede e superiores podem ajustar os parâmetros de operação durante as transmissões. As mudanças de configuração são repassadas por ligações *cross-layer*, de modo que as mudanças na operação do rádio são feitas sem modificações nos componentes de *hardware*. Os parâmetros de operação, tais como frequência, modulação e potência de transmissão podem ser alterados. Por exemplo, a camada de transporte pode determinar que, para uma aplicação sensível a atrasos, a taxa de dados é mais importante do que a taxa de erros. Essa informação é encaminhada por meio das funções de gerenciamento espectral para a camada física, de modo que um esquema de modulação que habilita uma maior eficiência espectral seja selecionado. Adicionalmente, as redes sem fio cognitivas são capazes de reconfigurar sua infraestrutura com base em experiências temporais (*i.e.*, comportamento de aprendizagem) para se adaptar às variações contínuas da rede [79]. Há, ainda, os desafios relativos ao roteamento, controle de fluxo e controle de congestionamento [61].

Os principais desafios relacionados a essas camadas incluem o conhecimento espectral, a configuração de rotas de qualidade em ambientes dinâmicos e a manutenção das rotas. A construção da topologia e o endereçamento também são considerados funções primordiais. Em relação ao endereçamento, por exemplo, a maioria dos esquemas utiliza endereços fixos ou obtidos dinamicamente. Os métodos de endereçamento fixo incluem as extensões de endereços MAC físicos de um rádio cognitivo ou o endereçamento por códigos atribuídos por um dispositivo controlador central. Os métodos de endereçamento dinâmico dependem de líderes de grupo para atribuir identificadores aos nós, por meio de serviços de nomeação, semelhante ao utilizado pelo Protocolo de Configuração de Hospedeiro Dinâmico (*Dynamic Host Configuration Protocol* – DHCP) [79].

### 3.5 Aplicações das Redes Cognitivas

As redes cognitivas são um novo paradigma em comunicações sem fio, para disponibilizar melhores serviços a diversos nichos de mercado. Os rádios cognitivos, que integram essas redes, podem perceber o ambiente de propagação, aprender padrões e adaptarem seus parâmetros para atender a requisitos imediatos do usuário, da rede e do ambiente de rádio [80]. Entre as várias áreas de aplicações das redes cognitivas, podem ser citadas [61]:

- **Redes Alugadas** – A rede primária pode prover uma rede alugada permitindo o acesso oportunista do espectro licenciado, por acordo com a rede secundária para não prejudicar os parâmetros de qualidade de serviço dos usuários primários [81]. Por exemplo, a rede primária pode alugar o acesso ao espectro apenas para uma operadora. A rede primária também pode disponibilizar o acesso ao espectro para uma comunidade regional, com o propósito de prover acesso sem fio por banda larga;
- **Redes *Mesh* Cognitivas** – Redes em malha sem fio têm surgido como uma tecnologia de baixo custo para prover conectividade em banda larga [82]. Entretanto, à medida que a densidade da rede aumenta e as aplicações demandam uma maior vazão de dados, as redes *mesh* necessitam de um aumento em sua capacidade para atender os requisitos das aplicações. Considerando que a tecnologia de rádio cognitivo proporciona o acesso a faixas mais largas do espectro, as redes cognitivas podem ser utilizadas para redes *mesh* que serão implementadas em áreas urbanas densas [83]. Por exemplo, a área de cobertura de redes cognitivas pode aumentar se um *backbone mesh* sem fio é estabelecido baseado em pontos de acesso cognitivos e nós de repasse cognitivos [84]. A capacidade de um ponto de acesso cognitivo, conectado pelo acesso em banda larga à Internet, é distribuída em uma extensa área com o auxílio de nós de repasse cognitivos. As redes cognitivas têm a capacidade de acrescentar, de maneira temporária ou permanente, alocações espectrais para os enlaces usados nos esquemas de transmissão cooperativa no caso de alta carga de tráfego;
- **Redes de Emergência** – As redes cognitivas também podem ser implementadas para o auxílio na operação de redes de emergência [85]. No caso de desastres naturais, que podem temporariamente inviabilizar a infraestrutura de comunicação existente, as ações das equipes de emergência nas áreas do desastre precisam formar redes de emergência. Considerando que as redes de emergência lidam com informações críticas, uma comunicação segura precisa ser garantida com o mínimo de atraso de transmissão. Além disso, comunicações em situações de emergência requerem uma disponibilidade significativa de espectro de rádio para a manipulação de grandes volumes de tráfego de dados, incluindo voz, vídeo e dados. As redes cognitivas podem oferecer o uso eficaz do espectro existente sem a necessidade de uma infraestrutura e mantendo as prioridades de comunicações e tempos de resposta;

- Redes Militares – Uma das aplicações das redes cognitivas está no ambiente de comunicações militares. As redes cognitivas permitem aos dispositivos militares de comunicação escolher faixas de frequência, esquemas de modulação e de codificação adaptáveis às variações do ambiente de rádio em campos de batalha. Adicionalmente, as redes militares demandam recursos de segurança e proteção das transmissões em ambientes hostis. As redes cognitivas permitem às equipes militares realizarem o *handoff* espectral e identificar faixas espectrais seguras, livres de interceptação por tropas inimigas;
- Redes de Sensores sem Fio – Atualmente, a maioria das redes de sensores sem fio operam em faixas não-licenciadas e estão sujeitas à interferência causada por outras redes que compartilham a mesma faixa espectral. Prover qualidade de serviço em tais redes pode ser uma tarefa difícil, visto que o espectro não-licenciado vem se tornando mais disputado. A coexistência de múltiplas redes em uma mesma banda espectral apresenta outros desafios, que incluem a utilização espectral, segurança, colisões de transmissão etc.

O projeto de redes cognitivas pode ser uma proposta promissora para prover requisitos de QoS em redes de sensores sem fio. A baixa utilização do espectro primário disponibiliza uma quantidade expressiva de recursos a serem possivelmente utilizados para a transmissão por baixa latência e largura de banda adequada aos requisitos. Redes de sensores sem fio dotadas dessa capacidade cognitiva são denominadas Redes de Sensores sem Fio Cognitivas (RSSFC) e vêm despertando crescente interesse em pesquisa e desenvolvimento pela comunidade acadêmica e corporativa [4, 86].

### 3.6 Redes de Sensores sem Fio Cognitivas

Aplicações como telemedicina [86, 87], monitoramento residencial, redes de emergência e automação industrial, geralmente requerem a alocação de vários nós sensores confinados em uma área reduzida. Esses nós utilizam faixas não-licenciadas, tais como industriais, científicas e bandas espectrais médicas, que são consideravelmente disputadas e podem ser beneficiados pelo gerenciamento espectral cognitivo. Além disso, as RSSFC são bastante apropriadas para a implementação de aplicações multimídia, aplicações de vigilância em tempo real etc.

Uma arquitetura de comunicação comum para RSSFC está ilustrada na Figura 3.4. Dependendo da disponibilidade espectral, os nós sensores transmitem suas leituras em uma maneira oportunística para os nós intermediários, e por fim, para o nó sorvedouro (*sink node*).

É importante designar um canal de controle comum (CCC) para que haja a troca de dados de controle, tais como resultados do sensoriamento espectral, dados da alocação espectral, descoberta de vizinhos etc. A provável dificuldade em alocar um CCC com uma ampla abrangência espacial, requer uma arquitetura de agrupamento [88], em que o líder de cada grupo (*cluster-head*) possa gerenciar efetivamente o espectro de maneira dinâmica, por meio de um canal de controle comum local. Além disso, as RSSFC devem considerar a possibilidade de

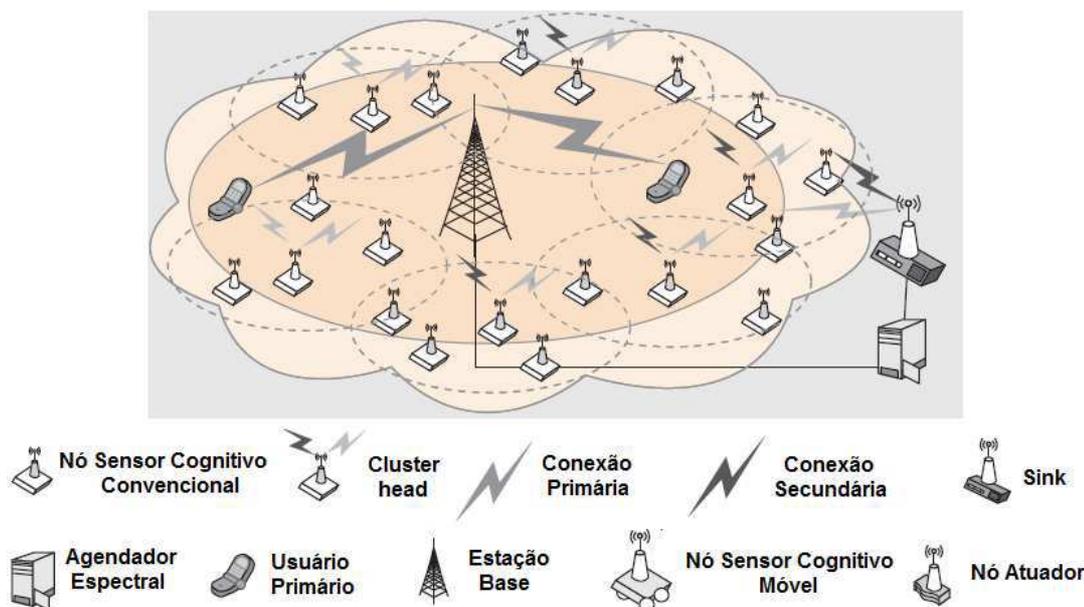


Figura 3.4 Arquitetura de uma rede de sensores sem fio cognitiva [4].

incluir funções de mobilidade dos nós e adaptar a operação da rede aos novos cenários criados. Uma arquitetura heterogênea e hierárquica pode incorporar nós especiais equipados com fontes de energia de maior capacidade. Esses nós especiais são denominados nós atuadores e podem desempenhar tarefas adicionais, como negociação espectral [4].

### 3.6.1 Características e Desafios

As redes de sensores sem fio cognitivas apresentam características e desafios que as diferenciam das suas correspondentes individuais, *i.e.*, as redes cognitivas e as redes de sensores sem fio. Essas diferenças estão atreladas às camadas da pilha de protocolos, que são listadas e discutidas a seguir [4]:

- **Camada Física** – A camada física de uma RSSFC precisa prover a capacidade de reconfigurar sua frequência de operação, modulação, codificação de canal e potência de saída sem substituição ou acréscimo de *hardware*. Esses requisitos são desafiadores devido à natureza de recursos restritos dos nós sensores. Por outro lado, a limitada capacidade dos conversores analógico-digital e o processamento de sinais de alta carga fazem do sensoriamento espectral uma tarefa igualmente desafiadora para um nó sensor. A detecção de sinais fracos de usuários primários, enquanto existem usuários secundários ocupando o canal, é também uma tarefa desafiadora. De fato, o sensoriamento espectral em banda larga, o uso de esquemas de modulação avançados e as capacidades de aprendizagem cognitivas não podem ser implementadas em sua totalidade em um nó sensor, devido a suas limitações computacionais.

- Camada de Enlace – Em RSSFC, um protocolo de controle de acesso ao meio depende da topologia especificada e os nós sensores podem negociar pelo acesso ao canal, antes da transmissão efetiva dos dados. Tanto a formação da topologia quanto a negociação pelo uso do canal requerem a troca de pacotes de controle. Portanto, comparado a uma rede de sensores convencional, o esquema MAC de uma RSSFC deve lidar com desafios adicionais como: períodos de sensoriamento espectral silencioso, que inibem transmissões; a dificuldade de difusão sobre um canal de controle comum em uma rede de larga escala; e a necessidade de mecanismos de acesso de alta prioridade para a distribuição de informações sobre sensoriamento espectral e resultados de decisões.
- Camada de Rede – Diversos esquemas de roteamento de rádio cognitivo *ad hoc* tentam prover o vínculo entre decisões de roteamento e decisões espectrais, mas não consideram as limitações de recursos inerentes às RSSFC. Por outro lado, a maioria dos esquemas de roteamento desenvolvidos para redes de sensores sem fio tem o objetivo de minimizar o consumo de energia e não lidam com as questões de acesso espectral dinâmico.
- Camada de Transporte – Em redes de sensores, a camada de transporte é responsável principalmente pela entrega confiável fim-a-fim de leituras de eventos e controle de congestionamento, para preservar recursos da rede enquanto considera os requisitos de QoS exigidos pela aplicação. Porquanto esse equilíbrio entre confiabilidade de transmissão e consumo de energia seja inerente a RSSFC, o gerenciamento espectral dinâmico proporciona desafios adicionais, tais como as características dos canais variantes e a proibição de transmitir devido aos períodos de sensoriamento espectral silencioso. Além disso, algumas aplicações, tais como rastreamento de alvos e vigilância, podem também impor requisitos relativos ao atraso para a comunicação confiável.
- Camada de Aplicação – Os algoritmos de camada de aplicação em redes de sensores lidam principalmente com a geração da informação e extração de propriedades dos sinais monitorados para relatar ao nó sorvedouro. Outros serviços providos pela camada de aplicação incluem métodos de solicitação de serviços aos sensores, agregação e fusão de dados. Portanto, os protocolos da camada de aplicação existentes precisam atender às características dinâmicas e requisitos das RSSFC.

O sensoriamento espectral é uma das funcionalidades mais importantes na distinção entre redes de sensores convencionais e as RSSFC. As vantagens do acesso espectral oportunístico (*e.g.*, maior largura de banda, menor taxa de erros devido à capacidade de alternar para o melhor canal, menor atraso de contenção etc.) acarretam um consumo adicional de energia imposto pelo sensoriamento espectral e distribuição dos resultados de sensoriamento. A otimização dessa relação de compromisso tem despertado interesse considerável das comunidades científica e industrial [89–92].

A característica cognitiva das RSSFC não está restrita ao paradigma de gerenciamento espectral oportunista. De fato, as redes cognitivas podem operar em um conjunto de frequências fixas, na própria rede secundária, mas seus nós podem ser dotados de outras capacidades cognitivas, como estimação de parâmetros, cooperação entre os nós, processamento de algoritmos baseados em inteligência computacional ou capacidades de auto-organização inspirada em sistemas biológicos. Desse modo, os nós da rede devem ser dotados de uma ou mais capacidades cognitivas para otimizar algum processo presente na rede [7].

Um exemplo de operação cognitiva em uma rede de sensores sem fio, que não necessita utilizar o paradigma de gerenciamento espectral dinâmico, é a eleição de um líder de grupo por meio de técnicas de inteligência computacional, inclusive com a possível participação em meta-heurísticas biologicamente inspiradas.

### 3.7 Conclusão

Este capítulo apresentou uma visão geral sobre as redes cognitivas, que têm sido desenvolvidas como uma tentativa de resolver os problemas relativos à limitada disponibilidade de faixas de espectro e à ineficiência em sua utilização. Essas redes são equipadas com as capacidades intrínsecas dos rádios cognitivos e oferecem um paradigma de comunicação ciente da ocupação do espectro em redes sem fio. Para isso é necessário que o processo de sensoriamento espectral seja eficaz e determine, com a maior confiabilidade possível, estimativas dos parâmetros do espectro.

Além do paradigma de gerenciamento espectral dinâmico, a capacidade cognitiva ainda pode ser utilizada por redes com nós que realizem funções colaborativas, ou dotadas de um grau de inteligência computacional, por ferramentas como lógica nebulosa e redes neurais. Além disso, os nós cognitivos podem processar algoritmos bio-inspirados, com o objetivo de otimizar alguma tarefa da rede, de maneira distribuída e tolerante a falhas.

Algumas aplicações das redes cognitivas foram discutidas, com destaque para as redes de sensores sem fio cognitivas. O capítulo seguinte apresenta um protocolo proposto para a eleição de líderes e formação de grupo, que utiliza a otimização por colônia de formigas e a lógica nebulosa para prover capacidade de inferência sobre a rede.

## CAPÍTULO 4

---

---

# LF-Ant: Um Protocolo Bio-inspirado para Redes de Sensores sem Fio

---

Uma rede de sensores pode ser definida como uma classe particular de sistemas distribuídos, em que as comunicações de baixo nível não dependem da localização topológica da rede. Desta forma, as RSSFs possuem características particulares, como a utilização de recursos restritos de energia, topologia de rede dinâmica e uma grande quantidade de nós. Essas características dificultam a reutilização de alguns algoritmos desenvolvidos para outros tipos de sistemas distribuídos. As soluções para esses problemas, como a sincronização da rede, a eleição de um líder e a aquisição de informações que representam o estado da rede devem considerar também características como a precisão, eficiência e o custo das operações.

Em estratégias de agrupamento, o processo de eleição de um líder de grupo é uma questão fundamental e tem impacto significativo no consumo geral de energia da rede. Técnicas baseadas no comportamento organizado de formigas sociais, por meio do uso de Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization* – ACO) apresentam boas características para o projeto de protocolos de agrupamento em redes de sensores sem fio [93–100]. Entretanto, grande parte desses esquemas propostos é baseada em redes de salto único, o que desperdiça energia e limita o alcance máximo de transmissão [101].

As técnicas de ACO utilizam um grafo  $\mathcal{G} = (\mathcal{C}, \mathcal{L})$ , em que  $\mathcal{C} = \{c_1, c_2, \dots, c_{N_c}\}$  é um conjunto de vértices,  $\mathcal{L} = \{l_{c_i c_j} | (c_i, c_j) \in \tilde{\mathcal{C}}\}$ ,  $|\mathcal{L}| \leq N_c^2$  é um conjunto de arestas possíveis entre os elementos de  $\tilde{\mathcal{C}}$ , em que  $\tilde{\mathcal{C}}$  é um subconjunto do produto Cartesiano  $\mathcal{C} \times \mathcal{C}$ . Algoritmos de ACO podem ser utilizados para solucionar problemas de custo mínimo. Por exemplo, no problema do caixeiro viajante (*Travelling Salesman Problem* – TSP),  $\mathcal{C}$  é o conjunto de cidades,  $\mathcal{L}$  é o conjunto de arcos que conectam as cidades e uma solução  $\psi$  é um circuito Hamiltoniano. Por outro lado, no esquema AntNet, relacionado a um problema de roteamento genérico em redes de comunicações,  $\mathcal{C}$  e  $\mathcal{L}$  correspondem respectivamente aos conjuntos de nós de processamento e de enlaces de comunicações de uma rede real [102, 103].

Em algoritmos de ACO, a informação coletada por formigas no processo de busca por alimento é armazenada nas trilhas de feromônio,  $\tau$ . Em geral, a concentração de feromônio indica a qualidade de uma rota, ou de outro parâmetro avaliado. Os arcos também possuem uma informação heurística,  $\eta$ , que representa uma informação disponível *a priori* sobre a definição do problema. Se  $\eta$  representa uma função custo relacionada com medidas de distância, a imprecisão de estimativas pode degradar o desempenho geral do sistema [103].

Sistemas de inferência nebulosa também são ferramentas importantes na otimização de algoritmos de agrupamento, pois, por meio da inferência de parâmetros que são genuinamente imprecisos, conseguem eleger os líderes de grupo mais preparados [104, 105]. Estratégias que utilizam a lógica nebulosa [106, 107] para a eleição de líderes podem equilibrar o consumo global de energia da rede e aumentar o tempo de vida. Apesar de usar um esquema de eleição nebulosa, o protocolo CHEF utiliza apenas variáveis linguísticas relacionadas à energia residual e concentração de nós sensores, sem considerar, por exemplo, a dispersão dos líderes de grupo [108].

Em redes de sensores sem fio, o uso do ARQ truncado diminui a taxa de perda de pacote, mas, dependendo da relação entre o número máximo de retransmissões permitidas e a qualidade do canal, ele pode degradar o tempo de vida da rede devido às retransmissões necessárias [109–111]. A Diversidade em Modulação Cooperativa (DMC) pode otimizar essa relação de compromisso sem desperdício de largura de banda ou de energia. Diferentemente de outros esquemas cooperativos propostos recentemente, como o SCA com LEACH [112], que consome muita energia ao introduzir redundância pelo uso de códigos de bloco espaço-temporais, a DMC rotaciona o ângulo da constelação do sinal e entrelaça as componentes dos símbolos transmitidos [112–115].

Este capítulo apresenta um protocolo *cross-layer* de agrupamento para redes de sensores sem fio, o LF-Ant (*Linguistic Fuzzy Ant*), inspirado pelo comportamento de formigas argentinas [116] (detalhes sobre a meta-heurística utilizada são apresentados no Apêndice A). O protocolo proposto tem como objetivo aumentar o tempo de vida e diminuir a taxa de perda de pacote de redes de sensores sem fio. Os objetivos são alcançados por uma eleição ótima de líderes de grupo, na camada de rede, e pelo controle de possíveis retransmissões com a técnica de DMC, nas camadas de enlace e física. Um limiar de colaboração e um processo de ARQ truncado guiam a operação *cross-layer*. Por meio de simulações, a comparação com outro esquema cooperativo, o SCA com LEACH, comprova a superioridade do protocolo proposto.

## 4.1 Trabalhos Relacionados

Os sistemas e processos biológicos têm evoluído por milhões de anos e possuem características que inspiram o projeto de algoritmos de sistemas de comunicações. Algumas dessas características são [117]: capacidade de adaptação às mudanças do ambiente; robustez e resiliência a falhas causadas por fatores internos e externos; habilidade de aprendizado; gerenciamento efi-

caz de recursos restritos; auto-organização e comportamento distribuído. Diversos protocolos de redes de sensores sem fio são projetados de modo a obter resultados satisfatórios por meio dessas características.

Ding *et al.* apresentaram uma abordagem centralizada para o relato de dados em redes de sensores sem fio [94], o protocolo AntChain, que utiliza técnicas de ACO como ferramentas de otimização centralizada e supera o desempenho dos protocolos LEACH [52] e PEGASIS [118], em termos de tempo de vida da rede. Entretanto os algoritmos são processados na estação base, o que pode implicar um custo alto de organização e eleição dos líderes de grupo. Rui *et al.* propuseram um esquema em que o nó sensor na rede é mapeado como uma formiga em um cenário de ACO e a comunicação dos nós é modelada pelo feromônio correspondente. Se uma formiga detecta um alvo de interesse, ela libera feromônio para o restante das outras formigas tomarem conhecimento. O feromônio acumulado é calculado de maneira adaptativa para determinar a probabilidade de o nó sair do estado de hibernação [95].

Em [119], um algoritmo de roteamento baseado em princípios de colônias de formigas, para redes móveis *ad hoc* foi apresentado, considerando as concentrações de feromônio das formigas. O feromônio é tratado como uma métrica que indica a qualidade de um percurso. Embora ele evapore com o tempo, as formigas subsequentes deixam uma quantidade de feromônio adicional e reforçam o percurso. Elas efetuam o menor percurso entre o alimento e seu ninho, de um modo distribuído e autônomo. As formigas se dirigem aos seus destinos, ao mesmo tempo que estabelecem os caminhos inversos para a fonte.

Em [120], os autores apresentaram um protocolo de roteamento biologicamente inspirado e baseado em agrupamento, o T-ANT. As formigas são desestimuladas a utilizar rotas que apresentaram baixo desempenho nas iterações passadas, com a aplicação de anti-feromônio. O número de grupos é calculado de modo a otimizar a distribuição de carga da rede e a eficiência no consumo de energia. Um nó que contém uma formiga se torna um líder de grupo, enquanto os outros nós aderem aos melhores grupos para si. Apesar de considerar as variáveis relativas ao consumo de energia e à dispersão entre os líderes de grupo, o protocolo não leva em conta a concentração dos nós na rede e nem as condições de transmissão. Além disso, o T-ANT é baseado em um modelo de rede de salto único, o que pode limitar a abrangência geográfica da rede e aumentar o consumo de energia.

## O Protocolo AntNet

No protocolo AntNet, cada formiga busca uma rota de custo mínimo entre um par de nós da rede [103, 121]. As formigas são lançadas a partir de cada nó da rede em direção aos nós destinos,  $d$ , de modo a atender os padrões de tráfego de interesse. Se uma formiga  $\kappa$  está em um nó  $i$ , ela escolhe mover-se para o próximo nó  $j$ , de acordo com uma regra de decisão probabilística, que é função da memória da formiga  $\mathcal{M}^\kappa$  e da tabela de roteamento local da formiga,  $\mathcal{A}_i$  [102]. A tabela de roteamento é obtida por uma composição funcional entre as trilhas de feromônio locais,  $\tau_{ij d}$ , e a informação heurística,  $\eta_{ij}$ . Uma vez que a formiga  $\kappa$  tenha

completado um percurso, ela deposita uma quantidade  $\Delta\tau^\kappa(n)$  de feromônio, proporcional à qualidade do percurso percorrido, em que  $n$  representa o instante de tempo. Após alcançar o nó destino, a formiga volta para o nó fonte, ao longo do mesmo caminho percorrido anteriormente, no entanto, no sentido inverso. Partindo de  $d$  para  $s$ , a formiga  $\kappa$  incrementa a intensidade de feromônio

$$\tau_{ijd}(n) \leftarrow \tau_{ijd}(n-1) + \Delta\tau^\kappa(n). \quad (4.1)$$

Após essa atualização da trilha, parte do feromônio de todas as conexões de saída do mesmo nó  $i$ , relativas ao nó destino  $d$ , evapora

$$\tau_{ijd}(n) \leftarrow \frac{\tau_{ijd}(n)}{(1 + \Delta\tau^\kappa(n))}, \forall j \in \mathcal{N}_i, \quad (4.2)$$

em que  $\mathcal{N}_i$  é o conjunto de vizinhos do nó  $i$ . A relação entre a tabela de roteamento local do AntNet,  $\mathcal{A}_i = a_{ijd}(n)$ , e da regra de decisão das formigas,  $p_{ijd}^\kappa(n)$ , é dada por

$$p_{ijd}^\kappa(n) = \begin{cases} a_{ijd}(n) = \frac{w\tau_{ijd}(n) + (1-w)\eta_{ij}}{w + (1-w)(|\mathcal{N}_i| - 1)}, & \text{se } j \notin \mathcal{M}^\kappa, \\ 0, & \text{se } j \in \mathcal{M}^\kappa, \end{cases} \quad (4.3)$$

em que  $j \in \mathcal{N}_i$ ,  $d$  é o nó destino,  $w \in [0, 1]$  é um fator de peso e o denominador é um termo de normalização. A memória da formiga,  $\mathcal{M}^\kappa$ , indica o conjunto de nós que já foi visitado. Pelo uso da Expressão 4.3, as formigas evitam a formação de laços.

## 4.2 O Protocolo LF-Ant

O protocolo de agrupamento apresentado nesta seção, o LF-Ant (Linguistic Fuzzy Ant), funciona com base no comportamento de formigas que precisam encontrar percursos ótimos a partir de uma determinada fonte até um destino final. O objetivo é otimizar a eleição de líderes de grupo, em cada rodada. Para isso, a modelagem clássica do AntNet é modificada, pois o sistema proposto transforma a representação de vértices em representação de arestas e vice-versa. Desse modo, cada nó sensor,  $s$  (vértice), na rede que utiliza o protocolo LF-Ant pode ser visto como um percurso (aresta),  $ijd$ , no sistema AntNet. Portanto, a eleição do nó sensor mais preparado para líder de grupo equivale à escolha do percurso de custo mínimo, pela formiga. Por outro lado, os dois vértices no sistema AntNet (fonte e destino final) podem ser vistos como os dois seguintes modos de transmissão no protocolo proposto:

1. Transmissão Direta: não utiliza nenhum tipo de diversidade;
2. Transmissão Cooperativa: utiliza a técnica de diversidade cooperativa.

Esses modos de transmissão compõem a contribuição da camada física e de enlace no esquema *cross-layer* e essa operação está descrita no Seção 4.3.

Inicialmente, formigas artificiais são atribuídas aleatoriamente à região monitorada. Cada grupo de nós sensores recebe uma formiga,  $\kappa$ , que indica o respectivo primeiro líder de grupo. Nas próximas eleições, cada nó do grupo processa regras de decisão e gera valores especiais, denotados *chance*.

Para cada nó sensor, a respectiva formiga,  $\kappa$ , se dirige ao destino final e volta ao ninho, incrementando a intensidade de feromônio,  $\tau_s$ . No domínio da rede de sensores, isso é equivalente a cada nó sensor executar a Atribuição 4.1. A variável de atualização,  $\Delta\tau^\kappa$ , deve indicar a qualidade do percurso escolhido pela formiga. Essa é uma medida de desempenho do nó sensor na rodada anterior. No protocolo LF-Ant, a variável de atualização é dada por

$$\Delta\tau^\kappa = \frac{\varepsilon_s \cdot \rho_s}{\zeta_s \cdot \Gamma_s}, \quad (4.4)$$

em que  $\varepsilon_s$  é a energia residual do nó sensor,  $\zeta_s$  é a quantidade de energia consumida pelo nó sensor na última rodada,  $\Gamma_s$  é o número total de transmissões realizadas pelo nó sensor na rodada anterior e  $\rho_s = 2$ , se os pacotes transmitidos anteriormente foram corretamente recuperados pelo nó destino. Caso contrário, se, mesmo com retransmissões, os pacotes não foram corretamente recuperados, então  $\rho_s = 1$ . Esses valores foram obtidos empiricamente, com simulações.

Após a atualização de feromônio, todos<sup>1</sup> os nós sensores executam a Atribuição 4.2, que corresponde à evaporação de feromônio. A próxima etapa é o processamento da informação heurística,  $\eta_s$ , dada pela saída de um sistema de inferência nebulosa, explicado na Seção 4.2.1. Com a combinação de  $\tau_s$  e  $\eta_s$ , o nó sensor calcula o valor da regra de decisão, de acordo com a Fórmula 4.3. Esse valor indica a probabilidade de um percurso em atrair formigas, e equivalentemente, indica a probabilidade de um nó sensor se tornar um líder de grupo.

Os nós atribuem o valor da regra de decisão à variável *chance*. Cada nó anuncia um mensagem para os outros candidatos, com esse valor em anexo e aguarda mensagens anunciadas pelos outros nós. Se seu valor de *chance* é maior que a dos outros nós, o nó sensor ganha a eleição e anuncia uma *CH\_message*. Caso contrário, o nó sensor que não foi eleito recebe uma *CH\_message*, seleciona o líder mais próximo como o seu líder e envia uma mensagem para aderir àquele grupo.

O nó sensor que possui o próximo maior valor de *chance* (o segundo colocado na eleição) se torna um candidato a colaborador, que em um possível estágio de retransmissão, pode se tornar um vice-líder de grupo e cooperar em um esquema de diversidade. Esse nó atinge um limiar de colaboração e a única *chance* maior no grupo é a do líder de grupo eleito (o primeiro colocado na eleição).

Caso dois, ou mais nós possuam o mesmo valor de *chance*, e esse for o mais alto do grupo, então o nó eleito é aquele que possui a menor identificação (ID) de nó entre eles. A informação

<sup>1</sup>Uma alternativa a ser implementada futuramente é a execução seletiva, de modo que apenas alguns nós precisem realizar o processamento de atribuições, de acordo com diferentes critérios de disparo [122], o que pode diminuir o consumo de energia.

de ID de cada nó sensor também é compartilhada no momento da difusão individual dos valores de chance. No protocolo proposto, esse mecanismo garante que apenas um nó seja eleito no respectivo grupo.

### 4.2.1 Informação Heurística Nebulosa

Em algoritmos de ACO, a informação heurística representa uma informação local que não depende da qualidade das iterações anteriores. No Ant System, um algoritmo que otimiza soluções para o problema do caixeiro viajante,  $\eta_{ij} = 1/J_{ij}$ , em que  $J_{ij}$  representa a distância entre duas cidades  $i$  e  $j$  [103]. No algoritmo AntNet, a informação heurística é dada por [102]

$$\eta_{ij} = 1 - \frac{q_{ij}}{\sum_{l \in \mathcal{N}_i} q_{ij}}, \quad (4.5)$$

em que  $q_{ij}$  representa o comprimento da fila (em *bits* a serem enviados) do enlace que conecta o nó  $i$  ao seu vizinho  $j$ . O conjunto de vizinhos do nó  $i$  é dado por  $\mathcal{N}_i$ . No esquema proposto, a informação heurística  $\eta_s$ , representada pela variável `eta`, relaciona duas outras variáveis: `distancia_local` e `dispersao_CHs`.

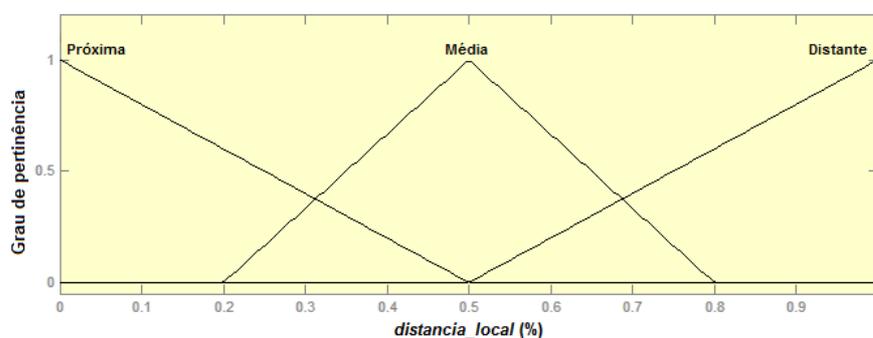
A variável `distancia_local` é a soma das distâncias entre o nó candidato e outros nós que estão dentro de um raio de alcance específico de transmissão. Quanto maior a soma, mais energia precisará ser gasta na transmissão dos dados sensorizados ao nó candidato (se for eleito líder). Entretanto, para um valor de soma de distâncias pequeno, a energia gasta na fase de agregação de dados do grupo pelo líder será menor. Para essa variável, quanto menor o valor, maior a chance do nó candidato se eleger um líder de grupo. Essa variável foi proposta no protocolo CHEF [123], mas em sua definição original, se houver poucos nós internos ao raio de alcance específico de transmissão, o valor da soma pode ser pequeno. Isso pode indicar, falsamente, que o consumo de energia dos nós será menor do que para o caso em que os nós (em um número maior) estejam mais próximos do nó candidato. No protocolo proposto, essa soma é normalizada, por meio da divisão do valor de `distancia_local` pelo número de nós sensores internos ao raio de alcance específico de transmissão.

A variável `dispersao_CHs` é a soma das distâncias entre o nó candidato e os líderes de grupo presentes em um raio de alcance específico de transmissão. A relação de proporcionalidade entre a magnitude da variável e a chance de eleição para líder é direta. Quanto maior a dispersão de líderes de grupo em torno do nó candidato, maior sua chance em liderar o grupo. Além de promover uma boa distribuição de líderes, isso contribui para o equilíbrio de carga de transmissão e processamento na rede.

Como a composição de `eta` é dada por duas variáveis que se baseiam em medições incertas e relativas a medições de distância, a lógica nebulosa é apropriada para representar seu cálculo final. Além das incertezas de medições, pequenas mudanças relativas ao posicionamento dos

**Tabela 4.1** Regras Nebulosas utilizadas no protocolo LF-Ant.

Regra	se		então
	distancia_local	dispersao_CHs	eta
1	Próxima	Distante	Muito Alta (MA)
2	Média	Distante	Médio Alta (MdA)
3	Distante	Distante	Pouco Alta (PA)
4	Próxima	Média	Muito Média (MM)
5	Média	Média	Média (M)
6	Distante	Média	Pouco Média (PM)
7	Próxima	Próxima	Pouco Baixa (PB)
8	Média	Próxima	Médio Baixa (MdB)
9	Distante	Próxima	Muito Baixa (MB)

**Figura 4.1** Funções de pertinência para a variável `distancia_local`.

nós sensores na rede podem ocorrer e isso pode ser compensado na operação do sistema de inferência nebulosa.

Na lógica nebulosa, as decisões são baseados em regras *se-então*, que são usadas para determinar o valor das variáveis de saída [124]. O sistema de inferência é composto por variáveis linguísticas e operadores lógicos. As regras nebulosas utilizadas no sistema proposto, para produzir o valor da informação heurística, estão listadas na Tabela 4.1. À medida que os valores das variáveis `distancia_local` e `dispersao_CHs` se tornam pequenos (Próxima) e grandes (Distante), respectivamente, a informação heurística nebulosa assume os maiores valores, e portanto, fornece as maiores contribuições para que o nó sensor seja eleito um líder de grupo.

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 representam as funções de pertinência das variáveis `distancia_local`, `dispersao_CHs` e `eta`, respectivamente. A escolha por funções triangulares se justifica pela simplicidade de processamento. O método de *defuzzificação* utilizado é o centróide [124].

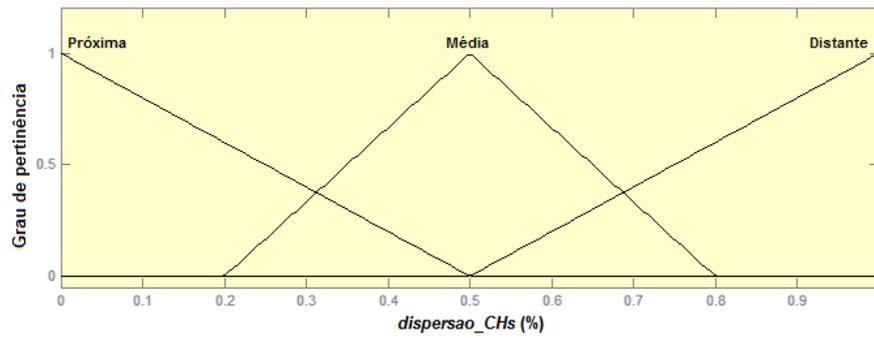


Figura 4.2 Funções de pertinência para a variável *dispersao\_CHs*.

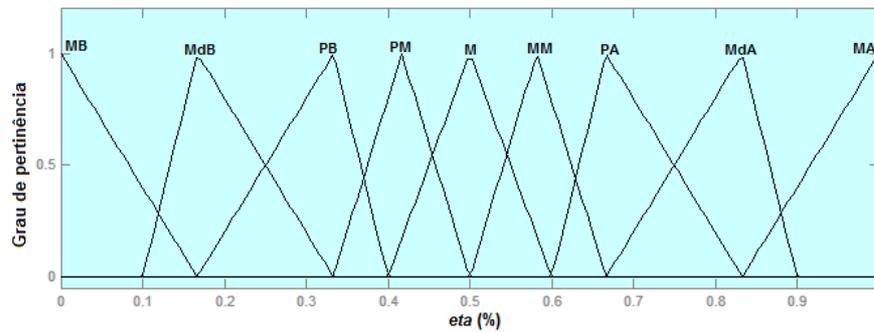


Figura 4.3 Funções de pertinência para a variável *eta*.

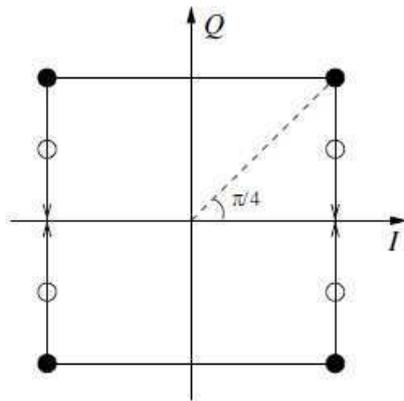
### 4.3 Diversidade em Modulação Cooperativa

A respeito do comportamento biológico das colônias de formigas, uma transmissão cooperativa pode ser interpretada como uma maneira eficaz de transportar uma grande presa ao ninho, pois formigas que trabalham colaborativamente podem carregar dez vezes a capacidade de uma formiga solitária [125]. No LF-Ant, essa colaboração entre as formigas é traduzida no uso de uma técnica de diversidade cooperativa entre os nós para combater os efeitos do desvanecimento do canal sem fio.

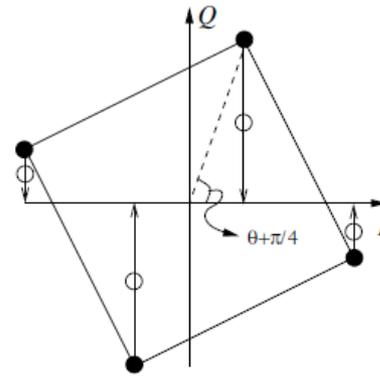
A diversidade em redes sem fio, algumas vezes referida como diversidade de canal ou diversidade de enlace, está relacionada com a introdução de redundância em transmissões por diferentes canais, por exemplo, faixa de frequência, período de tempo, e outros, que apresentem diferentes condições de recepção. Um esquema de diversidade utiliza tal fenômeno para transmissões de melhor qualidade [101]. A técnica de diversidade em modulação combina a inserção de redundância por meio de uma escolha criteriosa do ângulo de referência de uma constelação MPSK e o entrelaçamento independente das componentes do símbolos a serem transmitidos [10].

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram como o desempenho de um sistema pode ser afetado pela escolha do ângulo de referência de uma constelação QPSK quando o canal de comunicações está sujeito aos efeitos do desvanecimento. Nessa figura os círculos cheios representam a constelação no transmissor, ao passo que os círculos vazios indicam a constelação na entrada do

receptor. Como pode ser observado, apenas a componente em quadratura do símbolo transmitido é atingida por um pico de desvanecimento. Pode-se notar que a constelação comprimida apresentada na Figura 4.5 (círculos vazios) oferece mais proteção contra os efeitos do ruído do que a constelação apresentada na Figura 4.4, porque dois símbolos distintos não colidem, uma vez que apresentam projeções distintas nos eixos em fase ( $I$ ) e em quadratura ( $Q$ ) [126].



**Figura 4.4** Diagrama de constelação QPSK sem rotação.



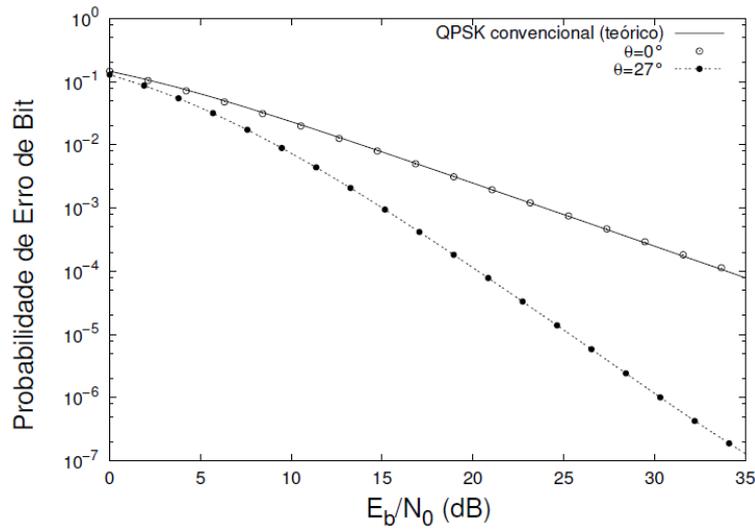
**Figura 4.5** Diagrama de constelação QPSK rotacionado.

Na realidade, o desvanecimento afeta aleatoriamente as componentes em fase e em quadratura dos sinais transmitidos e a situação apresentada nas Figuras 4.4 e 4.5 contempla apenas um caso particular. Contudo, verifica-se que a probabilidade de ocorrência conjunta de dois picos de desvanecimento é praticamente nula em canais independentes. Portanto, considerando que as componentes em fase e em quadratura são afetadas de maneira independente, pode-se verificar que, em média, a constelação com diversidade é mais adequada para a transmissão neste tipo de canal. Para garantir a independência entre o desvanecimento sofrido pelas componentes em fase e em quadratura pode-se utilizar o entrelaçamento independente de componentes [113].

A Figura 4.6 apresenta duas curvas, sendo uma para a constelação de referência e outra usando o ângulo ótimo ( $\theta = 27^\circ$ ) de rotação. O uso da constelação rotacionada pelo ângulo ótimo supera o desempenho obtido com o uso da constelação de referência. Considerando a constelação QPSK de referência ( $\theta = 0^\circ$ ), o desempenho do esquema proposto se reduz àquele de uma transmissão QPSK convencional, cuja probabilidade de erro de *bit* ( $P_b$ ) também foi incluída na Figura 4.6 e é dada por [127]

$$P_b = \frac{1}{2} \left[ 1 - \sqrt{\frac{E_b/N_0}{1 + E_b/N_0}} \right]. \tag{4.6}$$

A diversidade em modulação cooperativa explora o ganho de diversidade em um sistema se cada componente do sinal transmitido é afetado pelo desvanecimento do canal de maneira independente. Além disso, para alcançar o ganho máximo de diversidade, quaisquer dois pontos



**Figura 4.6** Probabilidade de erro de *bit* para o esquema de diversidade em modulação em função da relação sinal-ruído ( $E_b/N_0$ ) para a constelação QPSK considerada [128].

na constelação do sistema precisa ter o máximo número de componentes distintas. A DMC é executada em uma maneira adaptativa, pois só é necessária se erros de transmissão ocorrem. O próximo salto de transmissão a partir de um líder fonte pode ser desempenhado em dois estágios: *difusão* e *retransmissão*.

### 4.3.1 O Estágio de Difusão

No estágio de difusão, um líder de grupo fonte encaminha a mensagem agregada de seu grupo para um outro líder, *i.e.*, o líder mais próximo, que é também o próximo salto no processo de roteamento em direção ao nó destino. O candidato a colaborador, indicado pelo limiar de colaboração, recebe o pacote transmitido devido à natureza de difusão do canal sem fio. Os nós sensores restantes do grupo ativam o modo de hibernação e economizam energia. O pacote é transmitido por um esquema de modulação QPSK convencional. O sinal modulado é dado por [113]

$$\begin{aligned}
 s(t) &= A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n p(t - nT_s) \cos(2\pi f_c t) \\
 &+ A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n p(t - nT_s) \sin(2\pi f_c t),
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

em que

$$\begin{aligned}
 a_n, b_n &= \pm 1 \text{ com igual probabilidade} \\
 p(t) &= \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_s \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

para uma frequência de portadora,  $f_c$ , e uma amplitude de portadora,  $A$ . O pacote transmitido possui um CRC em anexo e o receptor (o próximo líder de grupo, ou o candidato a colaborador, ou o nó destino) o detecta. Uma mensagem de reconhecimento é enviada de volta para o líder fonte. Se o pacote é corretamente recuperado pelo receptor, não necessariamente o candidato a colaborador, o líder fonte continua transmitindo novos pacotes e o processo anterior é repetido. Caso contrário, o estágio de retransmissão é iniciado.

### 4.3.2 O Estágio de Retransmissão

Se o candidato a colaborador recebe o pacote corretamente, ele se torna um *vice-líder de grupo* e, juntamente com o líder fonte, retransmite o pacote utilizando a diversidade em modulação cooperativa. Caso contrário, uma simples transmissão QPSK é novamente usada, o candidato a colaborador ativa o estado de hibernação e economiza energia. As retransmissões continuam até o pacote ser entregue com sucesso, ou o número de retransmissões exceder  $N_r^{\max}$ , que é um parâmetro pré-selecionado e indica o número máximo de retransmissões permitidas por pacote.

Na diversidade em modulação cooperativa, se uma constelação QPSK é rotacionada por um ângulo específico, um certo tipo de redundância entre os dois canais de quadratura é introduzido e o sistema pode obter vantagem da diversidade obtida. Então, ambos os líderes fonte e o vice rotacionam a constelação por um ângulo  $\theta$

$$s(t) = A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_n p(t - nT_s) \cos(2\pi f_c t) + A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} y_n p(t - nT_s) \sin(2\pi f_c t), \quad (4.9)$$

em que

$$\begin{aligned} x_n &= a_n \cos\theta - b_n \sin\theta, \\ y_n &= b_n \sin\theta + a_n \cos\theta. \end{aligned}$$

A fase constante  $\theta$  é selecionada de modo que a distância euclidiana entre as constelações do sinal QPSK seja minimizada para ambas as componentes, fase e quadratura [113].

As componentes em quadratura são geradas e cada componente é entrelaçada de maneira independente. Os entrelaçadores do sinal são escolhidos de forma que após o desentrelaçamento, as duas componentes sejam independentes. Um exemplo do processo de entrelaçamento é apresentado na Tabela 4.2. Por simplicidade, o entrelaçamento de apenas dois símbolos é apresentado. O primeiro símbolo transmitido pelo líder fonte possui a componente em quadratura do segundo símbolo ( $Q_2$ ). Por outro lado, o vice-líder transmite um símbolo com a componente em quadratura do primeiro símbolo ( $Q_1$ ). Pode ser observado que os nós envolvidos na DMC en-

viam apenas metade da quantidade total da informação, individualmente. As duas componentes são elevadas para a frequência da portadora e adicionadas

$$s_s(t) = A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_n p(t - nT_s) \cos(2\pi f_c t) + A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} y_{n-k} p(t - nT_s) \sin(2\pi f_c t), \quad (4.10)$$

em que  $k$  é um número inteiro que representa o atraso temporal em números de símbolos introduzidos pelo entrelaçamento entre as componentes  $I$  e  $Q$ .

**Tabela 4.2** O processo de entrelaçamento para dois símbolos, no protocolo LF-Ant.

	Alocação de tempo 1		Alocação de tempo 2	
<b>Líder fonte</b>	$Q_2$	$I_1$	Ocioso	Ocioso
<b>Vice-líder</b>	Ocioso	Ocioso	$Q_1$	$I_2$

### 4.3.3 O Modelo do Canal e o Sistema de Decodificação

Considere um canal de comunicações com desvanecimento plano lento em que um fator multiplicativo representa o efeito do desvanecimento e um termo aditivo que representa o ruído gaussiano. O sinal recebido é [128]

$$r(t) = \alpha(t)s(t) + n(t), \quad (4.11)$$

em que  $\alpha(t)$  é modelado por uma variável aleatória complexa de média nula. O sinal recebido,  $r(t)$ , é primeiro convertido para banda básica. O sinal obtido em um intervalo de sinalização é

$$r_l(t) = \alpha_n e^{-j\phi_n} s_l(t) + z(t), \quad nT_s \leq t \leq (n+1)T_s, \quad (4.12)$$

em que  $z(t)$  representa o ruído gaussiano branco complexo,  $\alpha_n$  é a amplitude do desvanecimento (considerada constante sobre um intervalo de sinalização),  $\phi_n$  é mudança de fase causada pelo desvanecimento do canal, e  $s_l(t)$  corresponde ao sinal transmitido equivalente em banda básica  $s(t)$  [113]. Com a estimação da mudança de fase do sinal recebido no nó destino e após a demodulação, o sinal recebido é dado por

$$\tilde{\mathbf{r}}_n = \alpha_n \mathbf{s}_n + \mathbf{z}_n, \quad (4.13)$$

em que  $\mathbf{s}_n$  é uma representação vetorial do sinal transmitido no tempo  $nT_s$ , e os elementos do vetor complexo  $\mathbf{z}_n$  são variáveis aleatórias gaussianas identicamente distribuídas e independentes com média nula e variância  $N_0/2$ .

O vetor decodificado no nó destino, após o processo de desentrelaçamento, é

$$\mathbf{r}_n = \alpha_n x_n + \text{Re}\{\mathbf{z}_n\} + j[\alpha_{n+k} y_n + \text{Im}\{\mathbf{z}_n\}] \quad (4.14)$$

que é processado utilizando uma detecção símbolo a símbolo. O demodulador ótimo processa a distância euclidiana quadrada entre o vetor recebido e cada um dos quatro vetores de sinal do esquema QPSK e então decide em favor do mais próximo a  $\mathbf{r}_n$  [113].

## 4.4 Avaliação de Desempenho

Esta seção apresenta a avaliação de desempenho do protocolo LF-Ant. Nas simulações a rede de sensores é composta de 100 nós, localizados aleatoriamente em uma área de 50 metros  $\times$  50 metros. O nó destino está localizado nas coordenadas  $x = 25$  e  $y = 150$  metros. Considere que cada nó possui uma energia inicial de 3 mJ e que cada pacote contém 120 *bits*. O transceptor consome  $\epsilon_{\text{elec}} = 50$  nJ/bit para alimentar os circuitos eletrônicos de transmissão e recepção. Para o amplificador de transmissão, há um consumo de  $\epsilon_{\text{fs}} = 10$  pJ/bit/m<sup>2</sup>, ou  $\epsilon_{\text{mp}} = 0.0013$  pJ/bit/m<sup>4</sup>, de modo que uma razão sinal-ruído adequada seja alcançada. Um limiar de distância específico,  $d_0$ , é dado por

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{fs}}}{\epsilon_{\text{mp}}}}. \quad (4.15)$$

Desse modo, para transmitir uma mensagem de  $l$  *bits* por uma distância  $d$ , o nó sensor consome [123]

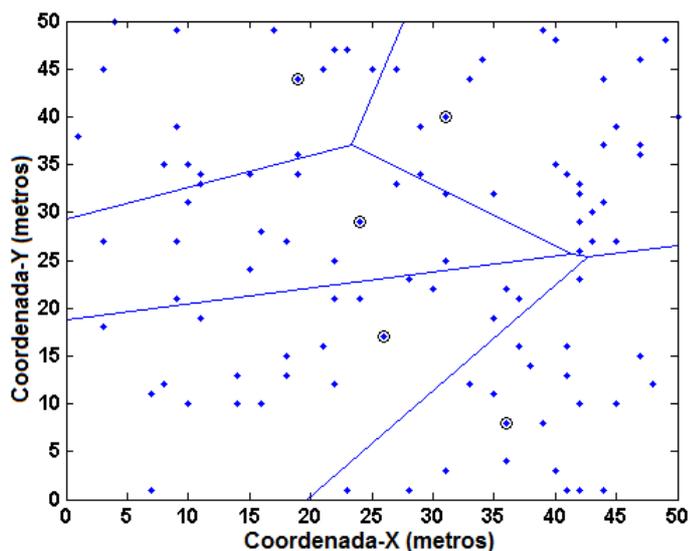
$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} l \cdot (\epsilon_{\text{elec}} + \epsilon_{\text{fs}} \cdot d^2), & \text{se } d \leq d_0 \\ l \cdot (\epsilon_{\text{elec}} + \epsilon_{\text{mp}} \cdot d^4), & \text{se } d > d_0 \end{cases} \quad (4.16)$$

e para receber uma mensagem equivalente, o nó sensor consome

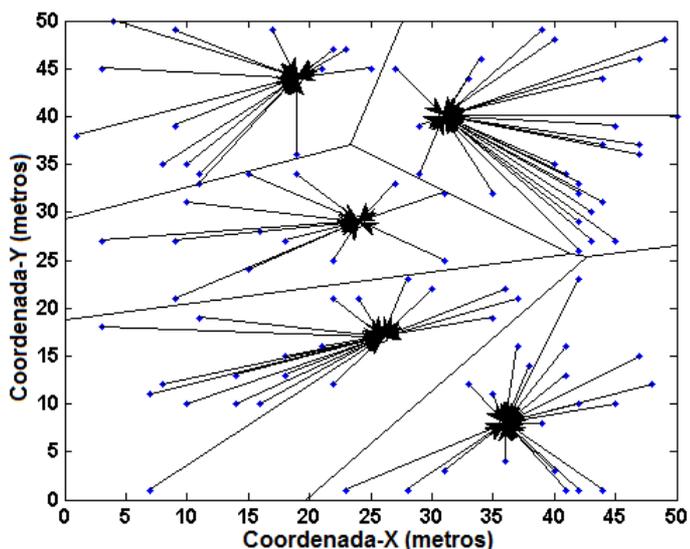
$$E_{Rx}(l) = \epsilon_{\text{elec}} \cdot l. \quad (4.17)$$

A rede de sensores considerada está ilustrada na Figura 4.7. Os cinco líderes de grupo estão representados por círculos e agregam as informações sensoriadas por outros nós, nos respectivos grupos. Esse processo de agregação está ilustrado na Figura 4.8.

A avaliação de desempenho foi realizada pela comparação de resultados de simulação entre o LF-Ant e outro projeto cooperativo *cross-layer*, o SCA com LEACH. Ele utiliza o protocolo LEACH na camada de rede e os códigos de bloco espaço-temporais cooperativos na camada física, com uma operação adaptativa da diversidade cooperativa, na camada de enlace, apenas se erros de transmissão ocorrerem. O protocolo LEACH garante a eleição de todos nós para líderes de grupo, em um número específico de rodadas, o que distribui o consumo de energia geral da rede. Entretanto, métricas de desempenho importantes, como energia residual e nível



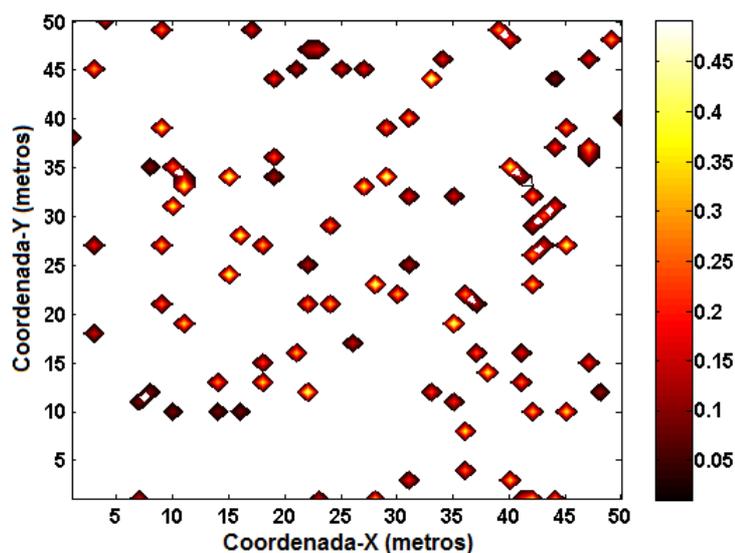
**Figura 4.7** Cinco líderes de grupo (representados em círculos) eleitos pelo protocolo de agrupamento proposto.



**Figura 4.8** O processo de agregação, que reduz a quantidade de informação necessária a ser transmitida para o nó destino.

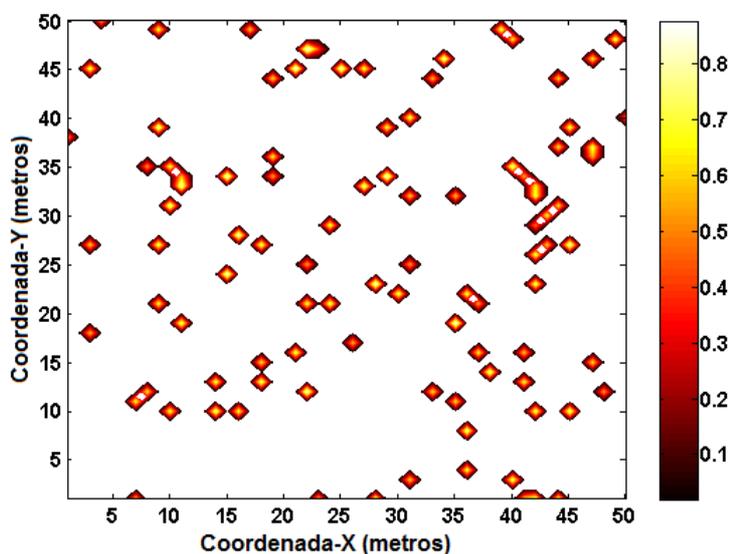
de concentração de nós, não são consideradas no projeto do protocolo [52]. Mesmo com um comportamento similar de taxa de erro *bit* [52, 112] da diversidade em modulação, a quantidade de dados transmitidos codificados é o dobro da mensagem original. Nas avaliações de desempenho apresentadas nesse capítulo, dois nós em cooperação são utilizados no funcionamento do SCA com LEACH. No LF-Ant, dois nós também são utilizados no estágio de retransmissão.

As Figuras 4.9 e 4.10 representam os mapas de energia da rede de sensores simulada, para o SCA com LEACH e para o protocolo proposto, respectivamente. Os mapas foram obtidos para a rodada de operação 50 e uma razão sinal-ruído de 25 dB. O esquema proposto apresenta uma distribuição de energia residual mais uniforme do que o SCA com LEACH. Além dessa avaliação de equilíbrio de consumo de energia pela rede, os níveis de energia observados nas



**Figura 4.9** O mapa de energia da rede de sensores, utilizando o protocolo LEACH. Uma distribuição de energia residual não-uniforme pode ser verificada.

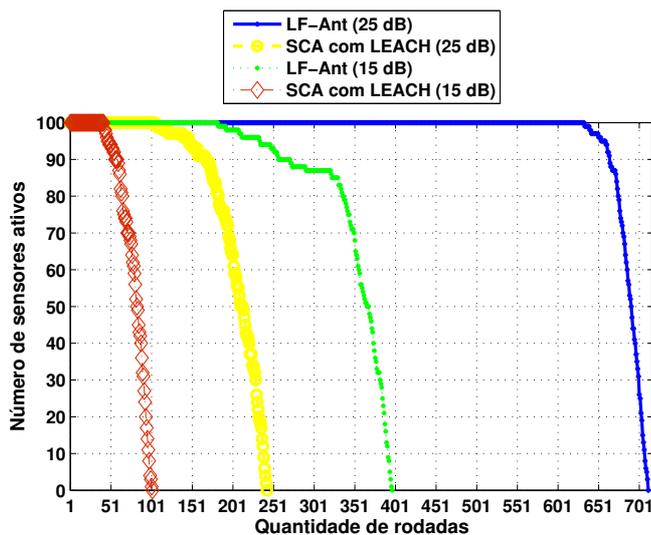
figuras reforçam a superioridade do esquema proposto em maximizar o tempo de vida da rede, já que cores claras indicam maior energia residual e, portanto, uma operação da rede com maior duração.



**Figura 4.10** O mapa de energia da rede de sensores, utilizando o protocolo proposto. Além de níveis mais altos de energia residual, a distribuição do consumo de energia da rede entre os nós é mais equilibrada.

A avaliação referente ao tempo de vida da rede de sensores está ilustrada na Figura 4.11, em que o número de nós ativos é avaliado em função da quantidade de rodadas. A comparação de desempenho entre os dois sistemas foi obtida utilizando duas condições de propagação diferentes. Conforme o esperado, para a melhor condição de propagação, em que o canal apresenta

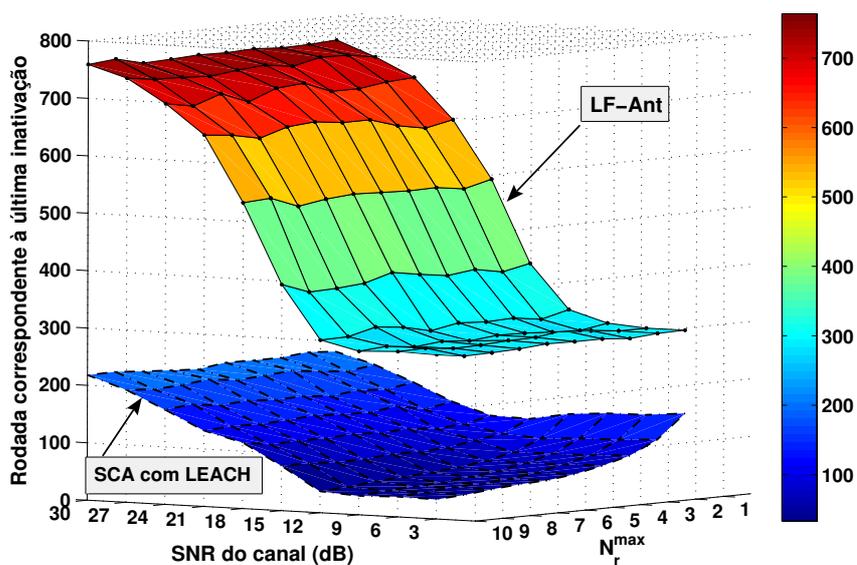
SNR igual a 25 dB, o tempo de vida da rede é estendido em relação a um canal degradado com SNR igual a 15 dB. Em um canal com SNR igual a 15 dB, o protocolo LF-Ant apresenta 396 rodadas até a inativação completa da rede, enquanto, no protocolo SCA com LEACH, a rede utiliza 101 rodadas para a inativação do último nó. Nesse cenário, o LF-Ant estende o tempo de vida da rede em aproximadamente quatro vezes. Além disso, o esquema proposto supera o SCA com LEACH em todos os casos, mesmo quando diferentes SNRs são comparadas.



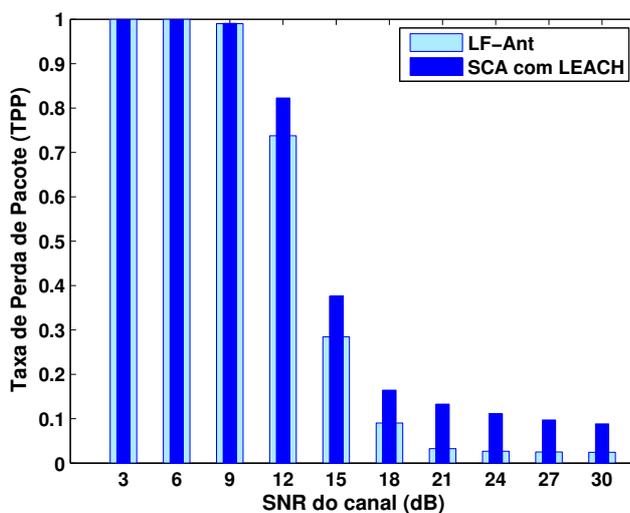
**Figura 4.11** Avaliação do tempo de vida da rede. O protocolo proposto supera o desempenho de um protocolo clássico de agrupamento.

A Figura 4.12 apresenta a comparação de desempenho relacionada ao tempo de vida da rede, em que o número de rodadas necessário para a inativação do último nó é medido, como uma função da SNR do canal e  $N_r^{\max}$ . Pode ser observado que, para todas as condições de propagação, o LF-Ant apresenta melhores resultados do que o SCA com LEACH, pois o tempo de vida da rede é prolongado por mais rodadas. Além disso, em relação a  $N_r^{\max}$ , o LF-Ant apresenta variações suaves, ao contrário do SCA com LEACH, que, principalmente em condições degradadas de propagação, diminui a quantidade de rodadas pois mais energia é gasta em mais retransmissões necessárias.

A avaliação de desempenho relacionada com a taxa de perda de pacote como uma função da SNR do canal é apresentada na Figura 4.13. Para baixos valores de SNR, o desempenho do protocolo proposto é similar ao observado no SCA com LEACH, pois a qualidade do canal é severamente afetada. Entretanto, a partir de 12 dB, a taxa de perda de pacote medida no LF-Ant diminui mais do que no SCA com LEACH, o que também contribui para aumentar o tempo de vida do protocolo proposto.



**Figura 4.12** A comparação de desempenho do tempo de vida da rede entre o protocolo proposto e o SCA com LEACH. Em todos os casos, o LF-Ant apresenta melhores resultados, com uma maior quantidade de rodadas necessárias para a inativação do último nó.



**Figura 4.13** A comparação da taxa de perda de pacote como uma função da qualidade do canal. Sob condições de propagação degradadas, a avaliação de desempenho é similar, mas a partir de 12 dB, o LF-Ant apresenta menores valores de TPP.

## 4.5 Conclusão

Este capítulo apresentou o LF-Ant, um novo protocolo de agrupamento para redes de sensores sem fio, inspirado no comportamento organizado e distribuído de colônias de formigas para otimizar o processo de eleição de líderes de grupo. A informação heurística é modelada por meio de um sistema de inferência nebulosa para lidar com as incertezas de medições de

distância entre os nós sensores. O objetivo é a eleição ótima de líderes de grupo e o controle do processo de possíveis retransmissões cooperativas.

A avaliação de desempenho foi realizada pela comparação de resultados de simulações entre o esquema proposto e um outro esquema *cross-layer*, o SCA com LEACH. As métricas de desempenho utilizadas foram o tempo de vida da rede como uma função da SNR do canal, número máximo de retransmissões, rodadas de operação e da distribuição do consumo de energia pela rede. O outro parâmetro avaliado foi a taxa de perda de pacote como uma função da SNR do canal. Em ambas as avaliações, o LF-Ant superou o SCA com LEACH, prolongando o tempo de vida da rede e diminuindo a taxa de perda de pacote.

A superioridade de desempenho do LF-Ant pode ser explicada pela eficiência de energia ao executar a diversidade cooperativa, pois os nós envolvidos na cooperação precisam transmitir apenas metade dos símbolos, individualmente. Além disso, a eleição biologicamente inspirada de líderes de grupo considera variáveis relacionadas à energia residual, qualidade e consumo das transmissões anteriores e lida com a incerteza das estimações de distância, pela modelagem da informação heurística nebulosa.

O próximo capítulo detalha a proposta de um protocolo projetado para redes de cuidados médicos, com o objetivo de diminuir o tempo de atraso médio no relato de emergência e a taxa de perda de pacote da rede.

## CAPÍTULO 5

---

# Uma Abordagem Cognitiva para o Protocolo LF-Ant

---

As RSSFs podem apresentar um impacto significativo em vários sistemas de cuidados médicos de emergência. Sensores podem ser usados para capturar sinais vitais de pacientes, repassar os dados para dispositivos eletrônicos portáteis utilizados por técnicos em emergência médica, médicos e enfermeiros. Em um evento de desastre em massa, as redes de sensores podem melhorar a habilidade para os primeiros socorros e o tratamento de pacientes [129].

Diversos protocolos disponíveis para telemedicina são baseados no funcionamento de redes de sensores sem fio no espectro não-licenciado. Um problema observado pelas redes que operam nessa parte do espectro é a dificuldade de incrementar a qualidade de serviço (*Quality of Service* – QoS). Atualmente, o espectro não-licenciado tem sido disputado por várias redes. A coexistência de múltiplas redes na mesma faixa espectral impõe desafios, *e.g.*, utilização espectral, segurança e colisões de transmissão, o que configura um problema para sistemas de monitoramento em redes de cuidados médicos, que devem prover tráfego com requisitos de QoS específicos [86].

O acesso espectral dinâmico é uma abordagem de comunicações de utilização espectral eficaz e promissora para redes de sensores sem fio de múltiplos saltos e com restrições de recursos, devido à sua característica de comunicação por ocorrência de eventos. Com o uso de rádios cognitivos o acesso espectral oportunista pode também auxiliar a implementação e manutenção de múltiplas redes de sensores sobrepostas e a eliminar colisões e atrasos excessivos [3]. O acréscimo das potencialidades do rádio cognitivo em redes de sensores sintetiza um novo paradigma, *i.e.*, rede de sensores sem fio cognitivas (RSSFC) [4].

Tecnologias cognitivas podem ser inspiradas pelo comportamento organizado de grupos de insetos [7]. Os sistemas bio-inspirados podem ainda ser estendidos para o projeto de algoritmos de roteamento e para a formação de estruturas hierárquicas em protocolos de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* – MAC). Em [8] os autores testaram a hipótese do pedômetro, em que formigas desérticas utilizam um mecanismo de odômetro para otimizar o percurso

entre o alimento e o formigueiro (os experimentos para teste da hipótese do pedômetro são apresentados no Apêndice A). É possível estabelecer um paralelo (e uma inspiração de projeto de protocolo) entre os diferentes comprimentos das pernas das formigas utilizadas nesses experimentos, com diferentes comprimentos de bloco utilizados no acesso espectral oportunista, em redes de sensores sem fio cognitivas.

Além do projeto das camadas superiores, o desvanecimento causado por múltiplos percursos nas transmissões sem fio aumenta a taxa de perda de pacote. Entretanto, esquemas resilientes a erro para transmissões de dados médicos devem ser desenvolvidos para aumentar a confiabilidade da rede [130]. A Diversidade em Modulação Cooperativa (DMC) pode combater os efeitos nocivos do desvanecimento sem a necessidade de um desperdício de largura de banda ou de energia. A DMC rotaciona o ângulo da constelação do sinal e entrelaça os símbolos das componentes transmitidas [113]. Entre os intervalos de entrelaçamento, o sensoriamento espectral pode ser usado para detectar a presença de usuários com maior prioridade de relato de dados, que sinalizem alguma requisição por prioridade de atendimento por meio do espectro primário.

Neste capítulo, o autor propõe um protocolo bio-inspirado e cooperativo, em que as relações entre os diferentes comprimentos das pernas das formigas desérticas são traduzidas para o projeto de uma estrutura hierárquica de uso dinâmico de recursos. Desse modo, pacientes com maior grau de emergência tendem a ter maior prioridade de acesso espectral oportunista.

## 5.1 Trabalhos Relacionados

O monitoramento do estado de saúde de pacientes é a aplicação mais estudada entre os sistemas pervasivos de cuidados médicos [130]. Os sinais vitais mais utilizados são relacionados às medições por eletrocardiografia, oximetria de pulso, temperatura corpórea, taxa de batimentos cardíacos e pressão arterial. A maioria dos estudos têm focado na captura e envio dos dados a um local remoto para avaliação especializada [131].

Malan *et al.* [129] apresentaram o CodeBlue, que consiste em um sistema para cuidados médicos de emergência, que integram sensores de sinais vitais de baixa potência, PDAs, e computadores de mesa. O CodeBlue melhora a habilidade para os primeiros atendimentos e facilita a alocação de recursos apropriados nos hospitais.

Ko *et al.* [132] propuseram o esquema MEDiSN para atender objetivos semelhantes aos do CodeBlue (*i.e.*, melhorar o processo de monitoramento de pacientes em hospitais e vítimas de desastre, assim como dos agentes de primeiros socorros), mas usaram uma arquitetura de rede diferente. Especificamente, diferente do sistema *ad hoc* usado no CodeBlue, o MEDiSN utiliza uma infraestrutura de rede sem fio de fácil implementação de pontos de repasse (*relay points*). Os pontos de repasse são implantados em posições fixas e se comunicam com um ou mais *gateways* para acesso à Internet. Os *moten*s que coletam os sinais vitais, denotados *miTags*, são associados com os pontos de repasse para enviar suas medições ao *gateway*. Em relação

ao CodeBlue, o MEDiSN apresenta a vantagem de economia de energia nos miTags, pois eles não precisam repassar as informações uns dos outros. Entretanto, a disponibilidade e o custo de implantação dos pontos de repasse, o que caracteriza fortemente a operação infraestruturada, pode ser inviável em uma situação de emergência. Além disso, a falha de operação de um ponto de repasse pode significar o isolamento de comunicação de diversos miTags.

As aplicações de monitoramento médico requerem o relato de eventos de emergência, assim como das informações fisiológicas medidas periodicamente. Sob condições críticas, os dados de emergência devem ter seu relato garantido, com um atraso aceitável para o tipo de sinal específico. Para atender a essa necessidade, mecanismos de priorização de relato dos dados de emergência precisam ser desenvolvidos. Benhaddou *et al.* [133] propuseram um esquema de controle de acesso ao meio para cuidados médicos, que considera um algoritmo de agendamento de serviços sobre o padrão IEEE 802.11, para prover a mais alta precedência para o tráfego de emergência médica. Os autores descrevem a arquitetura geral e propõem um esquema MAC para redes de sensores de cuidados médicos, que adapta a alocação do canal de acordo com a necessidade da rede. Entretanto, os protocolos de relato de emergência devem também atender às restrições de consumo de energia das redes de sensores [130].

Em [86], os autores estudaram o desempenho do tráfego de aplicações de telemedicina em uma rede de sensores cognitivas. Eles apresentaram uma rede cognitiva infraestruturada para monitoramento médico, em que as estações base cognitivas identificam o espectro disponível e encaminham os dados para as estações de cuidados médicos associadas. Eles também propuseram estratégias para prover o tráfego de monitoramento periódico e de emergência em tempo real. Os resultados mostram que um desempenho satisfatório pode ser alcançado para o tráfego de telemedicina. Entretanto, os autores não consideram o impacto do sistema proposto em outros parâmetros de QoS, como a taxa de perda de pacote. Além disso, a operação baseada em infraestrutura pode ser inviável em redes de emergência, pois elas podem requerer capacidades de funcionamento *ad hoc*, como auto-organização, operação distribuída e auto-recuperação.

## 5.2 Considerações sobre a Rede

A rede de cuidados médicos considerada neste capítulo é composta por nós sensores, com rádio cognitivo associados aos pacientes, que medem os sinais vitais e podem identificar seus graus de emergência. No esquema proposto, os graus de emergência (GE) são classificados em três tipos: GE Baixo, em que o paciente não apresenta risco de morte e seu *status* de saúde pode ser considerado regular; GE Alto, em que o paciente possui alterações em seus sinais vitais e apresenta riscos moderados de morte; e GE Crítico, em que o paciente apresenta um risco expressivo de morte por causa de seu *status* de saúde criticamente irregular. O método usado para gerar um diagnóstico de grau de emergência, baseado nos valores medidos pelos sensores, não é levado em consideração neste trabalho, mas diversos estudos relacionados podem ser encontrados em [86, 130, 132].

Todos os pacientes são considerados nós da rede e são dispostos aleatoriamente sobre uma região. Portanto, diversos nós precisam relatar os GEs correspondentes e as informações dos sinais vitais medidos para uma estação central (sorvedouro), que pode estar conectada a hospitais, clínicas, ou institutos de pesquisa por meio de enlaces de Internet. Neste capítulo, apenas o relato a partir dos nós sensores para o sorvedouro é analisado. Os nós compõem grupos e elegem líderes e vice-líderes de grupo. O processo de agrupamento e eleição é baseado no protocolo LF-Ant Cognitivo, explicado na Seção 5.3.

O líder de grupo agrega as informações medidas (e seus graus de emergência) a partir de vários nós internos ao grupo. O vice-líder auxilia o grupo no relato dos casos GE Alto e GE Crítico, sobre as faixas primárias. Esse é o relato de emergência intra-grupo e é considerado livre de erros, ao passo que o encaminhamento inter-grupos está sujeito aos efeitos do desvanecimento dos canais sem fio.

O vice-líder pode ainda realizar funções de sinalização para auxiliar as atividades do líder de grupo:

1. Avisar o líder de grupo, sobre uma requisição de relato de emergência;
2. Relatar as características das oportunidades espectrais (*e.g.*, frequência da portadora, largura de banda, taxa de erro etc.), se o líder de grupo solicitar;
3. Sincronizar as transmissões de dados.

### 5.3 O Protocolo LF-Ant Cognitivo

O LF-Ant é um protocolo de agrupamento projetado para redes de sensores sem fio, que é baseado no comportamento de formigas que precisam encontrar o percurso ótimo a partir da fonte até o destino final [116]. O principal objetivo é a eleição de líderes de grupo, em cada rodada, e controlar as possíveis retransmissões futuras. Neste capítulo, o protocolo LF-Ant Cognitivo é proposto, de modo a estender as capacidades do LF-Ant, pela inserção da operação cognitiva necessária para contemplar os requisitos de uma rede com uso espectral dinâmico. Essa operação pode prover qualidade de serviço e otimizar o relato do *status* de saúde dos pacientes monitorados para uma estação central médica.

Considere um grafo  $\mathcal{G}(V, E)$ , em que  $V$  é o conjunto de nós sensores em um grupo que são candidatos a se tornar um líder daquele grupo. O equivalente no algoritmo AntNet é o conjunto de arestas (percursos) candidatas entre dois vértices, *i.e.*, o ninho e o alimento. No protocolo LF-Ant Cognitivo,  $E$  representa o conjunto de enlaces de comunicações (arestas). Esse conjunto possui duas possibilidades: o enlace primário (licenciado) e o enlace secundário (cognitivo). No AntNet, as formigas vão a partir do ninho para o alimento e retornam diversas vezes, identificando novos percursos, de acordo com as mudanças do ambiente. No LF-Ant Cognitivo, os enlaces, e seus respectivos nós usuários, são escolhidos de acordo com as variações dos canais sem fio e com a ocorrência de um *status* de emergência de um paciente.

A inicialização do protocolo proposto inicia com a eleição aleatória dos líderes de grupo, da mesma maneira realizada pelo protocolo LF-Ant, descrito no Capítulo 4. Nas próximas eleições, cada nó julga seu potencial para líder de grupo, também pela variável *chance*. O esquema de agrupamento é apresentado no Algoritmo 6.1.

```

for  $s \leftarrow 1$  to #nós do
   $\tau_s \leftarrow \tau_s + \Delta\tau^\kappa$ ;
   $\tau_s \leftarrow \frac{\tau_s}{(1+\Delta\tau^\kappa)}$ ;
  Determine a variável linguística,  $\text{eta}_s$ ;
   $\eta_s \leftarrow$  defuzzificação de  $\text{eta}_s$ ;
   $p_s^\kappa = \begin{cases} \mathcal{A}_s = \frac{w\tau_s + (1-w)\eta_s}{w + (1-w)(|\mathcal{N}_s| - 1)}, & \text{if } s \notin \mathcal{M}^\kappa, \\ 0, & \text{if } s \in \mathcal{M}^\kappa, \end{cases}$ ;
   $\text{chance}_s \leftarrow p_s^\kappa$ ;
  Anuncie o valor de  $\text{chance}_s$ ;
  Receba os outros valores e os compare;
  if o valor de  $\text{chance}_s$  é maior do que os outros then
    | Anuncie uma CH_message;
  else
    | if o valor de  $\text{chance}_s$  é o próximo valor mais alto then
      | Anuncie uma vice CH_message;
    | else
      | Selecione o líder mais próximo como seu líder;
      | Associe ao grupo.
    | end
  end
end

```

**Algoritmo 5.1:** A eleição do líder de grupo e do vice-líder.

Para cada nó sensor, a respectiva formiga,  $\kappa$ , se dirige ao destino final e volta ao ninho, incrementando a intensidade de feromônio,  $\tau_s$ . No domínio da rede de sensores, isso é equivalente a cada nó sensor executar a Atribuição 4.1. A variável de atualização,  $\Delta\tau^\kappa$ , deve indicar a qualidade do percurso escolhido pela formiga. Essa é uma medida de desempenho do nó sensor na rodada anterior. No esquema proposto, a variável de atualização é dada por

$$\Delta\tau^\kappa = \frac{\varepsilon_s \cdot \rho_s}{\zeta_s \cdot T_s} + \frac{\alpha_s}{N_s}. \quad (5.1)$$

A variável de atualização na Fórmula 5.1 lida com componentes relacionadas ao consumo de energia, comportamento de perda de pacote e com uma componente cognitiva, que é a diferença significativa entre as abordagens propostas nos protocolos LF-Ant e LF-Ant Cognitivo. Ela privilegia os nós que conseguem identificar mais oportunidade espectrais na rede primária. O número total de lacunas espectrais detectadas até a rodada anterior é dado por  $\alpha_s$  e o número total de rodadas em que o sensoriamento espectral foi necessário é dado por  $N_s$ . As diferenças

entre os resultados do sensoriamento espectral realizado pelos nós sensores cognitivos podem ser atribuídas a efeitos de sombreamento, problema do terminal escondido e falhas de operação dos nós.

O restante do processo de eleição de líderes de grupo segue o protocolo LF-Ant, ou seja, cada nó calcula o valor da variável *chance*, compara com os valores dos outros nós e decide pela formação do grupo.

## 5.4 O Relato de Emergência

As formigas desérticas, *Cataglyphis fortis*, utilizam um modo de reconhecimento de rotas por meio de integração de percursos para monitorar suas posições correspondentes, relativas ao formigueiro. Isso as habilita a retornar por uma rota direta, em vez de refazer trajetos tortuosos que acontecem quando buscam por alimento em seu *habitat* desértico. O integrador de percursos requer dois tipos de informações de entrada: sobre a direção do percurso e sobre a distância percorrida, com base no mecanismo de odômetro da formiga [8].

Em redes de cuidados médicos, o relatório de informação sensoriada pode ser realizado por diferentes maneiras, usando parâmetros de transmissão diferentes, de acordo com o grau de emergência de um paciente. O protocolo proposto está voltado para o projeto de uma estrutura hierárquica de utilização dinâmica de recursos, que é baseada em experimentos de teste da hipótese de que formigas desérticas medem as distâncias percorridas por meio de um “contador de passos”.

De acordo com a hipótese do pedômetro, as formigas que se locomoveram para o alimento, por meio de pernas de dimensões normais e tiveram suas pernas modificadas em comprimento, ao chegar ao alimento, devem cobrir uma distância diferente nos seus trajetos de retorno ao formigueiro. Esses experimentos foram realizados pela manipulação dos comprimentos das pernas e, portanto, pela alteração do comprimento dos passos. As formigas com pernas alongadas (implantes) ou com pernas reduzidas (amputadas) apresentaram passos mais largos ou mais curtos, respectivamente, e alteraram a distância percorrida, que foi super-estimada pelas formigas que usaram implantes e sub-estimada pelas formigas amputadas. Além disso, os resultados experimentais indicaram que, após a inclusão de mecanismos de compensação devido aos métodos experimentais usados, as velocidades das formigas foram proporcionais aos comprimentos das pernas [8].

No protocolo proposto, essas relações entre os diferentes comprimentos de perna e seus desempenhos inspiram o projeto da estrutura hierárquica proposta de uso dinâmico de recursos. Assim como nas formigas desérticas, usuários diferentes devem alcançar diferentes resultados de desempenho em redes de cuidados médicos. Desse modo, o protocolo MAC e a alocação de recursos devem ser projetados para as necessidades de tais redes, de forma a prover qualidade de serviço e utilizar os recursos da rede de maneira eficaz. O esquema de relatório de emergên-

cia proposto relaciona a alocação de recursos com o grau de emergência dos pacientes. Esse esquema está apresentado no Algoritmo 6.2 e cada caso é detalhado a seguir.

```

for  $n \leftarrow 1$  to #não-eleitos do
  Confira o grau de emergência (GE);
  if ( $GE_n = \textit{Crítico}$ ) or ( $GE_n = \textit{Alto}$ ) then
    realize o sensoriamento espectral;
    if uma lacuna espectral (LE) foi identificada then
      % compartilhe o meio na rede primária;
      envie uma emergency_message sobre a LE;
      aguarde pela detecção do líder ou do vice-líder;
      if  $GE_n = \textit{Crítico}$  then
        | envie os dados medidos sobre o tamanho de bloco máximo;
      else
        | envie os dados medidos sobre o tamanho restrito de bloco;
      end
    else
      % compartilhe o meio na rede secundária;
      Acesse a rede secundária sobre um protocolo CSMA/CA;
    end
  else
    % compartilhe o meio na rede secundária;
    Acesse a rede secundária sobre um protocolo CSMA/CA;
  end
end

```

**Algoritmo 5.2:** O relatório de emergência realizado no interior de um grupo.

- **GE Baixo** – O relatório das informações medidas em um paciente com grau de emergência baixo (GE Baixo) pode ser visto como o caminhar de formigas amputadas, que, sob o domínio da rede, pode ser equivalente ao uso apenas da rede secundária, que apresenta uma alta probabilidade de colisões e baixa qualidade serviço. Nessa situação, a transmissão possui a menor prioridade, se comparada com o relatório de maiores graus de emergência. Quanto menor é a velocidade da formiga, menor é a prioridade para relatar os dados;
- **GE Alto** – O relato de dados de pacientes com grau de emergência alto (GE Alto) apresenta uma prioridade maior e tende a usar mais recursos da rede do que no caso descrito anteriormente. Isso é equivalente aos experimentos que usam formigas sem manipulação nas pernas, que apresentam passos maiores e são mais rápidas do que as formigas amputadas. Pacientes com GE Alto possuem mais direitos de uso de recursos da rede, do que aqueles com GE Baixo, mas apresentam menos direitos do que aqueles com GE Crítico. Eles podem acessar as oportunidades espectrais primárias para transmitir os dados, mas

o comprimento do bloco de transmissão (em *bytes*) é, predominantemente, menor do que nos casos de GE Crítico. Conseqüentemente, nas transmissões realizadas por nós com GE Alto, existem mais intervalos de sensoriamento espectral, o que habilita a detecção de pacientes com GE Crítico, ou de usuários licenciados. De fato, a representação de quão menor é a precedência de um nó com GE Alto em relação a um nó com GE Crítico é dada por

$$TCB = \frac{CB_A}{CB_C}, \quad (5.2)$$

em que TCB é taxa de comprimento de bloco para o uso espectral primário oportunista,  $CB_A$  é o comprimento do bloco para transmissão permitida para um nó com GE Alto (sobre um acesso oportunista) e  $CB_C$  é o comprimento do bloco para a transmissão de dados de um nó com GE Crítico (sobre um acesso oportunista). Um valor pequeno de TCB indica que nós com GE Alto possuem, continuamente, menos acesso ao espectro primário, em favor de nós com GE Crítico. Por exemplo, se a TCB é igual a zero, então isso significa que nós com GE Alto não têm permissão para uso do espectro primário, de maneira oportunística. Nesse caso, todas as oportunidades espectrais detectadas são alocadas para nós com GE Crítico. Por outro lado, se a TCB é igual a um, então ambos os nós com GE Alto e Crítico apresentam o mesmo direito de transmissão de dados sobre as bandas primárias.

- **GE Crítico** – As formigas com implante apresentam passos maiores no teste do odômetro. Após a compensação do efeito causado pela cola adicionada às suas pernas, as formigas com implante podem ser caracterizadas pela maior velocidade de trajeto e o relato dos dados de pacientes com GE Crítico pode ser representado pelo movimento dessas formigas. Esses nós possuem a maior prioridade (na rede de cuidados médicos) e devem usar mais recursos de transmissão. Assim como para os nós com GE Alto, os nós com GE Crítico são significativamente auxiliados pelos respectivos líder e vice-líder, porque esses podem sensoriar as requisições de emergência sobre bandas primárias, por meio do sensoriamento espectral. A formação dos grupos baseada no LF-Ant Cognitivo é decisiva para a eleição dos nós que podem detectar mais oportunidades de acesso espectral.
- **Usuários Primários** – Apesar de não fazerem parte da rede de cuidados médicos considerada, os usuários primários possuem prioridade absoluta de acesso espectral (nas faixas primárias) e não podem ser prejudicados por um usuário cognitivo.

O roteamento inter-grupos também é inspirado pelo comportamento das formigas desérticas. O protocolo é baseado no critério de menor distância, entre o nó sensor cognitivo e o nó sorvedouro. A informação é encaminhada de um grupo para o outro, em direção ao nó sorvedouro. Portanto, a estratégia de roteamento utiliza a informação de distância entre os grupos, para determinar o menor percurso para o nó sorvedouro. O processo de encaminhamento pode

ser visto como o uso do mecanismo de odômetro em uma fase de configuração, em que as distâncias de possíveis rotas poderiam ser medidas. Na prática, os nós devem comparar as distâncias e escolher a menor delas. Além disso, a direção do encaminhamento deve seguir sempre rumo ao nó sorvedouro, como se um aparato de navegação pudesse ser acessado. A união dessas características evita a ocorrência de laços de percurso e otimiza a escolha de rotas a partir do grupo fonte até o nó sorvedouro. Essa estratégia de roteamento combina um estágio baseado em estado do nó, que é representado pela eleição dos nós para líder e vice-líder (realizada pelo LF-Ant Cognitivo), com uma estratégia baseada no critério de menor distância (inspirada pelo mecanismo de odômetro das formigas) sobre os nós eleitos na formação dos grupos.

## 5.5 Diversidade em Modulação Cooperativa com Sensoriamento Espectral

O roteamento inter-grupos guia a informação agregada pelo líder de grupo fonte, ao passo que o vice-líder pode cooperar se erros ocorrerem. Entretanto, ambos precisam detectar novas requisições de relato de emergência e devem ser capazes de encaminhar os dados associados com eles. Esse processo está apresentado no Algoritmo 6.3. A diversidade em modulação cooperativa é executada nos mesmos casos e de maneira semelhante àquela descrita no Capítulo 4. A principal diferença é a inclusão do sensoriamento espectral realizado nos intervalos de entrelaçamento das componentes dos símbolos.

Um exemplo do processo de entrelaçamento é apresentado na Tabela 5.1. O primeiro símbolo transmitido pelo líder de grupo fonte possui a componente em quadratura do segundo símbolo ( $Q_2$ ), no primeiro intervalo de tempo. Concomitantemente, o vice-líder realiza o sensoriamento espectral (SE). No segundo intervalo de tempo, o vice-líder transmite um símbolo com a componente em quadratura do primeiro símbolo ( $Q_1$ ) e o líder de grupo fonte realiza o sensoriamento espectral. Esse mecanismo habilita a detecção de uma requisição para relato de emergência, que interrompe a diversidade cooperativa para transmitir por QPSK convencional o pacote agregado e repassa a informação de prioridade mais alta.

Nesse caso, o repasse para o próximo grupo pode ser realizado pelo vice-líder, se a requisição por relato de emergência é proveniente de um outro grupo da rede. Então, o líder de grupo fonte continua transmitindo o restante do pacote agregado, só que por QPSK convencional. Caso contrário, se a requisição por relato de emergência é oriunda do mesmo grupo, então o líder de grupo fonte é responsável por repassar os dados correspondentes. Como consequência, o vice-líder continua a transmissão do pacote agregado, por QPSK convencional.

Se requisições por relato de emergência não são detectadas pelo sensoriamento espectral, então o líder de grupo fonte e o vice-líder continuam colaborando por meio da DMC. O restante do processo de transmissão, modelo do canal e decodificação no receptor ocorrem da mesma maneira que no LF-Ant.

```

for  $i \leftarrow 1$  to #pacotes do
  O líder transmite um novo pacote;
  O receptor confere o CRC;
  if  $CRC == \textit{correto}$  then
    | o receptor envia um ACK;
  else
    o receptor envia um NACK;
     $N_r = 0$ ;
    for  $j \leftarrow 1$  to  $N_r^{max}$  do
      Líder transmite  $Q_2$  e  $I_1$  na alocação temporal 1;
      Vice-líder realiza o sensoriamento espectral na alocação temporal 1;
      Vice-líder transmite  $Q_1$  e  $I_2$  na alocação temporal 2;
      Líder realiza o sensoriamento espectral na alocação temporal 2;
      if Uma requisição de relato de emergência for detectada then
        | Vice-líder encaminha a informação de emergência;
        | Líder transmite o restante do pacote por QPSK convencional;
      else
        | Ambos o líder e o vice-líder continuam cooperando;
      end
      o receptor confere o CRC;
      if  $CRC == \textit{correto}$  then
        | o receptor envia um ACK;
        | break;
      else
        | o receptor envia um NACK;
      end
    end
  end
end

```

**Algoritmo 5.3:** A comunicação entre os grupos. A diversidade em modulação cooperativa é solicitada se erros ocorrerem.

**Tabela 5.1** O entrelaçamento de dois símbolos no protocolo LF-Ant Cognitivo.

Alocação temporal	Intervalo 1		Intervalo 2
Líder fonte	$Q_2$	$I_1$	SE
Vice-líder	SE		$Q_1$ $I_2$

## 5.6 Análise de Desempenho

Para avaliar o desempenho da técnica proposta, simulações em Matlab 7 foram realizadas. A rede de sensores é composta de 100 nós, que estão distribuídos em cinco grupos. Portanto, cinco líderes de grupo e vice-líderes são eleitos a cada rodada. Os nós estão dispostos aleatoriamente em uma área de 100 metros  $\times$  100 metros. O nó sorvedouro está localizado nas coordenadas

$x = 50$  e  $y = 250$  metros. A taxa de transmissão adotada é de 128 kbit/s e o comprimento do pacote gerado em cada nó sensor é de 128 bits.

A probabilidade de um nó apresentar um grau de emergência específico ( $P_{GE}$ ) é distribuída de acordo com três conjuntos distintos. O primeiro conjunto é denotado C.1 e contém 60 nós dispostos aleatoriamente sobre a rede. O segundo e o terceiro conjunto são denotados C.2 e C.3 e contêm 30 e 10 nós, respectivamente. Os valores considerados de  $P_{GE}$  para os três conjuntos estão representados na Figura 5.1.

As métricas de desempenho avaliadas são o atraso médio e a taxa de perda de pacote. O ângulo de rotação da constelação é selecionado para  $\theta = 27^\circ$ , porque é ótimo para o esquema QPSK [128]. O número máximo de retransmissões é quatro, *i.e.*,  $N_r^{\max} = 4$  e um CRC apresenta  $C = 16$  bits.

Para as simulações, a informação sobre a ocupação espectral e os requisitos It is assumed in this work that the information about the spectrum occupancy and the requests for emergency reporting are available to the sensor nodes from a database search engine [134]. Spectrum sensing data provided to database system can be obtained by classical methods, such as energy detection, cyclostationary feature detection or matched filter detection [61].

Para as simulações, apesar de identificar oportunidades espectrais ou requisições de relato de emergência, a operação de sensoriamento espectral está restrita ao nível de detecção de resultados em bancos de dados dinâmicos [134]. Portanto, nenhum método de varredura espectral é adotado, e sim, apenas uma consulta aos bancos de dados que apresentam as oportunidades espectrais e as requisições de relato de emergência. Os dados do sensoriamento espectral providos ao sistema de busca pode ser obtido por métodos clássicos, tais como detecção de energia, detecção de propriedades cicloestacionárias [61].

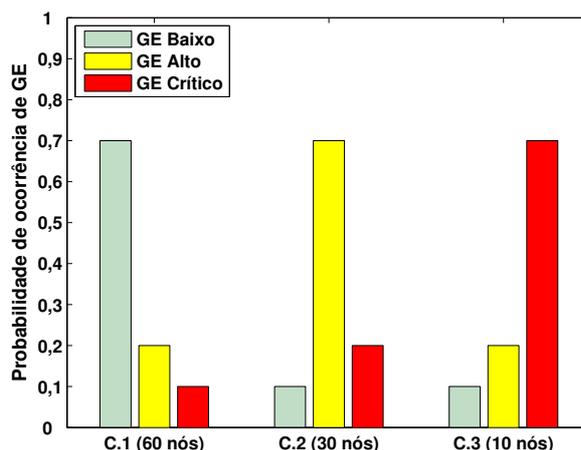
O fator  $w$  é igual a 0,5, pois isso assegura um equilíbrio satisfatório entre o nível de feromônio e a informação heurística nebulosa. A informação heurística é tão relevante quanto o nível de feromônio, pois ela pode identificar os nós de melhor posicionamento. Além disso,  $\eta_s$  possui forte impacto nas primeiras eleições, porque o valor de  $\tau_s$  ainda é similar para todos os nós. De fato, cada nó apenas calcula  $p_s^k$  após a primeira rodada, na qual as cinco eleições são realizadas aleatoriamente. Após comparar os diferentes valores de regra de decisão, a formiga correspondente de um grupo específico identifica o percurso ótimo (elege o líder de grupo). Esse é o critério de parada da simulação em cada rodada.

A informação heurística nebulosa é processada pelo *Toolbox* de Lógica Nebulosa do Matlab e os parâmetros configurados são: [135, 136]:

- Sistema de inferência nebulosa: *Mandani*;
- Método E: *min* (minimum);
- Implicação: *min* (minimum);
- Agregação: *max* (maximum);

- Defuzzificação: *Centróide*.

Os valores usados para representar as variáveis de entrada são alcançadas por uma operação de normalização, em que o denominador é o valor de área circular em torno do nó sensor. Nas simulações, o raio é igual 30 m para a variável *distancia\_local* e 50 m para a variável *dispersao\_CHs*.

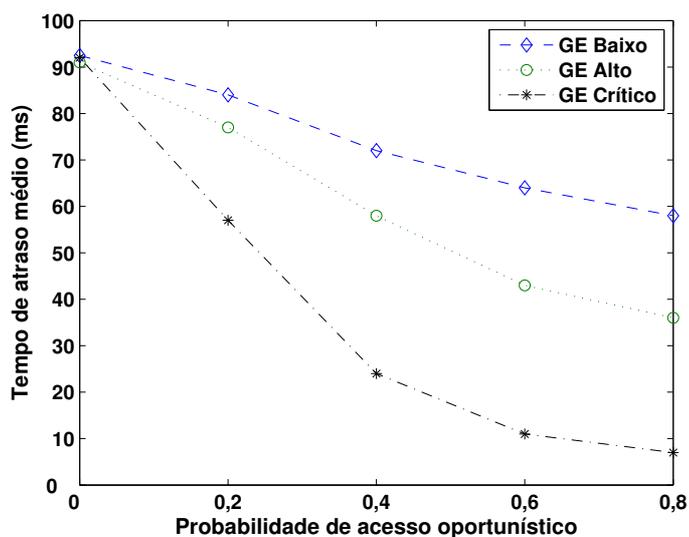


**Figura 5.1** Distribuição de probabilidade de um nó apresentar um grau de emergência específico.

O tempo de atraso médio (ms) relacionado à probabilidade de acesso oportunista ( $P_{ao}$ ), considerando os três graus de emergência, é avaliado na Figura 5.2. Ele diminui à medida que a probabilidade de acesso oportunista aumenta. Usuários migram da operação na rede secundária para a rede primária, o que alivia a alta concorrência no espectro não-licenciado e melhora a qualidade de serviço por meio do uso do espectro licenciado disponível. Os nós que correspondem a GE Crítico apresentam o melhor desempenho em todos os valores de  $P_{ao}$ . O menor valor de tempo de atraso médio é 7 ms, para  $P_{ao} = 0,8$ .

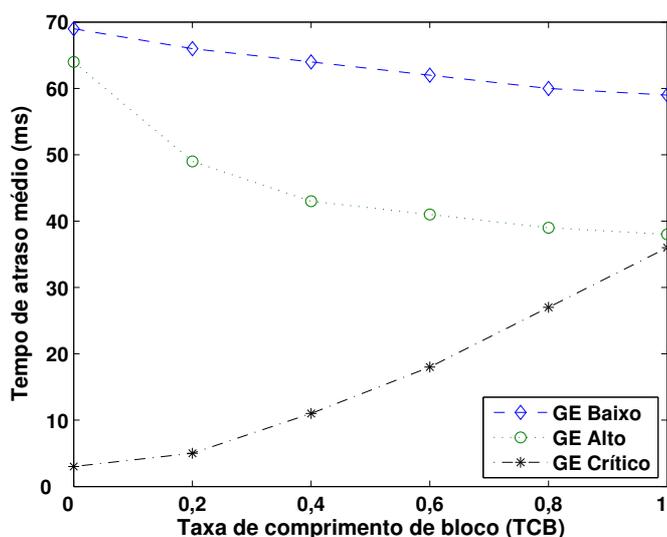
Os nós com GE Alto apresentam um desempenho intermediário, porque possuem menor prioridade e menor alocação no uso oportunista do espectro, *i.e.*, nessa simulação a taxa de comprimento de bloco é 0,4. O menor valor alcançado de tempo de atraso médio é 36 ms, para  $P_{ao} = 0,8$ . Os nós com GE Baixo, que são restritos ao uso de recursos da rede secundária, apresentam o pior desempenho, com o menor valor de atraso médio, igual a 58 ms, para  $P_{ao} = 0,8$ . O espectro secundário muito disputado contribui para esse desempenho degradado. Em  $P_{ao} = 0$  os usuários compartilham um desempenho similar correspondente a um atraso de 91 ms (em média). Nesse caso, devido à probabilidade nula de acesso oportunista, todos os nós da rede estão restritos apenas a usar a rede secundária.

A Figura 5.3 mostra a avaliação de desempenho relacionada ao tempo de atraso médio como uma função da taxa de comprimento de bloco, considerando  $P_{ao} = 0,6$ . Os nós com GE Baixo e GE Alto possuem seus desempenhos melhorados à medida que a taxa de comprimento de bloco aumenta. Essa melhoria é mais expressiva em nós com GE Alto, porque eles podem usar



**Figura 5.2** Tempo de atraso médio como uma função da probabilidade de acesso oportunista do espectro, sobre uma TCB igual a 0,4.

continuamente as oportunidades espectrais por períodos mais longos, à medida que o valor da TCB aumenta. Se o mesmo tamanho de bloco é assegurado para nós com GE Alto e Crítico ( $TCB = 1$ ), então o desempenho desses nós é similar (38 ms e 36 ms, respectivamente). Por outro lado, se a taxa de comprimento de bloco é nula, então apenas nós com GE Crítico são permitidos a usar as oportunidades espectrais na rede primária, o que resulta no menor tempo de atraso médio desses nós (3 ms). Apesar de melhorar o desempenho dos nós com GE Baixo, o incremento da TCB não causa tanto impacto (comparado com as demais classes), *i.e.*, apenas uma variação de 69 ms para 59 ms.



**Figura 5.3** Tempo de atraso médio como uma função da taxa de comprimento de bloco, sobre  $P_{ao} = 0,6$ .

Os resultados relativos à taxa de perda de pacote (TPP) como uma função da SNR média, para os três casos de emergência considerados, são apresentados nas Figuras 5.4, 5.5, 5.6, em que  $P_{ao} = 0,6$  e  $TCB = 0,4$ . Uma comparação entre o desempenho das transmissões com diversidade em modulação cooperativa (se necessária) e sem a aplicação dessa técnica também é apresentada. Em todos os casos, os valores de TPP diminuem à medida que a SNR média aumenta, o que é um comportamento esperado. Além disso, quanto maior é o grau de emergência, menor é a TPP. Isso pode ser explicado porque existe um decréscimo no número de colisões pelo uso de faixas espectrais disponíveis, permitido aos nós com GE Crítico e, com as restrições impostas pela taxa de comprimento de bloco, aos nós com GE Alto.

O uso da diversidade em modulação cooperativa também melhorou o desempenho da taxa de perda de pacote para os três casos de GE. Entretanto, a diferença entre o desempenho da comparação entre o uso do DMC e sem ele é menos expressivo no caso dos nós com GE Crítico, porque os enlaces primários usados pelos respectivos nós são menos disputados, com menos colisões. Consequentemente, eles já apresentam uma melhor qualidade de serviço.

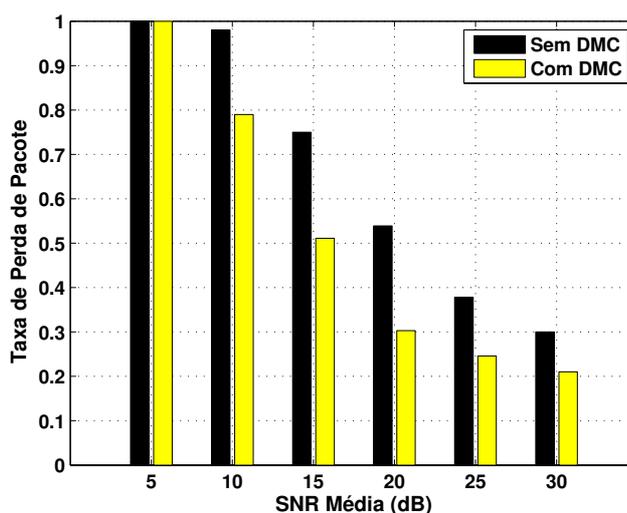
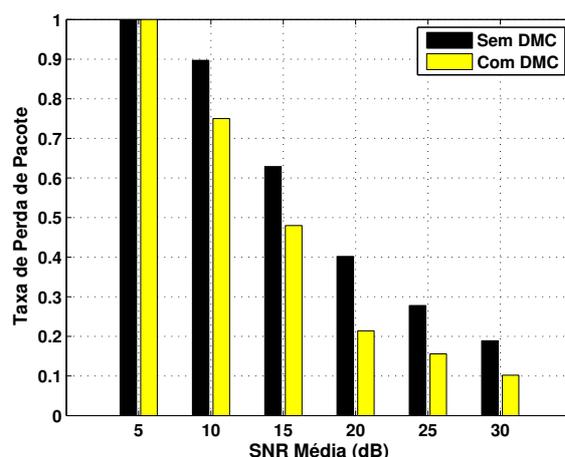


Figura 5.4 Taxa de perda de pacote para os nós com GE Baixo, como função da SNR média.

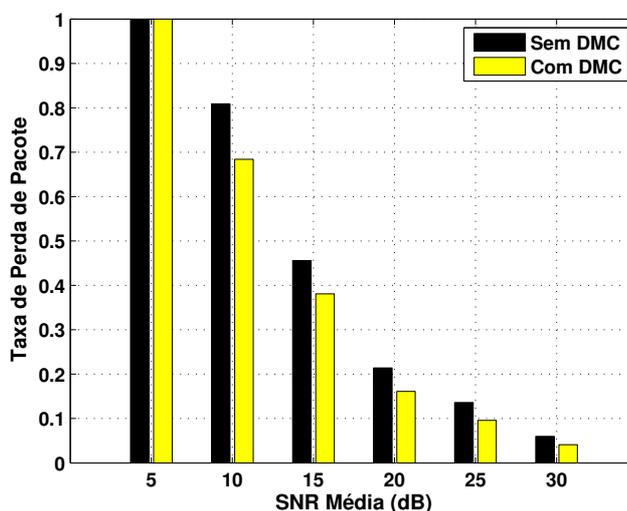
## 5.7 Conclusão

As redes de sensores sem fio para cuidados médicos apresentam diversas potencialidades para o monitoramento de pacientes e para desempenhar relatos de emergência. Entretanto, elas estão sujeitas à alta concorrência pelo acesso ao espectro não-licenciado, o que diminui a qualidade do serviço prestado. A operação cognitiva utiliza o espectro de maneira mais eficaz e pode melhorar o desempenho das redes de cuidados médicos.

Neste capítulo, foi apresentado o protocolo LF-Ant Cognitivo, que é inspirado pelo comportamento de formigas e, por meio de uma capacidade cognitiva, elege os nós mais preparados para coordenar a operação de um grupo. O líder e o vice-líder de grupo colaboram para garantir



**Figura 5.5** Taxa de perda de pacote para os nós com GE Alto, como função da SNR média.



**Figura 5.6** Taxa de perda de pacote para os nós com GE Crítico, como função da SNR média.

a alocação dinâmica de recursos, de modo que os pacientes que apresentam os maiores graus de emergência devem ser privilegiados. A alocação dinâmica de recursos foi inspirada por experimentos com manipulação das pernas de formigas desérticas. Além disso, a diversidade em modulação cooperativa com sensoriamento espectral foi proposta para atuar de maneira adaptativa e ajudar no combate ao desvanecimento dos canais sem fio.

Os resultados de simulação mostraram um decréscimo no tempo de atraso médio necessário para relatar os casos de emergência. Além disso, a taxa de perda de pacote foi também reduzida, principalmente quando a diversidade em modulação cooperativa foi usada.

O capítulo seguinte apresenta o estudo da diversidade em modulação cooperativa em redes heterogêneas, com destaque para a avaliação do impacto de erros de estimação do canal, do fator de energia e da profundidade de entrelaçamento. Adicionalmente, o desempenho da rede heterogênea com eleição por mapa de energia e acesso oportunístico é analisado.

## CAPÍTULO 6

---

# Diversidade em Modulação Cooperativa Aplicada a Redes de Sensores sem Fio Heterogêneas

---

As redes de sensores sem fio (RSSF) consistem na tecnologia de comunicação entre nós sensores instalados em determinadas regiões, para relatar o monitoramento distribuído de um fenômeno ou processo específico. Sensores de diversos tipos têm sido utilizados para melhorar a qualidade de observação de funções de vigilância, agricultura de precisão, detecção de agentes poluentes ou substâncias químicas, acompanhamento em cuidados médicos e previsão de desastres naturais [6].

A utilização de grupos na formação da rede aumenta o alcance das comunicações fim-a-fim, visto que os dados monitorados pelos nós sensores simples são agregados pelo líder de grupo (*Cluster-Head* – CH) e repassados para o nó sorvedouro, por meio de múltiplos saltos, líder a líder. Além disso, a formação de grupos na rede possibilita uma diminuição do consumo de energia, visto que, em geral, a distância de transmissão entre o nó sensor simples e o líder de grupo é menor do que a distância do nó simples ao nó sorvedouro [88]. Nesse tipo de rede, uma rodada de operação é definida como o intervalo de tempo necessário para que todos os grupos disponibilizem seus dados para transmissão.

Algumas aplicações permitem o planejamento de alocação diferenciada de recursos em redes de sensores sem fio, de modo que, por exemplo, alguns nós sensores possuam maior capacidade de armazenamento de energia do que outros. Se os nós sensores possuem os mesmos equipamentos e programas, então a RSSF é classificada como homogênea. Por outro lado, se a rede possui nós com diferentes capacidades e funções, ela é dita heterogênea [137]. Nesse caso, há uma relação de custo-benefício entre a quantidade de recursos alocados e o desempenho da rede. Uma rede de sensores heterogênea e formada por grupos pode ter líderes com maior energia do que os nós simples, visto que os líderes desempenham funções de maior complexidade e maior consumo de energia [51].

Entretanto, em redes que utilizam uma arquitetura heterogênea, a maneira como os recursos são previamente distribuídos pode influenciar de maneira significativa o desempenho do sistema. Especificamente, em uma rede que utiliza cooperação entre os nós, a capacidade de energia alocada deve ser suficiente para garantir essa colaboração por um maior número de rodadas e diminuir a taxa de perda de pacote. Métodos de tomadas de decisão por meio da informação de mapas de energia também podem auxiliar na melhoria do desempenho, principalmente se o acesso espectral oportunístico for utilizado.

Este capítulo apresenta a avaliação de desempenho de uma rede de sensores sem fio heterogênea cooperativa, com o objetivo de identificar valores específicos de capacidade de energia entre os nós, de modo a diminuir a taxa de perda de pacote da rede. Diferentes cenários de qualidade de canal são avaliados, para fatores distintos de energia inicial, que diferenciam a capacidade de armazenamento de energia dos nós simples e líderes de grupo. A eleição de vice-líderes de grupo com base na informação do mapa de energia também é avaliada, assim como o desempenho da rede heterogênea com acesso espectral oportunístico. Além disso, o desempenho da rede é analisado sob a condição da presença de erros de estimação da resposta ao impulso do canal. Mesmo sob essa condição, a rede apresenta uma diminuição da taxa de perda de pacote, ao passo que o tempo de vida é influenciado pela característica de distribuição heterogênea do sistema.

O capítulo está organizado da seguinte maneira: a Seção 6.1 apresenta alguns trabalhos correlatos às técnicas avaliadas. A Seção 6.2 apresenta os resultados relativos ao impacto dos erros de estimação do canal, com a descrição dos estimadores de módulo e fase. O impacto do fator de energia na rede heterogênea e da profundidade de entrelaçamento é avaliado na Seção 6.3. O desempenho da rede heterogênea com eleição por mapa de energia e acesso oportunístico é analisado na Seção 6.4 e as considerações finais são apresentadas na Seção 6.5.

## 6.1 Trabalhos Relacionados

Redes de sensores sem fio heterogêneas têm despertado o interesse de pesquisadores. Problemas complexos que abrangem condições ambientais diferentes exigem nós sensores específicos para as tarefas individuais, que resultam em redes heterogêneas. Uma vez que nós sensores de diferentes tipos podem ser incompatíveis, uma arquitetura de gerenciamento geral para esses cenários heterogêneos é necessária. Nós individuais devem ser reconfigurados e atualizados durante o seu tempo de vida [138].

A arquitetura MANNA faz o gerenciamento funcional e de informação para redes de sensores, que oferece funções de estabelecimento de configurações para os dispositivos [48]. Cada um dos nós de gerenciamento é responsável por um grupo de nós sensores. A arquitetura define as unidades e a troca de informações entre os dispositivos.

A rede de suporte à deposição (*Deployment Support Network* – DSN), para observar, controlar e reprogramar uma RSSF em operação, é apresentada em [139]. Sua maior desvantagem

é a necessidade de uma rede *backbone* sem fio adicional. As Redes de Sensores Globais (*Global Sensor Networks* – GSN) oferecem um *middleware* para a integração flexível e rápida e para a deposição de redes de sensores heterogêneas.

Em [140], o protocolo HACC (*Heterogeneous-Aware Cooperative Clustered*) é apresentado, em que três níveis funcionais hierárquicos são considerados na rede heterogênea: líderes de grupo; líderes de grupo cooperativos; e nós sensores (nós simples). Os nós da rede processam algoritmos para decidir qual dos três tipos de função devem desempenhar na rodada correspondente. A rede é formada por diferentes capacidades de armazenamento de energia. Os nós básicos têm uma energia inicial padrão  $E_{\text{nrms}} = E_0$ , enquanto os nós avançados têm uma energia inicial maior, de modo que  $E_{\text{adv}} = (1 + \alpha) \cdot E_0$ . Há também os nós intermediários, em que  $E_{\text{int}} = (1 + \beta) \cdot E_0$ , em que  $\beta = \alpha/2$ . Com esses três níveis de heterogeneidade, aqueles que possuem mais energia a cada rodada, são eleitos para as funções de maior consumo de energia (líder e líder cooperativo). A diversidade cooperativa entre os nós é implementada por meio de códigos de bloco espaço-temporais, para as transmissões de maior distância, ao nó sorvedouro. A avaliação de desempenho, para  $\alpha = 3$ , apresenta uma melhoria dos resultados de consumo de energia médio da rede, com relação ao protocolo LEACH [52] e EEHC [141]. Entretanto, o protocolo HACC não avalia o desempenho da rede para diferentes valores de  $\alpha$ , de modo a identificar os diferentes comportamentos da rede.

Guidoni *et al.* [142, 143] propuseram um modelo de mundo pequeno para auxiliar no projeto de redes de sensores sem fio heterogêneas. O modelo apresentado considera o padrão de comunicação da rede para criar atalhos direcionados ao nó de monitoramento, diminuindo a latência na transmissão dos dados. Os pontos finais desses atalhos são nós com um maior alcance de transmissão e com reservas de armazenamento de energia capazes de transmitir por tais distâncias. Entretanto, esse tipo de comunicação causa interferência expressiva nos canais sem fio, de modo que o modelo apresentado também considera as potencialidades dos sistemas de multi-interface e multi-canal, da Camada de Controle de Acesso ao Meio, para reduzir o número de colisões durante as comunicações. Os resultados de simulação mostraram que com apenas poucos nós de maior capacidade, uma rede de sensores sem fio pode ser adaptada para uma rede heterogênea com propriedades de mundo pequeno. Adicionalmente, se os atalhos são direcionados ao nó de monitoramento e atribuídos a um canal sem fio diferente, o número de colisões e a latência da comunicação de dados é reduzida.

Sistemas heterogêneos podem ter a complexidade de processamento presente nos líderes de grupo e centros de fusão reduzida, assim como podem diminuir o requisito relativo à potência de transmissão. Resultados de simulação apresentados em [144] demonstram esse ganho de desempenho, em que os autores combinam a estimação dos coeficientes do canal com a prevenção a falhas dos nós sensores, por meio de técnicas de controle de erros. Em [145], os autores consideram o problema de regras de fusão em um esquema de detecção distribuída, se as decisões binárias locais realizadas pelos sensores são transmitidas por enlaces sem fio e sujeitos ao desvanecimento e ruído. A avaliação de desempenho mostrou que à medida que a SNR do

canal aumenta os erros de estimação do canal diminuem e o desempenho do sistema tende a um cenário ideal, com estimação perfeita do canal no centro de fusão. Em [146], a técnica de diversidade em modulação cooperativa diminui a taxa de perda de pacote do sistema, considerando a ausência de erros de estimação da resposta ao impulso (RI) do canal.

Mapas de energia em redes de sensores sem fio têm sido utilizados para representar a quantidade de energia disponível em cada parte da rede e esse uso pode estender o tempo de vida. Em [147], os autores propõem um sistema para obter uma visão geral do estado de energia residual, por meio da aplicação de um método de agregação intra-rede. Os resultados de simulação mostram que o sistema proposto apresenta desempenho satisfatório, comparado a um método de extração individual por nó do nível de energia. Um método de predição de mapa de energia foi proposto em [148], em que cada nó tenta estimar a quantidade de energia a ser gasta futuramente e enviar essa informação, juntamente com o valor de energia disponível, ao nó de monitoramento. O resultados de simulação mostram que a técnica de predição apresenta um desempenho superior em economia de energia, perante um esquema de simples extração individual por nó. Em [51], os autores analisam as configurações de uma rede heterogênea, quanto ao consumo de energia, mas não consideram a capacidade cooperativa entre os nós.

## 6.2 Impacto dos Erros de Estimação do Canal

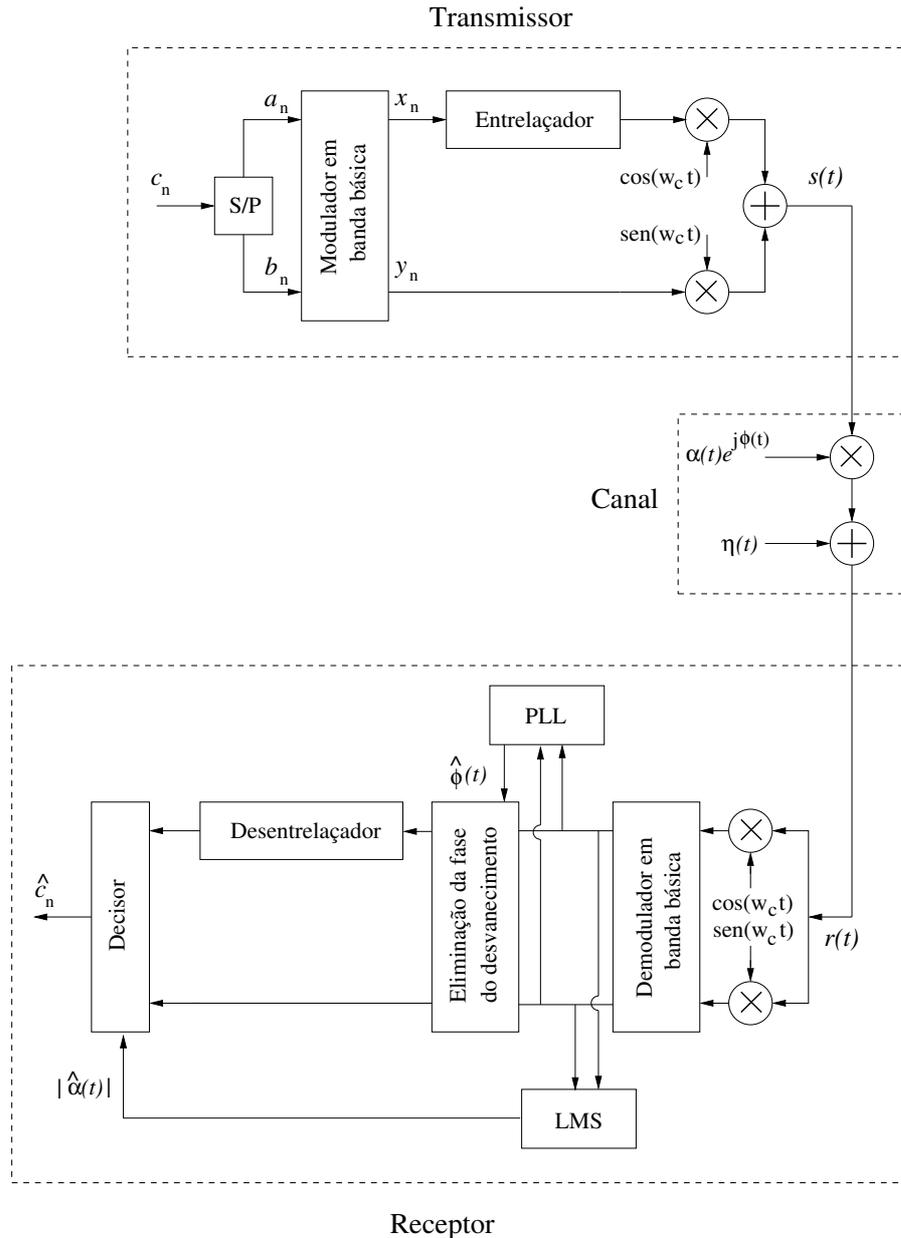
Nesta seção, o algoritmo LMS (*Least Mean Square*) e um PLL (*Phase-Lock Loop*) de primeira ordem são utilizados para a estimação do módulo e da fase do canal, respectivamente. O diagrama de blocos do sistema de comunicações considerado está ilustrado na Figura 6.1. Em particular, a informação de fase é utilizada para compensar o deslocamento de fase provocado pelo canal.

### 6.2.1 O Estimador de Módulo

O algoritmo LMS foi utilizado para obter a estimativa do módulo da resposta ao impulso do canal com desvanecimento por meio da equação recursiva [149]

$$\hat{\alpha}(n+1) = \hat{\alpha}(n) + \mu s(n)e^*, \quad (6.1)$$

em que  $\mu$  é o passo do algoritmo e  $e(n) = r_n - \hat{\alpha}_n \hat{s}(n)$ . Durante o processo de treinamento  $\hat{s}(n) = s(n)$ . Após o treinamento, a estimativa desse sinal é fornecida pelo decisor.



**Figura 6.1** Diagrama de blocos do sistema de comunicações considerado. O algoritmo LMS e um PLL de primeira ordem são utilizados para a estimação do módulo e da fase do canal, respectivamente.

### 6.2.2 O Estimador de Fase

A estimação da fase do desvanecimento é obtida por meio de um filtro recursivo. Mais precisamente, utiliza um PLL de primeira ordem, cuja expressão de atualização de fase é dada por [10]

$$\hat{\phi}(n + 1) = \hat{\phi}(n) + \kappa u_{\phi}(n), \tag{6.2}$$

em que a constante  $\kappa$  é o passo (ou ganho) do filtro recursivo e  $u_{\phi}(n)$  representa um detetor de erro de fase, dado por [149]

$$u_{\phi}(n) = \text{Im}[e^{-j\hat{\phi}(n)} s_n^* r_n]. \tag{6.3}$$

O objetivo do PLL é maximizar a função de verossimilhança da fase, fazendo com que a saída do detetor de erro de fase seja nula. Apesar de sua simplicidade, a utilização deste esquema de detecção de fase leva a resultados satisfatórios.

### 6.2.3 Avaliação de Desempenho

A rede heterogênea considerada é formada por 100 nós sensores simples (com energia inicial de 3 mJ) e 25 líderes de grupo (com energia ilimitada). Os nós sensores são alocados em uma rede de dimensões 100 m  $\times$  100 m e o nó sorvedouro está localizado nas coordenadas  $x = 25$  m and  $y = 150$  m. O número máximo de retransmissões permitidas é três.

O esquema de modulação QPSK foi utilizado. Na diversidade em modulação cooperativa, o ângulo de rotação é igual a  $27^\circ$  e 50 símbolos de treinamento foram utilizados. Os passos do LMS e do PLL foram 0,25 e 0,6.

O desempenho do sistema foi avaliado com relação à taxa de perda de pacote da rede e à rodada para a primeira e para a última inativação de nó. Em ambos, a razão sinal-ruído média do canal é variada de 5 a 30 dB.

A Figura 6.2 apresenta a taxa de perda de pacote da rede, com relação à SNR do canal. Conforme o esperado, maiores valores de PLR foram identificados para SNRs baixas. Além disso, em todos os cenários, o modo sem diversidade cooperativa apresenta o pior desempenho, visto que apenas o mecanismo de retransmissão é utilizado para tentar entregar os pacotes de maneira correta ao receptor. Além disso, é possível identificar o impacto dos erros de estimação do canal na diversidade em modulação cooperativa. O desempenho do esquema DMC com estimação do canal apresentou um comportamento intermediário entre os esquemas QPSK simples e DMC com a estimação perfeita do canal. Em 30 dB, a PLR de ambos os esquemas é nula.

A Figura 6.3 apresenta a avaliação do tempo de vida da rede, sob a observação de qual é a rodada que corresponde à primeira inativação de nó na rede. Por outro lado, a Figura 6.4 mostra a avaliação do tempo de vida da rede, sob a observação de qual é a rodada que corresponde à última inativação de nó da rede. Em ambos os casos, o esquema QPSK (sem diversidade) apresentou os valores máximos, que correspondem à rodada 449. Essa superioridade ocorre pois no esquema que não utiliza a diversidade em modulação cooperativa, vice-líderes de grupo não são eleitos e não participam do processo de retransmissão. Portanto o consumo de energia é menor.

## 6.3 Impacto do Fator de Energia e da Profundidade de Entrelaçamento

Nesta seção, o impacto do fator de energia e da profundidade de entrelaçamento da DMC é avaliado, com foco para a análise do comportamento da Taxa de Perda de Pacote (TPP).

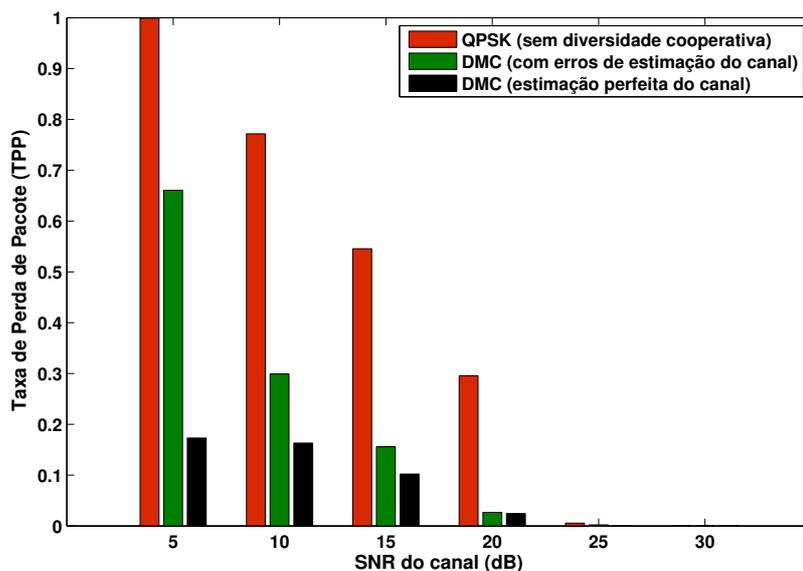


Figura 6.2 Taxa de perda de pacote como função da SNR do canal.

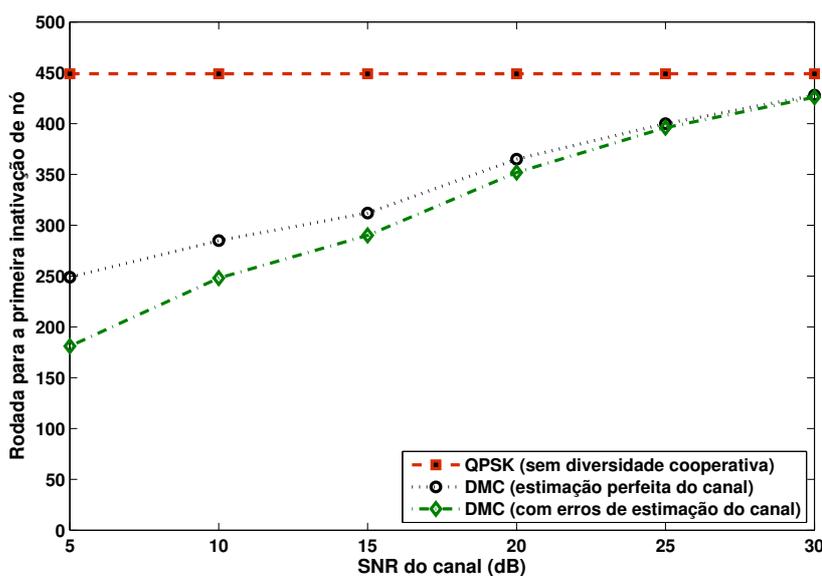
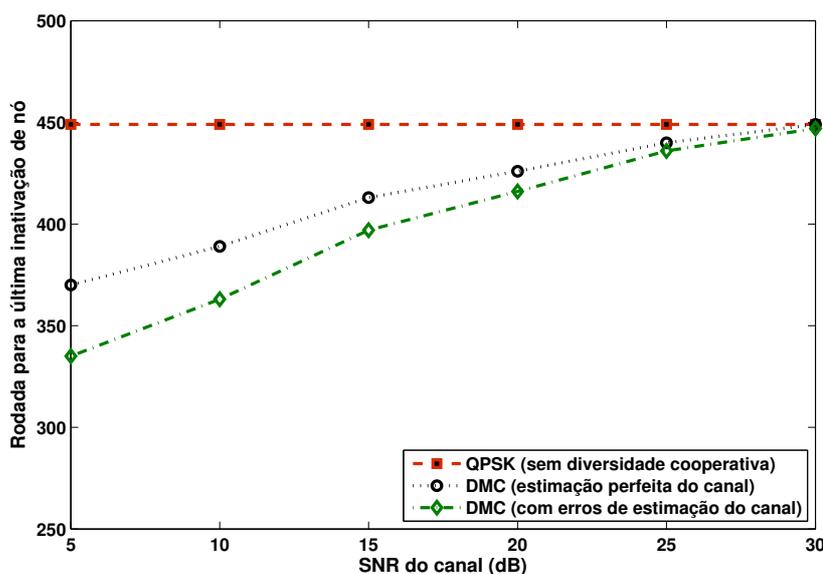


Figura 6.3 Rodada para a primeira inativação de nó como função da SNR do canal.

### 6.3.1 O Fator de Energia (NBAT)

A TPP é avaliada com base na variação do fator de energia, representado pela variável NBAT, que é um múltiplo da quantidade de energia inicial dos nós simples. A relação é ilustrada na Tabela 6.1. Observe que a rede é considerada heterogênea para todos os valores de NBAT diferentes de 1. À medida que NBAT aumenta, a capacidade de baterias de cada CH aumenta, em relação aos nós sensores simples.



**Figura 6.4** Rodada para a última inativação de nó como função da SNR do canal.

**Tabela 6.1** Definição do fator de energia, representado pela variável NBAT. A rede é considerada homogênea para NBAT = 1.

NBAT	Energia Inicial	
	Nó Sensor Simples	Líder de grupo
1	0,003 J	0,003 J
2	0,003 J	0,006 J
⋮	⋮	⋮
10	0,003 J	0,030 J

### 6.3.2 A Profundidade de Entrelaçamento ( $K$ )

A avaliação de desempenho também considera a variação dos cenários de qualidade de canal, por meio da variação da SNR. Os coeficientes de fase e módulo do canal são considerados perfeitamente estimados. Além disso, a DMC é avaliada para dois valores de profundidade de entrelaçamento:  $K = 1$  e  $K = 60$ .

A profundidade de entrelaçamento mostra como a alocação temporal das componentes dos símbolos está organizada, de modo que quanto maior a profundidade, mais distante a componente está do seu símbolo correspondente. Por exemplo, para  $K = 1$ , a alocação das componentes segue a representação da Tabela 6.2

**Tabela 6.2** Representação da alocação das componentes de dois símbolos, para uma profundidade de entrelaçamento  $K = 1$ .

Intervalo 1		Intervalo 2	
$Q_2$	$I_1$	$Q_1$	$I_2$

Se  $K = 2$ , por exemplo, então a alocação das componentes segue a representação da Tabela 6.3

**Tabela 6.3** Representação da alocação das componentes de quatro símbolos, para uma profundidade de entrelaçamento  $K = 2$ .

Intervalo 1		Intervalo 2		Intervalo 3		Intervalo 4	
$Q_3$	$I_1$	$Q_4$	$I_2$	$Q_1$	$I_3$	$Q_2$	$I_4$

Observe que quanto maior é a profundidade de entrelaçamento, maior é a decorrelação entre as componentes. Por outro lado, um atraso maior é constatado para a decodificação completa no receptor.

### 6.3.3 Avaliação de Desempenho

A rede de sensores heterogênea considerada é formada por 125 nós, dos quais 100 são nós sensores simples e 25 são líderes de grupo (CHs). Portanto, a rede possui 25 grupos, com os nós alocados em grade, em uma área de  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ , conforme ilustrado na Figura 6.5. Na simulação, os nós sensores simples são identificados de 1 a 100, da esquerda para a direita e de baixo para cima. A identificação dos CHs é feita de maneira semelhante, entretanto de 101 a 125. As rotas inter-grupos são fixas e com direção aos nós sorvedouros. Cinco nós sorvedouros estão localizados nas coordenadas  $(X = 10, Y = 110)$ ;  $(X = 30, Y = 110)$ ;  $(X = 50, Y = 110)$ ;  $(X = 70, Y = 110)$ ;  $(X = 90, Y = 110)$ .

O processo de agregação intra-grupo é feito pelo CH, que recebe os pacotes dos respectivos nós simples e encaminha o pacote agregado, de comprimento  $120 \text{ bits}$ . Os pacotes encaminhados entre os grupos são processados, de modo que o próximo CH sempre transmite um pacote com  $120 \text{ bits}$ . O processo de retransmissão, após a ocorrência de erros, pode utilizar a DMC, entre o CH e o vice-CH do grupo, com  $\theta = 27^\circ$ , pois apresenta o desempenho ótimo na rotação de constelações QPSK [128]. Um rodízio contínuo é utilizado para a eleição do vice-CH, de modo que a cada rodada um novo vice-líder é eleito no grupo.

A principal métrica avaliada é a Taxa de Perda de Pacote (TPP), calculada como a razão entre o número de pacotes perdidos e o número de pacotes gerados. Um pacote pode ser perdido por decorrência de erros de transmissão, ou pela inativação (indisponibilidade de energia) do CH que deveria transmiti-lo. Duas variáveis auxiliam na compreensão do comportamento da taxa de perda de pacote: a EPLR, que é a contribuição da taxa de perda de pacote devido à inativação dos CHs; e a TPLR, que é a contribuição da taxa de perda de pacote devido aos erros de transmissão.

As funções custo para representar o consumo de energia são baseadas no modelo apresentado em [116]. O critério de parada da simulação é a última inativação de nó sensor, ou se restarem apenas cinco CHs ativos na rede. Os códigos foram implementados em Matlab R2011a.

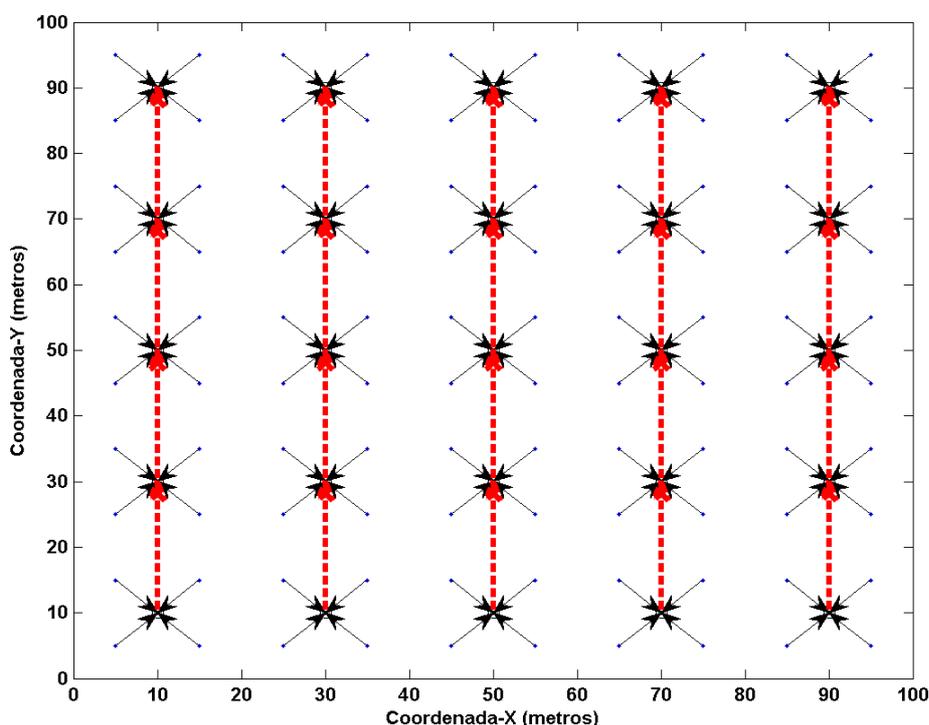


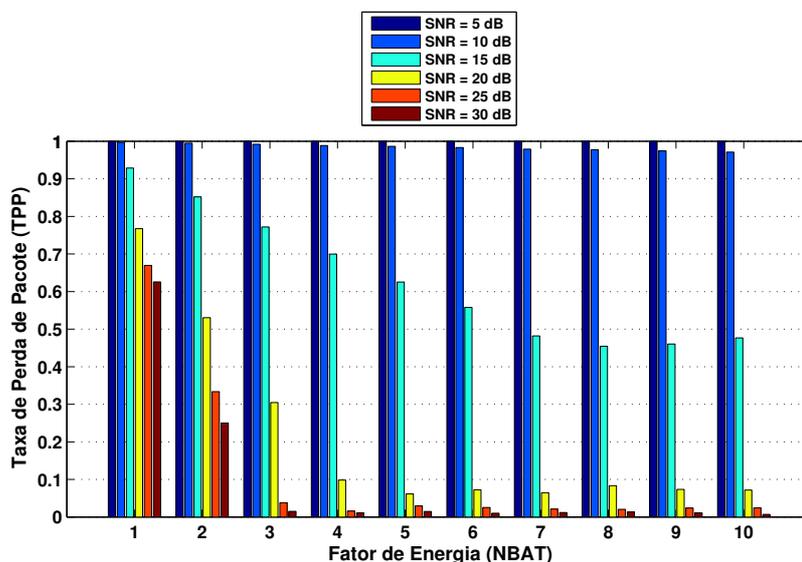
Figura 6.5 Mapa de localização dos nós sensores na rede.

### Rede sem Diversidade Cooperativa

As Figuras 6.6, 6.7, 6.11 apresentam os resultados referentes à Taxa de Perda de Pacote da rede, em função de NBAT. A Figura 6.6 mostra a avaliação de desempenho para o esquema sem diversidade em modulação cooperativa, ou seja, sempre os nós sensores transmitem os dados por QPSK simples. Para os valores de SNR = 5 dB e 10 dB, uma variação pequena e valores altos de TPP são observados. Até NBAT = 10, os CHs inativam antes dos nós simples. À medida que NBAT aumenta, a EPLR diminui e a TPLR aumenta. Por exemplo, para a SNR = 5 dB e NBAT = 1, obtém-se EPLR = 0,90155 e TPLR = 0,09845. Por outro lado, para NBAT = 10, EPLR = 0,0080178 e TPLR = 0,9919822. Ou seja, o aumento da disponibilidade de energia permite que a rede utilize mais retransmissões, entretanto, devido à baixa qualidade do canal, elas não são suficientes para garantir a entrega correta dos pacotes, o que aumenta a TPLR.

Para a SNR = 15 dB, há um decréscimo da TPP até NBAT = 8, que depois é de certa forma estabilizada. Até esse valor de fator de energia, os CHs inativam antes dos nós simples. Se o CH de um grupo está inativo, mas outros nós desse grupo continuam ativos, então o pacote que seria formado é considerado perdido. Por isso, de NBAT = 1 até NBAT = 6 a inativação prematura dos CHs diminui e causa também um decréscimo na taxa de perda de pacote. De fato, a partir de NBAT = 7 a taxa de perda de pacote mantém um comportamento praticamente constante, por volta de 46,84%. A sobrevivência dos CHs além dos nós simples garante um comportamento

fixo até a rodada 449, que é a rodada de sobrevivência máxima dos nós sensores simples. A partir dessa rodada, o desempenho da rede atende à proporção direta entre a quantidade de rodadas de operação (que aumenta com NBAT) e a quantidade de pacotes perdidos, em sua maioria, por causa de perdas de transmissão.



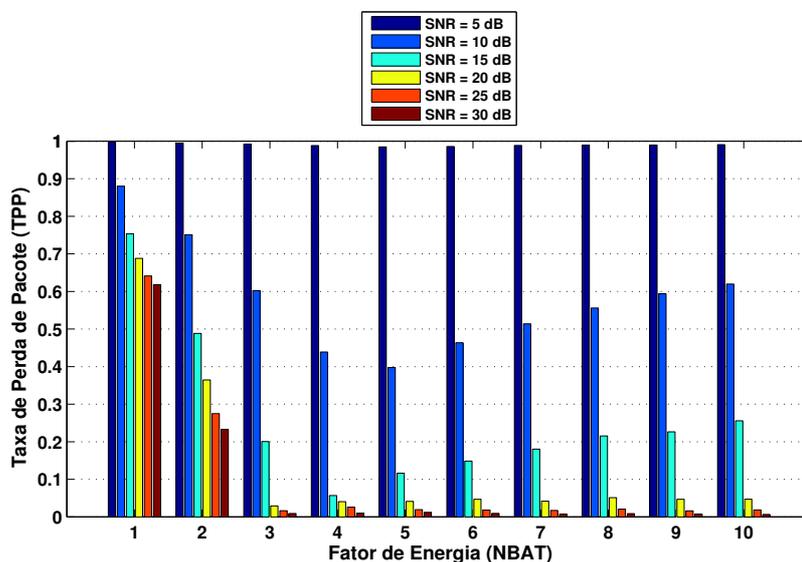
**Figura 6.6** Avaliação da taxa de perda de pacote, como uma função do fator de energia (NBAT), para a rede sem o modo de diversidade cooperativa.

Ainda para a Figura 6.6, e considerando a  $SNR = 20$  dB, a TPP decresce até  $NBAT = 5$  e depois praticamente estabiliza. O comportamento equivale ao cenário de 15 dB, entretanto os CHs inativam antes dos nós simples até  $NBAT = 4$ . A partir disso, a taxa de perda de pacote estabiliza por volta de 7, 11%. Essa diminuição relativa ao limiar de inativação prematura de CHs ocorre pois a quantidade de retransmissões necessárias por CH diminui, visto que a qualidade do canal aumenta. Isso pode ser observado de maneira mais acentuada para os cenários de 25 dB e 30 dB, em que a TPP decresce até  $NBAT = 3$  e depois estabiliza.

### Rede com DMC e $K = 1$

A Figura 6.7 apresenta os resultados de taxa de perda de pacote para a rede com esquema de diversidade em modulação cooperativa e  $K = 1$ . Para  $SNR = 5$  dB, devido à baixa qualidade do canal, muitas retransmissões são utilizadas e, como a DMC é permitida, os nós simples são constituídos vice-CHs e também participam do processo de retransmissão. Desse modo, para baixos valores de SNR o limiar de inativação de nós simples não é mais equivalente à rodada 449 (o que acontece no modo QPSK, sem DMC). De fato, a inativação dos nós simples acontece antes, pois há um maior consumo de energia proveniente da cooperação com os CHs. Por exemplo, para a  $SNR = 5$  dB e  $NBAT = 5$ , a inativação do primeiro nó da rede é a de um nó sensor simples, na rodada 251. Para essa situação, a maioria dos CHs inativa na rodada 289.

Mesmo com a equiparação entre a quantidade de rodadas para a inativação de nós simples e CHs, a baixa SNR do canal não permite a diminuição da taxa de perda de pacote.



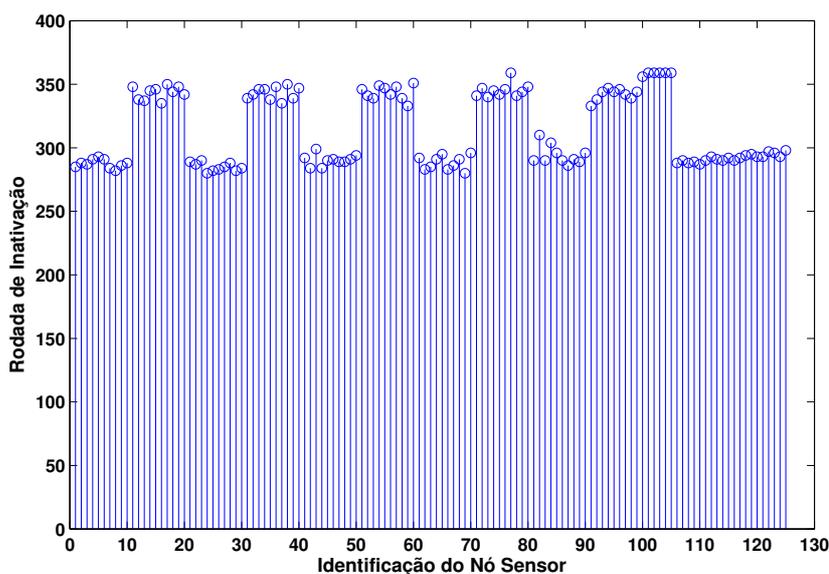
**Figura 6.7** Avaliação da taxa de perda de pacote, como uma função do fator de energia (NBAT), para  $K = 1$ .

Para o canal de comunicações com  $SNR = 10$  dB, a TPP decresce até  $NBAT = 5$ , mas retoma o crescimento a partir disso. Os desempenhos relativos ao tempo de vida de cada nó da rede estão representados nas Figuras 6.8, 6.9 e 6.10, com o objetivo de auxiliar na análise do comportamento da taxa de perda de pacote, visto que as métricas estão relacionadas. Cumpre salientar que, geralmente, os nós simples com identificação (ID) de 1 até 10, de 21 até 30, ..., e de 81 até 90 inativam antes do que os nós com ID de 11 até 20, de 31 até 40, ..., e de 99 até 100. Isso ocorre pois os nós posicionados antes do líder de seu grupo estão mais distantes do líder do próximo grupo, em direção ao respectivo nó sorvedouro. Logo, consomem mais energia nas retransmissões.

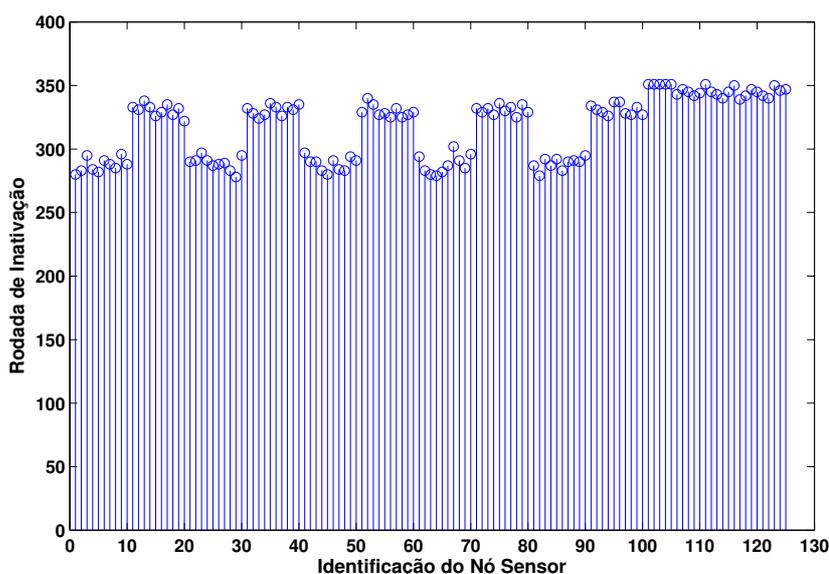
Na Figura 6.8, os líderes de grupo inativam antes que a maioria dos nós simples, de modo que os pacotes gerados são perdidos, pois os líderes não possuem energia suficiente para transmití-los. Cinco CHs permanecem ativos até a última rodada (consomem menos energia pois não recebem pacotes de outros CHs), mas, pelo fato de não dispor de outros líderes de grupo ativos, intermediários entre o nó sorvedouro, os pacotes também são perdidos.

Na Figura 6.9, a diferença entre as rodadas de inativação dos CHs e dos nós simples é menor, além do que os CHs inativam em poucas rodadas depois do que a maioria dos nós simples. Isso possibilita um maior número de retransmissões por CMD, o que diminui a taxa de perda de pacote e cria um vale na curva de TPP como uma função de NBAT.

Na Figura 6.10, a diferença entre as rodadas de inativação dos CHs e dos nós simples é maior, além do que os CHs inativam bem depois do que a maioria dos nós simples. Isso aumenta o número de retransmissões sem diversidade (essas retransmissões são feitas por QPSK



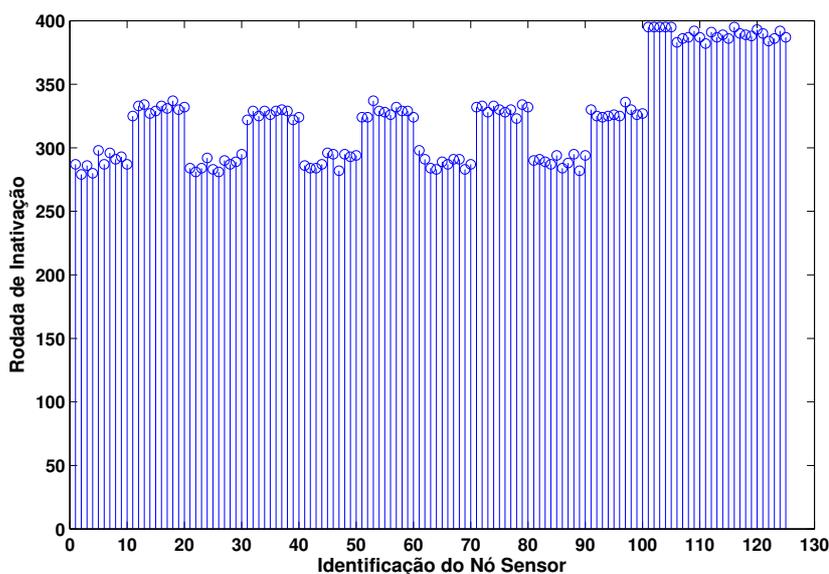
**Figura 6.8** Tempo de vida de cada nó sensor da rede, para  $SNR = 10$  dB e  $NBAT = 4$ .



**Figura 6.9** Tempo de vida de cada nó sensor da rede, para  $SNR = 10$  dB e  $NBAT = 5$ .

simples), visto que os CHs operam de maneira isolada nas últimas rodadas. Conseqüentemente, a TPP aumenta e esse comportamento é mantido com o aumento de NBAT, pois mais retransmissões sem diversidade são utilizadas.

Para a  $SNR = 15$  dB, o comportamento é equivalente ao do cenário com  $SNR = 10$  dB. Entretanto, no valor de  $NBAT = 4$ , a diferença entre as rodadas de inativação dos CHs e dos nós simples é menor, além do que os CHs inativam em poucas rodadas depois do que a maioria dos nós simples. A inflexão de desempenho na sequência do gráfico de barras ocorre antes do que no cenário com  $SNR = 10$  dB, visto que a qualidade do canal é maior, portanto os CHs



**Figura 6.10** Tempo de vida de cada nó sensor da rede, para  $SNR = 10$  dB e  $NBAT = 6$ .

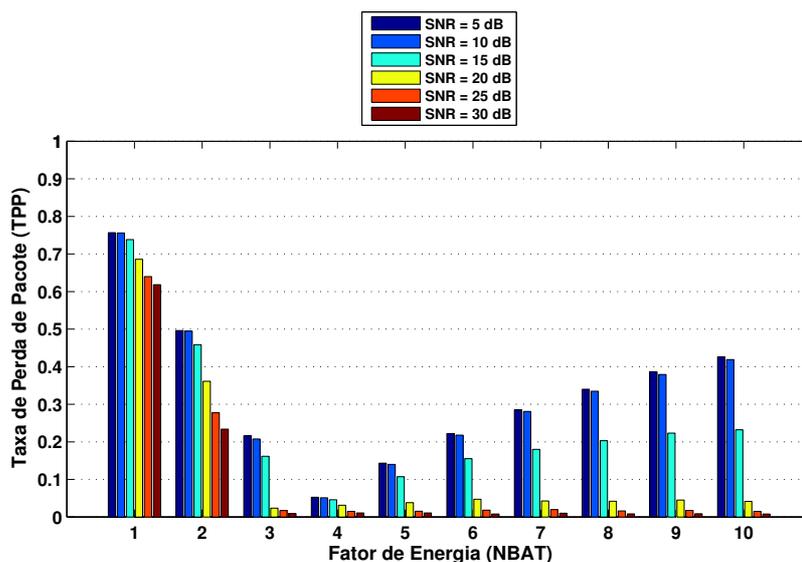
utilizam mais rodadas para inativarem e conseguem equiparar antecipadamente ao tempo de vida dos nós simples.

Para os cenários com  $SNR = 20$  dB,  $SNR = 25$  dB e  $SNR = 30$  dB, menos retransmissões são necessárias, pois a qualidade do canal é melhor. Desse modo, a inativação dos nós simples fica próxima ao limiar de 449 rodadas e o desempenho da rede apresenta um comportamento semelhante ao observado com o modo QPSK. Ou seja, a taxa de perda de pacote decresce até  $NBAT = 3$  e depois estabiliza.

### Rede com DMC e $K = 60$

A Figura 6.11 apresenta os resultados de taxa de perda de pacote para a rede com esquema de diversidade em modulação cooperativa, especificamente com  $K = 60$ . Para as condições de canal com 5 dB, 10 dB e 15 dB, a TPP decresce até  $NBAT = 4$  e retoma o crescimento a partir disso. Nesse valor de fator de energia, a diferença entre as rodadas de inativação dos CHs e dos nós simples é menor. Quanto antes os CHs inativam em relação aos nós simples, mais pacotes são perdidos (independentemente da qualidade do canal e da profundidade de entrelaçamento) por não haver CH disponível para encaminhar os pacotes. Por outro lado, a qualidade do canal e a profundidade de entrelaçamento influenciam fortemente o desempenho da rede, nos casos em que CHs e nós simples inativam em rodadas próximas umas das outras. A partir do momento em que apenas os CHs permanecem ativos, a profundidade de entrelaçamento não interfere mais, pois a DMC não é mais utilizada. Nessas rodadas, o desempenho relativo à TPP é baseado na qualidade do canal e na energia residual da rede.

É possível observar o impacto da profundidade de entrelaçamento no desempenho da rede, visto que quanto maior é o valor de  $K$ , melhor é o desempenho. A Figura 6.12 apresenta a



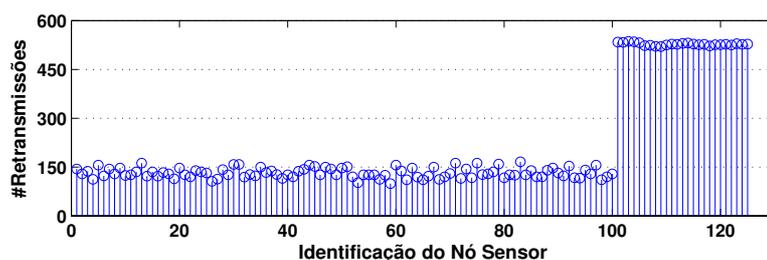
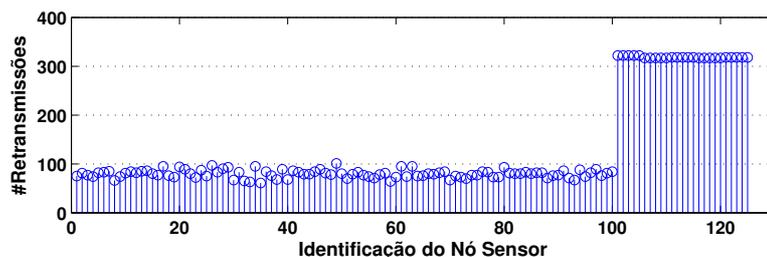
**Figura 6.11** Avaliação da taxa de perda de pacote, como uma função do fator de energia (NBAT), para  $K = 60$ .

quantidade de retransmissões utilizadas por cada nó sensor na rede. Ambas consideram a SNR do canal igual a 5 dB e  $N_{BAT} = 3$ . A Figura 6.12(a) apresenta os resultados para a  $K = 1$  e a Figura 6.12(b) apresenta os resultados para  $K = 60$ . Para o esquema com  $K = 1$ , em média 131,9 retransmissões são utilizadas pelos nós simples e em média 527,6 retransmissões são utilizadas pelos CHs. Para o esquema com  $K = 60$ , em média 79,6 retransmissões são utilizadas pelos nós simples e 318,4 retransmissões são utilizadas pelos CHs. Mesmo com um maior número de retransmissões utilizadas, parte dos pacotes é entregue com erro, no esquema com  $K = 1$ , o que aumenta a TPP. Além disso, no cenário da Figura 6.12(a), a  $EPLR = 0,54016$  e a  $TPLR = 0,45984$ . Por outro lado, no cenário da Figura 6.12(b),  $EPLR = 1$  e  $TPLR = 0$ , de modo que todos os pacotes perdidos se devem à inativação dos CHs e não a perdas de transmissão pelo canal de comunicações.

Menos retransmissões são necessárias nos cenários 20 dB, 25 dB e 30 dB, pois as condições de propagação são melhores. Desse modo, a inativação dos nós simples fica próxima ao limiar máximo de 449 rodadas e o desempenho da rede assume um comportamento semelhante ao observado com o modo QPSK. Ou seja, a taxa de perda de pacote decresce até determinado valor de NBAT e depois estabiliza.

## 6.4 Eleição por Mapa de Energia e Acesso Oportunístico

A eleição dos vice-líderes pode utilizar a informação relativa à energia residual dos nós sensores candidatos, de modo a otimizar o processo e distribuir de maneira mais uniforme o consumo de energia da rede. Nesta seção, a eleição de vice-líderes de grupo utiliza a informação

(a)  $K = 1$ (b)  $K = 60$ 

**Figura 6.12** [Número de retransmissões utilizadas por cada nó sensor.] Número de retransmissões utilizadas por cada nó sensor. O cenário considerado possui SNR do canal igual a 5 dB e  $N_{BAT} = 3$ .

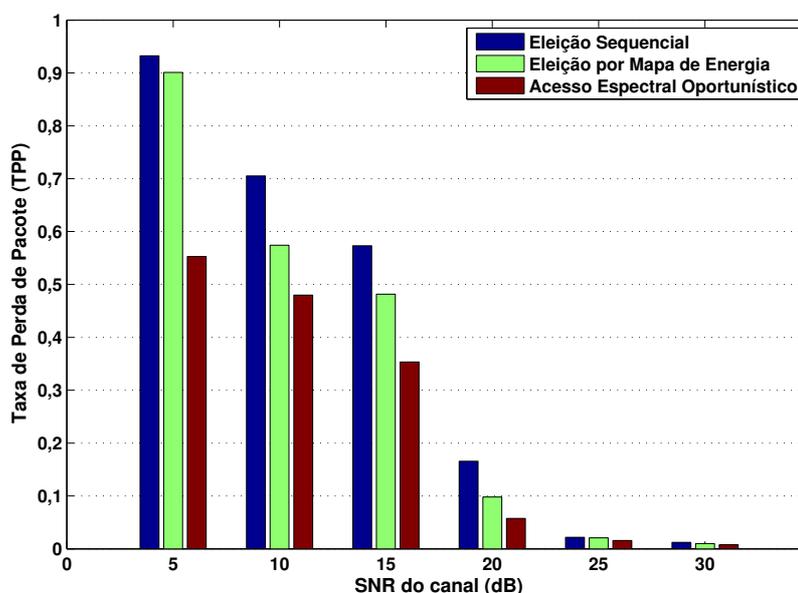
do mapa de energia, que os CHs formam sobre os seus grupos. A arquitetura da rede segue a mesma distribuição apresentada na Seção 6.3.3.

Apesar de os mapas de energia serem formados em cada CH, com as informações de energia residual obtidas dos nós simples, o desempenho relativo à taxa de perda de pacote e à distribuição do consumo de energia pela rede é melhor do que no caso em que os vice-líderes são eleitos de maneira sequencial. Isso ocorre, pois a energia consumida pelas funções de retransmissão realizadas pelos vice-líderes é bastante superior ao consumo de energia do relato individual do nível de energia residual. Ou seja, o CH de cada grupo escolhe para vice-líder aquele nó com a maior capacidade de energia residual e este pode utilizar de maneira mais eficaz as tentativas de retransmissão.

Além disso, o desempenho da rede pode melhorar de maneira significativa pela utilização do acesso espectral oportunístico, de modo que a cooperação entre vice-líder e CH pode ser beneficiada pelo uso dinâmico do espectro. Essa capacidade cognitiva é utilizada nesta seção, com o objetivo de avaliar o desempenho da rede heterogênea com acesso espectral oportunístico. Esse acesso é realizado tanto pelos CHs, quanto pelos vice-líderes, que também são eleitos por meio da retroalimentação da informação do mapa de energia. A probabilidade de acesso oportunístico é de 60%, ou seja,  $P_{aO} = 0,6$  e o número máximo de retransmissões permitidas é igual a 9, ou seja  $N_r^{\max} = 9$ .

A Figura 6.13 apresenta o desempenho relativo à taxa de perda de pacote, como uma função da SNR do canal. No geral, para as três técnicas avaliadas, a TPP decresce à medida que a SNR do canal aumenta. Em comparação à eleição sequencial, o ganho de desempenho da eleição

com mapa de energia não é tão expressivo quanto o observado no uso do acesso espectral oportunístico. Isso ocorre pois quando a capacidade cognitiva da rede é considerada, o consumo de energia proveniente das mensagens de relato do nível de energia residual de cada nó simples é compensado pelo acesso à condição de melhor qualidade de canal, o que diminui a quantidade de erros.



**Figura 6.13** Taxa de perda de pacote como função da SNR do canal.

As Figuras 6.14, 6.15, 6.16 apresentam os mapas de energia da rede, relativos apenas ao nível de energia residual dos nós simples, nas quais três cenários de qualidade de canal (5 dB, 15 dB e 25 dB) são avaliados, para as rodadas de operação 112, 224, 336 e 448. Observe que a rodada de número 449 é o limite de tempo de vida máximo de cada nó simples da rede (essa condição é alcançada se esse nó participar apenas do processo de agregação intra-grupo e não for eleito vice-líder).

Nas representações dos mapas de energia, quanto mais escura é a cor, menor é a energia residual do respectivo nó simples. Os percentuais de energia residual dos cem nós simples estão representados nos mapas, de modo que a última coluna à direita representa a escala, que é comum a todos os mapas gerados.

Conforme o esperado, em ambas as figuras, à medida que o número de rodadas aumenta, o mapa de energia fica mais escuro, pois menos energia residual está presente. Na Figura 6.14, principalmente para as SNRs iguais a 5 dB e 15 dB, há uma diferença acentuada no nível de energia residual entre os nós simples, de modo que a distribuição de energia é pouco uniforme. Para a SNR igual a 25 dB essa característica não é verificada, pois menos retransmissões são necessárias, diante da melhoria da qualidade do canal.

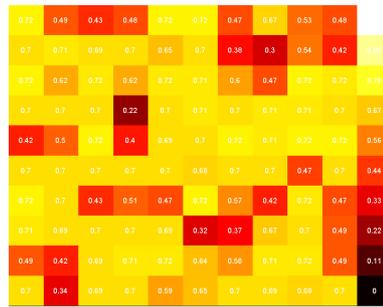
Por meio da retroalimentação das informações do mapa de energia para realizar a eleição de vice-líder, a distribuição do consumo de energia fica mais uniforme, em especial para as SNRs

iguais a 5 dB e 15 dB. Isso pode ser verificado na Figura 6.15. Para a SNR igual a 25 dB, o desempenho é semelhante ao do esquema da Figura 6.14, visto que menos retransmissões são necessárias e há uma menor dependência da contribuição do vice-líder.

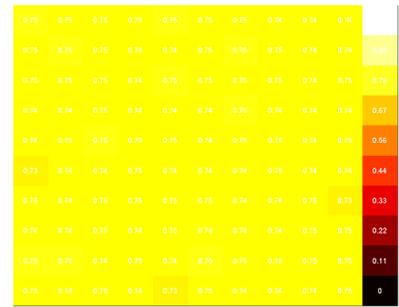
O acesso espectral oportunístico melhorou o desempenho, pois distribuiu ainda mais o consumo de energia pela rede. Com o uso dinâmico do espectro, a qualidade de transmissão aumentou e menos retransmissões foram necessárias. Esse comportamento mais uniforme do consumo de energia pode ser verificado na Figura 6.16 e é um diferencial maior em relação às outras técnicas, para as SNRs iguais a 5 dB e 15 dB.



(a) SNR = 5 dB e Rodada 112.



(b) SNR = 15 dB e Rodada 112.



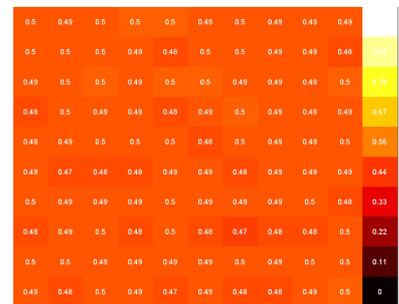
(c) SNR = 25 dB e Rodada 112.



(d) SNR = 5 dB e Rodada 224.



(e) SNR = 15 dB e Rodada 224.



(f) SNR = 25 dB e Rodada 224.



(g) SNR = 5 dB e Rodada 336.



(h) SNR = 15 dB e Rodada 336.



(i) SNR = 25 dB e Rodada 336.



(j) SNR = 5 dB e Rodada 448.

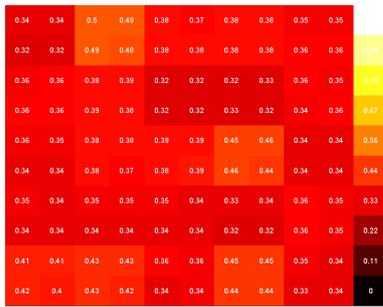


(k) SNR = 15 dB e Rodada 448.

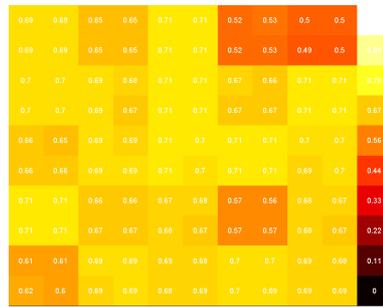


(l) SNR = 25 dB e Rodada 448.

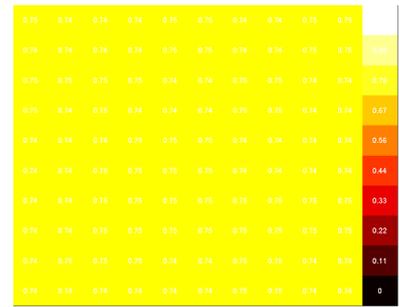
Figura 6.14 Mapas de energia para a rede com eleição contínua (sequencial).



(a) SNR = 5 dB e Rodada 112.



(b) SNR = 15 dB e Rodada 112.



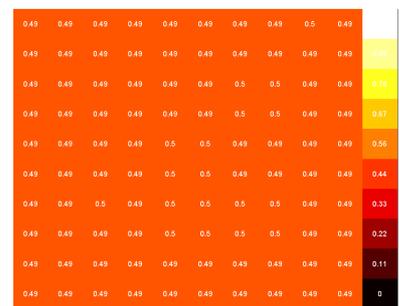
(c) SNR = 25 dB e Rodada 112.



(d) SNR = 5 dB e Rodada 224.



(e) SNR = 15 dB e Rodada 224.



(f) SNR = 25 dB e Rodada 224.



(g) SNR = 5 dB e Rodada 336.



(h) SNR = 15 dB e Rodada 336.



(i) SNR = 25 dB e Rodada 336.



(j) SNR = 5 dB e Rodada 448.

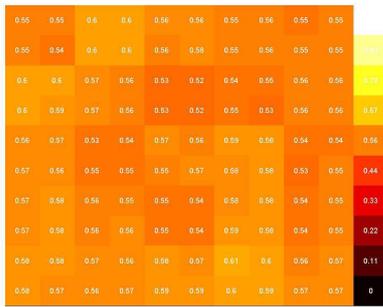


(k) SNR = 15 dB e Rodada 448.

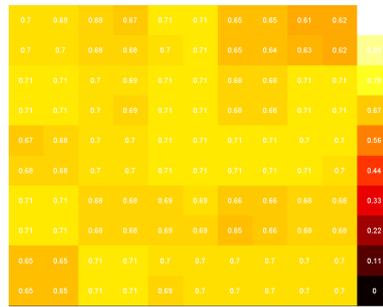


(l) SNR = 25 dB e Rodada 448.

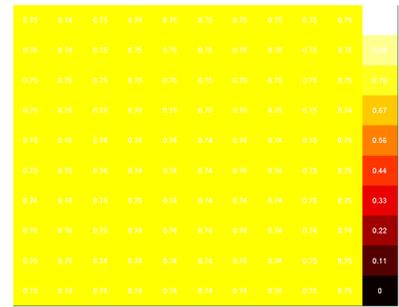
Figura 6.15 Mapas de energia para a rede com eleição por retroalimentação da informação de energia residual.



(a) SNR = 5 dB e Rodada 112.



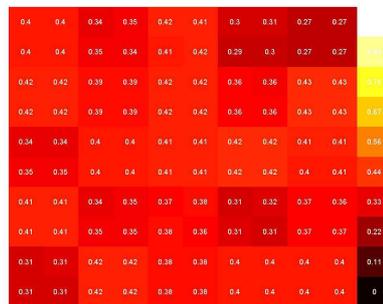
(b) SNR = 15 dB e Rodada 112.



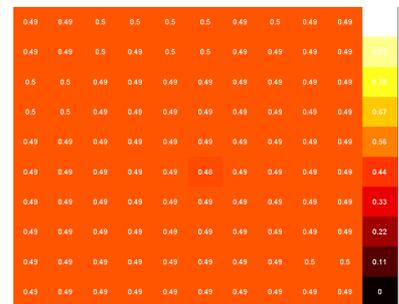
(c) SNR = 25 dB e Rodada 112.



(d) SNR = 5 dB e Rodada 224.



(e) SNR = 15 dB e Rodada 224.



(f) SNR = 25 dB e Rodada 224.



(g) SNR = 5 dB e Rodada 336.



(h) SNR = 15 dB e Rodada 336.



(i) SNR = 25 dB e Rodada 336.



(j) SNR = 5 dB e Rodada 448.



(k) SNR = 15 dB e Rodada 448.



(l) SNR = 25 dB e Rodada 448.

Figura 6.16 Mapas de energia para a rede com acesso espectral oportunístico.

## 6.5 Conclusão

Neste capítulo, o desempenho de diversas técnicas aplicadas a redes heterogêneas foi avaliado. A diversidade em modulação cooperativa foi utilizada, mas, em parte das simulações, o impacto dos erros de estimação do canal foi analisado.

Sob a consideração de que os CHs possuíam capacidade de armazenamento de energia ilimitada e com o critério de parada equivalente à inativação do último nó simples, o tempo de vida da rede alcançou valores maiores para os esquemas de transmissão QPSK (sem diversidade cooperativa) e para a diversidade em modulação cooperativa com estimação perfeita do canal. Por outro lado, mesmo com a presença de erros de estimação, a taxa de perda de pacote foi menor no modo cooperativo.

Além disso, foi avaliado o desempenho da taxa de perda de pacote com relação à variação do fator de energia. Para cada cenário de qualidade de canal o desempenho foi analisado, de modo a identificar limiares em que a taxa de perda de pacote apresentou os menores valores. O fator determinante de desempenho entre um cenário e outro, além da SNR do canal, é o quão distante está a inativação dos líderes de grupo em relação aos nós simples. Além disso, no modo cooperativo, aumentar o fator de energia além de um limiar específico pode resultar em um aumento da taxa de perda de pacote. A profundidade de entrelaçamento ( $K$ ) também mostrou sua influência no desempenho da rede, de modo que o aumento de  $K$  produziu uma diminuição na taxa de perda de pacote.

O método de eleição de vice-líderes foi melhorado, com a técnica de retroalimentação por mapa de energia, que uniformizou a distribuição do consumo de energia. Além disso, com a utilização do acesso espectral oportunístico, a rede diminuiu significativamente a taxa de perda de pacote.

O próximo capítulo apresenta as considerações finais da tese e as perspectivas de continuação da pesquisa.

## CAPÍTULO 7

---

---

# Considerações Finais e Perspectivas

---

Nesta Tese, o projeto e avaliação de desempenho de técnicas de diversidade cooperativa aplicadas a redes de sensores sem fio cognitivas foram apresentados. Os relacionamentos cruzados entre as camadas de rede, enlace e física foram representados pelas interações dos protocolos de agrupamento com os resultados provenientes das técnicas de diversidade cooperativa.

A técnica de diversidade em modulação cooperativa apresentou vantagens inerentes à diminuição da taxa de erro de *bit*, causado pelo ganho de diversidade do esquema. Esse ganho foi propiciado pela combinação da rotação de uma constelação QPSK e o entrelaçamento independente das componentes dos símbolos em quadratura e em fase. A técnica apresentou resultados satisfatórios, quando comparada a outro esquema de diversidade, o SCA com LEACH, visto que este não apresenta a mesma eficiência espectral do esquema proposto. Na DMC, cada nó sensor que participa do processo de retransmissão precisa enviar apenas metade dos símbolos contidos no pacote de dados agregados no grupo. Essa característica, além de diminuir a taxa de perda de pacote, também aumentou o tempo de vida da rede.

O uso da diversidade em modulação cooperativa foi otimizado, pois a escolha criteriosa com relação a quais nós teriam o direito de cooperar nas retransmissões foi auxiliado por técnicas cognitivas, tanto no âmbito de gerenciamento espectral oportunístico, quanto pelo uso de técnicas de inteligência computacional e inspiração em comportamentos biológicos. Os protocolos LF-Ant e LF-Ant Cognitivo foram utilizados para a eleição de líderes e vice-líderes e garantiram o relacionamento com as camadas física e de enlace dos protocolos propostos. A utilização dessas ferramentas foi importante para eleger os nós mais bem posicionados da região monitorada, garantir boa cobertura da rede, aumentar o tempo de vida de operação, diminuir a taxa de perda de pacote e o tempo de atraso médio no relato de informações de emergência. Há ainda alguns desafios em aberto, para confrontar os resultados obtidos, especialmente no que se refere à complexidade computacional dos algoritmos propostos e à utilização de cenários mais sedimentados por outros grupos de pesquisa, que poderão ser implementados com o auxílio de plataformas de simulação de rede.

Além disso, é necessário variar alguns parâmetros para testar a escalabilidade da rede, com relação ao funcionamento do LF-Ant Cognitivo. Número de nós, quantidade de canais disponíveis e a área de cobertura podem apresentar um impacto significativo na avaliação de desempenho. Por exemplo, ao aumentar a área geográfica de cada grupo, a condição de que a comunicação intra-grupo é livre de erros pode não ser mais razoável. Desse modo, seria necessário identificar um limiar de tentativa para a eleição de líder e vice-líder. Caso contrário, se muitos nós candidatos à cooperação ficarem programados para receber o pacote e apenas aqueles que o decodificaram corretamente compararem os valores de *chance*, poderia ocorrer um consumo excessivo de energia com o processo de eleição. Um limiar de compromisso poderia ser identificado, relacionando a dimensão geográfica do grupo, o número de nós e o comprimento do pacote, de modo a identificar quantos nós devem se candidatar no processo de eleição para cada condição.

Outros cenários também foram testados para a diversidade em modulação cooperativa. Com características heterogêneas, o desempenho da rede foi avaliado sob o impacto de erros de estimação do canal, do fator de energia e da profundidade de entrelaçamento. Mapas de energia e a capacidade de acesso espectral oportunístico também foram utilizados com a distribuição heterogênea. Resultados importantes foram derivados, e concluem que de fato há um impacto significativo frente aos erros de estimação do canal que, em geral, não invalidam o mérito da DMC. Além disso, o modo como os recursos podem ser distribuídos, caracterizando um grau de heterogeneidade da rede, foi analisado. Para diferentes valores de fator de energia, e por meio da variação da SNR do canal, limiares de crescimento e estabilização da taxa de perda de pacote foram identificados.

De fato, os comportamentos observados estão atrelados à característica cooperativa da rede, visto que o desempenho foi fortemente afetado pelo intervalo entre as rodadas de inativação de líderes de grupo e nós simples. Evidentemente, bastaria mudar o critério de parada da simulação para que os comportamentos de taxa de perda de pacote também fossem alterados. Por exemplo, se a rede for considerada inativa (critério de parada) no momento de inativação do último líder de grupo (considerando que os CHs apresentem um consumo de energia médio semelhante), então o comportamento da taxa de perda de pacote não apresentaria os pontos de inflexão observados na avaliação do Capítulo 6. Por outro lado, o protocolo poderia admitir também que, mesmo com a inativação de todos os líderes de grupo, a rede se reconfigurasse de modo que os nós remanescentes pudessem se eleger líderes e vice-líderes de grupo, o que estenderia a cooperação por mais rodadas e diminuiria (ou estabilizaria) a taxa de perda de pacote. Entretanto, os resultados alcançados são importantes, pois mostram que em redes heterogêneas, a taxa de perda de pacote apresenta uma dependência forte com o fator de energia, especialmente se a distribuição do conjunto de recursos limitar a coordenação de grupo a alguns nós específicos.

Outros esquemas de roteamento e geração da carga de informação também poderiam influenciar o desempenho da rede heterogênea avaliada. Nas simulações do Capítulo 6, uma distribuição em grade foi utilizada, em que rotas fixas de encaminhamento foram previamente

determinadas, apenas considerando um critério de distancia ao nó sorvedouro. Os nós sorvedouros foram alocados na borda da rede, o que aumentaria o consumo de energia dos respectivos nós próximos, caso, por exemplo, o comprimento do pacote incrementasse a cada salto de transmissão. Se a rede ficar restrita a uma escala geográfica menor, então um mecanismo de roteamento adaptativo já seria suficiente para solucionar essa desigualdade no consumo de energia. Senão, além do roteamento adaptativo, os nós sorvedouros poderiam ser instalados em posições internas à rede.

Os mapas de energia da rede foram utilizados para retroalimentar a informação de energia residual dos nós e esse mecanismo foi utilizado no processo de eleição de vice-líderes, visto que os CHs já são previamente especificados na instalação da rede heterogênea. Esse processo e o acesso espectral oportunístico diminuíram a taxa de perda de pacote da rede e uniformizaram a distribuição do consumo de energia.

Técnicas de predição de mapa de energia poderiam melhorar o desempenho da rede, especialmente se outros parâmetros de simulação forem considerados. Por exemplo, se o número máximo de retransmissões permitidas diminuir abaixo de um limiar, então o consumo de energia necessário para formar o mapa poderia ser maior do que o consumo referente ao processo de cooperação, o que tornaria ineficaz o uso do mapa. Por outro lado, se apenas alguns nós precisarem relatar seu nível de energia residual, ou se isso for feito por algum mecanismo de predição em intervalos de tempo específicos, então haveria uma relação de compromisso entre a precisão da formação do mapa e o consumo de energia necessário.

Com relação ao ganho de desempenho obtido com o acesso oportunístico, a escolha do método utilizado para o sensoriamento espectral também poderia influenciar o desempenho do sistema. Nas simulações realizadas, as oportunidades espectrais são identificadas apenas por uma consulta a banco de dados, que é formado com base na probabilidade de acesso oportunístico ( $P_{aO}$ ). A energia consumida nesse processo é relativa à função de recepção de dados. A depender do método de sensoriamento, na prática esse custo poderia aumentar de maneira significativa, tanto por conta de um maior período de sensoriamento, quanto pela complexidade de processamento para realizar a função de decisão espectral.

## 7.1 Propostas para Trabalhos Futuros

Diante das contribuições apresentadas e com base nos resultados já alcançados, as seguintes perspectivas para a continuação do trabalho são enumeradas a seguir:

1. Avaliar a escalabilidade da rede de cuidados médicos utilizada com o LF-Ant Cognitivo, por meio da variação do número de nós da rede, dimensões e comprimento dos pacotes;
2. Identificar o número ótimo de grupos, em função da dimensão da rede, número de nós e modelo de rádio;

3. Modelar o consumo de energia envolvido com o processamento da informação heurística nebulosa e com o sensoriamento espectral;
4. Modelar a interação da lógica nebulosa com as incertezas de estimação de distância pela potência do sinal recebido;
5. Avaliar a complexidade computacional do LF-Cognitivo.
6. Simular diferentes cenários e parâmetros de heterogeneidade, em que os nós são submetidos a cargas de transmissão variadas e a estratégia de roteamento a ser desenvolvida possa influenciar diretamente o desempenho do sistema;
7. Utilizar modelos de predição de mapas de energia e avaliar o desempenho para formar uma visão geral da energia residual da rede;
8. Desenvolver métodos de eleição de vice-líderes e de reconfiguração da rede, para o caso de inativação prematura dos CHs , de modo a evitar que os pacotes sejam perdidos a partir dessa condição.

## APÊNDICE A

---

---

# Otimização por Colônia de Formigas

---

Muitos aspectos do comportamento de um grupo de insetos são estudados pelas teorias de auto-organização, que tentam explicar como indivíduos de comportamento simples podem construir uma sociedade complexa. Por exemplo, sabe-se que em tais sociedades há grupos de agentes especializados e, aparentemente, não há um gerente operacional. Estruturas complexas resultam da interação de comportamentos simples executados por indivíduos que possuam apenas informações locais [150]. Para prover embasamento sobre os comportamentos que servirão de inspiração para o desenvolvimento de algumas das técnicas apresentadas nesta Tese, este apêndice descreve alguns desses comportamentos, suas modelagens e resultados de experimentos realizados com colônias formigas.

No início dos anos 1990, a técnica de Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization* – ACO) foi proposta por Dorigo *et al.*, como uma nova meta-heurística inspirada na natureza para a solução de problemas de Otimização Combinatorial (*Combinatorial Optimization* – CO) não triviais [151, 152]. Uma meta-heurística é um método para resolver de forma genérica problemas de otimização. Utiliza a combinação de escolhas aleatórias e o conhecimento histórico dos resultados anteriores para se guiar e realizar as buscas, o que evita paradas prematuras em locais sub-ótimos. Exemplos de meta-heurísticas são as técnicas de Busca Tabu (*Tabu Search*) [153, 154], *Simulated Annealing* [155] e Computação Evolucionária [156].

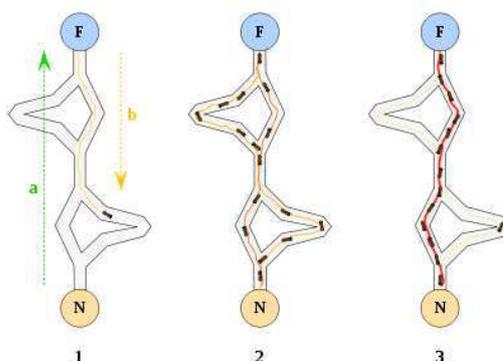
A técnica de ACO tem seu funcionamento inspirado no comportamento natural das colônias de formigas. Cada formiga, quando caminha em busca de alimento, deposita no solo uma substância química denominada feromônio. Na possibilidade de seguir por vários caminhos, uma formiga pode, para decidir entre eles, considerar a quantidade de feromônio (depositado anteriormente por outras formigas) em cada um dos caminhos. Um caminho com muito feromônio é mais atrativo do que outro com menos. Com o decorrer do tempo, essa substância química evapora. Após um determinado tempo, a maioria das formigas decide trilhar um caminho mais curto (possivelmente o ótimo) entre o seu ninho e o alimento. Esse comportamento de colônias de formigas reais é explorado em colônias de formigas artificiais, de modo a solucionar problemas de CO.

As Figuras A.1 e A.2 ilustram o comportamento organizado de formigas em uma colônia, o que leva à inspiração para a solução problemas de otimização combinatorial. Particularmente, a Figura A.2 representa, em três etapas, o estabelecimento autônomo da melhor rota entre o formigueiro (**N** – *Nest*) e o alimento (**F** – *Food*). As três etapas que descrevem esse mecanismo são:

1. A primeira formiga encontra uma fonte de alimento, por meio de uma rota aleatória (**a**) e deixa um rastro de feromônio no caminho de volta (**b**) ao formigueiro;
2. Outras formigas seguem quatro possibilidades de rota. A rota mais curta apresenta a maior concentração de feromônio;
3. As formigas subsequentes são atraídas pela rota de maior chance, ou seja, pela rota mais curta. O nível de feromônio das rotas mais distantes diminui com a evaporação dessas substâncias químicas.



**Figura A.1** O comportamento organizado e distribuído de formigas em uma colônia é a inspiração para a meta-heurística ACO [157].



**Figura A.2** Identificação da melhor rota entre o formigueiro (**N**) e o alimento (**F**) [157].

A principal característica dos algoritmos computacionais inspirados em colônia de formigas é o uso de um mecanismo conhecido como reforço positivo, baseado na analogia com o

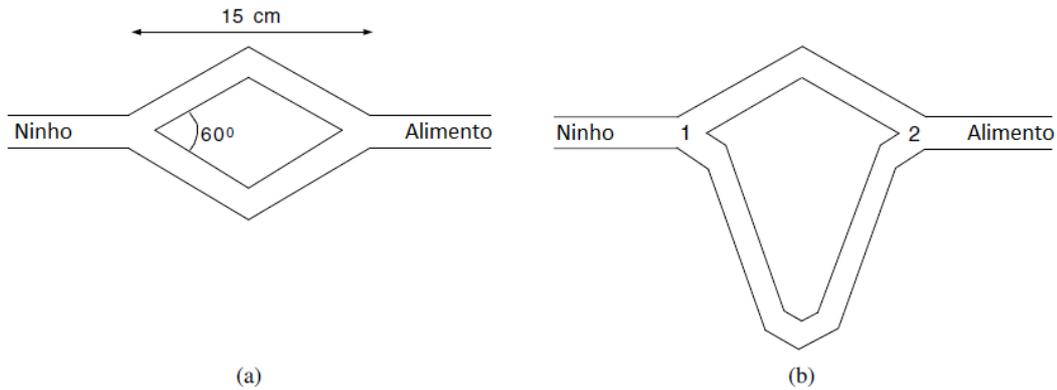
comportamento de certas espécies de formigas que depositam feromônio nos caminhos por elas trilhados, o que reforça essas rotas, que possivelmente são as melhores. Um feromônio virtual é utilizado para manter as boas soluções na memória do computador. Também há o conceito de reforço negativo, implementado por meio da analogia com o processo de evaporação que o feromônio sofre na natureza. A combinação do reforço positivo (depósito de feromônio) com o negativo (evaporação), permite evitar, na maioria dos casos, uma convergência prematura do algoritmo para soluções, possivelmente não ruins, mas talvez, sub-ótimas. O comportamento cooperativo é outro conceito importante. Algoritmos de colônia de formigas fazem uso da exploração simultânea de diferentes soluções por meio de diferentes formigas. As melhores formigas influenciam a exploração das demais, por meio das estratégias empregadas para atualizar o feromônio nos caminhos.

## A.1 Experimentos com Pontes Duplas

O comportamento de diversas espécies de formigas, por exemplo *Iridomyrmex humilis* [156], *Linepithema humile* e *Lasius niger* [158], é baseado na comunicação indireta mediada por feromônio. Esse comportamento foi investigado em alguns experimentos por diversos pesquisadores. Deneubourg *et al.* utilizaram uma ponte para a ligação entre um ninho de formigas oriundas da Argentina, da espécie *Iridomyrmex humilis*, e a fonte de alimento [159]. Os experimentos apresentam a variação da razão  $r = l_l/l_s$  entre os comprimentos de dois ramos da ponte dupla, em que  $l_l$  representa o comprimento do maior ramo e  $l_s$ , o do menor ramo.

No primeiro experimento, a ponte é formada por dois ramos de mesmo comprimento ( $r = 1$ ), de acordo com o exposto na Figura A.3(a). Inicialmente, as formigas são liberadas para se moverem livremente entre o ninho e o alimento. O percentual de formigas que escolhem um ramo ou o outro é observado em relação ao tempo. Embora, inicialmente, aconteçam escolhas aleatórias, eventualmente todas as formigas utilizam o mesmo ramo. Durante as primeiras escolhas, não há feromônio nos ramos, de modo que qualquer um deles pode ser escolhido com a mesma probabilidade. À medida que as formigas depositam feromônio enquanto caminham, a concentração de feromônio se torna maior na rota com mais formigas. Essa superioridade estimula mais formigas a escolher aquele ramo novamente e o processo continua até a maioria convergir para um único ramo.

No segundo experimento, a razão entre os comprimentos dos dois ramos é  $r = 2$ , de modo que o ramo longo possui o dobro do comprimento do ramo curto. A Figura A.3(b) mostra um esquema desse experimento. Após um intervalo de tempo, todas as formigas escolhem utilizar o menor ramo. Assim como no primeiro experimento, as formigas partem do ninho para explorar o ambiente e chegam a um ponto de decisão em que precisam optar por um dos ramos. Inicialmente, pelo fato de os ramos parecerem idênticos para as formigas, elas os escolhem aleatoriamente. É esperado que, metade das formigas escolha o longo e a outra metade escolha o curto, apesar de que oscilações no ambiente podem favorecer um em detrimento do outro. A



**Figura A.3** Experimentos com pontes duplas: (a) os ramos possuem o mesmo comprimento; (b) os ramos possuem comprimentos diferentes [159].

diferença em relação ao primeiro experimento é que, pelo fato de um ramo ser menor do que o outro, as formigas que escolhem o curto são as primeiras a chegar no alimento e a retornar para o ninho. Logo, quando as próximas formigas tiverem que decidir qual o melhor ramo, a maior concentração de feromônio polariza essa decisão para o ramo curto. O acúmulo de feromônio nele é incrementado rapidamente, o que atrai mais formigas. Entretanto, mesmo com uma razão  $r = 2$ , nem todas as formigas utilizam o caminho curto (uma pequena parcela utiliza o caminho longo). Esse comportamento é interpretado como uma *exploração por novos caminhos*, o que confere uma certa robustez ao aparecimento de falhas nas rotas já escolhidas.

## A.2 Um Modelo Estocástico

Deneubourg *et al.* propuseram um modelo estocástico simples, que descreve o comportamento de colônias de formigas, de acordo com os experimentos de ponte dupla que realizaram. Nesse modelo,  $\psi$  formigas por segundo atravessam a ponte, em sentidos opostos, a uma velocidade constante  $v$  cm/s e depositam uma unidade de feromônio em cada ramo. Dados os comprimentos  $l_s$  e  $l_l$  dos ramos curto e longo, respectivamente, uma formiga que escolhe o ramo curto, o atravessa em  $t_s = l_s/v$  segundos, enquanto uma formiga que escolhe o ramo longo, utiliza  $r \cdot t_s$  segundos para atravessá-lo, em que  $r = l_l/l_s$ .

A probabilidade  $p_{ia}(t)$  de que uma formiga que chega a um ponto de decisão  $i \in \{1, 2\}$ <sup>1</sup> selecione o ramo  $a \in \{s, l\}$ , em que  $s$  e  $l$  denotam os ramos curto e longo, respectivamente, em um instante  $t$ , é uma função da quantidade total de feromônio  $\phi_{ia}(t)$  no ramo, que é proporcional ao número de formigas que utilizaram o ramo até o instante  $t$ . Por exemplo, a probabilidade  $p_{is}(t)$  de uma formiga escolher o ramo curto é dada por

$$p_{is}(t) = \frac{(t_s + \phi_{is}(t))^\alpha}{(t_s + \phi_{is}(t))^\alpha + (t_s + \phi_{il}(t))^\alpha}. \quad (\text{A.1})$$

<sup>1</sup>Os pontos de decisão estão apresentados na Figura A.3(b).

A Fórmula A.1, assim como o valor  $\alpha = 2$ , foi encontrada a partir dos experimentos de ponte dupla. A probabilidade  $p_{il}(t)$  de uma formiga escolher o ramo longo é dada por  $p_{il}(t) = 1 - p_{is}(t)$ .

Esse modelo considera que a quantidade de feromônio em um ramo é proporcional ao número de formigas que utilizaram o ramo até aquele instante, de modo que a evaporação do feromônio não é contabilizada. As equações diferenciais que descrevem esse sistema são

$$\frac{d\phi_{is}}{dt} = \psi p_{js}(t - t_s) + \psi_{is}(t), \quad (i = 1, j = 2; i = 2, j = 1), \quad (\text{A.2})$$

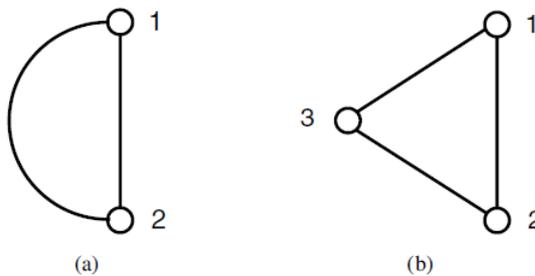
$$\frac{d\phi_{il}}{dt} = \psi p_{jl}(t - r \cdot t_s) + \psi_{il}(t), \quad (i = 1, j = 2; i = 2, j = 1). \quad (\text{A.3})$$

Na Equação A.2, a variação instantânea, em  $t$ , de feromônio no ramo  $s$  e no ponto de decisão  $i$  é dada pelo fluxo de formigas  $\psi$ , considerado constante, multiplicado pela probabilidade de escolha do ramo curto no ponto de decisão  $j$ , no instante  $t - t_s$ . A esse produto, é somado um outro, entre o fluxo de formigas e a probabilidade de escolha do ramo curto, no ponto de decisão  $i$ , no instante de tempo  $t$ . A constante  $t_s$  representa um tempo de atraso, isto é, o tempo necessário para que as formigas atravessassem o ramo curto. A Equação A.2 expressa a mesma informação, exceto que o tempo de atraso é dado por  $r \cdot t_s$ .

### A.3 Colônias de Formigas Artificiais

Os experimentos de ponte dupla mostram que colônias de formigas apresentam uma modelo de otimização: por meio do uso de regras de probabilidade baseadas em informações locais, as formigas conseguem identificar o menor caminho entre dois pontos em seu ambiente. Os experimentos de ponte dupla inspiram o projeto de formigas artificiais, que se movem em grafos e encontram a menor rota entre o ninho e o alimento.

Considere o grafo da Figura A.4(a), que reproduz o modelo do experimento mostrado na Figura A.3(b).



**Figura A.4** Grafos equivalentes ao modelo experimental da Figura A.3(b). Em ambos os casos, as formigas partem do ninho para o alimento e retornam pelo percurso mais curto ou pelo mais longo. (a) O ramo longo é  $r$  vezes maior que o curto. (b) Cada arco do grafo possui o mesmo comprimento e um arco longo seria representado por uma sequência de arcos.

O grafo consiste em dois nós (1 e 2, que representam o ninho e o alimento, respectivamente), que são conectados por dois arcos, um curto e um longo. O arco longo é  $r$  vezes maior que o arco curto, em que  $r$  é um número inteiro. Adicionalmente, considere que o tempo é representado no domínio discreto e que para cada intervalo de tempo, cada formiga caminha em direção ao nó vizinho, a uma velocidade constante. Durante esse percurso, as formigas adicionam uma unidade de feromônio aos arcos que elas utilizam. As formigas caminham pelo grafo, escolhendo probabilisticamente os caminhos:  $p_{is}$  é a probabilidade de uma formiga, localizada no nó  $i$ , no instante  $n$ , escolher o caminho curto;  $p_{il}(n)$  é a probabilidade de escolher o caminho longo. Essas probabilidades são funções das trilhas de feromônio  $\phi_{ia}$  que as formigas que estão em  $i$ , ( $i \in \{1, 2\}$ ) encontram no ramo  $a$ , ( $a \in \{s, l\}$ ), de modo que

$$p_{is}(n) = \frac{[\phi_{is}(n)]^\alpha}{[\phi_{is}(n)]^\alpha + [\phi_{il}(n)]^\alpha}, p_{il}(n) = \frac{[\phi_{il}(n)]^\alpha}{[\phi_{is}(n)]^\alpha + [\phi_{il}(n)]^\alpha}. \quad (\text{A.4})$$

A atualização das trilhas de feromônio nos dois ramos é dada por

$$\begin{aligned} \phi_{is}(n) &= \phi_{is}(n-1) + p_{is}(n-1)m_i(n-1) + p_{js}(n-1)m_j(n-1), \\ &\quad (i = 1, j = 2; i = 2, j = 1), \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

$$\begin{aligned} \phi_{il}(n) &= \phi_{il}(n-1) + p_{il}(n-1)m_i(n-1) + p_{jl}(n-r)m_j(n-r), \\ &\quad (i = 1, j = 2; i = 2, j = 1), \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

em que  $m_i(n)$ , o número de formigas no nó  $i$ , no instante  $n$ , é dada por

$$\begin{aligned} m_i(n) &= p_{js}(n-1)m_j(n-1) + p_{jl}(n-r)m_j(n-r), \\ &\quad (i = 1, j = 2; i = 2, j = 1). \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Esse modelo difere daquele apresentado na Seção A.2 em dois aspectos importantes:

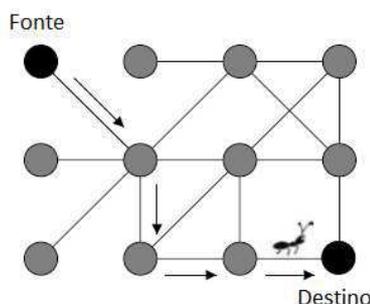
- Ele considera o comportamento geral do sistema e não o comportamento estocástico de cada formiga;
- Ele é um modelo de tempo discreto, enquanto que o outro modelo é de tempo contínuo. Desse modo, ele utiliza equações diferenças, enquanto o modelo apresentado na Seção A.2 utiliza equações diferenciais.

Outra maneira de modelar, por um grafo, o experimento representado na Figura A.3(b) é mostrada na Figura A.4(b). Nesse modelo, cada arco do grafo possui o mesmo comprimento e um arco longo é representado por uma sequência de arcos. Na Figura A.4(a), o arco longo é duas vezes maior do que o arco curto. Os dois grafos são equivalentes, apesar de o segundo modelo permitir uma implementação computacional mais fácil para grafos com muitos nós.

## A.4 Formigas Artificiais e Percursos de Custo Mínimo

De acordo com a Seção A.3, um conjunto de equações diferenças pode reproduzir o comportamento do modelo contínuo proposto por Deneubourg. Além disso, Dorigo *et al.* desenvolveram algoritmos que podem ser usados para solucionar problemas de custo mínimo em grafos mais complexos do que os grafos utilizados para representar os experimentos de ponte dupla.

Considere um grafo  $G = (N, A)$ , em que  $N$  é o conjunto de  $n = |N|$  nós e  $A$  é o conjunto de arcos que conectam esses nós. A Figura A.5 mostra um exemplo de um grafo que contém diversos possíveis caminhos entre os nós fonte e destino (equivalentes ao ninho e à fonte de alimento, respectivamente), de modo que as formigas precisam utilizar um percurso de menor custo.



**Figura A.5** Soluções construídas por formigas, isto é, percursos entre um nó fonte e um nó destino.

Entretanto, se o comportamento das formigas artificiais que representam os experimentos de pontes duplas, mesmo que diretamente estendido, for utilizado para solucionar o problema de custo mínimo no grafo, durante a construção das soluções, as formigas podem gerar laços (*loops*) em seus percursos. Esses laços concentram mais feromônio e tendem a confinar as formigas em suas rotas. Desse modo, é necessário incrementar as habilidades das formigas artificiais, de maneira a conservar as características mais importantes das formigas reais e a solucionar os problemas de percursos de custo mínimo em grafos genéricos.

Uma forma limitada de memória é provida às formigas artificiais, em que elas podem armazenar os percursos parciais que utilizaram até aquele momento, assim como os custos das rotas percorridas. Por meio do uso de memória, as formigas podem implementar comportamentos eficazes para a solução dos problemas supracitados. Esses comportamentos são

- Construção de soluções probabilísticas polarizadas pelas trilhas de feromônio;
- Percurso de volta determinística com a eliminação de laços e com atualização de feromônio;
- Avaliação da qualidade das soluções geradas e a utilização dessa métrica para a determinação da quantidade de feromônio a ser depositada.

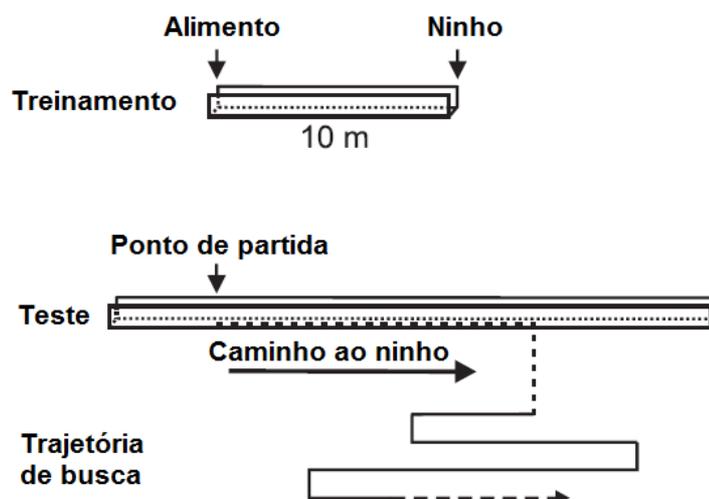
Embora os algoritmos de ACO sejam apropriados para solucionar problemas de custo mínimo, eles são uma abordagem interessante apenas para aqueles problemas em que algoritmos clássicos, por exemplo, programação dinâmica ou métodos de correção de rótulos [160], não podem ser eficientemente aplicados. Os seguintes tipos de problemas de custo mínimo se enquadram no campo de aplicações de algoritmos de ACO:

- Problemas NP, em que a dimensão do grafo estado-espaco completo é exponencial em relação à dimensão de representação do problema. Nesse caso, as formigas utilizam o grafo menor  $G$ , construído a partir dos componentes do problema e utilizam sua memória para gerar soluções apropriadas;
- Problemas de custo mínimo em que as propriedades do grafo do problema mudam no tempo, em paralelo ao processo de otimização, que precisa se adaptar à dinâmica do problema. Nesse caso, o grafo do problema pode até estar disponível (*e.g.*, problemas de redes de comunicações), mas suas propriedades (*e.g.*, os custos de conexões), podem mudar com o tempo. Desse modo, o uso de algoritmos de ACO é mais apropriado à medida em que a variação dos custos aumenta ou o conhecimento sobre o processo de variação diminui;
- Problemas em que a arquitetura computacional é espacialmente distribuída (*e.g.*, processamento distribuído e paralelo em redes de comunicações). Algoritmos de ACO são eficazes para esses tipos de arquitetura, devido ao seu caráter intrinsecamente distribuído e formado por múltiplos agentes.

## A.5 Experimentos de Manipulação de Pernas de Formigas Desérticas

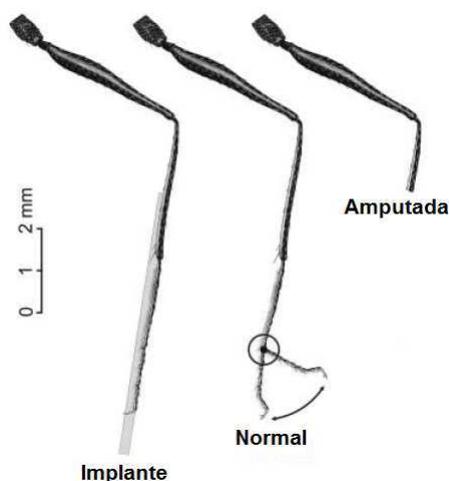
Nos experimentos para a verificação do mecanismo de odômetro que formigas desérticas apresentam, elas foram treinadas para caminhar a partir de seu ninho até o alimento por uma distância de dez metros em uma calha metálica linear, de acordo com o ilustrado na Figura A.6 (parte superior). Após um dia de treinamento, as formigas foram coletadas no ponto de alimento e transferidas para uma calha de teste, paralelamente alinhada com a calha de treinamento, de acordo com o ilustrado na Figura A.6 (parte inferior). Uma vez transferidas, elas realizaram seus trajetos de retorno ao ninho. Os mediadores do experimento marcaram os pontos em que as formigas mudaram suas rotas diretas. Nesses pontos elas passaram a adotar um comportamento de busca por trajetos alternativos [8].

De maneira mais específica, as formigas que alcançaram o alimento na etapa de treinamento foram coletadas e submetidas a manipulações experimentais. Para aumentar os comprimentos dos passos das formigas, nos trajetos de retorno ao ninho, suas pernas foram estendidas com



**Figura A.6** Diagrama que representa as calhas e os procedimentos de treinamento e teste, aplicados à formiga *Cataglyphis fortis*. O diagrama não está em escala [8].

cerdas de porco coladas à tíbia e ao tarso, conforme ilustrado na Figura A.7 (implante). Para diminuir o comprimento dos passos, as pernas foram amputadas por meio do corte de tarsômeros na metade do segmento da tíbia.



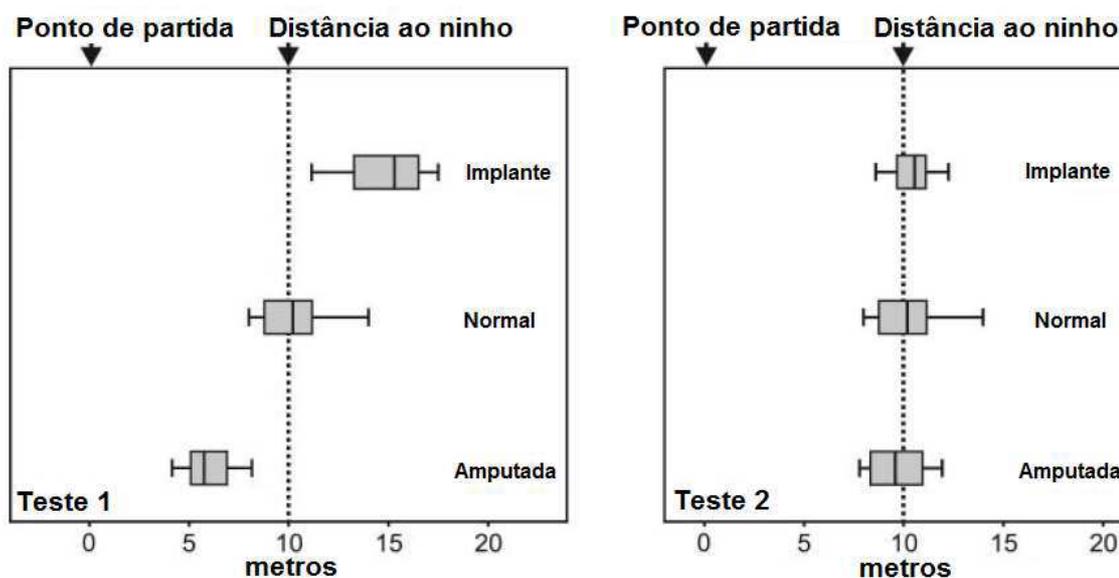
**Figura A.7** Representação das manipulações das pernas das formigas [8].

Os animais operados foram supridos com um item de alimento e transferidos para a calha de teste, com o alimento em suas mandíbulas (Teste 1). Essas formigas iniciaram seu retorno e quando percorreram a suposta distância ao ninho, passaram a adotar um comportamento de busca por trajetos. Os resultados estão representados na Figura A.8

As formigas com implante ultrapassaram a distância do ninho, percorrendo 15,3 metros, antes de iniciar o comportamento de busca por novos trajetos. Por outro lado, as formigas amputadas percorreram uma distância menor (5,75 metros) do que à do ninho, antes de iniciar o

comportamento de busca por novos trajetos. As formigas com pernas normais (sem manipulação) percorreram uma distância bastante próxima (10,2 metros) à do ninho [8].

As formigas modificadas e testadas foram posicionadas novamente no ninho e submetidas a um novo teste (Teste 2). Desse modo, elas percorreram o trajeto de ida ao alimento, por um dia, e apresentaram um trajeto de retorno ao ninho, com distâncias percorridas muito próximas àquelas observadas por formigas com pernas normais. As formigas com implante percorreram uma distância de 10,55 metros e as formigas amputadas percorreram 10,25 metros [8].



**Figura A.8** Resultados referentes às distâncias das formigas experimentais, testadas imediatamente após o comprimento de suas pernas terem sido modificados [8].

Esses resultados dão suporte à hipótese de que formigas desérticas utilizam um pedômetro para medições de distância, ou um contador de passos, embora elas não contem os passos literalmente.

## APÊNDICE B

---

---

# Biografia e Publicações

---

Marcelo Portela Sousa nasceu em Salvador, Bahia, em 31 de outubro de 1983, e é Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), desde 2010. Graduado em Engenharia Elétrica, em 2007, pela ÁREA1 – Faculdade de Ciência e Tecnologia e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em 2009. Atualmente é aluno do doutorado em Engenharia Elétrica pela UFCG e pesquisador do Instituto de Estudos Avançados em Comunicações (Iecom). Foi pesquisador bolsista da Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (Coelba) e da Faculdade ÁREA1, pelo convênio de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D 0047-013). Membro e voluntário, desde 2005, do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), Marcelo Portela é revisor do periódico *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (TVT), do periódico *Journal of Networks*(JNW), publicado pela Academy Publisher, e contribuiu com conferências renomadas como, Globecom'10, WPMC'10, VTC Spring'10, ITU Kaleidoscope'10, WCNC'12, ICACCI'12, entre outras, em que atuou como coordenador de sessão, ou como revisor. É mentor do Ramo Estudantil IEEE, do IFPB *campus* Campina Grande. Tem experiência e interesse na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica e Telecomunicações, atuando principalmente nos seguintes temas: Sistemas de Comunicações, Diversidade Cooperativa, Otimização por Colônia de Formigas, Redes de Sensores Sem Fio, Redes Cognitivas e Sistemas Nebulosos.

As principais publicações do autor estão listadas a seguir.

### **Artigos completos publicados em periódicos:**

1. SOUSA, M. P.; LOPES, W. T. A.; MADEIRO, F.; ALENCAR, M. S. "Cognitive LF-Ant: A Novel Protocol for Healthcare Wireless Sensor Networks". *Sensors* (Basel), v. 12, p. 10463-10486, 2012.
2. SOUSA, M. P. ; KUMAR, A. ; LOPES, R. F. ; LOPES, W. T. A. ; ALENCAR, M. S. "Cooperative Space-Time Block Codes for Wireless Video Sensor Networks". *Wireless Personal Communications*, v. 64, p. 123-137, Springer Verlag, 2012.

3. SOUSA, M. P.; LOPES, W. T. A.; MADEIRO, F.; ALENCAR, M. S. “Fundamentos de Redes de Cuidados Médicos”. Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação (RTIC), v. 1, p. 45-51, 2012.
4. SOUSA, M. P. ; LOPES, R. F. ; KUMAR, A. ; LOPES, W. T. A. ; ALENCAR, M. S. “Cooperative STBC with Fuzzy Election Applied to Surveillance Wireless Video Sensor Networks”. International Journal of Communication Networks and Distributed Systems (IJCNDS), v. 7, p. 293-310, Inderscience Publishers, 2011.
5. SOUSA, M. P. ; LOPES, W. T. A. “Desafios em Redes de Sensores sem Fio”. Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação (RTIC), v. 1, p. 41-47, 2011.

### **Livros publicados:**

1. ALENCAR, M. S.; SOUSA, M. P.; LOPES, R. F.; LOPES, W. T. A. “Cognitive Networks for Advancing Wireless Communication”. IGI Global (**Em fase de publicação**).

### **Capítulos de livros publicados:**

1. SOUSA, M. P. ; LOPES, W. T. A. ; COSTA, A. F. B. F; GOMES, R. C. M. ; ALENCAR, M. S. “Cooperative Diversity Applied to Cognitive Wireless Sensor Networks”. Advances in Sensor Networks Research. Nova Publishers (**Em fase de publicação**).
2. SOUSA, M. P. ; LOPES, R. F. ; LOPES, W. T. A. ; ALENCAR, M. S. “Redes Cognitivas: Um Novo Paradigma para as Comunicações Sem Fio”. In: Sociedade Brasileira de Computação. (Org.). Livro de Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC'10). Porto Alegre - RS: Sociedade Brasileira de Computação (SBC), 2010, p. 153-197.

### **Trabalhos completos publicados em anais de congressos:**

1. SOUSA, M. P.; LOPES, W. T. A.; MADEIRO, F.; ALENCAR, M. S. “The Impact of Channel Estimation Errors in Wireless Sensor Networks over Cooperative Modulation Diversity”. In: IEEE Global Wireless Summit (GWS'13), 2013, Atlantic City, New Jersey, USA.
2. SOUSA, M. P.; LOPES, W. T. A.; MADEIRO, F.; ALENCAR, M. S. “Alocação Dinâmica de Recursos Bio-inspirada Aplicada a Redes de Cuidados Médicos”. In: XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBRT'12), 2012, Brasília.
3. CAVALCANTE, M. A. ; SOUSA, M. P. “Avaliação de Desempenho de um Protocolo de Segurança para Sistemas RFID”. In: XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBRT'12), 2012, Brasília.
4. SOUSA, M. P.; LOPES, W. T. A.; MADEIRO, F.; ALENCAR, M. S. “Diversidade em Modulação Cooperativa com Sensoriamento Espectral para Redes Médicas”. In: Encontro Anual do Iecom em Comunicações, Redes e Criptografia, 2012, Campina Grande, PB.

5. SOUSA, M. P. ; BARROS, M. T. ; QUEIROZ, W. J. L. ; LOPES, W. T. A. ; ALENCAR, M. S. . “On the Improvement of Wireless Sensor Networks Using Modulation Diversity and Fuzzy Clustering”. In: The International Workshop on Telecommunications (IWT’11), 2011, Rio de Janeiro – RJ.
6. SOUSA, M. P. ; LOPES, W. T. A. ; ALENCAR, M. S. . “Otimização por Colônia de Formigas com Informação Heurística Nebulosa Aplicada a Redes de Sensores sem Fio”. In: XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT’11), 2011, Curitiba - PR.
7. SOUSA, M. P. ; LOPES, W. T. A. ; ALENCAR, M. S. . “LF-Ant: A Bio-inspired Cooperative Cross-layer Design for Wireless Sensor Networks”. In: The 22nd IEEE Symposium on Personal, Indoor, Mobile and Radio Communications (PIMRC’11), 2011, Toronto, Canada.
8. SOUSA, M. P. ; LOPES, W. T. A. ; ALENCAR, M. S. . “Ant Colony Optimization with Fuzzy Heuristic Information Designed for Cooperative Wireless Sensor Networks”. In: The 14th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM’11), 2011, Miami, USA.
9. FERREIRA, R. S. A. ; REGIS, C. D. M. ; MADEIRO, F. ; SOUSA, M. P. ; GUIMARAES, J. C. P. ; SANTANA, F. J. R. ; LOPES, W. T. A. . “Aplicação do Codificador H.264 na Transmissão de Vídeos de Subestações”. In: Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL’11), 2011, Fortaleza, CE.
10. SOUSA, M. P. ; LOPES, R. F. ; LOPES, W. T. A. ; ALENCAR, M. S. . “Low-Energy Selective Cooperative Diversity with ARQ for Wireless Image Sensor Networks”. In: IEEE 72nd Vehicular Technology Conference (VTC2010-Fall), 2010, Ottawa, Canada.
11. SOUSA, M. P. ; LOPES, R. F. ; KUMAR, A. ; LOPES, W. T. A. ; ALENCAR, M. S. . “Cooperative Space-Time Block Codes Applied to Wireless Video Sensor Networks”. In: 13th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC’10), 2010, Recife – PE.
12. LOPES, R. F. ; REGIS, C. D. M. ; SOUSA, M. P. ; LOPES, W. T. A. ; ALENCAR, M. S. . “FAST: A Fuzzy Adaptive Spatial Video Transcoding System”. In: 13th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC’10), 2010, Recife – PE.
13. SOUSA, M. P. ; LOPES, R. F. ; KUMAR, A. ; LOPES, W. T. A. ; ALENCAR, M. S. . “Cooperative STBC with Fuzzy Election Applied to Surveillance Wireless Video Sensor Networks” (Paper invited to publication in International Journal of Communication Networks and Distributed Systems). In: IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom’10) Workshop on Advanced Sensor Integration Technology (ASIT’10), 2010, Miami, USA.
14. LOPES, R. F. ; GLOVER, I. ; SOUSA, M. P. ; LOPES, W. T. A. ; ALENCAR, M. S. . “A Simulation Framework for Spectrum Sensing”. In: 13th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC’10), 2010, Recife – PE.
15. SOUSA, M. P. ; SANTOS, J. F. G. ; FREIRE, V. V. ; LOPES, W. T. A. ; ALENCAR, M. S. . “Esquema STBC Cooperativo com Eleição Nebulosa Aplicado a Redes de Sensores de Vídeo

- sem Fio”. In: 9th International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS’10), 2010, Rio de Janeiro.
16. 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’09), 2009, Blumenau, SC.
  17. 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’09), 2009, Tenerife, Canary Islands, Spain.
  18. 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’09), 2009, Blumenau, SC.
  19. SOUSA, M. P. ; KUMAR, A. ; ALENCAR, M. S. ; LOPES, W. T. A. . “Scalability in an Adaptive Cooperative System for Wireless Sensor Networks”. In: IEEE International Conference on Telecommunications (ICUMT’09) and Workshops, 2009, St. Petersburg, Russia.
  20. REGIS, C. D. M. ; Rocha B. R. ; SOUSA, M. P. ; ALENCAR, M. S. . “Transmissão de Vídeos Transcodificados com o Filtro da Média”. In: 8th International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS’09), 2009, Florianópolis, SC.
  21. SOUSA, M. P. ; REGIS, C. D. M. ; LOPES, W. T. A. ; ALENCAR, M. S. . “Diversidade Cooperativa Adaptativa Aplicada a Redes de Sensores sem Fio”. In: 8th International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS’09), 2009, Florianópolis, SC.
  22. 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.
  23. 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 Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad (IBERDISCAP’08), 2008, Bogotá, Colombia.

A Figura B.1 apresenta as citações das publicações do autor referentes a um capítulo de livro e dois artigos publicados em periódicos internacionais, até maio de 2013. As auto-citações não estão incluídas na relação.

Artigo/Capítulo	Periódico	JCR (2011)	Qualis Capes	Citado por:
Cognitive LF-Ant: A Novel Protocol for Healthcare Wireless Sensor Networks	Sensors (Basel)	1,739	A1 - Eng. IV	Gerhard P. Hancke and Gerhard P. Hancke Jr. "The Role of Advanced Sensing in Smart Cities." <i>Sensors</i> 13, no. 1 (2012): 393-425.
				Zong-Wen Liang, et al. "The Research for Mobile Network Resources Searching Based on Agent Using Ant Colony Optimization." <i>IEEE International Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICWAMTIP'12)</i> , 2012.
Cooperative Space-Time Block Codes for Wireless Video Sensor Networks	Wireless Personal Communications - Springer	0,458	A2 - Eng. IV	Hao Yuan, Changbing Li and Maokang Du. "Resource Scheduling of Cloud Computing for of Wireless Sensor Network Based on Ant Colony Algorithm." <i>Information Technology Journal</i> (2012).
Redes Cognitivas: Um Novo Paradigma para as Comunicações Sem Fio	Livro de Minicursos do SBRC'10 (SBC)	-	-	Eduardo Pagani Júlio and Célio Albuquerque. "Cognitive Wireless Networks.", Relatório Técnico, Universidade Federal Fluminense, 2013.
				Julio Cesar Huarachi Soto. "Um Esquema para Análise Multicritério e Cooperativa da Presença de Ataques EUP em Redes Ad Hoc de Rádio Cognitivo.", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR 2012.
				Eduardo Pagani Júlio. "Escalonamento de Espectro e Roteamento em Redes Cognitivas: Uma Perspectiva de Otimização.", Relatório Técnico, 2011.
				Eduardo Pagani Júlio. "Roteamento em Redes Cognitivas: Desafios e Taxonomia.", Relatório Técnico, Universidade Federal Fluminense, 2010.
				Tais Américo Almeida. "Análise de Desempenho do Sensoriamento de Espectro em Redes de Rádios Cognitivos.", Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade UNISALLE, Canoas, RS, 2010

**Figura B.1** Citações das publicações do autor até maio de 2013. As auto-citações não estão incluídas na relação.

---

---

## Referências Bibliográficas

---

- [1] A. Boukerche, E. Nakamura and A. Loureiro. “Algorithms for Wireless Sensor Networks: Present and Future”. In *Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks*, edited by A. Boukerche, chapter 1, pp. 1–19. John Wiley & Sons, 2009.
- [2] S. Haykin. “Cognitive Dynamic Systems”. Cambridge University Press, 2012.
- [3] M. P. Sousa, R. F. Lopes, W. T. A. Lopes and M. S. Alencar. “Redes Cognitivas: Um Novo Paradigma para as Comunicações Sem Fio”. In *Minicursos do XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, edited by C. A. Kamienski, L. P. Gasparly and M. P. Barcellos, chapter 4, pp. 153–197. Sociedade Brasileira de Computação, Porto Alegre, RS, 2010.
- [4] O. Akan, O. Karli and O. Ergul. “Cognitive Radio Sensor Networks”. *IEEE Network*, vol. 23, no. 4, pp. 34–40, 2009.
- [5] G. Anastasi, M. Conti, M. Francesco and A. Passarella. “Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A Survey”. *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 3, pp. 537–568, May 2009.
- [6] I. F. Akyildiz and M. C. Vuran. *Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, 2010.
- [7] Q. Mahmoud. *Cognitive Networks: Towards Self-Aware Networks*. John Wiley & Sons, 2007.
- [8] M. Wittlinger, R. Wehner and H. Wolf. “The Ant Odometer: Stepping on Stilts and Stumps”. *Science*, vol. 312, no. 5782, pp. 1965–1967, 2006.
- [9] M. S. Alencar. *Telefonia Celular Digital*. Érica, 2004.
- [10] W. T. A. Lopes. “Diversidade em Modulação Aplicada à Transmissão de Imagens em Canais com Desvanecimento”. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, Junho 2003.
- [11] A. Sendonaris, E. Erkip and B. Aazhang. “User Cooperation Diversity – Part I: System Description”. *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, pp. 1927–1938, 2003.

- 
- [12] A. Sendonaris, E. Erkip and B. Aazhang. “User Cooperation Diversity – Part II: Implementation Aspects and Performance Analysis”. *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, pp. 1939–1948, 2003.
- [13] M. P. Sousa. “Diversidade Cooperativa Adaptativa Aplicada a Redes de Sensores sem Fio”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Setembro 2009.
- [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)*, pp. 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)*, pp. 263–270, New York, NY, USA, 1999.
- [17] C.-Y. Chong and S. P. Kumar. “Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges”. *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 8, pp. 1247–1256, 2003.
- [18] R. Rashid and G. Robertson. “Accent: A Communication Oriented Network Operating System Kernel”. In *Proceedings of the 8th Symposium on Operating System Principles*, 1981.
- [19] R. D. C. Myers, A. Oppenheim and W. Dove. “Knowledge Based Speech Analysis and Enhancement”. In *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1984.
- [20] IEEE Std 802.15.1-2002. “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)”, 2002.
- [21] R. Dhaya, V. Sadasivam and R. Kanthavel. “Consistent Steering System using SCTP for Bluetooth Scatternet Sensor Network”. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, vol. 93, no. 4, pp. 267 – 270, 2012.
- [22] IEEE Std 802.15.4-2003. “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)", 2003.
- [23] F. Cuomo, A. Abbagnale and E. Cipollone. "Cross-Layer Network Formation for Energy-Efficient IEEE 802.15.4/ZigBee Wireless Sensor Networks". *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 2, pp. 672 – 686, 2013.
- [24] IEEE Std 802.16-2009 (Revision of IEEE Std 802.16-2004). "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems", 2009.
- [25] L.-D. Chou, D. C. Li and W.-Y. Hong. "Improving Energy-Efficient Communications with a Battery Lifetime-Aware Mechanism in IEEE 802.16e Wireless Networks". *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol. 25, no. 1, pp. 94 – 111, 2013.
- [26] F. Amigoni, G. Fontana and S. Mazzuca. "Robotic Sensor Networks: An Application to Monitoring Electro-Magnetic Fields". In *Proceedings of the 2007 Conference on Emerging Artificial Intelligence Applications in Computer Engineering: Real World AI Systems with Applications in eHealth, HCI, Information Retrieval and Pervasive Technologies*, pp. 384–393, Amsterdam, The Netherlands, 2007.
- [27] L. F. M. Vieira, A. A. F. Loureiro, A. O. Fernandes and M. Campos. "Redes de Sensores Aquáticas". In *Minicursos do XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, edited by C. A. Kamienski, L. P. Gasparly and M. P. Barcellos, chapter 5, pp. 199–240. Sociedade Brasileira de Computação, Porto Alegre, RS, 2010.
- [28] B. Buchli, F. Sutton and J. Beutel. "GPS-equipped Wireless Sensor Network Node for High-accuracy Positioning Applications". In *Lecture Notes on Computer Science. Proceedings of the 9th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN'12)*, pp. 179 – 195, Trento, Italy, 2012. Springer.
- [29] J. M. Kahn, R. H. Katz and K. S. J. Pister. "Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust". In *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99)*, 1999.
- [30] 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.
- [31] M. Hatler. *Wireless Sensor Networks: Mass Market Opportunities*. ONWorld, Inc., 2004.

- 
- [32] 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)*, pp. 588–599, 2004.
- [33] M. Kovatsch, S. Duquennoy and A. Dunkels. “A Low-power CoAP for Contiki”. In *Proceedings of the IEEE Workshop on Internet of Things Technology and Architectures*, Valencia, Spain, October 2011.
- [34] A. Eswaran, A. Rowe and R. Rajkumar. “Nano-RK: an Energy-Aware Resource-Centric RTOS for Sensor Networks”. In *26th IEEE International Real-Time Systems Symposium*, pp. 1 – 10, dec. 2005.
- [35] M. O. Farooq and T. Kunz. “Operating Systems for Wireless Sensor Networks: A Survey”. *Sensors*, vol. 11, no. 6, pp. 5900 – 5930, 2011.
- [36] ZigBee Alliance. Disponível em. “<http://www.zigbee.org>”, Acessado em Abril de 2012.
- [37] N. Petrellis, N. Konofaos and G. Alexiou. “A Wireless Infrared Sensor Network for the Estimation of the Position and Orientation of a Moving Target”. 5 2010.
- [38] ANT Technology. Disponível em. “<http://www.thisisant.com/>”, Acessado em Junho de 2013.
- [39] Dynastream Innovations. Disponível em. “<http://www.dynastream.com/>”, Acessado em Junho de 2013.
- [40] IPv6 over Low power WPAN (6LoWPAN). Disponível em. “<http://datatracker.ietf.org/wg/6lowpan/charter/>”, Acessado em Abril de 2012.
- [41] L. Atzori, A. Iera and G. Morabito. “The Internet of Things: A Survey”. *Computer Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.
- [42] HART Communication Protocol and Foundation. Disponível em. “<http://www.hartcomm.org/>”, Acessado em Abril de 2012.
- [43] R. A. F. Mini, B. Nath and A. A. F. Loureiro. “Prediction-based Approaches to Construct the Energy Map for Wireless Sensor Networks”. In *XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC’03)*, 2003.
- [44] A. A. F. Loureiro, J. M. S. Nogueira, L. B. Ruiz, R. A. Mini, E. F. Nakamura and C. M. S. Figueiredo. “Redes de Sensores Sem Fio”. In *Minicursos do XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Sociedade Brasileira de Computação, Natal, RN, 2003.

- 
- [45] 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)*, pp. 336–343, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [46] P. S. Sausen. “Gerenciamento Integrado de Energia e Controle de Topologia em Redes de Sensores Sem Fio”. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, 2008.
- [47] D. N. Rakhmatov and S. B. K. Vrudhula. “Energy Management for Battery-Powered Embedded Systems”. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 277–324, 2003.
- [48] L. B. Ruiz, J. M. Nogueira and A. A. F. Loureiro. “MANNA: a Management Architecture for Wireless Sensor Networks”. *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 2, pp. 116–125, feb 2003.
- [49] L. M. C. Arboleda and N. Nasser. “Comparison of Clustering Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks”. In *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE’06)*., pp. 1787–1792, May 2006.
- [50] F. Aurenhammer. “Voronoi Diagrams – a Survey of a Fundamental Geometric Data Structure”. *ACM Computing Survey*, vol. 23, pp. 345–405, September 1991.
- [51] E. J. Melo and M. Liu. “Analysis of Energy Consumption and Lifetime of Heterogeneous Wireless Sensor Networks”. In *IEEE Global Telecommunications Conference (GlobeCom’02)*, volume 1, pp. 21–25, 2002.
- [52] 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*, January 2000.
- [53] M. Fojtik, D. Kim, G. Chen, Y.-S. Lin, D. Fick, J. Park, M. Seok, M.-T. Chen, Z. Foo, D. Blaauw and D. Sylvester. “A Millimeter-Scale Energy-Autonomous Sensor System With Stacked Battery and Solar Cells”. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 48, no. 3, pp. 801 – 813, 2013.
- [54] G. Mendez and S. Mukhopadhyay. “A Wi-Fi Based Smart Wireless Sensor Network for an Agricultural Environment”. In *Wireless Sensor Networks and Ecological Monitoring*, edited by S. C. Mukhopadhyay and J.-A. Jiang, volume 3 of *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation*, pp. 247 – 268. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [55] M. A. Fernandes, S. G. Matos, E. Peres, C. R. Cunha, J. A. López, P. J. S. G. Ferreira, M. J. C. S. Reis and R. Morais. “A Framework for Wireless Sensor Networks

- 
- Management for Precision Viticulture and Agriculture Based on IEEE 1451 Standard”. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 95, pp. 19 – 30, 2013.
- [56] FCC. “FCC Radio Spectrum Home Page”, 2010. Disponível em: <http://www.fcc.gov/oet/spectrum>. Acessado em março de 2010.
- [57] G. Staple and K. Werbach. “The End of Spectrum Scarcity”. *IEEE Spectrum*, March 2004. Disponível em: <http://www.spectrum.ieee.org/mar04/3811>. Acessado em março de 2010.
- [58] A. Ghasemi. “Spectrum Sensing in Cognitive Wireless Networks: Requirements, Challenges and Design Trade-offs”. Ph.D. thesis, University of Toronto, Toronto, Canada, 2008.
- [59] FCC. “ET Docket no.02-155”. Technical report, Spectrum Policy Task Force Report, Nov 2002.
- [60] I. Akyildiz, Y. Altunbasak, F. Fekri and R. Sivakumar. “AdaptNet: An Adaptive Protocol Suite for the Next-Generation Wireless Internet”. *IEEE Communication Magazine*, vol. 3, no. 42, pp. pp.128–138, 2004.
- [61] I. Akyildiz, W. Lee, M. Vuran and S. Mohanty. “NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey”. *Computer Networks*, , no. 50, pp. pp.2127–2159, 2006.
- [62] R. W. Thomas, L. A. DaSilva and A. B. Mackenzie. “Cognitive networks”. In *Proceedings of the First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Baltimore, MD, USA, November 2005.
- [63] J. Mitola. “Cognitive Radio: an Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio”. Doctor of technology dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
- [64] J. Mitola and G. Q. Maguire. “Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal”. *IEEE Personal Communications*, vol. 6, pp. 13–18, Aug. 1999.
- [65] V. G. Menon, V. Johny, T. Tony and E. Alias. “Performance Analysis of Traditional Topology based Routing Protocols in Mobile Ad hoc Networks”. *International Journal of Computer Science*, vol. 2, no. 1, 2013.
- [66] K. Vijayasankar, R. Vedantham and A. G. Dabak. “Enhanced Carrier Sense Multiple Access (CSMA) Protocols”, 2013. US Patent 20,130,049,939.

- 
- [67] R. W. Thomas, D. H. Friend, L. A. DaSilva and A. B. Mackenzie. “Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems”. chapter Cognitive Networks. Springer, 2007.
- [68] B. Fette. “Introducing Adaptive, Aware, and Cognitive Radios”. In *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems*, edited by H. Arslan. Springer, 2007.
- [69] M. Buddhikot, P. Kolodzy, S. Miller, K. Ryan and J. Evans. “DIMSUNnet: New Directions in Wireless Networking Using Coordinated Dynamic Spectrum”. In *Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoW-MoM’05)*, pp. 78 – 85, 2005.
- [70] O. Ileri, D. Samardzija and N. Mandayam. “Demand Responsive Pricing and Competitive Spectrum Allocation via Spectrum Server”. In *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN’05)*, pp. 194–202, November 2005.
- [71] S. Haykin. “Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications”. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 2, no. 23, pp. 201–220, 2005.
- [72] K.-C. Chen, Y.-J. Peng, N. Prasad, Y.-C. Liang and S. Sun. “Cognitive Radio Network Architecture: Part I – General Structure”. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (ICUIMC’08)*, pp. 114–119, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [73] R. Tandra, A. Sahai and S. M. Mishra. “What is a Spectrum Hole and What Does it Take to Recognize One?” *Proceedings of the IEEE – Special Issue on Cognitive Radio*, vol. 97, no. 5, pp. 824–848, may 2009.
- [74] IEEE 802.22 Draft Standard. “IEEE P802.22TM/D0.3 Draft Standard for Wireless Regional Area Networks”, May 2007.
- [75] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru and S. Shankar. “IEEE 802.22: the First Worldwide Wireless Standard Based on Cognitive Radios”. In *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN’05)*, pp. pp.328–337, Baltimore, Nov. 2005.
- [76] A. Kumar and K. Shin. “Towards Context-Aware Wireless Spectrum Agility”. In *Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile computing and networking (MobiCom’07)*, pp. 318–321, New York, USA, 2007. ACM.
- [77] C. Cormio and K. R. Chowdhury. “A Survey on MAC Protocols for Cognitive Radio Networks”. *Ad Hoc Networks*, vol. 7, pp. 1315–1329, September 2009.

- 
- [78] M. Cesana, F. Cuomo and E. Ekici. “Routing in Cognitive Radio Networks: Challenges and Solutions”. *Ad Hoc Networks*, vol. 9, no. 3, pp. 228–248, May 2011.
- [79] L. Hester and A. D. Ridley. “Cognitive Radio Networks: Not Your Father’s Wireless Network”. *The Telecommunications Review*, pp. 44–54, 2008.
- [80] S. Ball and A. Ferguson. “Consumer Applications of Cognitive Radio Defined Networks”. In *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN’05)*, pp. 518–525, nov. 2005.
- [81] J. A. Stine. “Spectrum Management: the Killer Application of Ad Hoc and Mesh Networking”. In *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN’05)*, pp. 184–193, nov. 2005.
- [82] I. F. Akyildiz and X. Wang. “A Survey on Wireless Mesh Networks”. *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 9, pp. 23–30, sept. 2005.
- [83] P. Kyasanur. “Mesh Networking Protocols to Exploit Physical Layer Capabilities”. In *IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh)*, 2005.
- [84] L. Berlemann, S. Mangold and B. H. Walke. “Policy-Based Reasoning for Spectrum Sharing in Radio Networks”. In *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN’05)*, pp. 1–10, nov. 2005.
- [85] D. Maldonado, B. Le, A. Hugine, T. W. Rondeau and C. W. Bostian. “Cognitive Radio Applications to Dynamic Spectrum Allocation: a Discussion and an Illustrative Example”. In *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN’05)*, pp. 597–600, Baltimore, Nov. 2005.
- [86] S. Feng, Z. Liang and D. Zhao. “Providing Telemedicine Services in an Infrastructure-based Cognitive Radio Network”. *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, no. 1, pp. 96–103, 2010.
- [87] X. Y. Wang and A. Wong. “Multi-Parametric Clustering for Sensor Node Coordination in Cognitive Wireless Sensor Networks”. *PLoS ONE*, vol. 8, pp. 1 – 10, 2013.
- [88] M. P. Sousa, M. T. A. O. Barros, W. J. L. Queiroz, W. T. A. Lopes and M. S. Alencar. “On the Improvement of Wireless Sensor Networks Using Modulation Diversity and Fuzzy Clustering”. In *Proceedings of the International Workshop on Telecommunications (IWT’2011)*, pp. 295–299, Rio de Janeiro, RJ, May 2011.
- [89] M. Shafiee and V. Tabataba Vakili. “An Approach to Efficient Spectrum Sensing in Cognitive Wireless Sensor Networks (C-WSNs)”. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 256, pp. 2303 – 2306, 2013.

- 
- [90] S. Lee, R. Zhang and K. Huang. “Opportunistic Wireless Energy Harvesting in Cognitive Radio Networks”. *arXiv preprint arXiv:1302.4793*, 2013.
- [91] M. Naeem, U. Pareek, D. C. Lee and A. Anpalagan. “Estimation of Distribution Algorithm for Resource Allocation in Green Cooperative Cognitive Radio Sensor Networks”. *Sensors Basel*, vol. 13, no. 4, pp. 4884 – 4905, 2013.
- [92] L. Chen, W. Wang, A. Anpalagan, A. V. Vasilakos, K. Illanko, H. Wang and M. Naeem. “Green Cooperative Cognitive Communication and Networking: A New Paradigm for Wireless Networks”. *Mobile Networks and Applications*, pp. 1 – 11, 2013.
- [93] S. Selvakennedy, S. Sinnappan and Y. Shang. “A Biologically-Inspired Clustering Protocol for Wireless Sensor Networks”. *Computer Communications*, vol. 30, pp. 2786–2801, October 2007.
- [94] N. Ding and P. Xiaoping. “Data Gathering Communication in Wireless Sensor Networks Using Ant Colony Optimization”. In *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO'04)*, pp. 822–827, 2004.
- [95] W. Rui, L. Yan, Y. Gangqiang, L. Chaoxia and P. Quan. “Swarm Intelligence for the Self-Organization of Wireless Sensor Network”. In *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'06)*, pp. 838–842, 2006.
- [96] V. Vijaykumar, R. Chandrasekar and T. Srinivasan. “An Ant Odor Analysis Approach to the Ant Colony Optimization Algorithm for Data-Aggregation in Wireless Sensor Networks”. In *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM'06)*, 2006.
- [97] R. Chandrasekar and S. Misra. “Introducing an ACO Based Paradigm for Detecting Wildfires using Wireless Sensor Networks”. In *International Symposium on Ad Hoc and Ubiquitous Computing (ISAUHC '06)*, pp. 112–117, 2006.
- [98] S. Wang, X. Wang, L. Ding, D. Bi and Z. You. “Collaborative Hybrid Classifier Learning with Ant Colony Optimization in Wireless Multimedia Sensor Networks”. In *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA'08)*, pp. 3341–3346, 2008.
- [99] A.-A. Salehpour, B. Mirmobin, A. Afzali-Kusha and S. Mohammadi. “An Energy Efficient Routing Protocol for Cluster-Based Wireless Sensor Networks Using Ant Colony Optimization”. In *International Conference on Innovations in Information Technology (IIT'08)*, pp. 455–459, 2008.
- [100] C. Zhang and Q. Xu. “Clustering Approach for Wireless Sensor Networks Using Spatial Data Correlation and Ant-Colony Optimization”. In *International Conference on*

- 
- Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing (NSWCTC'09)*, pp. 538–541, 2009.
- [101] Y. P. Chen, J. Zhang and I. Marsic. “Link-Layer-and-Above Diversity in Multihop Wireless Networks”. *Communications Magazine*, vol. 47, no. 2, pp. 118 – 124, 2009.
- [102] G. Caro and M. Dorigo. “AntNet: Distributed Stigmergetic Control for Communications Networks”. *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 9, pp. 317–365, December 1998.
- [103] M. Dorigo and G. Caro. “Ant Colony Optimization: A New Meta-Heuristic”. In *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC'99)*, volume 2, 1999.
- [104] L. A. Zadeh. “Fuzzy Sets”. *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965.
- [105] L. A. Zadeh. “The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning – I”. *Information Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 199–249, 1975.
- [106] A. Osmani, M. Dehghan, H. Pourakbar and P. Emdadi. “Fuzzy-Based Movement-Assisted Sensor Deployment Method in Wireless Sensor Networks”. In *Proceedings of the First International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (CICSYN'09)*, pp. 90–95, Washington, DC, USA, 2009. IEEE Computer Society.
- [107] M. Tashtoush and A. Okour. “Fuzzy Self-Clustering for Wireless Sensor Networks”. In *Proceedings of the 2008 IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC'08)*, pp. 223–229, Washington, DC, USA, 2008. IEEE Computer Society.
- [108] N. Baldo and M. Zorzi. “Fuzzy Logic for Cross-Layer Optimization in Cognitive Radio Networks”. *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 4, pp. 64–71, April 2008.
- [109] 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*, vol. 3, no. 5, pp. 1746–1755, Sep 2004.
- [110] E. Malkamaki and H. Leib. “Performance of Truncated Type-II Hybrid Schemes with Noisy Feedback over Block Fading Channels”. *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, no. 9, pp. 1477–1487, Sep 2000.
- [111] M. P. Sousa, R. F. Lopes, W. T. A. Lopes and M. S. Alencar. “Low-Energy Selective Cooperative Diversity with ARQ for Wireless Image Sensor Networks”. In *Proceedings of the 72th IEEE Vehicular Technology Conference 2010 Fall (VTC'2010Fall)*, pp. 1–5, Ottawa, Canada, September 2010.

- 
- [112] M. P. Sousa, A. Kumar, M. S. Alencar and W. T. A. Lopes. “Performance Evaluation of a Selective Cooperative Scheme for Wireless Sensor Networks”. In *Proceedings of The Sixth ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks (PE-WASUN’2009)*, pp. 85–92, Tenerife, Canary Islands, Spain, October 2009.
- [113] S. B. Slimane. “An Improved PSK Scheme for Fading Channels”. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 47, no. 2, pp. 703–710, 1998.
- [114] T. Ahsin and S. B. Slimane. “Detection Strategies in Cooperative Relaying with Network Coding”. In *IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC’10)*, pp. 12–17, 2010.
- [115] S. A. Ahmadzadeh, S. A. Motahari and A. K. Khandani. “Signal Space Cooperative Communication”. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 4, pp. 1266–1271, 2010.
- [116] M. P. Sousa, W. T. A. Lopes and M. S. Alencar. “LF-Ant: A Bio-inspired Cooperative Cross-layer Design for Wireless Sensor Networks”. In *Proceedings of the 22nd IEEE Symposium on Personal, Indoor, Mobile and Radio Communications (PIMRC’11)*, pp. 143–147, Toronto, Canada, September 2011.
- [117] F. Dressler and O. B. Akan. “A Survey on Bio-Inspired Networking”. *Computer Networks*, vol. 54, no. 6, pp. 881–900, April 2010.
- [118] S. Lindsey and C. S. Raghavendra. “PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems”. In *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, volume 3, pp. 1125–1130, 2002.
- [119] I. Bouazizi. “ARA - The Ant-Colony Based Routing Algorithm for MANETs”. In *Proceedings of the International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW’02)*, Washington, DC, USA, 2002.
- [120] S. Selvakennedy, S. Sinnappan and Y. Shang. “Data Dissemination Based on Ant Swarms for Wireless Sensor Networks”. In *Proceedings of the 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC’06)*, pp. 132–136, jan. 2006.
- [121] M. Dorigo and T. Stützle. *Ant Colony Optimization*. MIT Press, 2004.
- [122] G. Trajcevski, N. Valtchanov, O. C. Ghica and P. Scheuermann. “A Case for Meta-Triggers in Wireless Sensor Networks”. In *Eighth IEEE International Symposium on Network Computing and Applications (NCA’09)*, pp. 171 – 178, 2009.

- 
- [123] J. Kim, S. Park, Y. Han and T. Chung. “CHEF: Cluster Head Election Mechanism Using Fuzzy Logic in Wireless Sensor Networks”. In *10th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT'08)*, pp. 654–659, 2008.
- [124] T. J. Ross. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. John Wiley & Sons, 2004.
- [125] G. Montemayor and J. Wen. “Decentralized Collaborative Load Transport by Multiple Robots”. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'05)*, pp. 372–377, 2005.
- [126] J. Boutros and E. Viterbo. “Signal Space Diversity: a Power-and-Bandwidth-Efficient Diversity Technique for the Rayleigh Fading Channel”. *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, no. 4, pp. 1453–1467, jul 1998.
- [127] J. Proakis. *Digital Communications*. McGraw-Hill, New York, 1989.
- [128] W. T. A. Lopes, F. Madeiro, J. F. Galdino and M. S. Alencar. “Impact of the Estimation Errors and Doppler Effect on the Modulation Diversity Technique”. In *Proceedings of the 64th IEEE Vehicular Technology Conference 2006 Fall (VTC'2006Fall)*, pp. 1–5, Montréal, Canada, September 2006.
- [129] D. Malan, T. Fulford-Jones, M. Welsh and S. Moulton. “CodeBlue: An Ad Hoc Sensor Network Infrastructure for Emergency Medical Care”. In *International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, 2004.
- [130] H. Alemdar and C. Ersoy. “Wireless Sensor Networks for Healthcare: A Survey”. *Computer Networks*, vol. 54, pp. 2688–2710, October 2010.
- [131] M. Yaghmaee, N. Bahalgardi and D. Adjeroh. “A Prioritization Based Congestion Control Protocol for Healthcare Monitoring Application in Wireless Sensor Networks”. *Wireless Personal Communications*, pp. 1 – 27, 2013.
- [132] J. Ko, C. Lu, M. B. Srivastava, J. Stankovic, A. Terzis and M. Welsh. “Wireless Sensor Networks for Healthcare”. *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 11, pp. 1947–1960, nov. 2010.
- [133] D. Benhaddou, M. Balakrishnan and X. Yuan. “Remote Healthcare Monitoring System Architecture using Sensor Networks”. In *IEEE Region 5 Conference*, pp. 1–6, April 2008.
- [134] L. Luo and S. Roy. “Analysis of Search Schemes in Cognitive Radio”. In *The 4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON'07)*, pp. 647–654, june 2007.

- 
- [135] S. N. Sivanandam, S. Sumathi and S. N. Deepa. *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [136] T. Mathworks. *Fuzzy Logic Toolbox – User’s Guide*. 2010.
- [137] D. L. Guidoni, R. A. F. Mini and A. A. F. Loureiro. “On the Design of Resilient Heterogeneous Wireless Sensor Networks Based on Small World Concepts”. *Computer Networks*, vol. 54, no. 8, pp. 1266 – 1281, 2010.
- [138] M. Anwander, G. Wagenknecht, T. Staub and T. Braun. “Management of Heterogeneous Wireless Sensor Networks”. *Network*, vol. 2, no. 3, pp. 4, 2007.
- [139] M. Dyer, J. Beutel, T. Kalt, P. Oehen, L. Thiele, K. Martin and P. Blum. “Deployment Support Network a Toolkit for the Development of WSNs”. In *Proceedings of the 4th European Conference on Wireless Sensor Networks, EWSN’07*, pp. 195 – 211, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer-Verlag.
- [140] M. A. Mamun, N. Nakaya, Y. Koi and Y. Hagihara. “HACC: Heterogeneous-Aware Cooperative Clustering Hierarchy for Wireless Sensor Networks”. In *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII’11)*, pp. 1113 – 1118, 2011.
- [141] D. Kumar, T. C. Aseri and R. B. Patel. “EEHC: Energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks”. *Computer Communications*, vol. 32, no. 4, pp. 662 – 667, 2009.
- [142] D. L. Guidoni, A. Boukerche, F. S. H. Souza, R. A. F. Mini and A. A. F. Loureiro. “A Small World Model Based on Multi-Interface and Multi-Channel to Design Heterogeneous Wireless Sensor Networks”. In *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM’10)*, pp. 1 – 5, 2010.
- [143] D. L. Guidoni. “Aplicação dos Conceitos Mundo Pequeno no Projeto de Topologias para Redes de Sensores sem Fio Heterogêneas”. Tese de doutorado, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Junho 2011.
- [144] S. Huang, C. Wu, P. Chen, T. Wang and Y. Han. “Combining Channel Estimation and Sensor Fault Protection in Wireless Sensor Networks”. In *8th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS’11)*, pp. 1 – 5, 2011.
- [145] H. R. Ahmadi and A. Vosoughi. “Impact of Channel Estimation Error on Decentralized Detection in Bandwidth Constrained Wireless Sensor Networks”. In *IEEE Military Communications Conference (MILCOM’08)*, pp. 1 – 7, 2008.

- 
- [146] M. P. Sousa, R. F. Lopes, A. Kumar, W. T. A. Lopes and M. S. Alencar. “Cooperative STBC with Fuzzy Election Applied to Surveillance Wireless Video Sensor Networks”. In *Proceedings of the IEEE Globecom 2010 Workshop on Advanced Sensor Integration Technology (ASIT 2010)*, pp. 251–255, Miami, FL, USA, December 2010.
- [147] Y. J. Zhao, R. Govindan and D. Estrin. “Residual Energy Scan for Monitoring Sensor Networks”. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC’02)*, volume 1, pp. 356 – 362, 2002.
- [148] R. A. F. Mini, M. do Val Machado, A. A. F. Loureiro and B. Nath. “Prediction-based Energy Map for Wireless Sensor Networks”. *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 235 – 253, 2005.
- [149] S. S. Haykin. *Adaptive Filter Theory*. Prentice Hall, 1991.
- [150] M. Dorigo, M. Zlochin, N. Meuleau and M. Birattari. “Updating ACO Pheromones Using Stochastic Gradient Ascent and Cross-Entropy Methods”. In *Applications of Evolutionary Computing*, edited by S. Cagnoni, J. Gottlieb, E. Hart, M. Middendorf and G. Raidl, volume 2279 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 17–23. Springer Berlin / Heidelberg, 2002.
- [151] M. Dorigo. “Optimization, Learning and Natural Algorithms (in Italian)”. Ph.D. thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
- [152] M. Dorigo, V. Maniezzo and A. Coloni. “Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 26, no. 1, pp. 29–41, February 1996.
- [153] F. Glover. “Tabu Search – Part I”. *ORSA Journal on Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 190–206, 1989.
- [154] F. Glover. “Tabu search - Part II”. *ORSA Journal on Computing*, vol. 2, pp. 4–32, 1990.
- [155] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt and M. P. Vecchi. “Optimization by Simulated Annealing.” *Science (New York, N.Y.)*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, May 1983.
- [156] M. Sato, Y. Sato and M. Namiki. “Proposal of a Multi-Core Processor from the Viewpoint of Evolutionary Computation”. In *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC’10)*, pp. 1–8, 2010.
- [157] Ant colony optimization: Wikis (The Full Wiki). Disponível em. “[http://www.thefullwiki.org/Ant\\_colony\\_optimization](http://www.thefullwiki.org/Ant_colony_optimization)”, Acessado em Junho de 2013.

- [158] E. Bonabeau, A. Sobkowski, G. Theraulaz and J. L. Deneubourg. “Adaptive Task Allocation Inspired by a Model of Division of Labor in Social Insects”. In *Biocomputing and Emergent Computation*, pp. 36–45. World Scientific Press, 1997.
- [159] S. Goss, S. Aron, J. Deneubourg and J. Pasteels. “Self-Organized Shortcuts in the Argentine Ant”. *Naturwissenschaften*, vol. 76, no. 12, pp. 579–581, December 1989.
- [160] D. P. Bertsekas. *Dynamic Programming and Optimal Control*. Athena Scientific, 1995.