

REDES SEM FIO DE MÚLTIPLOS SALTOS: PROTOCOLOS ESPECÍFICOS
PARA APLICAÇÕES E ROTEAMENTO COM SUPORTE
À DIVERSIDADE COOPERATIVA

Daniel de Oliveira Cunha

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte, Dr.Ing.

Prof. Guy Pujolle, Dr.

Prof. Dominique Gaïti, Dr.

Prof. Marcelo Gonçalves Rubinstein, D.Sc.

Dr. Jean-Pierre Briot, Dr.

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

Dr. Artur Ziviani, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2008

**Thèse de Doctorat de l'université Paris VI
Pierre et Marie Curie**

Spécialité
SYSTÈMES INFORMATIQUES

présentée par
M. Daniel DE OLIVEIRA CUNHA

pour obtenir le grade de
DOCTEUR de l'université Pierre et Marie Curie

**Réseaux sans fil multi-sauts:
protocoles à applications spécifiques et
routage orienté vers la diversité coopérative**

Soutenance prévue le 13 février 2008 devant le jury composé de

Jury

| | | |
|----------------------------------|-------------------|---|
| Dominique GAITI | Rapporteur | Prof. à l'Université de Technologie de Troyes |
| Marcelo G. RUBINSTEIN | Rapporteur | Prof. à l'Universidade do Estado do Rio de Janeiro |
| Jean-Pierre BRIOT | Examineur | Directeur de recherche CNRS |
| Luís Henrique M. K. COSTA | Examineur | Prof. à l'Universidade Federal do Rio de Janeiro |
| Artur ZIVIANI | Examineur | Chercheur au LNCC |
| Otto Carlos M. B. DUARTE | Directeur | Prof. à l'Universidade Federal do Rio de Janeiro |
| Guy PUJOLLE | Directeur | Prof. à l'Université Pierre et Marie Curie |

Numéro bibliothèque : _____

CUNHA, DANIEL DE OLIVEIRA

Redes Sem Fio de Múltiplos Saltos: Protocolos Específicos para Aplicações e Roteamento com Suporte à Diversidade Cooperativa [Rio de Janeiro] 2008

XVIII, 155 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Elétrica, 2008)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Redes sem fio de múltiplos saltos
2. Protocolos específicos para aplicações
3. Diversidade cooperativa

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

À minha avó.

Agradecimentos

À minha família, principalmente meus pais e meu irmão, por todo o amor, orientação, incentivo e apoio ao longo da minha vida.

À Mariana pelo amor, pela dedicação, pelo carinho, pela atenção e por todos os momentos compartilhados.

Aos meus orientadores Otto Carlos e Guy pelo apoio e por sempre me incentivarem a fazer o meu melhor.

À professora Dominique Gaïti por ter sido relatora da tese e pela presença na banca examinadora.

Aos doutores Jean-Pierre Briot e Artur Ziviani pela presença na banca examinadora e pelas sugestões para a melhoria do trabalho.

Ao professor Marcelo Gonçalves Rubinstein por ter sido relator da tese, pela presença na banca examinadora, pelas sugestões para a melhoria do trabalho e por toda a ajuda e amizade desde o começo da tese.

Ao professor Luís Henrique M. K. Costa pela participação na banca examinadora, pelas sugestões para a melhoria do trabalho e por toda ajuda e amizade desde meu mestrado.

A toda a equipe do GTA e do LIP6, em particular aos amigos Igor, Bicudo, Rafael, Aurélio, Miguel, Danilo, Natália, Kleber, Michele, Daniel, Davor e Mathieu pela amizade, pelas pausas e pelas cervejas. Aos amigos da Cité Universitaire que me ajudaram com a adaptação na França, em particular aos amigos Pedro, Christian, Amina, Katrin, Tomoya, Daniela, Giselle, Marilza, Alexandre e Priscila. A todos os amigos que, mesmo não sendo citados nominalmente, contribuíram para que eu evoluísse e chegasse até aqui.

Aos funcionários da UFRJ e da UPMC pela presteza no atendimento e pelo bom encaminhamento da convenção de cotutela.

À CAPES e à ANR, pelo financiamento da pesquisa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

REDES SEM FIO DE MÚLTIPLOS SALTOS: PROTOCOLOS ESPECÍFICOS
PARA APLICAÇÕES E ROTEAMENTO COM SUPORTE
À DIVERSIDADE COOPERATIVA

Daniel de Oliveira Cunha

Fevereiro/2008

Orientadores: Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte
Guy Pujolle
Programa: Engenharia Elétrica

O objetivo deste trabalho é propor técnicas para melhorar o desempenho das redes sem fio de múltiplos saltos. A primeira parte deste trabalho estuda as redes de sensores sem fio e suas aplicações. O trabalho foca a aplicação de estimação de campo e propõe dois protocolos para a camada aplicação que reduzem o número de amostras enviadas ao sorvedouro. Além disso, é proposto um protocolo de transporte capaz de carregar as amostras enviadas de forma eficiente e de fornecer informações temporais suficientes para a reconstrução do processo. Existe um compromisso entre a redução obtida no volume de dados enviado e a qualidade da estimação e, portanto, os parâmetros do mecanismo devem ser corretamente configurados para maximizar o desempenho e garantir a robustez do mecanismo. A segunda parte do trabalho estuda o roteamento em redes com diversidade cooperativa e busca integrar informações sobre os retransmissores cooperativos e as possibilidades de cooperação na seleção das rotas. Os resultados mostram que políticas de roteamento cooperativo que se baseiam apenas nas condições instantâneas dos canais são ineficientes quando o desvanecimento provoca variações nos canais sem fio a uma velocidade superior ao tempo de resposta do roteamento. É também proposta uma métrica de roteamento que leva em conta o comportamento de longo prazo dos enlaces e a disponibilidade de retransmissores cooperativos. A métrica proposta seleciona rotas com menor taxa de perda fim-a-fim e seus ganhos são ainda melhores em cenários híbridos, indicando sua adequação a cenários de implantação gradual da diversidade cooperativa.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

MULTIHOP WIRELESS NETWORKS: APPLICATION-SPECIFIC PROTOCOLS
AND ROUTING WITH COOPERATIVE DIVERSITY

Daniel de Oliveira Cunha

February/2008

Advisors: Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte

Guy Pujolle

Department: Electrical Engineering

The objective of this work is to improve the performance of wireless multihop networks. Initially, we study wireless sensor networks and their applications. The work is based on a field estimation application and two application-level protocols are proposed to reduce the amount of data sent to the sink. Moreover, we also propose a transport protocol to efficiently carry the transmitted samples and to ensure the correct reconstruction of the transmitted information at the sink. Results show a tradeoff between the reduction of the amount of data sent to the sink and the quality of the achieved estimation. Therefore, the configuration parameters of the proposed mechanism must be correctly tuned to maximize the performance and ensure the robustness. The second part of this work studies routing on networks that implement cooperative diversity and aims to include information about available relays and cooperation opportunities on the route selection. Results show that routing policies based only on the instantaneous conditions of the channels are inefficient when the channels vary rapidly due to fading in comparison to the response time of the routing layer. Therefore, we propose a cooperation-aware routing metric based on the long term behavior of the channels and the quality of the available relays. In entirely cooperative networks, the proposed metric selects routes that present a lower end-to-end loss rate. In hybrid scenarios, the proposed metric presents higher gains, which indicate its suitability to scenarios where cooperation is incrementally deployed.

Key-words: Wireless networks, Sensor Networks, Ad Hoc Networks, Routing, Cooperative Diversity.

Résumé de la Thèse présenté à COPPE/UFRJ comme une partie des exigences pour le grade de Docteur en Sciences (D.Sc.)

RÉSEAUX SANS FIL MULTI-SAUTS: PROTOCOLES À APPLICATIONS
SPÉCIFIQUES ET ROUTAGE ORIENTÉ VERS LA DIVERSITÉ COOPÉRATIVE

Daniel de Oliveira Cunha

Février/2008

Directeurs de Thèse: Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte

Guy Pujolle

Département: Ingénierie Électrique

L'objectif de ce travail est d'améliorer les performances des réseaux sans fil multi-sauts. La première partie de cette thèse étudie les problèmes spécifiques des réseaux de capteurs sans fil. Le travail réalisé se base sur une application d'estimation de champs et propose deux protocoles de niveau application pour réduire la quantité de données transmises à l'observateur du réseau. Il est proposé, aussi, un protocole de transport pour transférer les données d'une façon efficace et de fournir l'information temporelle nécessaire à la correcte reconstruction du processus. Les résultats montrent un compromis entre la réduction du volume de données et la qualité de l'estimation obtenue. Ainsi, les paramètres de configuration doivent être bien choisis pour maximiser les performances et assurer la robustesse. La deuxième partie du travail étudie le routage dans les réseaux qui implémentent la diversité coopérative et cherche à utiliser des informations à propos des relais disponibles pour sélectionner les routes. Les résultats montrent que les politiques de routage basées seulement sur les conditions instantanées des canaux sont inefficaces quand l'évanouissement provoque des variations des canaux sans fil qui sont plus rapides que le temps de réponse de la couche de routage. Alors, nous proposons une métrique de routage qui prend en compte les variations des canaux sans fil au long du temps ainsi que les bénéfices apportés par les relais disponibles. L'utilisation de la métrique proposée permet la sélection de routes qui présentent un taux de perte réduit. En outre, les gains sont encore plus importants dans des réseaux hybrides, ce qu'indique l'applicabilité de la métrique pour des scénarios où la coopération est implémentée progressivement.

Mots-clés: Réseaux sans fil, Réseaux de capteurs, Réseaux ad hoc, Routage, Diversité coopérative.

Conteúdo

| | |
|--|--------------|
| Resumo | vi |
| Abstract | vii |
| Résumé | viii |
| Lista de Figuras | xiii |
| Lista de Tabelas | xvi |
| Lista de Acrônimos | xviii |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação e Objetivos | 2 |
| 1.2 Estrutura do Documento | 5 |
| 2 As Redes de Sensores e suas Aplicações | 7 |
| 2.1 O Nó Sensor | 9 |
| 2.2 Roteamento e Agregação de Dados | 11 |
| 2.2.1 Protocolos em Árvore | 11 |
| 2.2.2 Protocolos com Formação de Grupos de Nós (<i>Clustering</i>) | 14 |

| | |
|-----------------|---|
| <i>CONTEÚDO</i> | x |
| 2.2.3 | Protocolos que Utilizam Múltiplos Caminhos 15 |
| 2.2.4 | Protocolos Híbridos 17 |
| 2.3 | As Aplicações das Redes de Sensores 18 |
| 2.3.1 | Aplicações Diversas 20 |
| 2.3.2 | Aplicação de Estimação de Campo 21 |
| 3 | A Estimação de Campo Orientada a Eventos 26 |
| 3.1 | O Algoritmo da Camada Aplicação 27 |
| 3.1.1 | Simulações Realizadas 31 |
| | Modelagem dos Dados Sintéticos 32 |
| | Resultados com Dados Sintéticos 35 |
| | Tratamento dos Dados de Entrada Reais 40 |
| | Resultados com Dados Reais 40 |
| 3.2 | O Protocolo de Transporte 45 |
| 3.2.1 | Simulações em Redes sem Perdas 49 |
| 3.2.2 | Simulações em Redes com Perdas 53 |
| 3.3 | Considerações Finais 55 |
| 4 | As Redes Ad Hoc e a Diversidade Cooperativa 57 |
| 4.1 | Os Canais Sem Fio 58 |
| 4.1.1 | A Propagação dos Sinais 59 |
| 4.1.2 | Os Canais com Desvanecimento 60 |
| 4.2 | O Roteamento Baseado na Qualidade do Canal 62 |
| 4.3 | A Diversidade Cooperativa 64 |

| | |
|--|------------|
| <i>CONTEÚDO</i> | xi |
| 4.3.1 Os Protocolos de Nível Físico | 66 |
| O Protocolo <i>Non-Orthogonal Amplify-and-Forward</i> | 67 |
| 4.3.2 Os Protocolos de Acesso ao Meio e a Escolha dos Retransmissores Cooperativos | 69 |
| 4.3.3 O Roteamento em Redes com Diversidade Cooperativa | 71 |
| 5 A Integração da Diversidade Cooperativa ao Roteamento | 74 |
| 5.1 A Análise em Redes Convencionais | 75 |
| 5.1.1 O Padrão de Desvanecimento e a Qualidade do Enlace | 76 |
| 5.1.2 Uma Métrica Baseada na Distribuição do Canal | 78 |
| Cenário de Simulação | 81 |
| Resultados Obtidos | 81 |
| 5.2 O Roteamento em Redes com Diversidade Cooperativa | 86 |
| 5.2.1 O Problema dos Algoritmos Gulosos em Redes com Desvanecimento | 88 |
| Cenário Inteiramente Cooperativo | 92 |
| Cenário Híbrido | 94 |
| 5.2.2 A Métrica de Roteamento Cooperativo | 96 |
| Cenário Inteiramente Cooperativo | 102 |
| Cenário Híbrido | 104 |
| 5.3 Considerações Finais | 109 |
| 6 Conclusões | 111 |
| Bibliografia | 117 |

| | |
|---|------------|
| <i>CONTEÚDO</i> | xii |
| A Résumé de la Thèse | 129 |
| B La Problématique | 131 |
| C Le Mécanisme d'Estimation de Champs Orienté Evénements | 133 |
| C.1 L'Algorithme de la Couche Application | 133 |
| C.2 Le Protocole de Transport | 135 |
| C.3 Considérations Finales | 138 |
| D La Métrique de Routage pour les Réseaux qui Utilisent la Diversité Coopérative | 140 |
| D.1 L'Analyse dans les Réseaux Non-Coopératifs | 141 |
| D.2 L'Analyse dans les Réseaux Non-Coopératifs | 144 |
| D.2.1 Les Différentes Politiques de Routage Coopératif | 146 |
| D.2.2 Une Métrique pour la Prise en Compte de la Coopération | 150 |
| E Conclusions | 155 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Os componentes de um nó sensor. | 9 |
| 2.2 | Estrutura em árvore para o envio de dados ao sorvedouro. | 12 |
| 2.3 | Estrutura baseada na formação de grupos de nós para o envio de dados ao sorvedouro. | 14 |
| 2.4 | Uso de múltiplos caminhos para o envio de dados ao sorvedouro. | 16 |
| 2.5 | Protocolos híbridos para o envio de dados ao sorvedouro. | 17 |
| 2.6 | Exemplo de campo com variações suaves e poucas áreas de fronteira. . . | 23 |
| 3.1 | Temperaturas em dois lugares distintos da cidade do Rio de Janeiro. . . . | 27 |
| 3.2 | Amostras enviadas em função de σ e com E_{max} igual a 1% quando o Algoritmo 1 é utilizado. | 36 |
| 3.3 | Amostras enviadas em função de σ e com E_{max} igual a 5% quando o Algoritmo 1 é utilizado. | 36 |
| 3.4 | Amostras enviadas em função de σ e com E_{max} igual a 1% quando o Algoritmo 2 é utilizado. | 37 |
| 3.5 | Amostras enviadas em função de σ e com E_{max} igual a 5% quando o Algoritmo 2 é utilizado. | 38 |
| 3.6 | Amostras enviadas variando-se α com σ igual a 1 quando o Algoritmo 2 é utilizado. | 39 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.7 | Amostras enviadas em função de E_{max} para α igual a 1. | 39 |
| 3.8 | Amostras enviadas pelo Algoritmo 2 em função de α para o conjunto de dados reais. | 41 |
| 3.9 | Erro médio na reconstrução com o uso do Algoritmo 2 em função de α para o conjunto de dados reais. | 43 |
| 3.10 | Resultados do Algoritmo 2 com as configurações ideais. | 44 |
| 3.11 | Pacote do tipo EBP. | 47 |
| 3.12 | Byte de supressão. | 47 |
| 3.13 | Pacote do tipo RP. | 48 |
| 3.14 | Dados enviados com E_{max} igual a 10%. | 50 |
| 3.15 | Resultados do protocolo EDFE com as configurações ideais. | 52 |
| 3.16 | Efeito das perdas na rede sobre a configuração Gulosa. | 53 |
| 3.17 | Robustez de diferentes configurações para E_{max} igual a 1%. | 55 |
| 4.1 | Distribuição da potência recebida para diferentes tipos de canais. | 62 |
| 4.2 | Cenário de utilização do protocolo NAF. | 67 |
| 4.3 | O roteamento não cooperativo e o roteamento cooperativo. | 71 |
| 5.1 | Comportamento da Função ANT. | 77 |
| 5.2 | Probabilidade de interrupção na subcamada MAC em função da probabilidade média de sucesso. | 78 |
| 5.3 | Obtenção da métrica DBETX. | 80 |
| 5.4 | Número médio de saltos por comunicação. | 82 |
| 5.5 | Número médio de transmissões por enlace. | 83 |
| 5.6 | Disponibilidade Média por enlace. | 84 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.7 | Disponibilidade fim-a-fim. | 85 |
| 5.8 | Densidade de probabilidade da capacidade dos enlaces cooperativos. | 89 |
| 5.9 | Efeito da variação da relação sinal-ruído média. | 90 |
| 5.10 | Resultados do cenário com todos os nós cooperativos. | 93 |
| 5.11 | Resultados do cenário com 50% dos nós cooperativos. | 95 |
| 5.12 | Decomposição do enlace cooperativo. | 97 |
| 5.13 | Resultados do cenário inteiramente cooperativo. | 103 |
| 5.14 | Resultados do cenário com 50% dos nós cooperativos. | 105 |
| 5.15 | Fator de cooperação das rotas. | 107 |
| 5.16 | Resultados em função da porcentagem de nós cooperativos. | 108 |
| C.1 | Résultats des configurations ideales. | 137 |
| D.1 | Disponibilité moyenne par lien. | 143 |
| D.2 | Disponibilité de bout-en-bout. | 144 |
| D.3 | Le lien coopératif et ses liens logiques. | 145 |
| D.4 | Probabilité de Succès de bout-en-bout. | 148 |
| D.5 | Probabilité de Succès du Lien qui présente le taux de perte le plus élevé. | 149 |
| D.6 | Probabilité de Succès de bout-en-bout dans le réseau hybride. | 150 |
| D.7 | Taux de perte moyen des routes. | 152 |
| D.8 | Taux de perte moyen des routes dans le réseau hybride. | 153 |
| D.9 | Facteur de coopération des routes. | 154 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|-----|
| 2.1 | Características típicas de algumas plataformas de sensores. | 10 |
| 2.2 | Evolução dos sensores de propósito genérico. | 10 |
| 3.1 | Configurações Ideais do protocolo EDFE. | 51 |
| 3.2 | Configurações alternativas para E_{max} igual a 1%. | 54 |
| 4.1 | Estrutura temporal do protocolo NAF. | 68 |
| 5.1 | Parâmetros de simulação. | 82 |
| 5.2 | Taxas mínima e máxima de transmissão das interfaces. | 86 |
| 5.3 | Tempo de coerência dos enlaces sem fio com nós estáticos. | 88 |
| 5.4 | Parâmetros de simulação. | 92 |
| 5.5 | Parâmetros de simulação. | 101 |
| 5.6 | Taxas de transmissão utilizadas nas simulações. | 102 |
| D.1 | Paramètres des Simulations. | 142 |
| D.2 | Temps de cohérence moyen quand les noeuds sont statiques. | 146 |
| D.3 | Les débits le plus faibles et le plus fort de l'interface. | 147 |
| D.4 | Paramètres de simulation. | 148 |

D.5 Les débits de l'interface. 152

Lista de Acrônimos

| | |
|---------|--|
| AF : | <i>Amplify-and-Forward;</i> |
| ANT : | <i>Average Number of Transmissions;</i> |
| AODV : | <i>Ad hoc On-demand Distance Vector;</i> |
| BER : | <i>Bit Error Rate;</i> |
| CARM : | <i>Cooperation-Aware Routing Metric;</i> |
| DBETX : | <i>Distribution-Based Expected Transmission Count;</i> |
| DF : | <i>Decode-and-Forward;</i> |
| EBP : | <i>Expected Behavior Packet;</i> |
| EBV : | <i>Expected Behavior Vector;</i> |
| EDFE : | <i>Event-Driven Field-Estimation;</i> |
| ENT : | <i>Expected Number of Transmissions;</i> |
| ETX : | <i>Expected Transmission Count;</i> |
| MAC : | <i>Medium Access Control;</i> |
| MIMO : | <i>Multiple-Input-Multiple-Output;</i> |
| MIPS : | <i>Million Instructions Per Second;</i> |
| NAF : | <i>Non-orthogonal Amplify-and-Forward;</i> |
| PER : | <i>Packet Error Rate;</i> |
| pdf : | <i>Probability Density Function;</i> |
| RCG : | <i>Roteamento Cooperativo Guloso;</i> |
| RCP : | <i>Roteamento Cooperativo Ponderado;</i> |
| RP : | <i>Refining Packets;</i> |
| RSSF : | <i>Redes de Sensores Sem Fio;</i> |
| SNIR : | <i>Signal-to-Noise-plus-Interference Ratio.</i> |

Capítulo 1

Introdução

As redes sem fio possuem um baixo custo de instalação e oferecem maior liberdade aos usuários, pois dispensam a utilização de cabos nas interfaces de rede. Existem diferentes arquiteturas segundo as quais estas redes podem ser configuradas. Dentre estas, a configuração mais comum é a celular, onde uma estação rádio-base é instalada para atender aos usuários que se encontram em sua área de cobertura. As estações rádio-base, por outro lado, são conectadas entre si e a outras redes através de cabos. Exemplos dessas redes são as redes de telefonia celular [1] e as redes locais sem fio infra-estruturadas [2, 3]. Mais recentemente, busca-se aumentar o alcance e a flexibilidade das redes sem fio através de redes sem fio de múltiplos saltos. Nestas redes, que podem ou não estar ligadas à Internet, os próprios nós sem fio são responsáveis pelo encaminhamento dos pacotes. Os nós devem, portanto, cooperarem a fim de permitir a comunicação entre nós afastados, os quais não conseguiriam se comunicar diretamente. Além disso, as redes sem fio de múltiplos saltos provêem facilidades de comunicação de forma simples e espontânea, com pouco ou nenhum planejamento prévio.

Apesar de sua flexibilidade e rápida instalação, as redes sem fio também apresentam alguns problemas peculiares. Dentre estes, pode-se destacar a sensibilidade à interferência externa, a formação de áreas de sombra devido à existência de obstáculos e a variação da qualidade do sinal ao longo do tempo devido ao desvanecimento. Nas redes do tipo celular, como apenas o último salto se baseia na comunicação sem fio, é possível planejar a rede e dimensioná-la para mitigar estes problemas. Nas redes sem fio de múltiplos

saltos, por outro lado, um planejamento abrangente capaz de reduzir significativamente estes problemas é complexo e muitas vezes inviável. As redes sem fio de múltiplos saltos apresentam ainda um problema muito particular que é o consumo de energia dos nós, pois alguns cenários de aplicação destas redes prevêem a utilização de nós com um suprimento restrito de energia, pois estes devem ser alimentados por baterias. Nestes cenários a conservação da energia dos nós é fundamental.

1.1 Motivação e Objetivos

Existem três tipos principais de redes sem fio de múltiplos saltos: as redes de sensores [4], as redes ad hoc [5] e as redes em malha [6]. Estas redes diferem quanto ao número típico de nós que as compõem, quanto aos recursos e capacidade dos nós e, principalmente, quanto aos seus objetivos.

As redes de sensores sem fio são formadas por nós bastante limitados de recursos tais como processamento, capacidade de comunicação e disponibilidade de energia. No entanto, o baixo custo destes nós permite a construção de redes compostas por centenas ou milhares de nós. No entanto, a principal peculiaridade destas redes está nos seus objetivos. Nas redes de sensores, os nós são dotados de módulos de sensoriamento e têm como objetivo realizar o monitoramento distribuído de uma região para um observador externo que é ligado à rede através de um nó sorvedouro. Desta forma, o objetivo da rede não é atender às necessidades dos nós que a compõem, mas sim às requisições deste observador externo. Além disso, como grande parte dos cenários de aplicação das redes de sensores sem fio supõe seu estabelecimento em regiões onde o acesso posterior aos nós sensores é difícil ou mesmo impossível, a conservação de energia é um aspecto fundamental no desenvolvimento de protocolos para redes de sensores.

As redes ad hoc são formadas por um número menor de nós se comparado às redes de sensores. No entanto, os nós que compõem estas redes possuem mais recursos, como computadores pessoais ou Assistentes Pessoais Digitais (PDAs), e, portanto, capazes de utilizar protocolos mais elaborados. Além disso, diferentemente dos nós sensores que são uma ferramenta para um usuário externo, os nós ad hoc são os próprios usuários da rede.

Esta diferença é muito importante, pois os protocolos desenvolvidos para redes ad hoc devem se preocupar com os interesses de todos os nós da rede. Assim, nas redes ad hoc, a conservação de energia ainda é importante, embora não seja tão crítica quanto nas redes de sensores.

Nas redes em malha sem fio, os usuários finais são conectados numa rede local sem fio a um ponto de acesso e os pontos de acesso formam um *backbone* e se comunicam entre si numa rede sem fio de múltiplos saltos. Um número reduzido dos nós do *backbone* é conectado à rede fixa para funcionar como *gateways* provendo acesso à Internet para toda a rede. Uma vez que a rede de múltiplos saltos é composta pelos pontos de acesso, o número de nós tende a ser reduzido em comparação a uma rede ad hoc. Além disso, os nós são mais complexos, pois precisam ser capazes de implementar tanto funcionalidades ad hoc, como o roteamento, quanto funcionalidades de um ponto de acesso. Em alguns casos, assume-se o uso de mais de um canal na comunicação entre os nós da rede em malha. Por fim, como os nós do *backbone* são compostos, em geral, por pontos de acesso estáticos, assume-se que estes nós podem ser alimentados continuamente e a conservação de energia não é o foco principal.

Neste trabalho, são focados dois aspectos diferentes das redes sem fio de múltiplos saltos: a conservação de energia nas redes de sensores e o uso da diversidade cooperativa para melhorar a qualidade de serviço das redes ad hoc. São propostas soluções para melhorar a conservação de energia das redes de sensores através do desenvolvimento de protocolos dedicados a aplicações. Também são propostas, para as redes ad hoc, métricas de roteamento que melhoram a qualidade de serviço ofertada. Em especial, é proposto um método que possibilita ao roteamento levar em conta as oportunidades de cooperação em redes com diversidade cooperativa. Alguns dos resultados desta segunda parte do trabalho podem ser generalizados para redes em malha, mas neste caso ainda é possível realizar algumas otimizações que exploram a maior complexidade dos nós. No entanto, o estudo deste caso específico está além do escopo deste trabalho.

Protocolos Dedicados a Aplicações

As redes de sensores podem ser utilizadas para dar suporte a aplicações distintas. Entre estas aplicações, destacam-se as aplicações militares, as aplicações de estimação de campo, as aplicações ligadas ao acompanhamento médico e as aplicações de vigilância. Embora todas estas aplicações sejam voltadas para a monitoração de algum fenômeno ou evento, diferentes aplicações podem apresentar requisitos de banda passante, atraso e processamento diferentes. Estas particularidades resultam em diferentes requisitos a serem impostos aos protocolos das camadas mais baixas e, sobretudo, em diferentes padrões de consumo de energia.

A idéia principal nesta parte do trabalho é que a identificação dos requisitos específicos de uma aplicação possibilita o desenvolvimento de protocolos específicos capazes de atender às necessidades do usuário sem sobrecarregar demasiadamente a rede. Este trabalho se foca nas aplicações de estimação de campo onde sensores são espalhados numa dada região para o monitoramento de processos variáveis espacial e temporalmente, pois nestas aplicações os dados coletados são transmitidos periodicamente. São propostos dois algoritmos na camada aplicação para reduzir a quantidade transmitida de dados e um protocolo de transporte para garantir a correta reconstrução, no nó sorvedouro, dos dados provenientes desta aplicação.

Roteamento com Suporte à Diversidade Cooperativa

A diversidade cooperativa é uma técnica desenvolvida para aumentar a robustez dos enlaces sem fio aos efeitos do desvanecimento. Nesta técnica os nós sem fio cooperam entre si, compartilhando suas antenas e agindo como retransmissores cooperativos para seus vizinhos, de modo a formar um canal MIMO (*Multiple-Input-Multiple-Output*) virtual. A fim de aproveitar, ao máximo, os benefícios da diversidade cooperativa não só as camadas física e MAC dos nós devem ser modificadas para implementar os protocolos cooperativos, mas também o roteamento deve ser adaptado para dar suporte a esta tecnologia.

Os trabalhos existentes na literatura sobre roteamento com suporte à diversidade coo-

perativa buscam aperfeiçoar o desempenho da rede com base nas condições instantâneas dos canais sem fio. No entanto, este trabalho aborda o problema em redes onde a variação dos canais é rápida em relação ao tempo de resposta do roteamento. Nesse caso, é proposta a utilização das estatísticas de longo prazo dos canais sem fio para estipular o valor da métrica de roteamento. A idéia, portanto, é de escolher rotas que possuem maior probabilidade de apresentar boas condições, ao invés de escolher as rotas com base nas condições momentâneas dos canais.

1.2 Estrutura do Documento

O Capítulo 2 apresenta uma visão geral das redes de sensores focando, principalmente, suas aplicações. Inicialmente, são descritas as características típicas dos nós sensores. A seguir, discutem-se a agregação de dados e como o roteamento pode ser implementado de forma a facilitar esta agregação. Por fim, são discutidas as principais aplicações de redes de sensores e seus requisitos principais são identificados. Um destaque especial é dado às aplicações de estimação de campo que são focadas neste trabalho.

Um mecanismo específico para a aplicação de estimação de campo é proposto no Capítulo 3. O mecanismo proposto é dividido em duas partes: o algoritmo da camada aplicação e o protocolo de transporte. São analisados dois tipos de algoritmos para a camada aplicação. O primeiro que limita o número de amostras enviadas e o segundo que limita o erro máximo por amostra. Em seguida, propõe-se um protocolo de transporte que trabalha em conjunto com estes algoritmos visando reduzir o número de pacotes enviados pelo nó ao sorvedouro. O mecanismo proposto é então analisado com base em dados reais.

O Capítulo 4 apresenta uma visão geral das redes ad hoc e mostra como a propagação nos enlaces sem fio pode afetar a qualidade de uma comunicação. A seguir, são discutidas as diferentes métricas existentes na literatura para dar suporte ao roteamento com base na qualidade dos enlaces sem fio. Por fim, a técnica de diversidade cooperativa é discutida. Apresentam-se alguns protocolos para a implementação da cooperação a nível físico e também propostas encontradas na literatura para subcamadas de acesso ao meio

(MAC) capazes de coordenar os retransmissores cooperativos. Por fim, o estado da arte em roteamento em redes com diversidade cooperativa é apresentado.

No Capítulo 5 são analisadas soluções para o roteamento em redes com diversidade cooperativa. Inicialmente analisa-se como o roteamento pode levar em conta o padrão de desvanecimento dos canais sem fio nas redes não-cooperativas, isto é, em redes que não implementam a diversidade cooperativa. Como resultado, propõe-se uma métrica de roteamento que se baseia na função de densidade de probabilidade da relação sinal-ruído dos canais sem fio e mostra-se que esta métrica é capaz de melhorar o desempenho da rede. Em seguida, é realizada uma análise sobre as diferentes abordagens para o desenvolvimento de métricas para o roteamento cooperativo, ou seja, que levam em conta as oportunidades de cooperação para estabelecer as rotas. Por fim, propõe-se e analisa-se uma métrica distribuída para o roteamento cooperativo em redes onde a taxa de transmissão é variável. A vantagem da métrica proposta é que ela leva em conta a variação do enlace cooperativo ao longo do tempo, mas é calculada com base em informações sobre os canais sem fio isoladamente.

Por fim, o Capítulo 6 conclui esta tese e apresenta possíveis direções futuras de pesquisa.

Capítulo 2

As Redes de Sensores e suas Aplicações

OS recentes avanços na microeletrônica e na comunicação sem fio permitiram o desenvolvimento de nós sensores de baixo custo capazes de se comunicarem a curtas distâncias. Estes pequenos sensores, dotados de unidades de sensoriamento, processamento e comunicação, podem ser organizados numa complexa estrutura cooperativa, dando origem a uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF). O baixo custo individual destes nós torna viável a construção de redes de sensores compostas por centenas ou milhares de nós. Isto possibilita uma maior proximidade desta rede com o ambiente monitorado, possibilitando a obtenção de dados mais precisos que dificilmente poderiam ser obtidos por técnicas de sensoriamento convencionais como satélites e radares.

As redes de sensores herdam diversas vantagens das redes ad hoc convencionais como, por exemplo, a grande flexibilidade, pois podem ser formadas rapidamente mesmo em lugares ermos, o baixo custo de instalação e a robustez, pois podem resistir a catástrofes da natureza e à destruição por motivo de guerra. Estas características aumentam ainda mais as potencialidades do sensoriamento distribuído, permitindo a coleta de dados em ambientes onde não haja qualquer tipo de infra-estrutura de comunicação, ou esta seja economicamente inviável.

Apesar de sua proximidade com as redes ad hoc típicas, as redes de sensores possuem algumas características específicas [4]. A principal distinção destas redes é a sua natureza cooperativa, já que o funcionamento da rede é centrado nos dados [7]. Outras peculiari-

dades destas redes são a grande limitação dos recursos de memória e processamento dos nós sensores, o dinamismo das condições ambientais em que estas redes devem funcionar e a necessidade de uma operação robusta em uma arquitetura escalável. No entanto, uma característica fundamental destas redes é a alimentação dos nós sensores através de baterias não recarregáveis por fontes externas. Essa fonte limitada de energia faz com que o tempo de vida de uma rede de sensores sem fio seja extremamente dependente da eficiência com que os recursos energéticos são aproveitados nestas redes [8, 9]. Por este motivo, a conservação de energia é um ponto crítico no projeto de qualquer rede de sensores, devendo ser levado em consideração não só nas soluções de *hardware*, mas também no desenvolvimento de *middleware* e *software*. Por ser um paradigma novo, a pesquisa envolvendo redes de sensores abrange desde a camada física até a camada aplicação.

As pesquisas na camada física buscam principalmente sobrepujar os problemas da propagação dos sinais de rádio-frequência, que apresentam grande atenuação nas condições às quais estas redes estão sujeitas. Análises realizadas indicam que a transmissão de 1kB de dados a 100m de distância consome a mesma energia que a execução de 3 milhões de operações por um processador típico [10]. Isto indica que o projeto de algoritmos e protocolos que troquem a transmissão de dados por algum processamento local pode resultar em grande economia de energia.

Outro ponto importante para a economia de energia em redes de sensores é a subcamada de acesso ao meio. O mecanismo de acesso ao meio deve ser desenvolvido de forma a permitir que os nós sensores desliguem suas interfaces de rádio a maior parte do tempo, pois é demonstrado que interfaces sem fio consomem muita energia mesmo no estado ocioso [11], ou seja, quando o módulo de rádio está ligado mas o nó não está nem transmitindo nem recebendo quadros. Assim, é importante que os nós da rede se organizem e agendem períodos de dormência para reduzir o consumo de energia com a escuta do meio e evitar o desperdício de energia com a recepção de quadros destinados a outros nós [12].

O roteamento [13] e a agregação de dados [14] são discutidos em conjunto na Seção 2.2, pois estes dois tópicos são correlacionados em redes de sensores. O objetivo da agregação de dados é reduzir o tráfego na rede e, desta forma, economizar energia. Uma

política de roteamento que leve em conta os mecanismos de agregação, pode aumentar a eficiência dos algoritmos de agregação e conseqüentemente melhorar a conservação de energia. As aplicações das redes de sensores também são detalhadas adiante, com ênfase para as aplicações de estimação de campo que são focalizadas neste trabalho. A seguir, são discutidas algumas características dos nós sensores em geral.

2.1 O Nó Sensor

Os nós sensores são constituídos de quatro componentes principais: uma unidade de sensoriamento, uma unidade de processamento, um transceptor e uma fonte de energia. Todos estes componentes devem ser interligados, como mostra a Figura 2.1, para permitir o processamento local e a transmissão das informações.

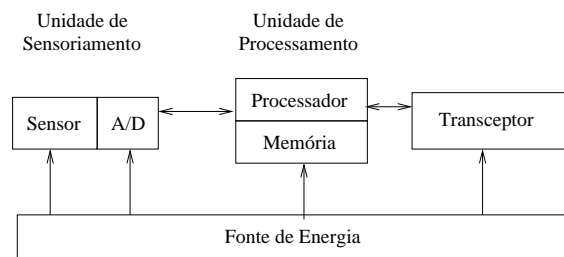


Figura 2.1: Os componentes de um nó sensor.

Dependendo da aplicação fim da rede, é possível que os sensores sejam dotados de unidades específicas adicionais, como, por exemplo, unidades de localização ou para prover mobilidade [4]. A maior restrição na implementação dos nós sensores é o custo por dispositivo, pois estes nós precisam ser baratos o suficiente para possibilitar a construção de redes com um número grande de sensores de modo a permitir a operação robusta e manter a conectividade da rede. Alguns trabalhos sugerem o uso de diferentes tipos de sensores, formando uma rede hierárquica onde um grande número de sensores mais específicos, que sacrificam flexibilidade e recursos, coexistem com poucos sensores mais complexos e caros [15]. A Tabela 2.1 mostra uma comparação entre diferentes tipos de nós sensores que apresentam diferentes níveis de complexidade. Pode-se perceber que as características dos nós sensores variam significativamente de acordo com o propósito do nó.

Tabela 2.1: Características típicas de algumas plataformas de sensores.

| Especificações | Especializado | Genérico | Alta Banda |
|---------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------|
| Nome | Spec | Mote | Imote |
| Tamanho | <100 mm ³ | 1-10cm ³ | 1-10cm ³ |
| Taxa de Transmissão | <50kbps | <100kbps | <1Mbps (<i>Bluetooth</i>) |
| MIPS | <5 | <10 | <50 |
| RAM | <4kB | <10kB | <128kB |
| Ciclo de Operação | 0.1-0.5% | 1-2% | 5-10% |

Os nós sensores ainda são muito limitados em termos computacionais, de armazenamento e de comunicação. No entanto, deve-se destacar que há um avanço significativo na capacidade dos nós sensores ao longo do tempo [15, 16, 17]. A Tabela 2.2 mostra a evolução dos sensores de propósito genérico ao longo dos últimos anos. Neste caso, pode-se perceber um aumento significativo na memória e na taxa de transmissão dos nós, assim como, uma redução expressiva no consumo de energia.

Tabela 2.2: Evolução dos sensores de propósito genérico.

| Especificações | Rene | Mica-2 | Telos | Tmote Mini |
|----------------------|------------|------------|----------------|------------|
| Ano | 1999 | 2001 | 2004 | 2007 |
| CPU | ATMEL 8535 | ATMEGA 128 | Motorola HCS08 | MSP430 |
| Consumo em Dormência | 0.036mW | 0.036mW | 0.001mW | < 0.004mW |
| Consumo Ativo | 60mW | 60mW | 32mW | 7.2mW |
| RAM | 512B | 4kB | 4kB | 10kB |
| Taxa de Transmissão | 10kbps | 76kbps | 250kbps | 250kbps |

É esperado que os ganhos tecnológicos na implementação de nós sensores continuem no mesmo ritmo. No entanto, em alguns casos, como para os sensores de propósito específico, espera-se que todo o ganho com tecnologia será voltado para aumentar a autonomia ou diminuir o custo, variando pouco o poder de processamento [15]. Desta forma, os protocolos e mecanismos desenvolvidos para estas redes devem possuir uma complexidade limitada, permitindo sua implementação em dispositivos com baixo poder de processamento.

2.2 Roteamento e Agregação de Dados

A tarefa do roteamento nas redes de sensores é especialmente complexa por dois fatores: a limitação energética dos nós e a possível desativação de nós por defeito [13]. Estes dois fatores fazem com que nós se tornem indisponíveis por algum período de tempo (para economizar energia) ou definitivamente (devido a algum defeito). Além disso, para aumentar a eficiência da rede, os protocolos de roteamento devem levar em conta as necessidades dos algoritmos de agregação de dados.

A agregação de dados é uma técnica que busca trocar comunicação por processamento, ou seja, os nós sensores processam as informações recebidas de diferentes vizinhos a fim de explorar a correlação entre as diferentes informações e reduzir a quantidade de informação a ser transmitida. Em redes de sensores, esse procedimento é interessante, pois é demonstrado que o custo energético da transmissão sem fio pode ser bastante superior ao custo do processamento [10]. No entanto, a eficiência dos algoritmos de agregação de dados é dependente do grau de correlação dos dados gerados pelos nós da rede. Esta correlação pode ser espacial, quando nós vizinhos geram dados com algum grau de correlação, pode ser temporal, quando as medidas de um dado sensor variam lentamente ao longo do tempo ou apresentam algum tipo de periodicidade, ou pode ser semântica, quando o conteúdo gerado pelos nós pode ser enquadrado num único grupo semântico (por exemplo, diferentes sensores relatam movimento numa mesma sala) [14].

Os trabalhos que buscam construir as rotas de modo a facilitar a agregação de dados podem ser classificados segundo a estrutura de encaminhamento utilizada. Esta estrutura pode ser em árvore, com a formação de grupos de nós (*clusters*), com utilização de múltiplos caminhos ou híbrida. Estas estruturas e algumas propostas encontradas na literatura são discutidas a seguir.

2.2.1 Protocolos em Árvore

Este tipo de algoritmo se baseia numa árvore cuja raiz é o nó sorvedouro. Geralmente utiliza-se uma árvore de menor caminho (*Shortest-Path Tree* - SPT), mas outros tipos

de árvores podem ser utilizados. A forma mais simples de agregar os dados que vão dos nós sensores para o sorvedouro é de selecionar alguns nós especiais como pontos de agregação e escolher uma direção preferencial para o encaminhamento dos pacotes. A seleção destes nós especiais pode ser feita com base em diferentes fatores como sua posição na árvore [18], seus recursos [19], etc. Nessa abordagem, uma árvore ligando todos os nós da rede, como mostrado na Figura 2.2, ou um conjunto de nós ao qual todos os nós podem se conectar diretamente (*connected dominating set*) [20] é construída com o nó sorvedouro como raiz. Com isto, os dados são encaminhados das folhas para a raiz da árvore.

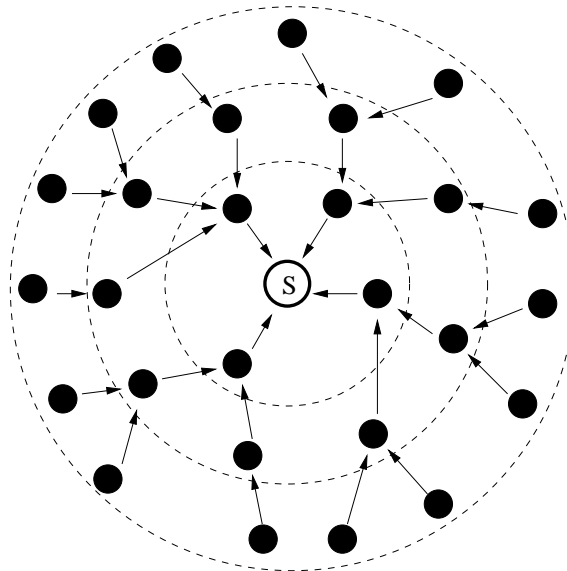


Figura 2.2: Estrutura em árvore para o envio de dados ao sorvedouro.

A agregação pode ser feita a cada vez que a informação passa a um nível superior na árvore ou quando a informação passa por nós agregadores específicos. Um problema desta abordagem é a sensibilidade às perdas na rede, pois quando o pacote enviado por um nó é perdido, toda a informação da sub-árvore abaixo deste nó é perdida. Além disso, o custo para manter esta estrutura de árvore pode ser elevado. No entanto, esta estrutura pode ser utilizada para o desenvolvimento de mecanismos que favoreçam a agregação de dados enquanto o consumo de energia dos nós pode ser balanceado [21, 22].

O protocolo *Directed Diffusion*, ou Difusão Direcionada, desenvolvido por Intanagonwiwat *et al.* [7], se aproveita da natureza orientada a dados das redes de sensores para economizar energia. O protocolo é desenvolvido para situações onde um ou mais nós

sorvedouros buscam obter informações específicas na rede que são solicitadas através da inundação da rede com o pedido. O protocolo possui três fases distintas de operação: a disseminação dos interesses, o estabelecimento dos gradientes e o reforço dos caminhos com o encaminhamento dos dados. Na fase da disseminação dos interesses, um nó sorvedouro que busca uma informação faz a sua solicitação através de *mensagens de interesse* onde os requisitos da informação procurada são descritos. Cada nó que recebe a mensagem de interesse, a reenvia a seus vizinhos e configura o gradiente de interesse relacionado a essa busca, ou seja, vetores contendo o próximo salto para onde toda mensagem recebida respondendo ao interesse deve ser encaminhada. Esta parte do protocolo é chamada de estabelecimento de gradientes. Quando esta fase de estabelecimento de gradientes é terminada, apenas o caminho mais eficiente é utilizado para encaminhar os dados de uma dada fonte ao nó sorvedouro. Se diversos nós possuem informações que atendem a um dado interesse, cada um será uma fonte diferente, cujos dados serão enviados através da árvore construída na fase de estabelecimento de gradientes. A agregação dos dados pode ser feita nesta árvore durante a fase de encaminhamento da informação solicitada ao sorvedouro.

O Protocolo PEGASIS (*Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems*) [23] organiza os nós numa cadeia, cujo líder é o único nó a se conectar diretamente ao nó sorvedouro. A fim de distribuir igualmente o consumo de energia dos nós, os nós se revezam no papel de líder. A construção da cadeia pode ser feita de forma centralizada, pelo nó sorvedouro, ou distribuída, com a utilização de um algoritmo guloso em cada nó. Este algoritmo distribuído necessita do conhecimento global da topologia da rede em todos os nós. Uma vez que a topologia da rede é conhecida por todos os nós, a cadeia começa a ser construída com o nó mais afastado do sorvedouro. Em seguida, o vizinho mais próximo deste nó é adicionado à cadeia e o processo se repete até a inclusão de todos os nós. O tempo de operação é então dividido em turnos e a cada turno um novo nó é escolhido como líder da cadeia. Os nós enviam seus dados ao líder que é encarregado de enviar os dados ao sorvedouro. Quando um nó recebe os dados de um vizinho na cadeia, ele realiza a agregação de seus próprios dados antes de repassar a informação ao próximo nó da cadeia.

2.2.2 Protocolos com Formação de Grupos de Nós (*Clustering*)

Assim como os protocolos em árvore, os protocolos com formação de grupos de nós também organizam a rede numa estrutura hierárquica. No entanto, neste caso, a rede é dividida em grupos e cada grupo possui um líder, como mostrado na Figura 2.3.

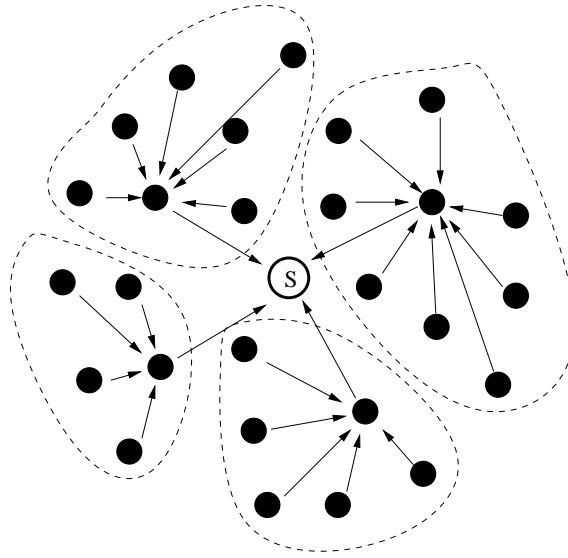


Figura 2.3: Estrutura baseada na formação de grupos de nós para o envio de dados ao sorvedouro.

Estes nós eleitos como líderes têm a responsabilidade de agregar os dados dos outros nós do grupo e enviá-los ao nó sorvedouro. Estes mecanismos possuem vantagens e desvantagens similares às daquelas dos protocolos em árvore [14].

O protocolo LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) [24] é um protocolo que agrupa os nós de forma adaptativa. O funcionamento do protocolo é dividido em turnos e possui duas fases distintas: a fase de configuração, onde os grupos são organizados, e a fase estacionária, onde as transmissões para o sorvedouro são feitas. Na fase da configuração, os nós decidem de forma distribuída se serão um líder de grupo ou não. Esta decisão é feita a partir da geração de um número aleatório que é em seguida comparado a um limiar. Este limiar é calculado com base na porcentagem de líderes, P , que se espera obter ao final da fase de configuração. Para promover o balanceamento do consumo de energia, apenas nós que não se elegeram líderes nos últimos $1/P$ turnos são elegíveis. Uma vez que um nó se elege líder, ele envia mensagens de aviso a seus vizinhos que escolhem a qual líder, ou grupo, se conectar com base na potência do sinal recebido.

Uma vez que os grupos são formados, o líder organiza um mecanismo de acesso múltiplo por divisão no tempo (TDMA) para a comunicação dentro do grupo. O acesso por divisão no tempo busca eliminar a contenção e economizar a energia dos nós. Na segunda fase do protocolo, os membros dos grupos enviam seus dados aos seus respectivos líderes segundo os *slots* de tempo pré-estabelecidos. Os nós que não são líderes podem entrar em estado de dormência até que seu *slot* de transmissão chegue e podem voltar a este estado logo após sua transmissão. Uma vez que os dados de todos os nós do grupo são recebidos, o líder do grupo pode realizar funções de agregação e enviar os dados ao sorvedouro.

O protocolo COUGAR [25] é adequado a aplicações de monitoramento onde os nós produzem informações de forma periódica. O protocolo é similar ao protocolo LEACH, mas a escolha do líder aos quais os nós se ligarão é feita com base numa métrica que pode ser mais complexa que a simples potência recebida. Particularmente, a escolha do líder pode ser feita com base na possibilidade de agregação de dados. Além disso, o líder não precisa estar necessariamente a um salto do nó e, neste caso, os pacotes são roteados dentro do grupo com o uso do protocolo de roteamento AODV (*Ad hoc On demand Distance Vector*) [26].

2.2.3 Protocolos que Utilizam Múltiplos Caminhos

Os protocolos que utilizam múltiplos caminhos visam aumentar a robustez da rede em relação ao problema da perda de pacotes contendo dados agregados, que reduz a eficiência dos protocolos baseados em árvores. Ao invés de utilizar apenas um caminho, definido pela árvore utilizada, estes protocolos enviam os dados por diferentes caminhos. A idéia é explorar a natureza difusora do meio sem fio e enviar simultaneamente os dados a diferentes vizinhos. Assim, os dados são enviados por múltiplos caminhos e a agregação pode ser feita em cada nó. Portanto, a informação é enviada de forma duplicada pela rede e a robustez é obtida à custa da sobrecarga causada pelo envio de diferentes cópias dos dados. Neste caso, a estrutura de agregação mais adequada é chamada de *topologia de anéis*, como mostrado na Figura 2.4.

Os nós são divididos em anéis segundo seu afastamento do sorvedouro e, com o intuito

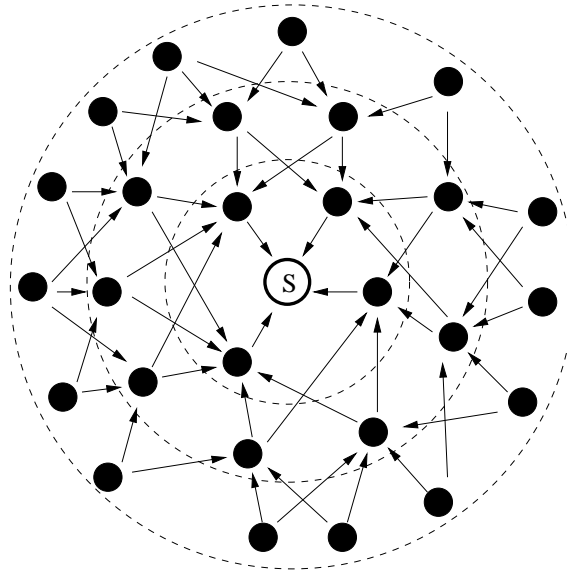


Figura 2.4: Uso de múltiplos caminhos para o envio de dados ao sorvedouro.

de gerar redundância, os nós enviam seus dados a diferentes vizinhos no próximo anel em direção ao sorvedouro. Os dados são agregados à medida que são passados de um nível ao outro.

No protocolo *Synopsis Diffusion* [27], ou Difusão de Sinopse, a agregação de dados é realizada numa abordagem de múltiplos caminhos. A topologia para a disseminação é organizada em anéis concêntricos em torno do sorvedouro. O protocolo é dividido em duas fases: a fase de distribuição das solicitações e a fase de recuperação das informações. A topologia em anel é formada quando um nó envia uma solicitação à rede. A topologia pode ser construída de duas formas distintas. A primeira é uma topologia em anel simples, com o nó sorvedouro no anel R_0 e os outros nós fazendo parte dos anéis sucessivos em função de suas distâncias do nó sorvedouro. Desta forma, um nó está no anel R_i se ele se localiza a i saltos do nó sorvedouro. A segunda opção é uma topologia chamada *anéis adaptativos* que é mais robusta e capaz de lidar com mudanças na rede. Nesta configuração, um nó do anel i monitora se os seus dados são incluídos nos pacotes enviados pelos nós do anel $i - 1$. Se essa inclusão não ocorre com frequência, o nó em questão procura um anel mais adequado, de modo a conseguir que seus dados sejam incluídos com mais frequência. Deve-se destacar que uma das características principais do protocolo *Synopsis Diffusion* é permitir que os dados sejam transportados por múltiplos caminhos até o sorvedouro. Essa prática pode gerar problemas caso a função de agregação usada

seja sensível à duplicação dos dados. No entanto, esse mecanismo é bastante robusto em redes onde a taxa de perdas é elevada, uma vez que a informação possui maiores chances de alcançar o sorvedouro.

2.2.4 Protocolos Híbridos

Existe uma última classe de protocolos que pode ser definida como protocolos híbridos. Este tipo de protocolo busca unir as vantagens dos protocolos em árvore com as vantagens dos protocolos que utilizam múltiplos caminhos. Estes protocolos se configuram automaticamente para se adequar às condições da rede, escolhendo a estrutura de agregação que oferece o melhor desempenho. A Figura 2.5 mostra como estes protocolos se organizam para o envio dos dados ao sorvedouro.

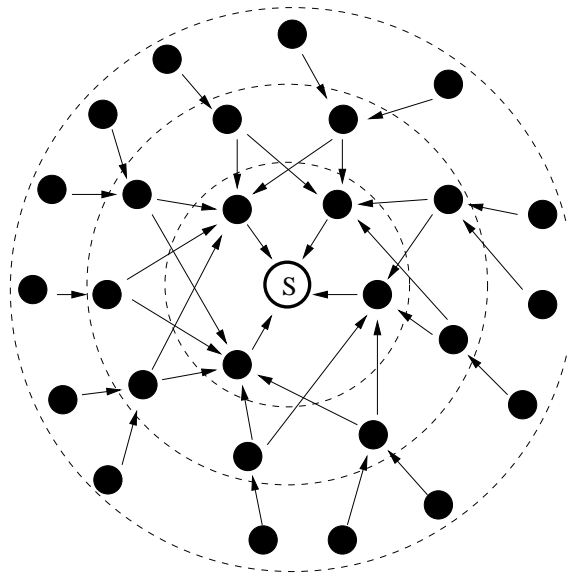


Figura 2.5: Protocolos híbridos para o envio de dados ao sorvedouro.

O protocolo *Tributaries and Deltas* [28] tenta combinar as estruturas em árvore com as estruturas em anel para superar os problemas que, como discutido nas seções anteriores, ambas apresentam quando usadas separadamente. Como resultado, obtém-se uma estrutura híbrida onde as duas estruturas podem ser usadas simultaneamente em regiões diferentes da rede. A idéia é construir uma topologia em anel ao redor do sorvedouro e ligar estruturas em árvore ao anel mais externo. Desta forma, limita-se o tamanho dos sub-ramos das árvores que podem ser afetados pela perda de um único pacote. Segundo

as condições da rede, a proporção de nós em cada parte da estrutura é variada. Em condições onde a taxa de perdas é baixa, a estrutura em árvore é favorecida e utilizam-se poucos anéis ao redor do sorvedouro. Por outro lado, em situações onde a taxa de perdas é elevada, utilizam-se muitos anéis e árvores de altura reduzida.

2.3 As Aplicações das Redes de Sensores

As aplicações das redes de sensores são variadas [29] e cada aplicação possui requisitos próprios [30, 31]. Estes requisitos podem ser diferentes em relação a fatores como o posicionamento dos nós, a mobilidade dos nós, a complexidade dos nós, a interface de comunicação dos nós e também a forma com que os dados são entregues à aplicação.

O posicionamento dos nós pode ser classificado segundo dois fatores: a aleatoriedade ou não deste posicionamento e a continuidade ou não na inclusão de nós na rede. Os nós podem ser posicionados de forma aleatória, possivelmente jogados de veículos, ou colocados em lugares precisos que podem ser definidos segundo uma topologia específica, por exemplo, em grade, ou para monitorar um ponto específico. Além disso, o posicionamento dos nós pode ser um processo instantâneo, onde todos os nós são colocados ao mesmo tempo, ou contínuo, onde nós continuam a ser adicionados após a instalação inicial da rede. Esta inclusão de nós pode ser motivada por diversos fatores como o preenchimento de lacunas deixadas pela instalação inicial ou a substituição de nós com defeito ou desativados pelo esgotamento da energia.

Assim como no caso do posicionamento dos nós, a mobilidade dos nós também pode ser classificada segundo diferentes fatores. A rede pode ser imóvel, onde nenhum dos nós se movimenta, parcialmente móvel, onde apenas alguns nós se movimentam, ou inteiramente móvel, onde todos os nós se movimentam. Além disso, essa movimentação pode ser ativa, quando os nós possuem unidades para prover mobilidade, ou passiva, quando os nós estão ligados a objetos móveis ou o movimento ocorre de modo fortuito pela ação do ambiente.

A complexidade dos nós também é um fator importante, pois como mostrado na Se-

ção 2.1 existem diferentes plataformas disponíveis. De um modo geral, sensores menores são menos intrusivos, mas também possuem um suprimento menor de energia e apresentam um custo mais elevado. Por outro lado, quando o tamanho do nó não é uma restrição importante, é possível aumentar sua complexidade sem um aumento significativo do seu custo.

Outro fator importante para o funcionamento da rede que é diretamente relacionado aos requisitos das aplicações é o tipo de interface de comunicação dos nós. As interfaces de comunicação baseadas em rádio-frequência são as mais flexíveis, pois não necessitam de visada direta e funcionam em distâncias relativamente longas. No entanto, a interface rádio se mostra o maior consumidor individual de energia nos nós sensores. Uma opção é o uso de feixes de luz, mas, embora sejam necessários transceptores menos complexos, essa técnica exige visada direta e o correto direcionamento dos feixes de luz dos nós [32]. Por fim, em ambientes onde a propagação de ondas de rádio seja ineficiente, como em redes subaquáticas, o uso da comunicação baseada em ondas sonoras é uma opção [30].

Finalmente, de acordo com os requisitos de entrega de dados da aplicação, as redes de sensores podem ser classificadas como: envio contínuo de dados, envio de dados orientado a eventos, envio de dados iniciado pelo observador ou envio híbrido de dados. No modelo de envio contínuo, os sensores enviam seus dados continuamente a uma taxa pré-determinada. Nas redes orientadas a eventos, os sensores apenas enviam dados quando um evento de interesse ocorre. Nas redes com transferências iniciadas pelo observador, os sensores apenas reportam dados explicitamente solicitados por algum observador. As redes em que mais de um destes modelos coexistem são chamadas de híbridas. Algumas aplicações, como a monitoração de dados meteorológicos, são naturalmente propícias para o envio contínuo de dados. Devido ao alto custo das transmissões de dados para a rede de sensores, torna-se especialmente interessante, nestes casos, a utilização de alguma computação local para reduzir o volume de dados trafegando na rede.

2.3.1 Aplicações Diversas

A flexibilidade das redes de sensores possibilita sua aplicação em diversas áreas, no entanto, as aplicações que mais têm motivado investimentos em redes de sensores são as aplicações militares [30]. A possibilidade de formação rápida e robusta de uma rede de sensores torna essas redes ideais para utilização militar, mesmo em território inimigo. Dentre as principais aplicações militares estão o monitoramento de tropas, a vigilância de campos de batalha e o rastreamento de alvos. A utilização destas redes para o monitoramento de tropas permite que os comandantes monitorem constantemente a situação de seus soldados, equipamentos e munições. A vigilância de campos de batalha permite um monitoramento automatizado da movimentação dos inimigos em regiões de importância crítica. Por fim, essas redes podem ser utilizadas para acompanhar alvos e servir de mira automática para munições inteligentes. Um exemplo de aplicação militar das Redes de Sensores sem Fio (RSSF) já testada é o uso de nós sensores para o rastreamento de veículos militares [33]. A Universidade de Berkeley e a companhia MLB são responsáveis pela implementação de um protótipo onde os nós sensores são posicionados com o auxílio de aeronaves não tripuladas. Cada nó sensor é equipado de um magnetômetro para a detecção de veículos e os nós colaboram entre si para estimar o curso e a velocidade do veículo rastreado. Os dados coletados são em seguida enviados à aeronave não tripulada. Nesta implementação, buscou-se desenvolver uma rede cujos nós pudessem passar despercebidos, dificultando assim a sua destruição. Os nós estão sujeitos a uma movimentação passiva e o envio de dados é orientado a eventos, onde um evento é a detecção de algum veículo.

Outro exemplo de aplicação militar é um sistema anti-atiradores de elite baseado numa RSSF. O sistema implementado por Simon *et al.* [34] utiliza sensores acústicos para determinar a posição de um atirador e a trajetória do projétil a partir da onda de choque e do barulho do disparo. A localização é feita através da comparação dos diferentes tempos de chegada dos ruídos. Os nós são estáticos e formam uma rede ad hoc para informar o resultado de suas medidas. Resultados mostram que o atirador pode ser detectado com a precisão de um metro e o tempo necessário é inferior a dois segundos.

As redes de sensores representam ainda um meio não-intrusivo para a monitoração

ambiental e levantamento de ecossistemas. A formação de uma RSSF em regiões como florestas e savanas permite um levantamento detalhado de espécies e micro-climas, o que não poderia ser feito com os métodos convencionais de sensoriamento. É possível a utilização de diferentes tipos de sensores em paralelo, de modo a construir uma visão mais completa do ambiente monitorado.

Alguns sistemas existentes são capazes de localizar a presença de espécies específicas de pássaros em tempo real. O sistema proposto por Wang *et al.* [35] utiliza o tempo de chegada para localizar o animal e o espectrograma do som para determinar a espécie de pássaro. Os nós são organizados em grupos, ou *clusters*, e o líder do grupo é responsável pelo processamento centralizado dos sinais. Como o nó líder é mais sobrecarregado, utiliza-se um tipo diferenciado de equipamento, com maior poder computacional e um GPS para possibilitar a localização do animal em relação ao resto da rede. A operação da rede é orientada a eventos, disparada quando a intensidade do sinal captado é superior a um valor de referência.

Existem ainda muitas outras aplicações possibilitadas pela ubiqüidade das redes de sensores. Dentre elas pode-se destacar o monitoramento das condições fisiológicas de pacientes [36], o auxílio à montagem de equipamentos e móveis [37] e o controle das condições de conservação de alimentos [38].

2.3.2 Aplicação de Estimação de Campo

Além das aplicações militares, a aplicação mais intuitiva das redes de sensores é no sensoriamento de processos físicos como temperatura, umidade e pressão. A utilização de diversos sensores espalhados numa dada região, possivelmente remota, para o monitoramento de processos variáveis espaço-temporalmente é chamada de estimação de campo. A utilização de uma rede de sensores para este fim possibilita a realização das medidas em lugares de outra forma inacessíveis, pois o observador pode estar a quilômetros de distância recebendo os dados. Esta é tipicamente uma aplicação de envio contínuo de dados, onde a qualidade da estimação depende diretamente da frequência com que os dados são obtidos. Quanto maior esta frequência, tanto temporal quanto espacial, maior a

precisão do sistema. No entanto, maiores frequências implicam um maior tráfego na rede e conseqüentemente um maior consumo de energia. A frequência espacial está diretamente ligada ao número de nós sensores e à forma com que estes sensores são colocados na região, enquanto que a frequência temporal depende da taxa com que os nós ativos coletam os dados. Quanto maior esta frequência, maior é a precisão na reconstrução do comportamento do processo monitorado [39]. No entanto, um maior número de amostras implica uma maior sobrecarga de comunicação para a transmissão dos dados na rede e, conseqüentemente, um maior consumo de energia por parte dos nós sensores.

Um exemplo de implementação deste tipo de aplicação é o sistema de monitoração das condições climáticas para agricultura. Beckwith *et al.* [40] utilizam uma RSSF para monitorar processos físicos que influenciam o crescimento das plantas numa vinícola. Os objetivos são de possibilitar uma colheita precisa, de controlar a necessidade de cuidados específicos como água e fertilizante, etc. Os nós são posicionados numa grade e formam uma topologia em árvore de altura igual a dois. Os nós coletam informações sobre a temperatura local para que um computador portátil possa fazer um mapa da temperatura na plantação.

Mainwaring *et al.* [41] utilizam uma RSSF para monitorar as condições dos ninhos de um pássaro. A RSSF é uma opção para evitar que a presença de humanos modifique a rotina normal dos animais. O objetivo é fornecer aos biólogos informações sobre a utilização dos ninhos, sobre as variações das condições climáticas no interior e ao redor dos ninhos no período de acasalamento e permitir a parametrização dos locais de acasalamento mais importantes. Nós sensores capazes de medir a umidade, a temperatura, a pressão e a intensidade luminosa são colocados no interior de ninhos e na superfície. Assim como os ninhos, os nós são organizados em grupos e o líder do grupo possui um transmissor de longo alcance para se comunicar com a estação base. Os dados são recolhidos periodicamente e enviados ao sorvedouro.

Muitos trabalhos sobre estimação de campos preocupam-se com questões relacionadas à frequência espacial com que as amostras são coletadas. A maior parte dos trabalhos considera campos com banda limitada, ou seja, cuja frequência máxima da variação entre as medidas em dois pontos distintos do campo é sempre limitada a um certo valor. No

entanto, a estimação de campos sem limite de banda é viável [39]. Kumar *et al.* sustentam que o erro causado pela sub-amostragem espacial não precisa ser eliminado, apenas reduzido ao nível do erro de quantização do sensor. Além disso, eles demonstram que há um compromisso entre a densidade de sensores e sua precisão para a obtenção de um determinado erro na reconstrução do campo.

A maior parte dos trabalhos que buscam reduzir a frequência espacial de coleta de dados assume a existência de um campo a ser sensoriado similar ao mostrado na Figura 2.6. Nesta figura, a região preta e as regiões brancas representam áreas onde o processo sensoriado varia suavemente em função da posição do sensor. As regiões cinza, por outro lado, representam áreas onde o processo apresenta uma variação mais abrupta em função da posição do nó sensor e são chamadas de fronteiras.

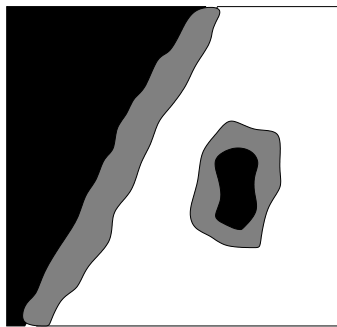


Figura 2.6: Exemplo de campo com variações suaves e poucas áreas de fronteira.

O esquema conhecido como *Backcasting* [42] propõe uma abordagem adaptativa em dois passos para reduzir o número de sensores ativos em função das correlações existentes no ambiente. Numa primeira etapa, um subconjunto dos nós sensores faz uma estimativa inicial do campo. Com base nesta estimativa, o centro de controle ativa mais nós sensores em regiões que apresentem maior variação nas medidas. Desta forma, regiões com um comportamento mais suave são monitoradas com uma densidade menor de nós, enquanto que regiões de fronteira são monitoradas com uma maior densidade de nós sensores. Esta abordagem privilegia a coleta de dados nas regiões com mudanças abruptas no campo, que tendem a apresentar maior interesse [43]. Apesar de conseguir reduzir o número de amostras coletadas nas regiões do campo com variação mais suave, este esquema não é capaz de reduzir o número de amostras nas regiões de fronteira, onde a rede tende a operar com a maior densidade possível de nós sensores ativos. Ao invés de permitir a todos

os nós sensores de enviarem seus dados e fazer a agregação de dados redundantes como discutido na Seção 2.2, este tipo de mecanismo decide quais nós geram leituras redundantes e desativa estes nós, reduzindo a carga na rede. Este mecanismo é, a princípio, utilizado em substituição às técnicas de agregação de dados no interior da rede. Ao invés de permitir que todos os nós transmitam e fazer o tratamento da redundância no interior da rede, os nós que geram leituras redundantes são desligados.

A proposta do algoritmo *Fidelity Driven Sampling* - FDS [44, 45] é explorar uma possível mobilidade para fazer uma estimativa inicial do ambiente e dividi-lo em regiões de acordo com a variação das medidas coletadas. Com base nesta estimativa, são adicionados pontos de amostragem às regiões com maior variação até que o erro na estimativa chegue ao patamar desejado ou que a cota máxima de amostras que podem ser coletadas seja atingida. Este esquema, no entanto, sofre da mesma limitação da técnica *Backcasting* por só preocupar-se com a densidade espacial das medidas. O protótipo implementado utiliza um único nó sensor que é posicionado com a ajuda de uma infra-estrutura de cabos de aço nos diferentes pontos a serem monitorados.

O algoritmo RACE [46] codifica de forma adaptativa as amostras coletadas através do uso de uma transformada *wavelet*. Desta forma, consegue-se reduzir o total de dados transmitidos ao sorvedouro. É possível neste tipo de abordagem a codificação das amostras com outras técnicas, como a PCA (*Piecewise Constant Approximation*) [47]. Estas técnicas, no entanto, são utilizadas após a decisão sobre quais amostras serão transmitidas e não reduzem o número de amostras enviadas. Elas transmitem menos dados por realizar uma codificação mais eficiente das amostras.

O esquema proposto neste trabalho visa complementar estas técnicas que reduzem a densidade espacial da coleta de dados. O objetivo desta proposta é reduzir a densidade temporal das amostras, explorando características intrínsecas do processo monitorado para definir um comportamento padrão e enviar somente as medidas que destoem deste padrão. Por ser uma técnica que atua na dimensão temporal, esta técnica possibilita até mesmo a redução do número de amostras geradas pelos nós nas regiões de fronteira. Como discutido anteriormente essas são as regiões onde técnicas como o *Backcasting* e o FDS não conseguem economizar energia, pois a variação entre as medidas em diferentes

pontos é significativa. Além disso, a técnica proposta possui a vantagem de ser distribuída, pois cada nó sensor define sua própria idéia de medida padrão, como será discutido adiante, e dispensa a utilização de qualquer infra-estrutura para operação.

Capítulo 3

A Estimação de Campo Orientada a Eventos

O ESQUEMA proposto baseia-se na construção de uma idéia de periferia de atenção [48] por parte de cada nó sensor. Para que isto seja possível, é necessário que o processo monitorado apresente um comportamento ao longo do tempo com alguma característica que possa ser considerada comum ou esperada. Para aplicações de envio contínuo de dados, esta técnica pode ser vista como uma passagem para o modelo de envio de dados orientado a eventos, onde um evento é definido como “algo diferente” do que é normalmente observado por um determinado nó sensor.

O trabalho realizado contempla apenas as aplicações de envio contínuo de dados onde são monitorados processos com comportamentos regulares. É importante destacar que muitos processos físicos apresentam um comportamento regular, às vezes com ciclos bem definidos. A Figura 3.1 mostra a temperatura coletada ao longo de três dias consecutivos por duas estações meteorológicas distintas na cidade do Rio de Janeiro [49].

Analisando esta figura, fica claro um comportamento padrão onde a temperatura é inicialmente mais baixa perto da meia-noite e começa a subir na metade da manhã. A temperatura declina no meio da tarde e volta a níveis relativamente baixos à noite. Considerando a idéia de periferia discutida anteriormente, uma medida que apresente um comportamento similar ao comportamento médio destas curvas poderia permanecer na

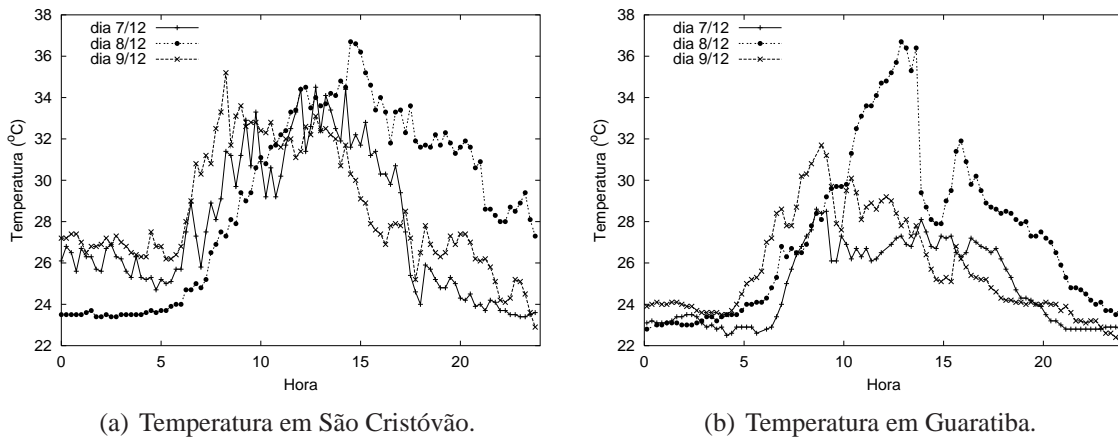


Figura 3.1: Temperaturas em dois lugares distintos da cidade do Rio de Janeiro.

periferia, ou seja, não seria transmitida. Por outro lado, uma medida destoando além de certo limiar deste comportamento padrão seria levada ao centro da atenção pelo nó sensor, isto é, seria enviada ao sorvedouro. No exemplo citado, pode-se perceber que as curvas da Figura 3.1(a) apresentam um comportamento bem parecido. As curvas da Figura 3.1(b), no entanto, mostram um comportamento destoante no dia 8/12, especialmente a partir das 10 horas. O esquema proposto visa exatamente economizar energia não mandando amostras no momento em que o comportamento da medida for o esperado e enviar amostras com maior frequência em situações como a mostrada na Figura 3.1(b). Desta forma, o sorvedouro assume que o comportamento da medida segue o esperado quando não receber nenhuma mensagem de atualização de amostra e ao receber os dados referentes ao comportamento incomum do dia 8/12, é capaz de estimar o campo sensoriado com pouco erro levando em consideração os comportamentos incomuns, como o comportamento mostrado para o dia 8/12 na Figura 3.1(b). Estas amostras enviadas devido a uma diferença grande em relação ao comportamento esperado são chamadas de *amostras de refinamento*.

3.1 O Algoritmo da Camada Aplicação

O processo de construção do comportamento esperado e definição sobre amostras destoantes pode ser feito de diferentes formas. A etapa inicial é identificar a periodicidade com que o comportamento regular ocorre. Para isto, deve-se coletar os dados com taxa

máxima de amostragem por um determinado período maior do que a regularidade esperada para permitir o cálculo da autocorrelação deste vetor com as medidas obtidas. Com base neste cálculo de autocorrelação pode-se obter a periodicidade do processo. Uma vez conhecida a periodicidade de N amostras do processo, o nó deve começar a identificar o Comportamento Periódico esperado (CP). O nó pode obter este comportamento periódico esperado da seguinte forma:

$$CP_i(k) = \alpha P_{i-1}(k) + (1 - \alpha)CP_{i-1}(k), \quad (3.1)$$

onde CP_i é um vetor contendo o comportamento esperado ao longo do período i , P_{i-1} é o vetor com as medidas obtidas ao longo do período $(i - 1)$, α é um fator multiplicativo que determina o peso da última amostra no cálculo do comportamento esperado e $1 \leq k \leq N$.

Desta forma, quanto maior α , maior o peso das amostras recentes e menos importância tem o histórico do comportamento do processo. Por outro lado, um valor baixo para o parâmetro α atribui maior importância ao histórico do processo e valoriza pouco as variações súbitas. Com base na Equação 3.1, pode-se verificar que o peso (W) das medidas obtidas há l períodos no comportamento esperado é:

$$W = \alpha \times (1 - \alpha)^{l-1} \mid l \geq 1. \quad (3.2)$$

No caso da temperatura, que é o processo físico abordado mais detalhadamente neste trabalho, há claramente uma periodicidade diária. Outras periodicidades podem ser identificadas, mas por motivos de simplicidade, as análises realizadas neste trabalho são focadas na periodicidade diária. Desta forma, os nós sensores devem identificar um Comportamento Diário esperado (CD). Este comportamento padrão é recalculado diariamente para levar em conta as medidas mais recentes. A decisão sobre quais amostras serão enviadas é feita com base neste comportamento. Há, no entanto, uma questão prática ligada à capacidade do sorvedouro de reconstruir a informação enviada pelo nó sensor. Para que isto seja possível, o nó deve enviar periodicamente um comportamento esperado ao sorvedouro. Este comportamento esperado deve servir de base para a reconstrução da informação fornecida pelo sensor. Até que um próximo comportamento esperado seja

enviado pelo sensor, o sorvedouro assume que a informação coletada pelo nó segue o último comportamento esperado, a exceção das amostras de refinamento enviadas pelo nó sensor que devem ser colocadas no dia e horário especificados pelo sensor. O nó sensor deve fazer a análise dos dados a serem enviados com base no último vetor de comportamento esperado (*Expected Behavior Vector* - EBV) enviado ao sorvedouro, garantindo que o sorvedouro esteja reconstruindo a informação como o nó sensor espera. Assim, o nó sensor pode averiguar se a medida obtida para um dado instante difere muito ou pouco do valor correspondente àquele horário específico no último EBV enviado. Caso a diferença, ou erro, em relação ao valor esperado seja menor que certo limiar configurável na rede (E_{max}), o nó sensor não envia a amostra ao sorvedouro, se esta diferença for maior que o erro admitido na reconstrução, o nó sensor envia a amostra juntamente com a informação temporal para inserção desta amostra na reconstrução do processo monitorado no sorvedouro.

Duas questões devem ser destacadas quanto a esse procedimento. Primeiramente, deve-se destacar que embora as medidas devam ser comparadas com o comportamento esperado para um determinado horário, este mecanismo não requer nenhum tipo de sincronização entre os diferentes nós sensores, pois cada sensor constrói sua própria periferia e analisa as amostras numa base de tempo local. O esquema funciona de uma forma distribuída. Além disso, se a cada dia o nó enviar o comportamento esperado para o dia seguinte, o sistema não obterá nenhum ganho. Assim, o sensor deve enviar as atualizações de comportamentos esperados a intervalos que possibilitem redução no número de amostras enviadas. As variações do procedimento realizado diariamente podem ser vistas nos algoritmos 1 e 2, onde CD_i é um vetor contendo o Comportamento Diário esperado ao longo do dia i , D_i é o vetor com as medidas obtidas ao longo do dia i , V_e é o último vetor de atualização do comportamento esperado enviado, $D_i(k)$ é o k -ésimo elemento do vetor D_i e N amostras são coletadas por dia.

Estes algoritmos possuem três partes principais, relacionadas aos três parâmetros de configuração dos algoritmos. O cálculo do comportamento esperado é feito diariamente através de uma ponderação ditada pelo parâmetro α e este comportamento esperado é enviado periodicamente com uma frequência especificada pelo parâmetro T_a . Por fim, com base no parâmetro E_{max} verifica-se se uma amostra deve ser enviada para reduzir o erro

Algoritmo 1 Algoritmo que limita o número de amostras.

```

 $CD_i = \alpha D_i + (1 - \alpha)CD_{i-1};$ 
 $T_a = T_a + 1;$ 
if  $(i \bmod T_a == 1)$  then
   $V_e = CD_i;$ 
  Enviar  $V_e;$ 
else
  for  $k = 1 : N$  do
    if  $abs(D_i(k) - V_e(k)) > abs(V_e(k)) * E_{max}$  then
      Enviar  $D_i(k)$ 
    end if
  end for
end if

```

Algoritmo 2 Algoritmo que limita o erro na reconstrução.

```

 $CD_i = \alpha D_i + (1 - \alpha)CD_{i-1};$ 
 $T_a = T_a + 1;$ 
if  $(i \bmod T_a == 1)$  then
   $V_e = CD_i;$ 
  Enviar  $V_e;$ 
end if
for  $k = 1 : N$  do
  if  $abs(D_i(k) - V_e(k)) > abs(V_e(k)) * E_{max}$  then
    Enviar  $D_i(k)$ 
  end if
end for

```

na estimação do processo. O cálculo do comportamento esperado mostrado nestes algoritmos é ligeiramente modificado em relação ao mostrado na Equação 3.1. No cálculo especificado nos dois algoritmos utiliza-se as informações do dia em questão no cálculo do comportamento esperado. Esta modificação reduz a diferença entre o comportamento esperado e as medidas do dia em que é feita a atualização do vetor de comportamento esperado. Esta menor diferença implica um menor erro quando o EBV é enviado no lugar das medidas do dia em que é feita a atualização do EBV (Algoritmo 1) e também um menor número de amostras de refinamento, quando o EBV é enviado independentemente das medidas do dia em que é feita esta atualização (Algoritmo 2). O Algoritmo 1 garante que sob nenhuma circunstância o mecanismo envia mais amostras do que o total de amostras coletadas. No entanto, a utilização do comportamento esperado em substituição às medidas do dia em que é feita a atualização do vetor de comportamento esperado não garante que o erro na reconstrução esteja limitado ao erro máximo configurado, a menos que o parâmetro α esteja configurado em 1. Por outro lado, o Algoritmo 2 limita o erro máximo na reconstrução todos os dias, mas pode gerar mais amostras do que o número

de amostras coletadas. À medida que o valor de α aumenta, e a variação do processo de um dia para o outro diminui, estas duas abordagens tendem a se igualar [50].

A utilização destes algoritmos, que se baseiam na Equação 3.1 para a obtenção do comportamento esperado, torna o esquema de baixa complexidade computacional. O esquema proposto realiza $O(1)$ operações por amostra. Esta baixa complexidade viabiliza a utilização do esquema proposto em nós sensores muito simples e com baixo poder computacional. A próxima seção detalha as simulações realizadas para analisar o esquema proposto.

3.1.1 Simulações Realizadas

Com o intuito de verificar a viabilidade do esquema proposto, são realizadas simulações do processamento local dos nós para determinar a redução no número total de amostras que cada nó sensor ativo deve enviar ao sorvedouro. A fração de amostras enviadas é utilizada como um índice de conservação de energia. Desta forma, preserva-se a generalidade dos resultados, evitando os efeitos da escolha de um MAC específico. O erro médio de reconstrução (AE) é utilizado para analisar a precisão da estimativa realizada e é definido como

$$AE = \frac{\sum_{t=1}^{TA} \frac{a_r(t) - a_s(t)}{a_s(t)} \cdot 100}{TA}, \quad (3.3)$$

onde $a_s(t)$ é a medida obtida pelo sensor no instante t , $a_r(t)$ é o valor desta amostra após a reconstrução no sorvedouro e TA é o número total de amostras obtidas.

As simulações realizadas baseiam-se no problema de medição de temperatura apresentado anteriormente. Estas simulações são feitas com a ferramenta MatLAB [51] e levam em consideração diversas possibilidades de configuração do mecanismo proposto. São variados três parâmetros principais: a frequência com que são enviadas atualizações sobre o comportamento esperado para os próximos dias, o fator α utilizado na construção do comportamento esperado e o erro admissível por amostra.

A frequência com que o vetor de atualização do comportamento esperado é enviado tem influência direta sobre o número total de amostras enviadas. O número de amostras

enviado nas atualizações é fixo em função da frequência de atualização. Quanto maior esta frequência, maior o número de amostras enviadas nas atualizações. No entanto, quando se aumenta muito o intervalo entre atualizações, há uma tendência a aumentar o número de amostras enviadas por apresentarem diferenças em relação ao comportamento esperado maiores que o erro admissível na rede.

O fator α pondera o comportamento esperado em relação às amostras de períodos mais recentes. Quanto maior o valor deste parâmetro, maior o peso que as amostras mais recentes possuem no cálculo do comportamento esperado.

O parâmetro E_{max} representa a qualidade requerida na reconstrução da informação enviada pelo sensor ao sorvedouro. Quanto menor este erro, melhor a estimação do campo sensoriado. No entanto, ao reduzir o erro permitido aumenta-se o número de amostras enviadas por apresentarem erro maior que o permitido e, assim, a redução no número de amostras enviadas pelo sensor ao sorvedouro será menor.

Um ponto de grande importância na análise deste mecanismo é o conjunto de dados utilizado como entrada para o algoritmo [52]. Inicialmente os algoritmos são testados com dados sintéticos [50, 53, 54] com o intuito de observar os efeitos dos parâmetros de configuração sobre o número de amostras que os algoritmos enviam após o processamento. Posteriormente, o algoritmo selecionado como mais adequado é analisado com base em dados reais [55] para verificar a eficácia do algoritmo na redução do total de amostras a ser enviado ao sorvedouro. Nesta parte das simulações, também é analisado o erro médio na reconstrução. Os resultados mostram que o erro médio resultante é significativamente menor que o erro admissível utilizado para configurar o mecanismo.

Modelagem dos Dados Sintéticos

Os dados sintéticos de entrada são modelados com base em informações obtidas a partir da inspeção de dados de temperatura coletados por diferentes estações meteorológicas como os mostrados na Figura 3.1. A partir da observação dos dados coletados nas estações meteorológicas, podem-se perceber algumas características importantes na evolução destas medidas ao longo de um mesmo dia e entre dias consecutivos. Com relação

ao comportamento ao longo de um dia deve-se destacar dois pontos principais: (i) a existência de um período no meio do dia onde a temperatura média eleva-se e (ii) uma maior variação na temperatura observada nos horários em que a temperatura média é elevada. Com relação ao comportamento em dias consecutivos pode-se perceber certa relação entre as temperaturas médias e nas diferenças entre as temperaturas máxima e mínima.

É importante destacar que o objetivo desta geração de dados não é reproduzir exatamente curvas de temperatura, mas reproduzir as características principais observadas a partir da inspeção de dados reais. Desta forma, o processo empregado na geração de dados busca fornecer vetores com dados de entrada para as simulações que apresentem as características destacadas anteriormente. Isto permite uma melhor análise do desempenho do esquema proposto em função das principais características do processo sensoriado.

Primeiramente a base para a construção do comportamento da temperatura ao longo de cada dia foi um período da função $-\cos(x)$, de modo a obter a média mais alta de temperatura no meio do dia. Esta função foi deslocada somando-se uma constante de modo a fazer com que a temperatura média comporte-se de forma parecida à mostrada na Figura 3.1(a).

Para modelar a relação existente entre as temperaturas médias de dias consecutivos, a constante somada à função $-\cos(x)$ para alterar a temperatura média num dado dia i (C_i) é definida como a constante utilizada no dia $i - 1$ (C_{i-1}) somada a uma variável aleatória gaussiana com média 0 e desvio padrão σ_1 . Quanto menor o valor de σ_1 , maior a relação entre a temperatura média de um dia e a temperatura média do dia seguinte. O mesmo procedimento foi utilizado para modelar a amplitude da função $-\cos(x)$ utilizada na geração dos dados do dia i (A_i) em função da amplitude utilizada para a função $-\cos(x)$ no dia anterior (A_{i-1}). Esta amplitude representa a relação entre as diferenças das temperaturas máxima e mínima em dias consecutivos.

Por fim, a cada ponto da função $-\cos(x)$ (estes pontos representam a temperatura em diferentes horários de um mesmo dia) foi somada uma variável aleatória ($R_i(k)$) com distribuição gaussiana também de média 0 mas com desvio padrão $\sigma_2 \times H(k)$, onde $H(k)$ é proporcional ao valor da função $-\cos(x)$ no horário considerado. Esta definição de $H(k)$ faz com que amostras de horários com temperaturas médias mais elevadas apresentem

uma maior variação. Quanto maior σ_2 , maior é esta variação. Todas as variáveis aleatórias gaussianas utilizadas tiveram seus valores máximos e mínimos limitados, evitando desta forma diferenças irreais de temperatura entre dias consecutivos. Desta forma, a variável gaussiana com seus valores máximos e mínimos limitados entre a e b (G_a^b) possui uma função densidade de probabilidade igual a

$$pdf(G_a^b) = \frac{f(x)}{\int_a^b f(x)} \mid a \leq x \leq b, \quad (3.4)$$

onde $f(x)$ é a função densidade de probabilidade de uma variável aleatória com distribuição gaussiana.

As k amostras geradas para um dado dia D_i são obtidas como

$$D_i(k) = A_i \times \cos\left(\frac{2 \times k \times \pi}{N}\right) + C_i + R_i(k). \quad (3.5)$$

onde N é o número de amostras por dia, ou período, e A_i , C_i e $R_i(k)$ são calculados de acordo com as funções a seguir.

$$A_i = (A_{i-1} \times G_a^b(0, \sigma_1)). \quad (3.6)$$

$$C_i = (C_{i-1} \times G_a^b(0, \sigma_1)). \quad (3.7)$$

$$R_i(k) = G_a^b(0, \sigma_2 \times H(k)). \quad (3.8)$$

Como discutido anteriormente, $G_a^b(x, y)$ denota uma variável gaussiana limitada em a e b com média x e desvio padrão y , e $H(k)$ é igual a

$$H(k) = 0.05 \times \cos\left(\frac{2 \times k \times \pi}{N}\right). \quad (3.9)$$

Os dados diários são gerados com 96 amostras, representando a medição da temperatura a intervalos regulares de 15 minutos. Para uma melhor análise dos efeitos das características do processo sensoriado sobre o desempenho do esquema proposto, os valores de σ_1 e σ_2 são variados ao longo das simulações. Quanto maiores estes dois desvios padrão, maior a imprevisibilidade do processo. A próxima seção apresenta mais detalhes

das simulações realizadas com os dados sintéticos e os resultados obtidos.

Resultados com Dados Sintéticos

As simulações do processamento local dos nós são feitas com base nos dados gerados através da modelagem descrita na seção anterior. Assim, os dados são gerados para representar os dados coletados por um nó sensor. O esquema proposto é aplicado a este conjunto de dados e calcula-se a fração do total de amostras que o nó sensor enviaria efetivamente ao sorvedouro. Quanto menor esta fração, melhor o desempenho do esquema proposto. A simulação assume que o nó já identificou a periodicidade de 96 amostras do processo, de modo a analisar somente o funcionamento no regime estacionário do mecanismo proposto. Considerar o procedimento de identificação do período natural do processo geraria uma sobrecarga de amostras coletadas que poderia influir na análise dos resultados em regime permanente. A eliminação deste efeito, resultaria no aumento da duração e da complexidade das simulações. Além disso, este procedimento de identificação do período independe dos parâmetros de configuração do mecanismo. Somente as medidas coletadas pelo nó sensor influenciam neste procedimento.

O esquema proposto possui alguns parâmetros de configuração que podem influir nos seus resultados: a frequência de atualização, a constante α e o erro admissível por amostra (E_{max}). Desta forma, as simulações são realizadas com a variação destes parâmetros para um melhor entendimento de seus efeitos. Em todas as simulações realizadas a frequência de atualização é um vetor de comportamento esperado (EBV) enviado a cada T_a dias. Desta forma, quanto maior o parâmetro T_a , menor a frequência de atualização. O erro admissível por amostra é o parâmetro E_{max} multiplicado pelo comportamento esperado no horário em questão. Todos os resultados obtidos possuem confiabilidade de 99% e intervalos de confiança menores que 3% do valor médio.

Inicialmente o algoritmo que limita o número de amostras é analisado. A primeira análise realizada é sobre a variação do número de amostras enviadas em função da incerteza no processo sensoriado. Para isso, é importante analisar o comportamento do número de amostras enviadas em função da variação de σ_1 e σ_2 . A Figura 3.2 mostra o número de amostras enviadas quando σ_1 e σ_2 variam juntos (σ).

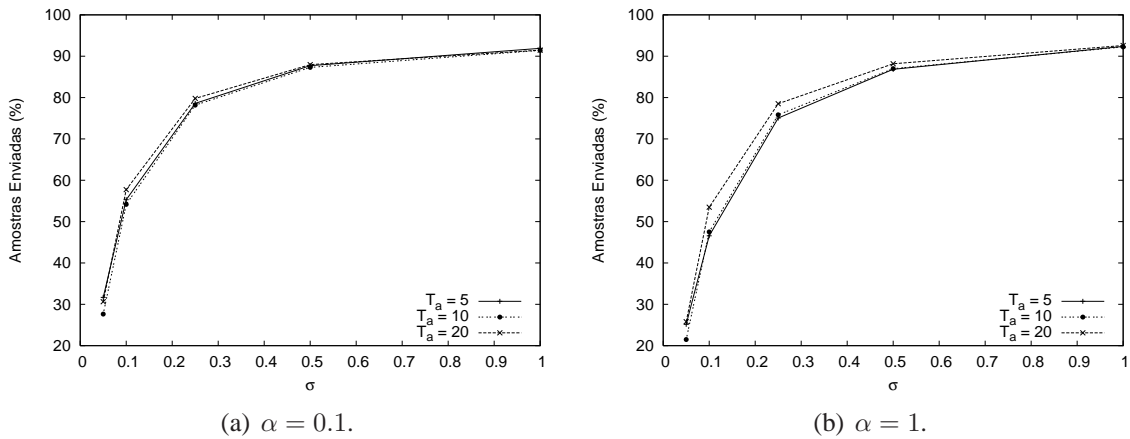


Figura 3.2: Amostras enviadas em função de σ e com E_{max} igual a 1% quando o Algoritmo 1 é utilizado.

Analisando a Figura 3.2 pode-se perceber que, para um valor muito baixo para o parâmetro E_{max} , o parâmetro α e a frequência de atualização não possuem grande influência no resultado. Deve-se destacar que a frequência mais baixa utilizada apesar de enviar menos amostras quando a variação do processo é muito baixa, apresenta um desempenho inferior às outras duas frequências consideradas à medida que a variação do processo aumenta com o incremento de σ (σ_1 e σ_2). Para este valor de E_{max} , a fração de amostras sobe rapidamente para 90% com o aumento de σ . A Figura 3.3 mostra a mesma análise com E_{max} igual a 5% do valor esperado.

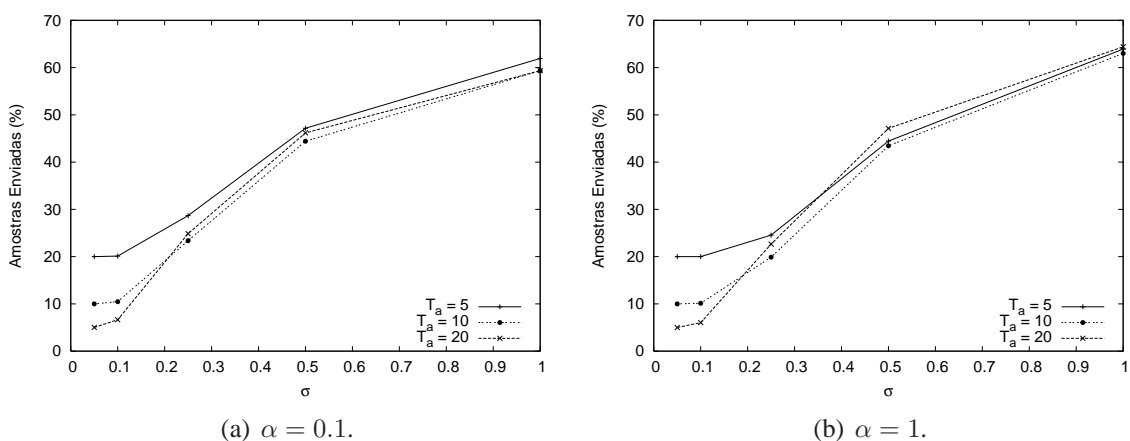


Figura 3.3: Amostras enviadas em função de σ e com E_{max} igual a 5% quando o Algoritmo 1 é utilizado.

Através da comparação entre as figuras 3.3 e 3.2, é possível notar que com o aumento do erro admissível, os parâmetros α e T_a passam a ter uma influência maior nos resul-

tados. Desta forma, a variação destes parâmetros causa mudanças mais perceptíveis nos resultados. Para E_{max} igual a 5%, o esquema consegue reduzir em torno de 35 a 40% o número de amostras enviadas com $\sigma = 1$. Com a utilização de restrições muito fortes para o erro tolerado, o ganho do esquema cai muito rapidamente. Além disso, é importante destacar que, para valores mais elevados de σ , a frequência de atualização de um comportamento esperado a cada 10 dias apresenta resultados melhores. Isto indica que o compromisso entre o número fixo de amostras enviadas nas atualizações e o número de amostras enviadas por erro à medida que o intervalo entre atualizações aumenta é melhor atendido com esta frequência de atualização intermediária.

Repetindo estas análises para o algoritmo que limita o erro na reconstrução (Algoritmo 2), pode-se observar os efeitos de enviar amostras de refinamento para os dias onde é feita a atualização do comportamento esperado. A Figura 3.4 mostra a porcentagem de amostras enviadas em função de σ para E_{max} igual a 1%. Como pode ser visto na Figura 3.4(a), uma configuração equivocada desse algoritmo pode resultar num número enviado de amostras maior que 100% do número original de amostras. Este problema é mais claro para $T_a = 5$, quando os dias de atualização são responsáveis por 20% de todas as amostras. No entanto, este algoritmo garante que o erro máximo na reconstrução seja menor que E_{max} para qualquer amostra. Este limite evita que algum evento de interesse ocorrendo num dia de atualização seja perdido. Como esperado, a Figura 3.4(b) mostra os mesmos resultados obtidos pelo algoritmo que limita o número de amostras, pois o parâmetro α é configurado em 1.

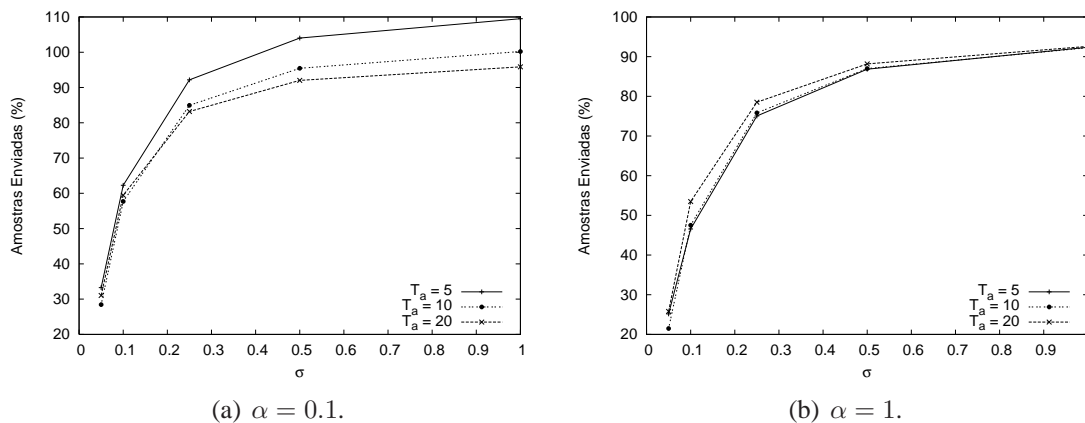


Figura 3.4: Amostras enviadas em função de σ e com E_{max} igual a 1% quando o Algoritmo 2 é utilizado.

Para um erro máximo mais relaxado, o desempenho do algoritmo que limita o erro na reconstrução (Figura 3.5(a)) para valores maiores de T_a se aproxima do desempenho alcançado pelo algoritmo que limita o número de amostras (Figura 3.3(a)). Novamente, para α igual a 1 (Figura 3.5(b)), o mecanismo funciona da mesma forma, independentemente do algoritmo utilizado.

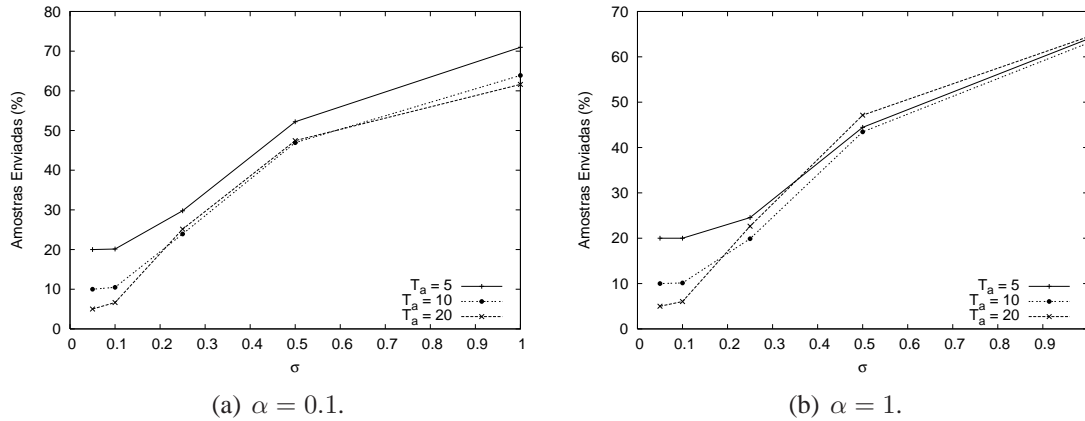


Figura 3.5: Amostras enviadas em função de σ e com E_{max} igual a 5% quando o Algoritmo 2 é utilizado.

Como se pode perceber pelos resultados mostrados na Figura 3.4(a), é importante configurar corretamente o Algoritmo 2, que limita o erro na reconstrução, evitando a transmissão de mais dados do que o coletado. A Figura 3.6 mostra os resultados do algoritmo que limita o erro na reconstrução para processos com grande variação ($\sigma = 1$) em função de α . Observando a Figura 3.6(a), pode-se perceber que para baixos valores de E_{max} , o Algoritmo 2 alcança melhores resultados com α igual a 1, situação na qual este algoritmo se comporta como o Algoritmo 1 com a mesma configuração. No entanto, à medida que a restrição do erro é relaxada (Figura 3.6(b)), valores intermediários de α passam a apresentar melhores resultados quando o parâmetro T_a é baixo.

A importância do parâmetro E_{max} faz com que seja interessante uma análise mais detalhada da sua influência sobre os resultados. A Figura 3.7 mostra os resultados do mecanismo em função do erro aceitável com o parâmetros T_a e α configurados em 10 e 1, respectivamente. Deve-se ressaltar que nessa configuração ambos os algoritmos alcançam os mesmos resultados, pois o parâmetro α é igual a 1.

A Figura 3.7 mostra que à medida em que o erro aceitável diminui, as variações de σ

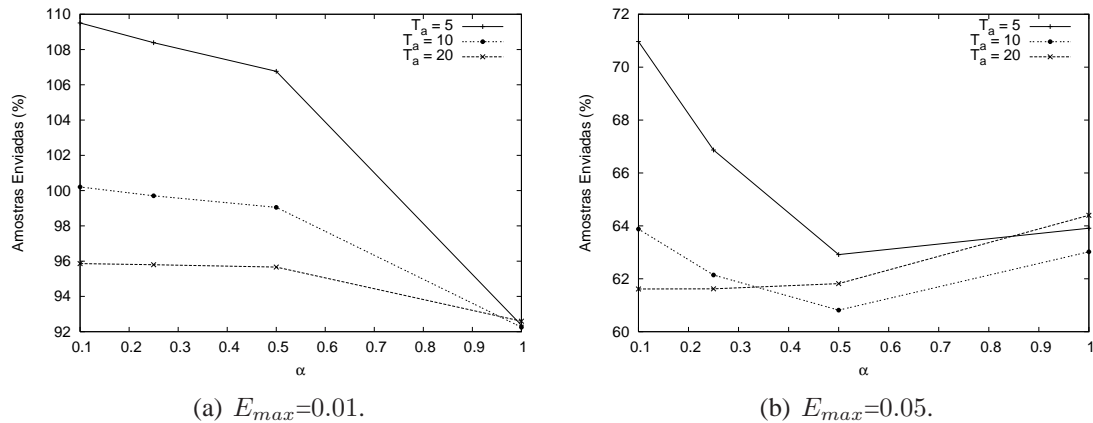


Figura 3.6: Amostras enviadas variando-se α com σ igual a 1 quando o Algoritmo 2 é utilizado.

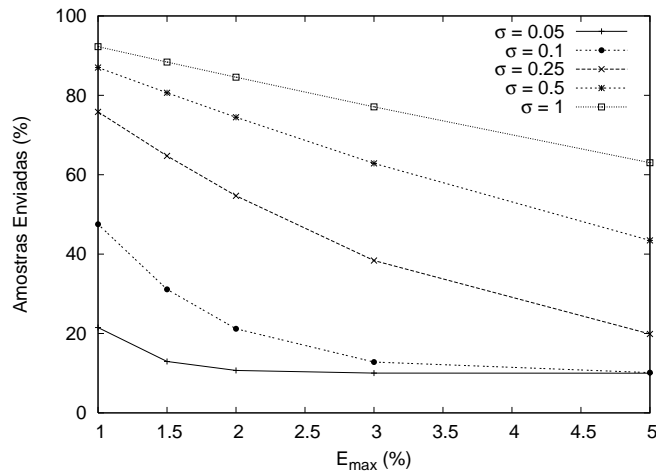


Figura 3.7: Amostras enviadas em função de E_{max} para α igual a 1.

apresentam um impacto maior sobre os resultados. Para erros aceitáveis altos, pequenas variações de σ são negligenciáveis. Deve-se ressaltar que, para valores mais elevados de E_{max} e com valores baixos de σ (processos mais regulares), a fração de amostras enviadas aproxima-se da fração de amostras que deve ser enviada de forma fixa em função da frequência de atualização utilizada. Estas frações são 20, 10 e 5% para T_a igual a 5, 10 e 20 dias, respectivamente. Além disso, mesmo para processos pouco regulares ($\sigma = 1$), é possível obter uma redução em torno de 10 a 20% para valores de E_{max} tão baixos quanto 1 e 3%.

O Algoritmo 1 pode resultar em erros imprevisíveis no dia em que o vetor de comportamento esperado (EBV) é enviado, o que pode levar à não observação de eventos de interesse. Assim, como os resultados mostram que a correta configuração do Algoritmo

2 pode resultar numa redução significativa do número de amostras enviadas, as análises subsequentes do mecanismo proposto serão feitas com base no Algoritmo 2. A próxima análise se baseia em dados reais sobre medidas de temperatura, disponíveis no sítio Internet de uma universidade brasileira [56]. A seguir são detalhados os procedimentos realizados para processar os dados obtidos e assegurar a integridade das amostras.

Tratamento dos Dados de Entrada Reais

O sítio Internet do Departamento de Ciências Exatas da Universidade de São Paulo [56] possui um histórico de dados meteorológicos desde 1997. São disponibilizadas medidas sobre a evolução da temperatura com um intervalo de 15 minutos, resultando em 96 amostras por dia, e os arquivos são organizados por dia. Os dados obtidos são pré-processados para evitar o uso de dados corrompidos. Alguns arquivos apresentam problemas em parte das medidas e o tratamento dado ao arquivo varia segundo o número de medidas apresentando problemas. Em situações onde faltava apenas uma medida, a medida inexistente foi substituída pela interpolação linear de sua medida predecessora e da medida imediatamente posterior à lacuna. Arquivos onde duas ou mais amostras apresentam problemas são descartados.

Após a eliminação dos dados corrompidos, as medidas de cada dia foram organizadas em vetores contendo as 96 amostras do referido dia. Esses vetores diários são concatenados para dar origem a um vetor maior com as medidas entre 1997 e 2005. Nos casos onde os dados de um dia são descartados, este dia é ignorado e os dados do dia anterior são concatenados com os dados do dia seguinte.

Este processamento resulta num único vetor com informações sobre 2880 dias, ordenados cronologicamente. Assim, as simulações são realizadas com um vetor de dados de entrada contendo 276480 elementos, que representam medidas obtidas pelo nó sensor.

Resultados com Dados Reais

Os resultados apresentados nesta seção mostram a aplicação do algoritmo que limita o erro na reconstrução para todas as amostras (Algoritmo 2) ao conjunto de dados obtidos

após o processamento descrito na seção anterior. Nesta parte do trabalho, busca-se analisar não só a porcentagem de amostras que devem ser enviadas como também o erro médio obtido na reconstrução dos dados (Equação 3.3). Deve-se ressaltar que quanto menor a fração de amostras enviadas, maior a eficiência do algoritmo. Além disso, um erro médio de reconstrução reduzido implica uma boa reconstrução do processo no nó sorvedouro e significa que a redução no número de amostras não resultou numa perda significativa na qualidade da estimação. Novamente, assume-se que a periodicidade de 96 amostras (1 dia) já é conhecida pelo nó. A Figura 3.8 mostra a porcentagem de amostras a ser enviada após o uso do algoritmo proposto (Algoritmo 2) em função do parâmetro α .

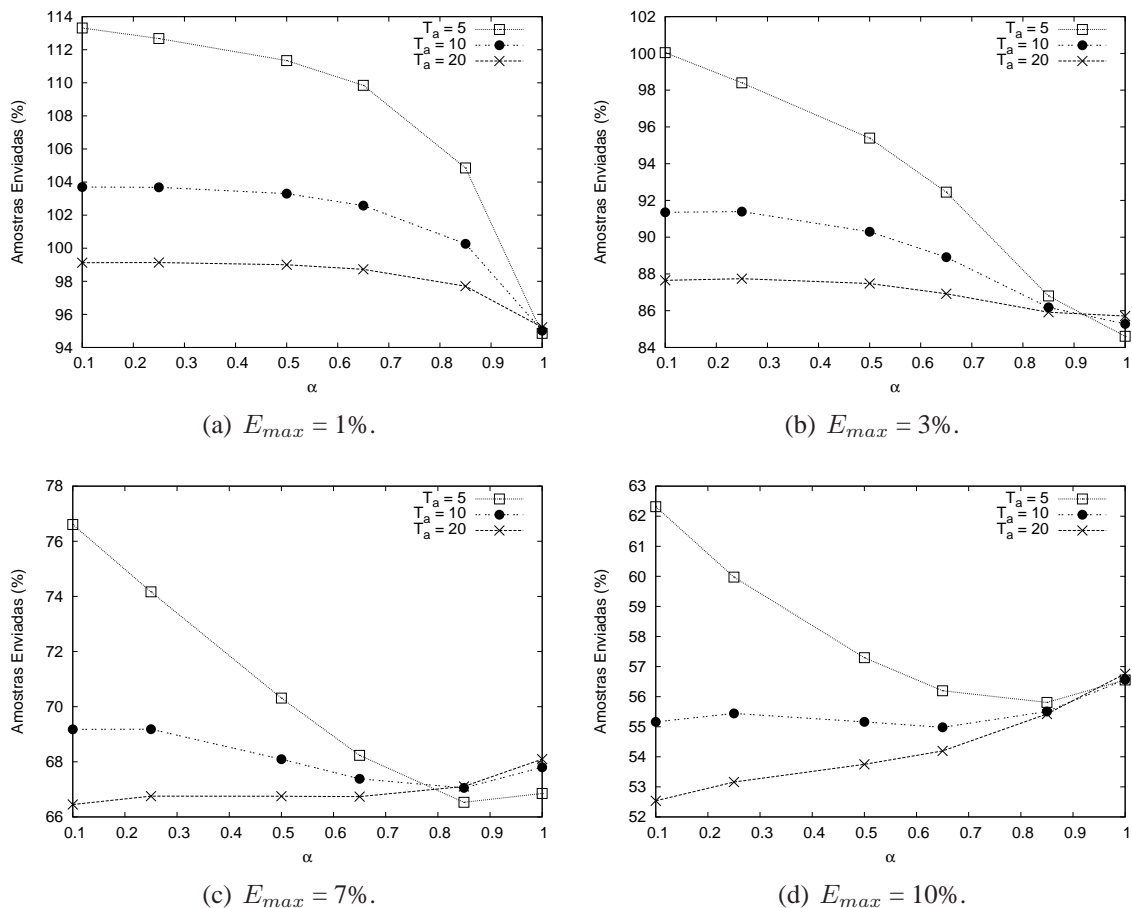


Figura 3.8: Amostras enviadas pelo Algoritmo 2 em função de α para o conjunto de dados reais.

Se o parâmetro E_{max} é configurado com valores muito baixos, a qualidade da reconstrução é melhor mas o algoritmo resulta numa redução menor no número de amostras enviadas. Por outro lado, valores elevados para este parâmetro possibilitam uma maior redução no total de amostras enviadas, mas reduz também a qualidade da estimação. Como

mostrado na Figura 3.8(a), onde se admite um erro muito pequeno na reconstrução, a redução no número de amostras enviadas é pequeno. Além disso, fica claro que uma configuração equivocada do sistema pode resultar na transmissão de um número de amostras maior que o original. Isto ocorre porque, além dos vetores de comportamento esperado que são enviados periodicamente, uma parte significativa das amostras é enviada como amostras de refinamento. No entanto, à medida que o parâmetro E_{max} é aumentado, o algoritmo proposto propicia uma redução mais significativa nas amostras enviadas. Quando o E_{max} é configurado em 3% (Figura 3.8(b)), é possível reduzir o número de amostras enviadas em até 15%. Quando este parâmetro é relaxado para 10% (Figura 3.8(d)), é possível uma redução de até 50% no total de amostras. É importante ressaltar que, como será discutido mais adiante, este valor aparentemente elevado na configuração do erro aceitável não implica necessariamente uma estimativa de baixa qualidade.

Uma outra observação importante a partir da Figura 3.8 é que o efeito da variação dos parâmetros α e T_a é diferente para diferentes valores do parâmetro E_{max} . Para valores mais baixos de erro (Figuras 3.8(a) e 3.8(b)), o algoritmo envia menos amostras à medida em que α se aproxima de 1. Para uma erro aceitável mais elevado (Figura 3.8(d)), o melhor resultado é obtido para um valor de α baixo e com o parâmetro T_a mais elevado.

Existe um compromisso entre o número de amostras enviadas e o erro obtido na reconstrução. Assim, diferentes configurações além de resultarem em diferentes níveis de redução no número de amostras, também resultam em erros médios de reconstrução diferentes. A Figura 3.9 mostra o erro médio na reconstrução em função do parâmetro E_{max} .

A primeira observação que deve ser feita a respeito da Figura 3.9 é que o erro médio obtido é significativamente menor que o erro máximo tolerado. Isto ocorre apenas uma parte das amostras possuem erros próximos de E_{max} e quando amostras de refinamento são enviadas, a reconstrução é feita sem nenhum erro. Desta forma, existe certa flexibilidade na configuração do parâmetro E_{max} . Além disso, o erro médio obtido na reconstrução apresenta um comportamento interessante. Primeiramente, deve-se destacar que para valores reduzidos do parâmetro E_{max} o erro médio aumenta rapidamente com o aumento de α até que α se aproxime de 1. Neste ponto, o erro médio apresenta uma

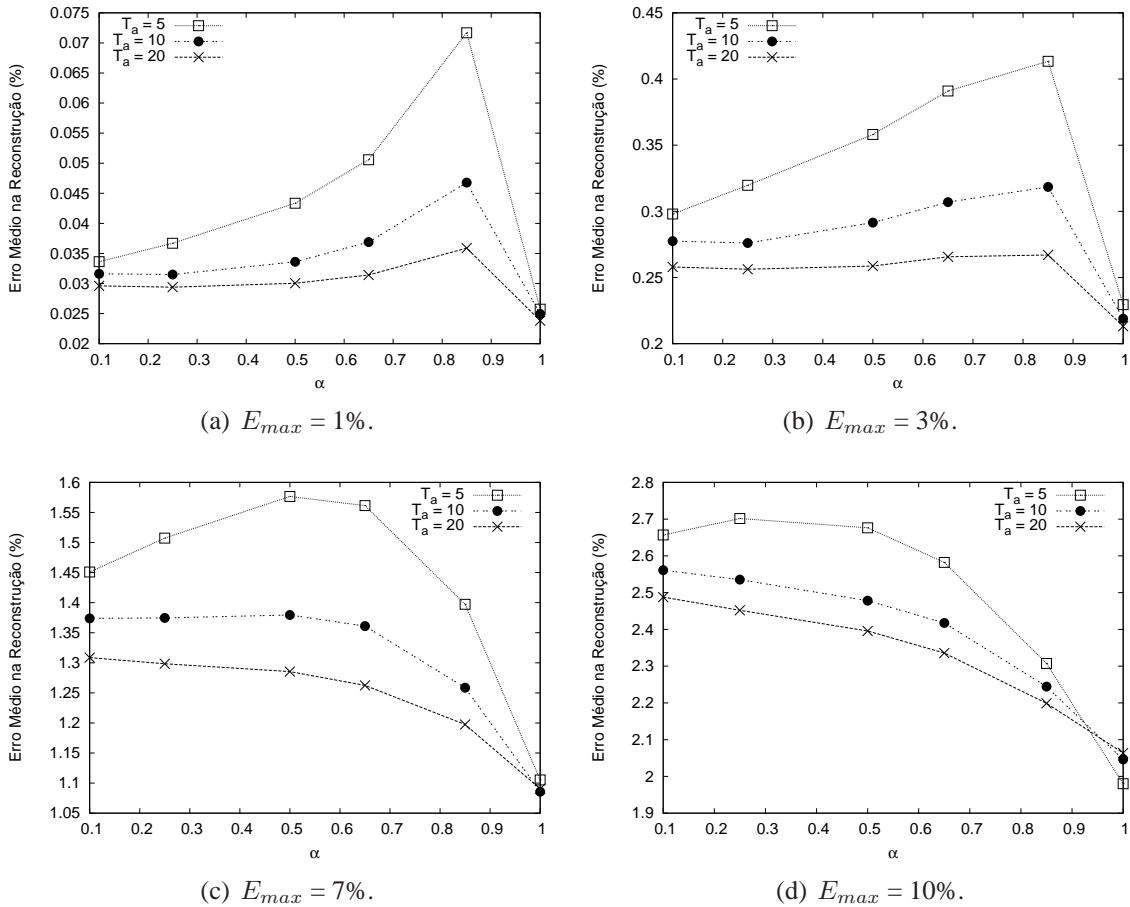
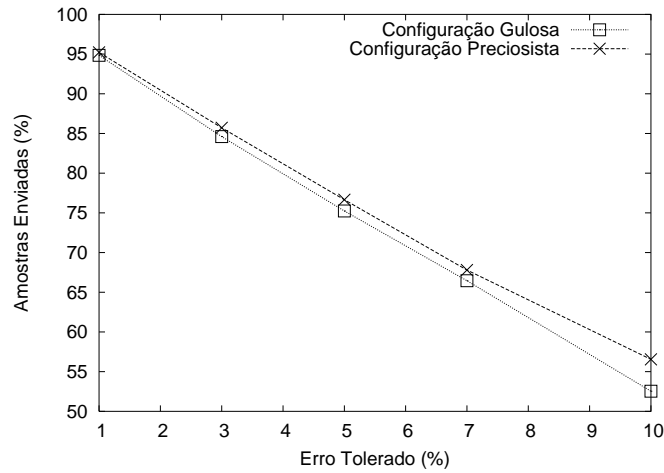


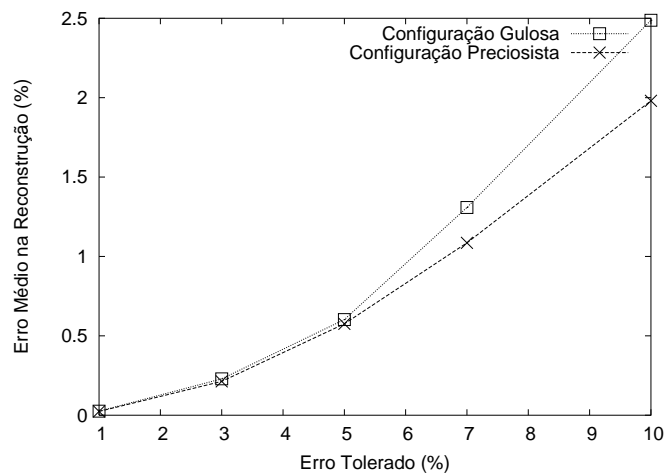
Figura 3.9: Erro médio na reconstrução com o uso do Algoritmo 2 em função de α para o conjunto de dados reais.

queda brusca. Esta queda brusca ocorre porque quando α é configurado com o valor 1, o EBV ignora o histórico das medidas e, desta forma, é composto pelas medidas do dia em que sua atualização é feita. Assim, todas as medidas deste dia são reconstruídas com erro igual a zero. Com o aumento do parâmetro E_{max} , o aumento do erro médio com α se torna mais suave (Figura 3.9(c)), chegando mesmo a reduzir em alguns casos (Figura 3.9(d)).

Os resultados mostrados nas Figuras 3.9 e 3.8 deixam claro a importância da correta configuração do algoritmo. Além disso, dependendo da métrica a ser otimizada, a melhor configuração pode variar. A seguir, são analisadas duas configurações ideais. A primeira busca enviar o mínimo possível de amostras e será chamada de Configuração *Gulosa*. A segunda, por outro lado, busca sempre minimizar o erro na reconstrução e será, portanto, chamada de Configuração *Preciosista*. A Figura 3.10 mostra a porcentagem de amostras e o erro médio na reconstrução destas duas configurações em função do parâmetro E_{max} .



(a) Amostras enviadas em função do erro tolerado.



(b) Erro médio de reconstrução em função do erro tolerado.

Figura 3.10: Resultados do Algoritmo 2 com as configurações ideais.

Como pode ser visto na Figura 3.10(a), em ambos os casos o aumento no parâmetro E_{max} resulta numa redução aproximadamente linear no número de amostras enviadas. A diferença entre os resultados das duas configurações também aumenta com o erro tolerado, mas com os parâmetros analisados esta diferença é sempre menor que 10%. Uma análise do erro médio na reconstrução (Figura 3.10(b)) mostra que este erro cresce rapidamente com o parâmetro E_{max} . Quando o parâmetro E_{max} é igual a 10%, a configuração *preciosista* resulta num erro médio aproximadamente 20% menor que a configuração *gulosa*. Este erro significativamente menor é obtido à custa de algumas amostras a mais. Assim, observa-se que pode ser interessante buscar uma configuração capaz de balancear o compromisso entre estas duas métricas.

O nó sorvedouro deve ser capaz de identificar quando amostras são suprimidas, de modo a substituí-las pelos valores correspondentes encontrados no último EBV. Além disso, é necessário identificar os EBVs quando estes são enviados ao sorvedouro. A próxima seção detalha e analisa um protocolo de transporte proposto para transportar os dados de saída do algoritmo de redução de amostras de forma eficiente até o sorvedouro. O *Event-Driven Field Estimation protocol* (EDFE) tem dois objetivos principais. O primeiro é de identificar os vetores de comportamento esperado e o segundo de fornecer informações suficientes para a correta reconstrução dos dados no sorvedouro.

3.2 O Protocolo de Transporte

Convencionalmente, a estimação de campo é feita com a marcação temporal (*timestamp*) de cada amostra enviada [57]. Este procedimento provê uma informação temporal detalhada, que é utilizada no processo de reconstrução dos dados no sorvedouro. No entanto, este procedimento é muito custoso, pois gera muita sobrecarga. Uma outra opção, quando a amostragem acontece a intervalos regulares é fornecer o *timestamp* da primeira amostra, informar o intervalo de amostragem do processo e enviar as outras amostras em seqüência. Esta abordagem será chamada neste trabalho de *Marcação Otimizada*. No entanto, esta abordagem ainda não suporta a supressão de amostras, pois o sorvedouro não possui meios para saber identificar que alguma amostra foi deliberadamente suprimida. Assim, o objetivo do protocolo proposto (*Event-Driven Field Estimation protocol* - EDFE) é não só de enviar os vetores de comportamento esperado (EBVs) e as amostras de refinamento de forma eficiente, mas também de fornecer informação temporal suficiente para a correta reconstrução do processo estimado no sorvedouro.

Como é normal a utilização de sensores que resultam em amostras de 2 bytes e a inclusão de *timestamps* de 4 bytes [57], a inclusão de mais de um *timestamp* por pacote é indesejável, pois gera uma sobrecarga significativa. Assim, o protocolo EDFE é projetado para utilizar apenas um *timestamp* por pacote. Além disso, a fim de aumentar a eficiência do protocolo, evita-se o uso dos mesmos campos de controle em todos os pacotes. São definidos, portanto, dois tipos de pacotes: pacotes EBP e pacotes de refinamento.

Todos os campos de controle do algoritmo são incluídos nos pacotes do tipo EBP (*Expected Behavior Packets*), que transportam os EBVs. Devido ao tamanho reduzido dos pacotes utilizados em redes de sensores [58], os EBVs podem, eventualmente, ser divididos em vários pacotes EBP. Para aumentar a eficiência do protocolo, amostras de refinamento podem ser transportadas no final do último EBP do período. Este *piggyback* é escolha do nó sensor e funciona de forma transparente para o sorvedouro. Por outro lado, os pacotes de refinamento (*Refining Packets* - RP) transportam apenas amostras de refinamento e bytes de supressão, que indicam quando amostras são suprimidas. A diferenciação entre os dois tipos de pacotes é feita através da apropriação do bit mais significativo do *timestamp* de 4 bytes. Em todos os *timestamps* válidos este primeiro bit é *zero*. Caso o primeiro bit de um pacote seja *um*, este pacote é um EBP e seus quatro primeiros bytes formam campos diferenciados de controle. Caso contrário, se o primeiro bit é *zero*, se trata de um RP e os quatro primeiros bytes formam um *timestamp*.

No mecanismo de estimação de campo proposto, os EBVs são os dados mais importantes. Desta forma, uma preocupação fundamental do protocolo EDFE é de garantir o correto reconhecimento e posicionamento das diferentes partes dos EBVs enviados. As amostras que compõem os EBVs são sempre carregadas em pacotes do tipo EBP e nenhuma amostra pode ser enviada através de *piggybacking* em pacotes do tipo RP. Isto é feito para garantir que mesmo no caso em que um pacote contendo parte de um EBV é perdido o nó sorvedouro seja capaz de posicionar corretamente o EBV na série temporal recebida. Dois campos especiais são incluídos nos pacotes EBPs a fim de possibilitar este procedimento. O primeiro é chamado de *Ordem*, e é composto pelos seis últimos bits do primeiro byte do pacote e tem a função de informar o número do EBP em questão em relação ao EBV. O segundo campo é chamado *Tamanho_EBV* e indica o número de amostras que compõem o EBV e, conseqüentemente, o período do processo monitorado. Assumindo-se um tamanho de pacote fixo, o número máximo de amostras por EBP é utilizado pelo sorvedouro para calcular o número total de pacotes do tipo EBP que são enviados por período. Eventuais lacunas nos vetores de comportamento causadas por perdas de pacotes EBP são preenchidas a partir do EBV precedente. Este procedimento permite que a reconstrução do processo continue, mesmo que um pacote EBP seja perdido. Os pacotes EBP também incluem o campo *Intervalo de Amostragem*, que indica o

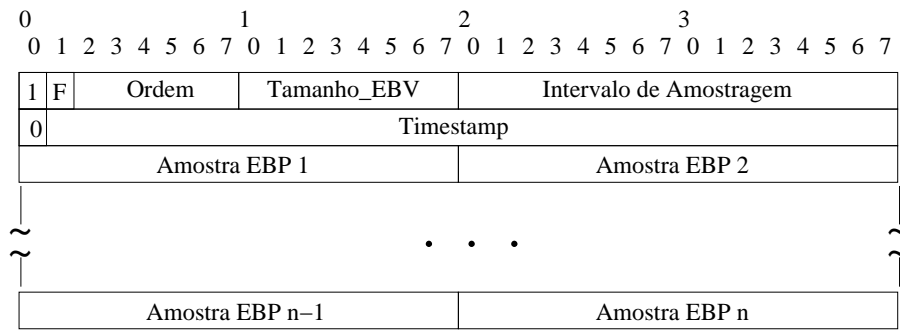


Figura 3.11: Pacote do tipo EBP.

período de amostragem definido como $1/f_a$, onde f_a é a frequência de amostragem utilizada no sensoriamento do processo físico. Por fim, o último campo de controle é o campo *Timestamp* que indica a marcação temporal da primeira amostra do EBP (*Amostra EBP 1*). A estrutura dos pacotes do tipo EBP é mostrada na Figura 3.11.

No primeiro byte dos pacotes EBP existe um bit de controle especial *F* que indica como os bytes de supressão são identificados nos pacotes de refinamento (RP). Esta identificação é feita de forma dedicada à aplicação. Parte-se da premissa de que nenhum processo natural assume valores próximos de ambos os extremos da medida (máximo valor positivo e mínimo valor negativo). Assim, se os dois primeiros bits do que se espera seja uma amostra de refinamento indiquem o valor extremo que não é atingido, este byte será reconhecido como um byte de supressão. A Figura 3.12 mostra a estrutura do Byte de Supressão. Nas explicações que se seguem assume-se uma codificação que identifica leituras negativas através da definição do bit mais significativo em 1.

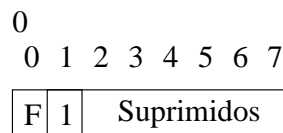


Figura 3.12: Byte de supressão.

Caso o sensor esteja captando valores mais próximos do extremo positivo, o bit *F* é configurado com o valor 1. Assim, como o segundo bit do byte de supressão é sempre 1, esses dois bits indicariam um valor negativo extremamente baixo, permitindo a identificação do byte de supressão. Por outro lado, se o sensor estiver captando valores mais próximos do extremo negativo, o bit *F* é configurado como 0 fazendo a identificação do byte de supressão através de um valor positivo extremamente alto. O campo *Suprimidos*

do byte de supressão indica quantas amostras consecutivas são suprimidas. Se mais de 64 amostras são suprimidas consecutivamente, a informação é dividida em 2 ou mais bytes de supressão consecutivos. Este bit especial é configurado pelo nó sensor no momento do envio dos EBPs.

Os Pacotes do tipo RP começam com a marcação temporal (*Timestamp*) de sua primeira amostra (*Amostra RP 1*). A primeira informação nunca é um byte de supressão, pois, uma vez que a ausência de informação implica sua substituição pela informação do EBV, isso criaria uma sobrecarga desnecessária. Após a primeira amostra, as amostras seguintes e os bytes de supressão podem se seguir de forma imprevisível. Existem apenas duas restrições. A primeira é que todas as amostras e bytes de supressão devem estar em ordem cronológica e a segunda é que a última amostra deve estar inteiramente contida no pacote, ou seja, o pacote não pode terminar no envio do primeiro byte de uma amostra. A Figura 3.13 mostra um exemplo válido de pacote do tipo RP.

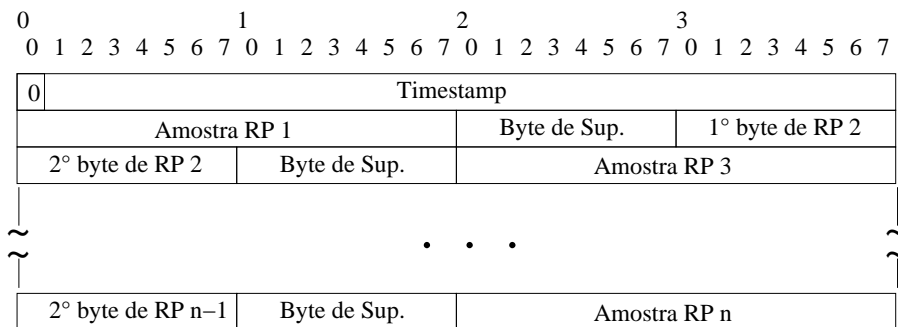


Figura 3.13: Pacote do tipo RP.

No sorvedouro, as amostras de refinamento e as amostras suprimidas são posicionadas para a reconstrução com base no *Timestamp* da primeira amostra (*Amostra RP 1*) e do período de amostragem informado nos pacotes EBP (*Intervalo de Amostragem*).

Para analisar o esquema proposto, após a integração do protocolo de transporte ao algoritmo da camada aplicação, são realizadas simulações mais completas que as realizadas anteriormente. Utiliza-se novamente o conjunto de dados reais e o Algoritmo 2 da camada aplicação. Varia-se o parâmetro α com maior granularidade e analisa-se uma faixa maior de valores para o parâmetro T_a (entre 2 e 80 dias). As métricas utilizadas são as mesmas das seções anteriores, acrescidas da porcentagem de pacotes enviados pelo protocolo. Esta última métrica difere do total de amostras ao considerar a sobrecarga do

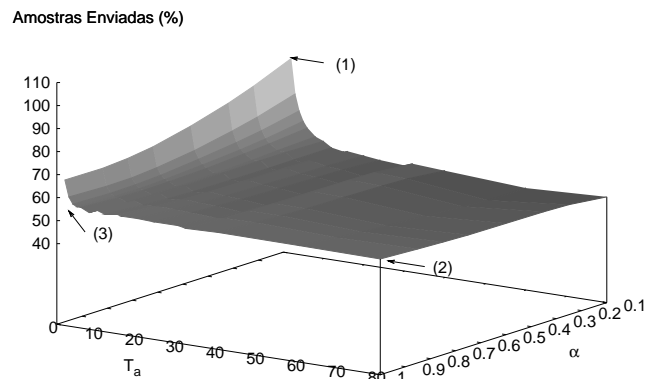
protocolo EDFE. Para as análises que se seguem assume-se que os pacotes gerados pelo protocolo EDFE podem ter até 36 bytes. Compara-se então os resultados do protocolo EDFE com o número total de pacotes resultantes do uso do mecanismo de *Marcação Otimizada*, descrito anteriormente. A Marcação Otimizada não faz nenhuma codificação das amostras, mas reduz a sobrecarga ao enviar apenas um *Timestamp* por pacote, seguido do intervalo de amostragem das medidas. Os resultados sobre o número de pacotes enviados são mostrados em porcentagem em relação aos resultados obtidos pelo mecanismo de Marcação Otimizada.

São realizados dois conjuntos de simulações [59]. O primeiro isola o funcionamento do protocolo EDFE dos efeitos da rede e analisa o processamento local do nó. Este conjunto de simulações é bastante similar às simulações realizadas anteriormente, com a diferença de que o protocolo EDFE é adicionado ao caminho percorrido pelos dados. No segundo conjunto de simulações, busca-se analisar o comportamento do protocolo quando este opera numa rede com perdas. Uma vez que o conjunto de dados de entrada (composto por dados reais de uma estação meteorológica) é limitado, opta-se pela simulação do comportamento de um único nó processando estes dados e os enviando pela rede, que é modelada através da taxa de perda de pacotes. Para analisar o efeito das perdas, a taxa de perdas na rede é variada segundo os valores de perdas verificados numa implementação real de RSSF feita por Szewczyk *et al.* [57].

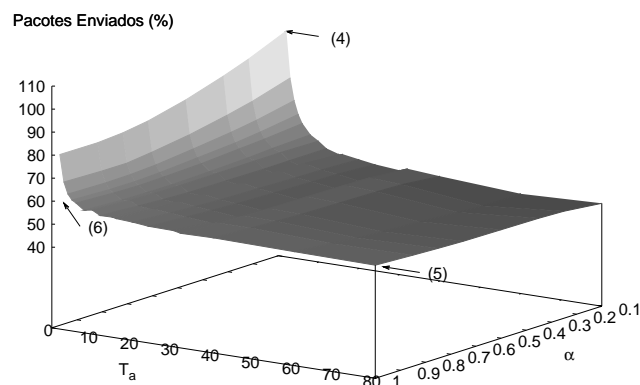
3.2.1 Simulações em Redes sem Perdas

O primeiro passo é analisar a interação entre o protocolo EDFE e o algoritmo da camada aplicação. Para isso, compara-se o total de amostras enviadas, resultado que depende apenas do algoritmo da camada aplicação, ao total de pacotes enviados, que captura os efeitos do protocolo EDFE em conjunto com o algoritmo de aplicação. A Figura 3.14 mostra essas duas métricas em função dos parâmetros α e T_a para E_{max} igual a 10%.

Pode-se perceber pela Figura 3.14 que as duas métricas apresentam comportamentos similares. No entanto, percebem-se algumas diferenças que são resultado da divisão da



(a) Amostras enviadas.



(b) Pacotes Enviados.

Figura 3.14: Dados enviados com E_{max} igual a 10%.

sobrecarga no protocolo EDFE. A primeira diferença importante é que embora ambas as métricas mostrem valores altos para valores baixos do parâmetro T_a , a fração de pacotes enviados apresenta um pico maior (setas 1 e 4 na figura). Isto ocorre porque o protocolo EDFE é projetado para concentrar sua sobrecarga nos pacotes do tipo EBP, que transportam os vetores de comportamento esperado (EBV). Baixos valores para o parâmetro T_a implicam o envio mais freqüente dos EBVs e conseqüentemente uma maior sobrecarga. Isto se confirma quando se analisa o comportamento das curvas para baixos valores de T_a e o parâmetro α configurado em 1 (setas 3 e 6). Nesta configuração do parâmetro α , nenhuma amostra de refinamento é enviada no dia em que o EBV é enviado e a relativa

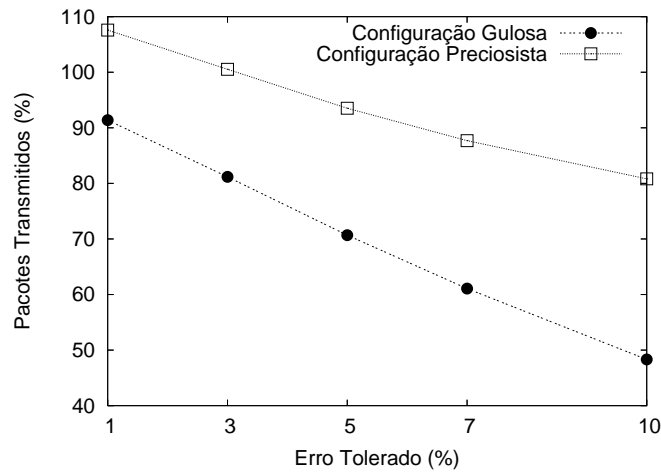
elevação na fração de pacotes enviados ainda é percebida (seta 6). Isto indica que o fator dominante desta sobrecarga é o envio dos EBVs. Outra consequência direta do projeto do protocolo é que à medida que o parâmetro T_a aumenta, o envio dos EBVs se torna menos freqüente e a sobrecarga do protocolo se reduz. A consequência é que para altos valores de T_a a fração de pacotes enviados é menor que a fração de amostras enviadas (setas 2 e 5). Isto demonstra que devido à concentração da sobrecarga nos pacotes do tipo EBP, o protocolo EDFE tende a reduzir mais a quantidade de dados enviados quando o parâmetro T_a é elevado. No entanto, o uso de um valor elevado para o parâmetro T_a afeta a robustez do protocolo às perdas, como será discutido mais adiante. As próximas análises discutem apenas a fração de pacotes enviados, que é a saída do protocolo EDFE. A partir da Figura 3.14, pode-se perceber que a configuração do sistema muda significativamente os resultados e, por este motivo, a exemplo da análise do protocolo de aplicação realizada na seção anterior, analisam-se duas configurações ideais. Uma configuração, denominada de Configuração *Gulosa*, busca minimizar o total de pacotes enviados enquanto que a outra configuração, denominada de Configuração *Preciosista*, minimiza o erro médio na reconstrução. A Tabela 3.1 mostra os parâmetros obtidos para estas configurações.

Tabela 3.1: Configurações Ideais do protocolo EDFE.

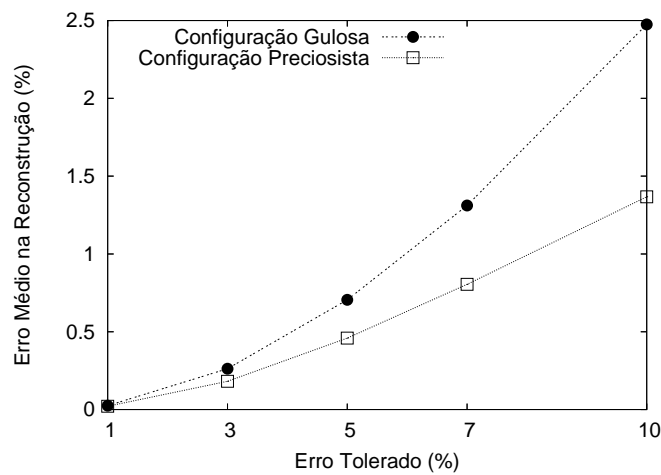
| Erro Máximo | Gulosa | | Preciosista | |
|----------------|--------|----------|-------------|----------|
| | T_a | α | T_a | α |
| 1% | 80 | 1 | 2 | 1 |
| 3% | 60 | 0.1 | 2 | 1 |
| 5% | 60 | 0.1 | 2 | 1 |
| 7% | 60 | 0.1 | 2 | 1 |
| 10% | 60 | 0.1 | 2 | 1 |

Os resultados obtidos por estas configurações são mostrados, em função do erro tolerado, na Figura 3.15.

Como mostrado na Figura 3.15, a Configuração *Gulosa* resulta numa porcentagem de pacotes transmitidos entre 16 e 31% inferior àquela transmitida pela Configuração *Preciosista*. Além disso, para valores baixos do parâmetro E_{max} , a Configuração *Preciosista* resulta na transmissão de mais dados do que o uso da Marcação otimizada. Isto ocorre porque, como mostrado na Tabela 3.1, esta configuração é obtida com um parâmetro T_a baixo



(a) Pacotes transmitidos em função do erro tolerado.



(b) Erro médio na reconstrução em função do erro tolerado.

Figura 3.15: Resultados do protocolo EDFE com as configurações ideais.

e α igual a 1. Esta configuração corresponde à região apontada pela seta 6 na Figura 3.14. Observando-se a Figura 3.15(b), pode-se observar que a Configuração Preciosista realmente resulta num erro menor na reconstrução. No entanto, como o objetivo do protocolo é reduzir a quantidade de dados enviados pela rede, a grande quantidade de pacotes enviada pela Configuração Preciosista não é útil para a aplicação. Porém, a diferença nos erros de reconstrução indica que pode ser interessante a busca por uma configuração híbrida, que leve em conta as duas métricas analisadas. É importante destacar que a Configuração Gulosa reduz em quase 10% a quantidade de dados enviados (Figura 3.15(a)) mantendo o erro médio na reconstrução menor que 0.025% (Figura 3.15(b)) quando o parâmetro E_{max} é igual a 1. Uma desvantagem da Configuração Gulosa é o aumento relativamente rápido do erro na reconstrução quando o parâmetro E_{max} é aumentado. Embora este au-

mento não seja desejável, a redução em mais de 50% na quantidade de pacotes enviados é significativa.

A seguir, o protocolo EDFE é analisado na presença de perdas na rede. Como discutido anteriormente, as perdas na rede são variadas com base numa implementação real feita por Szewczyk *et al.* [57]. Assim, a taxa de perda de pacotes (*Packet Error Rate - PER*) é variada de 0 a 30%. Os intervalos de confiança para uma confiabilidade de 99% são mostrados como barras verticais nos gráficos.

3.2.2 Simulações em Redes com Perdas

A Figura 3.16 mostra o erro médio de reconstrução no sorvedouro em função da PER da rede quando a Configuração Gulosa é utilizada. Nesta figura, também é mostrado o erro na reconstrução obtido pela Marcação Otimizada, que transmite todas as amostras coletadas. Como mostrado na Figura 3.15(a), este mecanismo envia até duas vezes mais pacotes que a Configuração Gulosa do protocolo EDFE. Quando pacotes do mecanismo de Marcação Otimizada são perdidos, assume-se que o sorvedouro faz a interpolação linear das amostras recebidas corretamente.

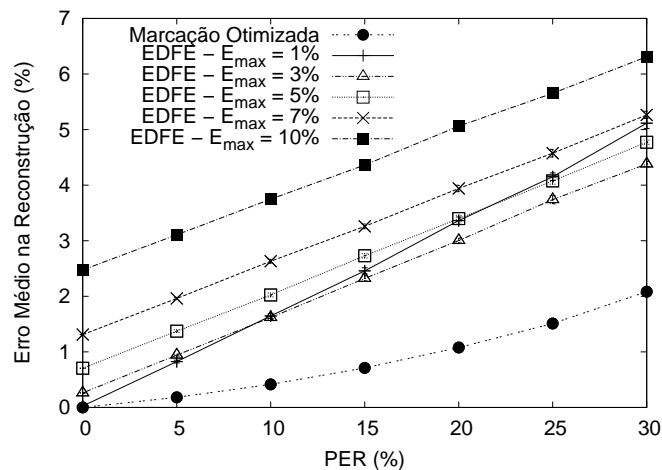


Figura 3.16: Efeito das perdas na rede sobre a configuração Gulosa.

Como mostrado na Figura 3.16, a diferença entre os erros gerados pelo uso do protocolo EDFE e o caso ideal, representado pela Marcação Otimizada, se torna relativamente menor quando valores realistas para a taxa de perdas são considerados. Isto ocorre porque

o erro causado pela rede passa a dominar o erro final de reconstrução e mesmo quando todas as amostras são enviadas (Marcação Otimizada) este erro cresce rapidamente até a faixa de 1 ou 2%. Além disso, o mesmo efeito faz com que, quando o protocolo EDFE é usado, as diferenças nos erros resultantes das diferentes configurações do parâmetro E_{max} se tornem relativamente menores. Este resultado sugere que a configuração do mecanismo proposto deve levar em conta também as condições de rede esperadas. Como pode ser visto na Figura 3.16, os erros médios de reconstrução das configurações onde o parâmetro E_{max} é igual a 5% ou 7% são bem parecidos mas a configuração com E_{max} igual a 7% resulta no envio de uma quantidade 13% menor de pacotes em relação à configuração com E_{max} igual a 5% (Figura 3.15(a)).

Por fim, as inclinações das curvas da Figura 3.16 podem ser vistas como indicadores da robustez da configuração em relação às perdas na rede. Com isto, pode-se perceber que a configuração com E_{max} igual a 1% é menos robusta que as outras. Como mostrado na Tabela 3.1, esta configuração usa um valor alto para o parâmetro T_a e α igual a 1, enquanto todas as outras configurações gulosas usam um valor intermediário para o parâmetro T_a e um valor baixo para α . A fim de verificar como as configurações do algoritmo da camada de aplicação alteram a robustez do protocolo EDFE, foram analisadas diferentes configurações dos parâmetros T_a e α com o parâmetro E_{max} igual a 1%. Estas configurações são resumidas na Tabela 3.2 e a Figura 3.17 mostra os resultados obtidos por estas configurações quando a taxa de perdas na rede é variada.

Tabela 3.2: Configurações alternativas para E_{max} igual a 1%.

| Configuração | α | T_a | Pacotes Transmitidos (%) | AE sem Perdas |
|---------------|----------|-------|--------------------------|---------------|
| Gulosa | 1 | 80 | 91.37 | 0.02484 |
| Alternativa 1 | 1 | 15 | 93.65 | 0.02295 |
| Alternativa 2 | 0.85 | 20 | 95.43 | 0.03587 |
| Alternativa 3 | 0.1 | 80 | 91.75 | 0.02842 |
| Alternativa 4 | 0.1 | 20 | 96.67 | 0.02977 |

Como pode ser visto na Figura 3.17, a variação destes dois parâmetros altera significativamente a robustez do protocolo. Valores mais baixos para o parâmetro α implicam que mais importância é dada ao histórico das medidas no cálculo dos EBVs, o que, segundo os resultados obtidos, aumenta a robustez do protocolo. Com relação ao parâmetro

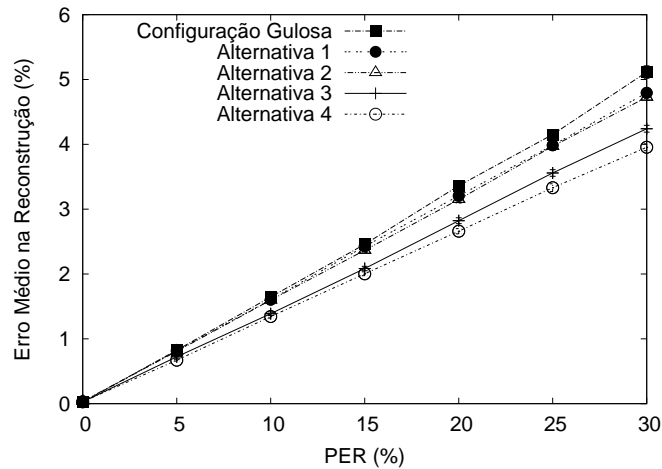


Figura 3.17: Robustez de diferentes configurações para E_{max} igual a 1%.

T_a , maiores valores significam uma menor redundância e, conseqüentemente, uma menor robustez. Quando os efeitos da variação dos dois parâmetros são comparados, a variação do parâmetro α se mostra mais significativa. O valor inicial de AE, ou seja, o erro médio na reconstrução quando não há perdas na rede, não apresenta influência significativa nos resultados.

3.3 Considerações Finais

Como os resultados apresentados nas seções anteriores mostram, a correta configuração do sistema tem uma grande importância nos resultados. Assim, o desenvolvimento de um módulo de aprendizado e configuração é uma extensão interessante para garantir que os parâmetros de configuração serão bem escolhidos. Este módulo pode funcionar no sorvedouro recebendo algumas medidas e decidindo com base nestas medidas a configuração mais adequada. A partir desta análise, o sorvedouro pode enviar aos nós sensores os parâmetros a serem adotados. Outra opção é implementar o módulo de configuração nos próprios nós sensores. Nesta arquitetura, cada nó é responsável pela sua própria configuração, com base nas medidas recolhidas num período inicial de operação. Para o caso de redes compostas por plataformas heterogêneas de sensores, como discutido na Seção 2.1, os nós mais poderosos computacionalmente podem ser responsáveis pela configuração de um sub-conjunto de nós com menor poder computacional.

Este protocolo é projetado, a princípio, para funcionar em sistemas onde técnicas de redução da frequência espacial de amostragem 2.3.2 são utilizadas. Neste caso, os nós que restam ativos são selecionados de forma que não haja redundância nos dados por eles transmitidos e técnicas de agregação de dados como as discutidas na Seção 2.2 são de pouca utilidade. No entanto, este mecanismo também pode ser bastante útil em redes onde o posicionamento dos nós faça com que suas medidas sejam independentes. Neste caso, nem as técnicas de agregação de dados, nem as técnicas de redução da frequência espacial são eficazes. É importante destacar que o protocolo se destina à medida de processos físicos de natureza periódica. Embora essa restrição pareça limitar a aplicabilidade do protocolo, deve-se ressaltar que a maior parte dos processos físicos apresenta este comportamento.

Por fim, o protocolo, tal qual é concebido provê um serviço sem confirmação, similar ao protocolo UDP. Assim, exceto para os EBVs, o protocolo não é capaz de distinguir amostras suprimidas de amostras perdidas. A recepção dos EBPs funciona como um sinal de que o nó sensor continua ativo, pois se espera que estes pacotes cheguem a intervalos regulares que são função dos parâmetros $T_{\text{amanho_EBV}}$ e T_a .

Capítulo 4

As Redes Ad Hoc e a Diversidade Cooperativa

A SEGUNDA parte deste trabalho busca aumentar a robustez das redes ad hoc às variações na qualidade dos canais sem fio. Embora as redes ad hoc possuam diversas vantagens em relação às redes cabeadas, estas redes são mais sensíveis a fatores externos como, por exemplo, a interferências e a obstáculos à propagação. O resultado é que diferentes enlaces de mesma distância podem apresentar condições médias bastante distintas e, além disso, as condições dos canais podem variar significativamente ao longo do tempo. Como discutido anteriormente, estes problemas se tornam ainda mais graves quando as redes são compostas por múltiplos saltos sem fio e construídas sem nenhum planejamento prévio.

Diversas técnicas são propostas na literatura para lidar com a variação na qualidade dos canais sem fio. Estas técnicas podem ser divididas em dois grupos dependendo de como estas técnicas atuam. O primeiro grupo é composto por técnicas aplicadas localmente nos enlaces sem fio que têm como objetivo reduzir os efeitos das variações dos canais. Como exemplo destas técnicas, pode-se destacar o aumento da potência de transmissão para oferecer uma margem de segurança contra o desvanecimento [60] e o uso de técnicas de diversidade de transmissão [61]. O segundo conjunto é composto por técnicas que atuam em vários enlaces ao mesmo tempo para tentar contornar ou reduzir a sensibilidade às variações dos canais. O exemplo mais comum deste segundo conjunto

de técnicas é o roteamento com base na qualidade dos canais, que permite a escolha de rotas mais estáveis [62]. Existem ainda técnicas como o roteamento oportunista [63], que busca transmitir os dados de forma oportunista se aproveitando da natureza difusora do meio sem fio, e o *Anycast* na subcamada MAC [64], onde a subcamada MAC recebe da camada de rede uma lista de possíveis próximos saltos e escolhe a quem encaminhar o pacote com base nas condições instantâneas dos canais.

Neste trabalho, busca-se integrar o uso da diversidade nos enlaces ao roteamento baseado na qualidade dos canais. Espera-se, portanto, melhorar o desempenho da rede através do uso de métricas que reflitam o benefício obtido pelo uso da diversidade nos enlaces sem fio. Neste capítulo, são discutidos o roteamento baseado na qualidade do canal e a técnica de diversidade cooperativa. Antes de apresentar estas técnicas, a próxima seção aborda a modelagem dos canais sem fio.

4.1 Os Canais Sem Fio

O estudo da propagação é importante, pois fornece ferramentas para estimar a potência de transmissão necessária para estabelecer uma comunicação sem fio confiável. Os modelos de canais utilizados podem ser classificados em dois grupos: os Modelos Físicos e os Modelos Estatísticos. Enquanto os modelos físicos levam em consideração as condições físicas exatas do ambiente, os modelos estatísticos se baseiam nas medidas de diferentes ambientes para obter um modelo simplificado para cada classe de ambiente. Desta forma, os modelos físicos são mais precisos enquanto que os modelos estatísticos são mais simples.

Os três principais modos de propagação que devem ser levados em conta na análise da propagação são: a visada direta, a reflexão e a difração. A visada direta ocorre quando existe uma linha de visada direta livre entre o transmissor e o receptor. A reflexão se refere ao fenômeno que ocorre quando as ondas eletro-magnéticas são refletidas por objetos que compõem o ambiente, como prédios e veículos. A difração, por sua vez, representa a curvatura experimentada pelas ondas quando estas passam pelos contornos dos objetos. Deve-se considerar, ainda, que frequentemente o sinal recebido chega ao receptor através

de diferentes caminhos, resultando numa combinação destes diferentes modos de propagação. Este fenômeno é conhecido como transmissão através de múltiplos caminhos, ou *multipath*. Além disso, os sinais destes diferentes caminhos podem se somar de forma construtiva ou destrutiva e esta soma pode variar ao longo do tempo caso o receptor, o transmissor ou algum objeto do ambiente se mova. Esta variação na qualidade do sinal recebido ao longo do tempo é conhecido como desvanecimento, ou *fading*.

4.1.1 A Propagação dos Sinais

Uma transmissão sem fio é caracterizada pela geração no transmissor de ondas eletromagnéticas representando uma determinada informação, pela propagação destas ondas pelo espaço e pela estimação da informação pelo receptor a partir do sinal captado. Neste cenário, o sistema de transmissão é composto pelas antenas responsáveis pela tradução de sinais elétricos em ondas eletro-magnéticas e pelo meio através do qual as ondas se propagam. Desta forma, a potência de transmissão (P_T) usada pelo transmissor e a potência recebida (P_R) pelo receptor se relacionam da seguinte forma

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{L_p}, \quad (4.1)$$

onde L_p representa as perdas de percurso, G_T é o ganho da antena de transmissão e G_R é o ganho da antena de recepção. Para antenas isotrópicas, ou seja, antenas que irradiam igualmente em todas as direções, esse ganho é igual a 1. Assumindo uma transmissão em espaço livre, a perda de percurso L_p pode ser expressa por

$$L_p = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2, \quad (4.2)$$

onde R é a distância do receptor e λ é o comprimento de onda da irradiação [60].

No entanto, em situações práticas a propagação não se dá através do espaço livre. Neste caso, pode-se utilizar uma abordagem estatística para modelar a potência recebida. Um modelo possível é o modelo de perdas logarítmicas, ou *log-distance* [65]. Neste modelo, a potência recebida a uma determinada distância d do transmissor $P_R(d)$ é calculada

como

$$P_R(d) = P_{R0}(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^\beta, \quad (4.3)$$

onde β é o expoente de perda de propagação, que é função do ambiente em questão, d_0 é uma distância de referência, tipicamente igual a um metro, e $P_{R0}(d_0)$ é a potência recebida à distância de referência, que é calculada com base na propagação em espaço livre (Equações 4.1 e 4.2). Tipicamente, para transmissões em ambientes urbanos o parâmetro β assume valores entre 2.7 e 5 [65].

O modelo mostrado na Equação 4.3 tem como objetivo calcular a perda média de percurso para uma dada distância d . No entanto, para uma localidade específica, a perda de percurso experimentada pode apresentar pequenas variações em função do ambiente. Este efeito é conhecido como *sombreamento*, ou *shadowing*. Medidas realizadas sugerem que este efeito pode ser modelado segundo uma distribuição *lognormal* [61]. Assim, a distribuição das perdas de percurso observadas possui a função de densidade de probabilidade

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}, \quad (4.4)$$

onde x representa a perda de percurso em dB, μ é a perda de percurso média em dB e σ é o desvio padrão da perda de percurso em dB. A seguir são discutidos os efeitos da propagação por múltiplos caminhos.

4.1.2 Os Canais com Desvanecimento

Quando a transmissão sem fio ocorre em ambientes onde existem objetos dispersores, os sinais trafegam entre o transmissor e o receptor através de múltiplos caminhos. Quando existe mobilidade do transmissor, do receptor ou dos dispersores, esses múltiplos caminhos mudam, resultando em flutuações na amplitude e na fase do sinal recebido. Este fenômeno é conhecido como desvanecimento.

O fator dominante no comportamento do canal com desvanecimento é a existência ou não de visada direta entre o transmissor e o receptor [65]. Quando não há visada direta, toda a energia é recebida através dos caminhos refletidos e o canal apresenta desvaneci-

mento do tipo Rayleigh. Por outro lado, quando há visada direta, o canal é classificado como um canal Ricean.

A função de densidade de probabilidade da potência recebida (p) num canal do tipo Ricean é dada por [66]

$$f_p(p|\bar{p}, K) = \frac{1+K}{\bar{p}} e^{-K} e^{\frac{p(1+K)}{\bar{p}}} I_0\left(\sqrt{\frac{4K(1+K)p}{\bar{p}}}\right), \quad (4.5)$$

onde \bar{p} é a potência média recebida, I_0 é a função de Bessel modificada de primeiro tipo e ordem zero, e K é o fator de Ricean. Definindo p_d como a potência recebida através da visada direta e \bar{p}_s como a potência recebida através dos caminhos refletidos, tem-se

$$K = \frac{p_d}{\bar{p}_s}. \quad (4.6)$$

Assim, quanto maior o fator K de um enlace, maior a influência da visada direta. O canal com desvanecimento do tipo Rayleigh pode ser visto como um caso especial do canal Ricean onde $K = 0$, o que significa que toda a energia é recebida através de caminhos refletidos. Neste caso, a Equação 4.5 se reduz a uma distribuição exponencial e a pdf da potência recebida é

$$f_p(p|\bar{p}) = \frac{1}{\bar{p}} e^{-\frac{p}{\bar{p}}}. \quad (4.7)$$

Comparando as equações 4.5 e 4.7, pode-se perceber que o canal do tipo Rayleigh é caracterizado por apenas um parâmetro, a potência média recebida, enquanto que o canal do tipo Ricean é caracterizado por dois parâmetros, a potência média recebida e a parcela de energia recebida através da visada direta. A Figura 4.1 mostra a distribuição da energia recebida para diferentes fatores K quando $\bar{p} = 1$.

Como mostrado na Figura 4.1, canais que apresentam a mesma potência recebida média podem exibir comportamentos bastante diferentes ao longo do tempo, segundo a parcela de energia recebida na visada direta.

Por fim, a velocidade das variações são dependentes da frequência da portadora (f_c) e das velocidades relativas entre o transmissor, o receptor e os elementos dispersores que

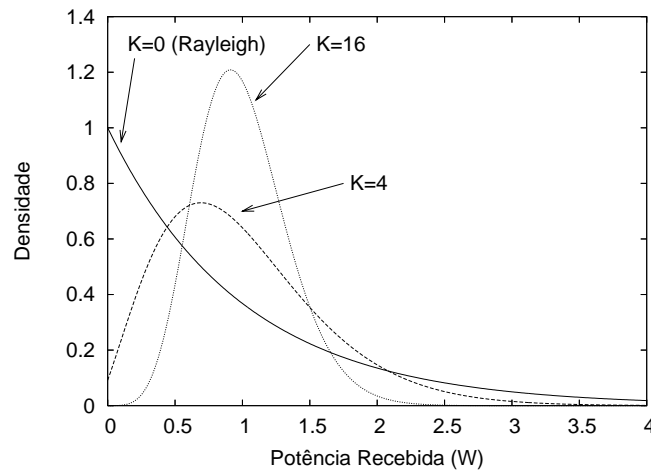


Figura 4.1: Distribuição da potência recebida para diferentes tipos de canais.

compõem o ambiente. O tempo de coerência, T_0 , é uma estimativa do tempo durante o qual o canal é considerado aproximadamente constante. Baseando-se na relação entre o tempo de coerência e a duração da transmissão de um símbolo, T_s , o canal pode ser classificado como um canal de desvanecimento rápido ou de desvanecimento lento. Quando $T_0 < T_s$, o canal apresenta desvanecimento rápido. Neste caso, o canal varia durante a transmissão de um símbolo, gerando distorções. Por outro lado, quando $T_0 > T_s$, o canal é classificado como um canal de desvanecimento lento. Neste caso, o principal efeito do desvanecimento é a redução na relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* - SNR) [67]. Neste trabalho, são considerados apenas canais com desvanecimento lento.

4.2 O Roteamento Baseado na Qualidade do Canal

Alguns dos fatores mais atrativos das redes sem fio de múltiplos saltos são a sua flexibilidade e o baixo custo [68]. No entanto, esta flexibilidade se baseia na capacidade da rede de se auto-organizar e, portanto, o desempenho destas redes é fortemente dependente da capacidade do protocolo de roteamento de selecionar rotas adequadas, minimizando perdas e maximizando a vazão. Esta dependência é especialmente verdadeira para as redes ad hoc, que não são necessariamente planejadas e podem ser formadas de modo aleatório e espontâneo.

A pesquisa inicial sobre as redes sem fio de múltiplos saltos é baseada em modelos

de propagação simplificados, o que resulta em cenários onde a contenção e a mobilidade representam os fatores mais importantes na redução do desempenho da rede [69]. Trabalhos mais recentes, no entanto, mostram que as variações inerentes aos canais sem fio são um fator importante, que não deve ser negligenciado. Schmitz *et al.* [70] mostram que num ambiente realista, mesmo sob condições que podem ser consideradas otimistas, a influência das variações dos canais sem fio nas mudanças de topologia é mais significativa que a da mobilidade. Com isto, fica clara a necessidade de se desenvolver métricas de roteamento baseadas na qualidade dos canais que reflitam também a estabilidade dos enlaces.

Adya *et al.* propõem a métrica *Per-Hop Round Trip Time* [71]. Esta métrica se baseia no atraso de ida e volta experimentado por sondas enviadas aos nós vizinhos. Para estimar os atrasos, os nós enviam periodicamente sondas a seus vizinhos. Ao receber uma sonda, o nó reconhece o seu recebimento incluindo no reconhecimento seu *timestamp*. Com base nesta informação, o nó que gerou a sonda é capaz de estimar os atrasos.

A métrica de número esperado de transmissões [72] (*Expected Transmission Count - ETX*) estima o número médio de transmissões necessárias para enviar um pacote através de um enlace sem fio. Para calcular esta métrica, os nós enviam periodicamente sondas para seus vizinhos e, baseado na porcentagem de sondas recebidas nas duas direções do enlace, estimam a probabilidade de sucesso dos enlaces (P_{suc}). A partir desta probabilidade de sucesso, o número médio de transmissões necessárias para a transmissão de um pacote através de um enlace específico é definido como $1/E[P_{suc}]$.

Draves *et al.* comparam o desempenho das métricas descritas acima em redes sem fio de múltiplos saltos [62]. Os resultados mostram que, em comparação à métrica convencional de menor número de saltos e às outras métricas baseadas na qualidade dos canais analisadas a métrica ETX resulta em rotas mais longas, porém mais eficientes.

Apesar de bastante eficiente, a métrica ETX é baseada no comportamento médio do enlace ($E[P_{suc}]$) e, uma vez que resultados recentes mostram a importância das propriedades da camada física no projeto eficiente de protocolos para redes sem fio [73], é esperado que o uso de informações mais completas sobre a camada física melhore o desempenho da rede. Koksall and Balakrishnan propõem duas melhorias à métrica ETX [74]. A pri-

meira proposição é a métrica ETX Modificada (*Modified ETX - mETX*). Diferentemente da métrica ETX original, a métrica mETX é computada como $E[1/P_{suc}]$. Esta mudança é capaz de melhor capturar os efeitos das variações dos enlaces no número esperado de retransmissões, que é obtido a partir da função $1/x$. A segunda métrica proposta, denominada número efetivo de transmissões (*Effective Number of Transmissions - ENT*), avalia a probabilidade do número de transmissões exceder o número máximo de retransmissões permitidas pela subcamada MAC. A métrica ENT é usada para podar o grafo de roteamento, eliminando, desta forma, enlaces com altas taxas de perda. O roteamento é então feito sobre o grafo podado, com base na métrica ETX original.

Para redes onde a taxa de transmissão é variável, Draves *et al.* [75] propõem o uso da métrica de tempo esperado de transmissão (*Expected Transmission Time - ETT*). Esta métrica é obtida ponderando-se a métrica ETX pelo tempo de transmissão de um pacote de tamanho fixo quando a taxa de transmissão média obtida no enlace é considerada.

Além das métricas de roteamento, um elemento importante para o bom funcionamento das redes sem fio de múltiplos saltos é o protocolo de roteamento. No entanto, este trabalho se foca nas métricas utilizadas e não nas peculiaridades da implementação dos protocolos. As análises mostradas no Capítulo 5 são feitas sobre grafos e, desta forma, apenas as métricas são consideradas. Para mais informações sobre protocolos de roteamento para redes sem fio de múltiplos saltos, existem fontes detalhadas disponíveis na literatura [76, 77, 78].

4.3 A Diversidade Cooperativa

As técnicas de diversidade buscam reduzir os erros provocados pelo desvanecimento dos canais. A idéia chave destas técnicas é de enviar ao receptor diferentes cópias da informação através de canais cujos desvanecimentos são descorrelacionados. Desta forma, a probabilidade de que todas as cópias da informação sejam corrompidas é reduzida. Mais especificamente, sendo p_f a probabilidade de um canal apresentar um desvanecimento acima de um certo limite que resulte na corrupção do sinal, a probabilidade de L cópias independentes da informação serem corrompidas é igual a p_f^L [60, 61].

A diversidade pode ser criada de diferentes maneiras. Uma possibilidade é empregar a diversidade temporal, ou seja, a informação é transmitida em L slots de tempo. Para garantir a independência entre o desvanecimento das diferentes réplicas da informação, é necessário que a separação temporal entre os diferentes slots de tempo seja superior ao tempo de coerência do canal, T_0 . Uma segunda possibilidade é prover a diversidade em frequência, ou seja, a informação é transmitida através de L portadoras diferentes. Analogamente, para garantir que o desvanecimento das diferentes portadoras seja independente, é necessário que a separação em frequência entre as diferentes portadoras seja superior à banda de coerência do canal, f_0 . A banda de coerência do canal é uma medida estatística da largura de banda na qual se pode assumir que todas as componentes possuem o mesmo ganho [67].

Por fim, uma terceira opção é o uso de diferentes antenas no transmissor e/ou receptor para gerar uma diversidade espacial. Se as diferentes antenas estiverem corretamente espaçadas, as componentes do sinal em múltiplos caminhos apresentarão atrasos de propagação suficientemente diferentes para que o desvanecimento nos pares transmissor-receptor apresentem desvanecimentos descorrelacionados. Este tipo de diversidade é a ideia por trás dos sistemas MIMO (*Multiple-Input-Multiple-Output*) modernos [79, 80].

No entanto, devido a restrições de tamanho e peso, alguns equipamentos não suportam múltiplas antenas com o espaçamento adequado. Para contornar esta restrição, desenvolveu-se a técnica chamada comunicações cooperativas [81]. O objetivo desta técnica é prover a diversidade espacial às transmissões de nós com apenas uma antena. Para isto, os nós sem fio compartilham suas antenas e funcionam como retransmissores cooperativos nas transmissões de seus vizinhos. Assim, em um enlace cooperativo, a informação enviada pelo nó emissor chega ao nó receptor tanto pelo sinal emitido pela antena do nó emissor quanto por sinais provenientes das antenas de um ou mais nós vizinhos cooperantes na comunicação. Uma espécie de arquitetura MIMO distribuída é formada e a diversidade cooperativa resultante é usada para reduzir os efeitos do desvanecimento e aumentar a confiabilidade das transmissões. No entanto, a implementação desta técnica não é trivial e requer modificações nas camadas física, MAC e rede dos nós sem fio.

4.3.1 Os Protocolos de Nível Físico

Sendonaris *et al.* são os primeiros a analisar os compromissos envolvidos com a diversidade cooperativa [82, 83]. Suas análises levam em conta somente a cooperação na camada física e os resultados obtidos mostram que o efeito da diversidade cooperativa é um aumento na relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* - SNR) que tem como efeito a melhora da qualidade do enlace com cooperação, ou seja, entre o nó emissor (nó origem do enlace) e o nó receptor (nó destino do enlace). Esta elevação na SNR pode ser explorada de duas formas diferentes: os nós cooperativos podem manter a potência original de transmissão e elevar a taxa de transmissão ou, para uma dada taxa de transmissão, reduzir a potência de transmissão a fim de economizar energia.

Diversos protocolos são propostos para a implementação da cooperação a nível físico [84]. Estes protocolos podem ser classificados como *Amplify-and-Forward* (AF) ou *Decode-and-Forward* (DF). Essa classificação se baseia no procedimento seguido pelo nó retransmissor cooperativo para retransmitir os dados ao nó receptor. Nos protocolos do tipo AF o nó retransmissor cooperativo simplesmente amplifica o sinal recebido do nó emissor e o retransmite ao nó receptor, enquanto que nos protocolos do tipo DF o retransmissor cooperativo primeiro decodifica o sinal recebido para em seguida recodificá-lo e transmitir esse sinal re-codificado para o nó receptor. A decodificação realizada pelos retransmissores cooperativos nos protocolos DF evita a propagação do ruído recebido no canal entre o emissor e o retransmissor cooperativo, mas também aumenta a complexidade do protocolo.

Com o amadurecimento dos estudos sobre a diversidade cooperativa, já existem trabalhos que buscam implementar protocolos cooperativos em camadas físicas baseadas no padrão IEEE 802.11 [85] e propostas da utilização de retransmissores cooperativos na especificação IEEE 802.16j [86]. Zhao e Belfiore [85] propõem uma camada física capaz de suportar a diversidade cooperativa que se baseia no padrão IEEE 802.11a [87] e no protocolo cooperativo NAF (*Non-Orthogonal Amplify-and-Forward*) [88]. O protocolo NAF é detalhado na próxima seção.

O Protocolo *Non-Orthogonal Amplify-and-Forward*

Durante as análises realizadas neste trabalho, assume-se o uso na camada física do protocolo de cooperação *Non-Orthogonal Amplify-and-Forward* (NAF) [88]. A Figura 4.2 mostra o cenário de utilização do protocolo NAF e é seguida por uma explicação detalhada da sua operação.

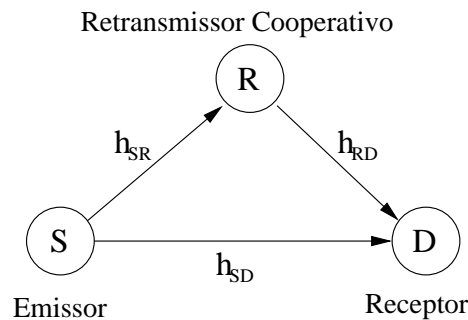


Figura 4.2: Cenário de utilização do protocolo NAF.

A Figura 4.2 mostra um canal cooperativo no qual o nó emissor, S , deseja transmitir um quadro para o nó D , que será chamado de nó receptor. Os nós S e D compartilham um vizinho, R , disposto a cooperar durante a transmissão agindo como um nó retransmissor cooperativo. Como os nós são *half-duplex*, o nó R é incapaz de receber o quadro do nó S e retransmití-lo a D simultaneamente. Por isto, a transmissão do quadro é dividida em dois intervalos de tempo (*slots*). Por consequência, o quadro também é dividido em duas partes, X_1 e X_2 , usando uma codificação espaço-temporal para permitir a recepção combinada dos sinais do emissor e do retransmissor cooperativo pelo nó receptor.

No primeiro *slot* de tempo, o nó S transmite a primeira parte do quadro (X_1) para o nó D enquanto que o nó R aproveita a difusão no meio sem fio para escutar a transmissão. Desta forma, neste primeiro *slot* de tempo, o nó D recebe X_1 através do canal h_{SD} e o nó R recebe X_1 através do canal h_{SR} . No segundo *slot* de tempo, o nó S transmite a segunda parte do quadro original (X_2), ao mesmo tempo em que o nó R retransmite a primeira parte do quadro. Como resultado, o nó D recebe no segundo *slot* de tempo a segunda parte do quadro original através do canal h_{SD} somada a uma cópia da primeira parte do quadro, que atravessou os canais h_{SR} e h_{RD} .

Para garantir que a cooperação não utilizará uma potência total de transmissão supe-

rior a uma transmissão convencional e simplificar a análise, assume-se que no segundo *slot* de tempo tanto o nó *S* quanto o nó *R* utilizam metade da potência de transmissão usada pelo nó *S* no primeiro *slot* de tempo. Com isso, os sinais recebidos ao longo do procedimento (Y_R , Y_{D1} e Y_{D2}) podem ser expressos da seguinte forma.

$$Y_R = h_{SR}X_1 + w_r, \quad (4.8)$$

$$Y_{D1} = h_{SD}X_1 + w_d \quad e \quad (4.9)$$

$$Y_{D2} = \frac{h_{SD}}{\sqrt{2}}X_2 + \frac{h_{RD}}{\sqrt{2}}bY_R + w_d, \quad (4.10)$$

onde X_1 and X_2 são as duas partes do quadro; w_r e w_d são os ruídos nos nós *R* e *D*; h_{SR} , h_{SD} e h_{RD} são os coeficientes dos canais mostrados na Figura 4.2; e b é um fator de normalização definido como

$$b = \sqrt{\frac{1}{|h_{SR}|^2 + \sigma_r^2}}, \quad (4.11)$$

sendo σ_r^2 a energia do ruído no nó retransmissor cooperativo. O fator $\frac{1}{\sqrt{2}}$ na Equação 4.10 é uma consequência da política de alocação de potência. A Tabela 4.1 resume esse procedimento.

Tabela 4.1: Estrutura temporal do protocolo NAF.

| Nó | Slot 1 | | Slot 2 | |
|----|--------|----------|--------|----------|
| | Tx | Rx | Tx | Rx |
| S | X_1 | | X_2 | |
| R | | Y_R | bY_R | |
| D | | Y_{D1} | | Y_{D2} |

Como mostram as Equações 4.8 e 4.10, o retransmissor cooperativo também propaga o ruído recebido junto com o sinal correspondente à primeira parte do quadro. Em situações onde este ruído se mantém num nível razoável, a diversidade proporcionada pelo uso do caminho que passa pelo retransmissor cooperativo é capaz de aumentar a SNR no receptor. Em situações onde os canais que ligam o nó *R* aos nós *S* e *D* não apresentam boas condições instantâneas, a transmissão cooperativa irá piorar a qualidade da comunicação ao invés de melhorá-la. Cabe à subcamada MAC escolher a configuração que oferece a maior capacidade instantânea. A capacidade instantânea do canal não cooperativo que

liga os nós S e D é, em bits por uso do canal (*bits per channel use* - bpcu), igual a

$$C(h_{SD}) = \log_2(1 + |h_{SD}|^2) \quad (4.12)$$

enquanto que a capacidade instantânea do canal cooperativo NAF com a potência do ruído normalizada em 1 [89] é, também em bits por uso do canal, igual a

$$C_{NAF} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + |h_{SD}|^2 + \frac{|h_{SD}|^2}{2 + |h_{RD}|^2 b^2} + \frac{|h_{SD}|^4 + |h_{RD}|^2 b^2 |h_{SR}|^2}{2 + |h_{RD}|^2 b^2} \right). \quad (4.13)$$

É importante ressaltar que a comunicação cooperativa requer uma camada de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC) específica que permita o emprego da cooperação.

4.3.2 Os Protocolos de Acesso ao Meio e a Escolha dos Retransmissores Cooperativos

Um aspecto fundamental para implementar de forma eficiente a diversidade cooperativa é a correta seleção do retransmissor cooperativo. Bletsas *et al.* [90] propõem uma técnica reativa de seleção de retransmissores na qual, baseado em medidas locais, os próprios candidatos a retransmissores estimam sua utilidade para uma dada comunicação e, através de um mecanismo de temporização, o melhor candidato se anuncia ao nó emissor. Os resultados mostram também que quando mais de um retransmissor cooperativo está disponível, a utilização do melhor candidato como único retransmissor cooperativo não resulta em redução de desempenho em relação a sistemas que utilizam vários retransmissores cooperativos para uma mesma comunicação. Este resultado é importante, pois a complexidade para coordenar um único retransmissor cooperativo é consideravelmente menor que a coordenação de diferentes retransmissores cooperativos ao mesmo tempo.

Hucher *et al.* [89] propõem um mecanismo AF adaptativo onde os nós trocam informação para a escolha do melhor retransmissor cooperativo. Além disso, no mecanismo

AF adaptativo, se os canais que ligam o emissor e o receptor ao retransmissor cooperativo apresentarem condições muito boas, utiliza-se uma transmissão não cooperativa de dois saltos através do retransmissor cooperativo que passa a funcionar como roteador.

Wang *et al.* propõem um mecanismo para a escolha do retransmissor cooperativo que se baseia no jogo de comprador/vendedor [91]. Seus resultados mostram que os candidatos a retransmissores cooperativos mais próximos da fonte são mais importantes na maximização da utilidade da fonte.

Moh *et al.* propõem um MAC chamado CD-MAC [92] que se baseia num protocolo cooperativo do tipo *Decode-and-Forward*. Neste algoritmo MAC, os nós monitoram e escutam pró-ativamente seus vizinhos para avaliar cada enlace. Com base nesta avaliação, os nós são capazes de escolher o retransmissor cooperativo mais adequado para cada transmissão.

O arcabouço desenvolvido por Jakllari *et al.* [93] se baseia na técnica de MIMO virtual. Para transmitir um pacote, o nó inicialmente difunde o pacote em questão para seus vizinhos diretos e, numa segunda fase, k retransmissores cooperativos se encarregam de transmitir o pacote num enlace MIMO virtual. Esta abordagem tem o problema de depender da disponibilidade de k vizinhos para funcionar e os resultados mostram que para redes com baixa densidade, este esquema é incapaz de melhorar o desempenho da rede. No entanto, à medida que a densidade da rede aumenta, as possibilidades de cooperação aumentam e o resultado é a construção de enlaces de maior alcance, pois a diversidade proporcionada resulta num aumento da SNR. Além disso, esta proposta é interessante, pois chega até o roteamento. No arcabouço proposto, a rota é estabelecida inicialmente utilizando a métrica de menor número de saltos sem levar em conta a utilização dos enlaces virtuais criados pela cooperação. Em seguida, um algoritmo é aplicado sobre a rota para aperfeiçoá-la com base nas oportunidades de cooperação existentes. No entanto, esta melhoria é limitada pela rota escolhida inicialmente e, além disso, o sistema requer que os nós armazenem estados para cada rota da qual fazem parte. A próxima seção detalha alguns trabalhos sobre roteamento levando em conta as oportunidades de cooperação.

4.3.3 O Roteamento em Redes com Diversidade Cooperativa

O primeiro passo para estudar o roteamento cooperativo é fazer a distinção entre este tipo de roteamento e o roteamento não cooperativo com uso da cooperação oportunista. No roteamento não cooperativo com uso da cooperação oportunista, a escolha dos roteadores que compõem a rota é feita sem nenhum tipo de análise a respeito da cooperação, ou seja, utiliza-se uma métrica convencional como, por exemplo, o menor número de saltos. A cada salto (enlace), no momento da transmissão do pacote, é verificado se existem condições de cooperação tais como as apresentadas na Figura 4.2. Isto é, o roteador que transmitirá o pacote se coloca na condição de emissor e seu sucessor na rota se coloca na condição de receptor, caso haja um vizinho em comum cujos canais h_{SR} e h_{RD} sejam favoráveis à cooperação, então o procedimento de cooperação é utilizado.

No caso do roteamento cooperativo, os roteadores que compõem a rota já são escolhidos com base nas oportunidades de cooperação existentes na rede. Ou seja, a métrica de roteamento é definida considerando cada par de possíveis roteadores vizinhos na situação mostrada na Figura 4.2 e verificando as possibilidades de cooperação que se apresentam. A Figura 4.3 exemplifica a diferença entre estes dois tipos de mecanismos de roteamento.

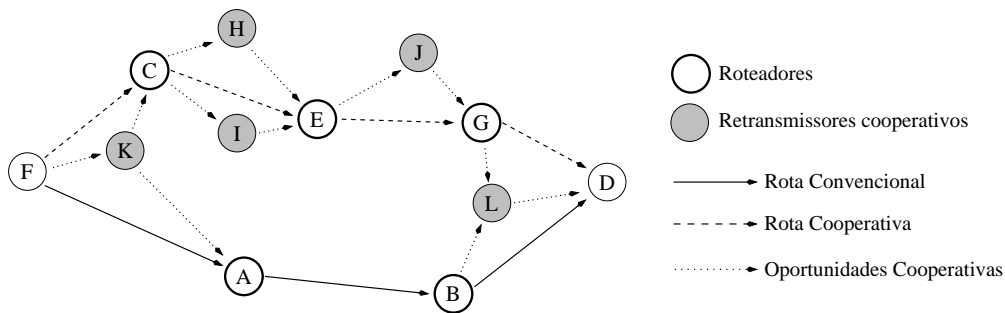


Figura 4.3: O roteamento não cooperativo e o roteamento cooperativo.

Neste exemplo, o nó fonte, F , deseja estabelecer uma rota para se comunicar com o nó D . Se o roteamento não cooperativo se basear na métrica de menor número de saltos, a rota escolhida é $\{F, A, B, D\}$. A cooperação oportunista pode, então, ser utilizada em cada salto (\overline{FA} , \overline{AB} e \overline{BD}) de modo a melhorar a qualidade das transmissões. No entanto, na situação mostrada neste exemplo, os nós A e B não possuem nenhum vizinho em comum e, desta forma, o enlace \overline{AB} não pode se beneficiar da cooperação oportunista. Este enlace representará um gargalo para a transmissão, pois provavelmente

apresentará uma taxa de perda mais elevada que os demais. O roteamento cooperativo, por outro lado, tenderá a evitar o enlace \overline{AB} . No exemplo mostrado, o caminho escolhido é $\{F, C, E, G, D\}$. Neste caminho, todos os enlaces possuem pelo menos um possível retransmissor cooperativo (o enlace \overline{CE} possui dois), o que reduz a taxa de perda destes enlaces e, conseqüentemente, a taxa de perda fim-a-fim da comunicação.

Segundo as duas possibilidades mostradas na Figura 4.3, existem dois enfoques diferentes para os trabalhos que analisam o roteamento em redes com diversidade cooperativa. Parte dos trabalhos nessa área analisam o uso da cooperação oportunista [94], ou seja, o uso das técnicas de cooperação nos enlaces de uma rota selecionada por algoritmos de roteamento convencionais que não levam em conta as possibilidades de cooperação. Essa abordagem não se mostra a mais eficiente, pois a rota não-cooperativa pode não apresentar oportunidades significativas para o uso da cooperação.

Khandani *et al.* [95] realizam a primeira análise de roteamento cooperativo, isto é, levando em conta as possibilidades de cooperação no momento em que as rotas são estabelecidas. Seus resultados mostram que em redes onde a taxa de transmissão é fixa, o roteamento cooperativo possibilita uma redução na potência de transmissão necessária para efetuar a transmissão com sucesso.

O trabalho de Beres e Adve [96] se destaca por analisar o roteamento cooperativo e não cooperativo em redes onde a taxa de transmissão é variável e o objetivo não é a redução da potência de transmissão mas sim o aumento da vazão da rede. Os resultados mostram que o roteamento cooperativo com o uso seletivo da cooperação, ou seja, apenas quando esta aumenta a capacidade do canal, resulta no melhor desempenho. Todos esses trabalhos sobre o roteamento em redes com diversidade cooperativa supõem uma rede estática, onde não só os nós são estáticos, mas também as condições dos canais sem fio. Desta forma, eles buscam aperfeiçoar o desempenho da rede baseando-se nas condições instantâneas dos canais sem fio.

Neste trabalho analisa-se o roteamento cooperativo em redes onde o desvanecimento gera variações nos canais sem fio numa velocidade elevada em comparação ao tempo de resposta do roteamento. Nesta situação, algoritmos baseados nas condições instantâneas dos canais deixam de ser ótimos, pois rotas selecionadas para uma dada realização de des-

vanecimento continuarão a ser utilizadas em condições diferentes das iniciais. Ao longo das análises realizadas, estes algoritmos são denominados *Algoritmos Gulosos*, pois buscam o melhor desempenho possível para um determinado momento, sem levar em conta o comportamento futuro dos canais. Este trabalho propõe, então, o uso de informações sobre o comportamento a longo prazo dos enlaces cooperativos para escolher rotas com maior eficiência. O próximo capítulo detalha as análises realizadas e a proposta para aumentar o desempenho da rede nestas condições.

Capítulo 5

A Integração da Diversidade Cooperativa ao Roteamento

OBJETIVO desta parte do trabalho é desenvolver uma métrica de roteamento para redes com diversidade cooperativa que seja capaz de refletir os ganhos obtidos pela cooperação. A idéia é desenvolver uma métrica que permita a realização do roteamento cooperativo, como discutido na Seção 4.3.3. São identificados três fatores importantes no cálculo desta métrica: o padrão de desvanecimento dos canais, as particularidades do protocolo de cooperação utilizado a nível físico e o número de retransmissores cooperativos disponíveis.

Dois tipos de análises são realizadas. A primeira análise é feita em redes convencionais, ou seja, aquelas que não utilizam diversidade cooperativa, e busca desenvolver um método para que o padrão do desvanecimento dos canais seja considerado no cálculo da métrica usada pelos algoritmos de roteamento. Os resultados obtidos em redes convencionais permite analisar, de forma isolada, o problema do roteamento em ambientes cujos canais com desvanecimento variam ao longo do tempo. Esta parte do trabalho é detalhada na Seção 5.1 [97].

A seguir são analisados os efeitos do protocolo de cooperação e das características dos retransmissores cooperativos disponíveis nas redes com diversidade cooperativa. Inicialmente, analisa-se o roteamento cooperativo que busca otimizar as rotas em função das

condições instantâneas da rede a fim de identificar suas limitações [98, 99]. Este tipo de política de roteamento é a encontrada nos trabalhos existentes na literatura. Algoritmos que empregam esta política são chamados, neste trabalho, de algoritmos gulosos, pois buscam maximizar o desempenho das rotas com base em condições momentâneas e não se preocupam com o desempenho a longo prazo das rotas. Por fim o trabalho se concentra no desenvolvimento de uma métrica de roteamento que leve em conta os três fatores identificados anteriormente [100].

5.1 A Análise em Redes Convencionais

O objetivo desta seção é desenvolver uma métrica para redes convencionais capaz de levar em conta o padrão de desvanecimento dos canais sem fio. Como resultado, é proposta a métrica de número esperado de transmissões com base na distribuição da probabilidade de perda do canal (*Distribution-Based Expected Transmission Count* - DBETX). A métrica DBETX é calculada com base em medidas da camada física e informações disponíveis localmente como o nível local de ruído e a modulação utilizada pelo transmissor. Com base nas medidas de um enlace, o nó é capaz de estimar a função de densidade de probabilidade (*probability density function* - pdf) da sua relação sinal-ruído-mais-interferência (*Signal-to-Noise-plus-Interference Ratio* - SNIR). Para uma dada modulação, é possível com base na SNIR calcular a taxa de erro binário (*Bit Error Rate* - BER) esperada e, conseqüentemente, a taxa de erros por pacote (*Packet Error Rate* - PER). Com isso, o número médio de transmissões num dado enlace pode ser estimado com base na SNIR, como será mostrado na Seção 5.1.2. A métrica DBETX leva também em conta o número máximo de transmissões na subcamada MAC na obtenção do número médio de transmissões. Além disso, a métrica DBETX penaliza enlaces que apresentam maiores perdas para encontrar rotas com menores taxas de perda fim-a-fim. Diferentemente da proposta de Koksall and Balakrishnan [74], a métrica DBETX favorece a escolha de enlaces com baixa taxa de perda sem podar o grafo de roteamento. Desta forma, evita-se a partição da rede quando a única rota para um determinado destino depende de um enlace de baixa qualidade.

O exemplo a seguir esclarece a vantagem de se basear no padrão de desvanecimento ao invés de se utilizar apenas informações sobre as condições médias dos canais. Suponha uma situação onde um pacote pode ser transmitido através de dois enlaces distintos, l_e ou l_v . O enlace l_e é bastante estável e sempre apresenta uma probabilidade de sucesso na transmissão (P_{suc}) igual a 0.5, enquanto o enlace l_v varia sensivelmente, apresentando metade do tempo $P_{suc} = 1$ e a outra metade do tempo $P_{suc} = 0.1$. Caso a métrica ETX convencional, que se baseia na média, seja utilizada, o enlace l_v é escolhido, pois apresenta $E[P_{suc}] = 0.55$. No entanto, observa-se que quando o enlace l_v apresenta más condições, seu número de transmissões médio é igual a 10. Assim, numa análise a longo prazo, seu número médio de transmissões é 5.5. Deve-se destacar ainda, que as subcamadas MAC possuem um limite máximo para o número de transmissões, que para o padrão IEEE 802.11 é igual a 7 quando os quadros RTS e CTS são utilizados. Assim, o enlace l_v apresenta durante metade do tempo perdas significativas, pois os pacotes são freqüentemente descartados devido ao limite de transmissões na camada MAC. Para evitar esse problema, este trabalho propõe a métrica DBETX que utiliza também a informação do número de transmissões realizadas na subcamada MAC para selecionar as rotas. Na próxima seção introduz-se o conceito de interrupção na subcamada MAC e a função do número médio de transmissões (*Average Number of Transmissions* - ANT). Realiza-se, ainda, uma análise sobre a importância de se levar em consideração o comportamento do canal ao longo do tempo.

5.1.1 O Padrão de Desvanecimento e a Qualidade do Enlace

A função do número médio de transmissões (ANT) representa o número esperado de transmissões num enlace levando-se em conta o número máximo de transmissões permitidas pela subcamada MAC (NT_{max}). Antes de definir formalmente esta função, deve-se discutir o conceito de interrupção na subcamada MAC. Neste trabalho define-se como interrupção na subcamada MAC a condição criada quando a probabilidade de sucesso (P_{Suc}) do enlace resulta num número esperado de transmissões maior que o parâmetro NT_{max} . Nesta situação, existe uma probabilidade alta de que o pacote a ser transmitido seja perdido devido a um número excessivo de tentativas. Assim, a condição de interrup-

ção na subcamada MAC ocorre quando a probabilidade de sucesso de um enlace é menor que a Probabilidade de Sucesso Limite (P_{lim}), que é definida como

$$P_{lim} = \frac{1}{NT_{max}}. \quad (5.1)$$

A função ANT é então definida como

$$ANT(x) = \begin{cases} \frac{1}{P_{Suc}(x)} & P_{Suc}(x) > P_{lim} \\ \frac{1}{P_{lim}} & P_{Suc}(x) \leq P_{lim} \end{cases} \quad (5.2)$$

A função ANT é mostrada na Figura 5.1.

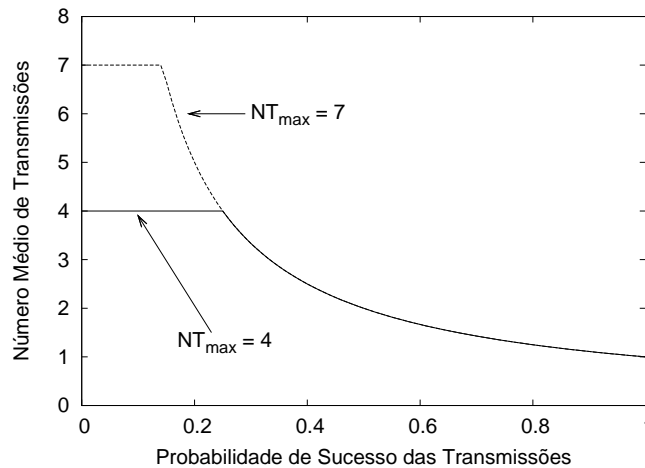


Figura 5.1: Comportamento da Função ANT.

Como pode-se observar na Figura 5.1, o parâmetro NT_{max} limita o valor da função ANT. Esta limitação reflete que a subcamada MAC não tentará transmitir um pacote mais que NT_{max} vezes. A probabilidade de P_{Suc} ser menor que P_{lim} é a probabilidade de interrupção na subcamada MAC (*MAC-layer outage probability* - $P_{out_{MAC}}$) do enlace. A Figura 5.2 mostra as probabilidades de interrupção na subcamada MAC de enlaces com diferentes padrões de desvanecimento em função de $E[P_{Suc}]$ assumindo-se a modulação 64-QAM [61] e pacotes de 500 bytes. Nesta figura, são analisados enlaces que apresentam os padrões de desvanecimento mostrados na Seção 4.1.2.

A Figura 5.2 mostra que enlaces com desvanecimento que apresentam a mesma P_{Suc} média podem possuir diferentes probabilidades de interrupção na camada MAC, dependendo do seu fator K , ou seja, da quantidade de energia recebida através da visada di-

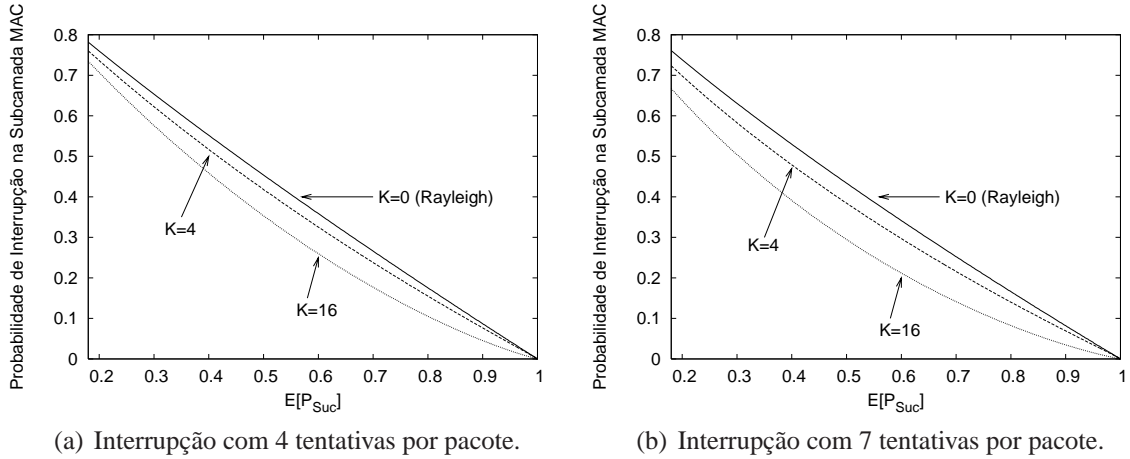


Figura 5.2: Probabilidade de interrupção na subcamada MAC em função da probabilidade média de sucesso.

reta. Para uma mesma $E[P_{Suc}]$, canais com mais energia concentrada na visada direta apresentam probabilidades de interrupção na subcamada MAC menores. Este efeito é mais pronunciado quando a subcamada MAC permite um número maior de tentativas (Figura 5.2(b)) porque quanto maior é o parâmetro NT_{max} , menor é o valor de P_{Suc} necessário para gerar a interrupção. Com isto, é ainda menos provável que a probabilidade de sucesso dos canais com uma visada direta significativa chegue abaixo de P_{lim} . As diferentes relações entre a P_{Suc} média e $P_{out_{MAC}}$ com base no padrão de desvanecimento mostram a importância da utilização de informações sobre o padrão de desvanecimento no cálculo da métrica de roteamento. A próxima seção formaliza o cálculo da métrica proposta.

5.1.2 Uma Métrica Baseada na Distribuição do Canal

A métrica proposta tem três objetivos: (i) refletir as variações do canal, (ii) levar em conta o limite de tentativas na subcamada MAC e (iii) favorecer a escolha de enlaces com menor probabilidade de perda. Assim, a métrica DBETX para o enlace l é definida como

$$DBETX(l) = E[ANT](l) \frac{1}{1 - P_{out_{MAC}}(l)}. \quad (5.3)$$

Ao utilizar-se a ANT média, os dois primeiros objetivos, refletir as variações do canal e levar em conta o limite de transmissões, são tratados enquanto que a ponderação com

a probabilidade de interrupção na subcamada MAC é motivada pelo terceiro objetivo. O cálculo da métrica DBETX requer o conhecimento do comportamento do canal sem fio ao longo do tempo e não de seus valores médios. A maior dificuldade encontrada é a diferença entre as escalas de tempo em que as diferentes camadas trabalham. Na camada física os eventos de interesse, ou seja, as mudanças na qualidade dos canais, ocorrem com a frequência de mili ou microssegundos, enquanto as interações na camada de rede ocorrem na escala de segundos, pois são intencionalmente espaçadas no tempo com o propósito de reduzir a sobrecarga dos protocolos. Portanto, é inviável obter uma visão mais completa dos estados dos enlaces baseando-se apenas nas interações na camada de rede.

Assim, propõe-se o uso de técnicas de otimização entre camadas para a obtenção de informações sobre cada quadro recebido de certo emissor a fim de atualizar as informações a respeito da qualidade do enlace em questão. Com esta abordagem, após a recepção de alguns quadros pode-se estimar a função de densidade de probabilidade da potência recebida num enlace e, conseqüentemente, a pdf da SNIR do enlace.

De acordo com a modulação utilizada, uma função adequada deve ser usada para traduzir a SNIR em BER. A partir da taxa de erro binária (BER), pode-se obter a taxa de erro de pacotes (PER) para uma dada relação sinal ruído mais interferência (SNIR) como se segue

$$PER(SNIR) = 1 - [1 - BER(SNIR)]^n, \quad (5.4)$$

onde n é o comprimento médio do pacote [101].

Finalmente, a métrica DBETX é obtida a partir das equações 5.2 e 5.3 com a transformação $P_{Suc} = 1 - PER$. O procedimento completo para a obtenção da métrica DBETX é mostrado na Figura 5.3.

Para levar em conta o padrão de desvanecimento, cada valor obtido é ponderado pela probabilidade de se obter a SNIR que o origina. Mais especificamente, o valor de $E[ANT]$ para o enlace l é obtido como

$$E[ANT](l) = \sum_{SNIR=0}^{\infty} p(SNIR)ANT(SNIR), \quad (5.5)$$

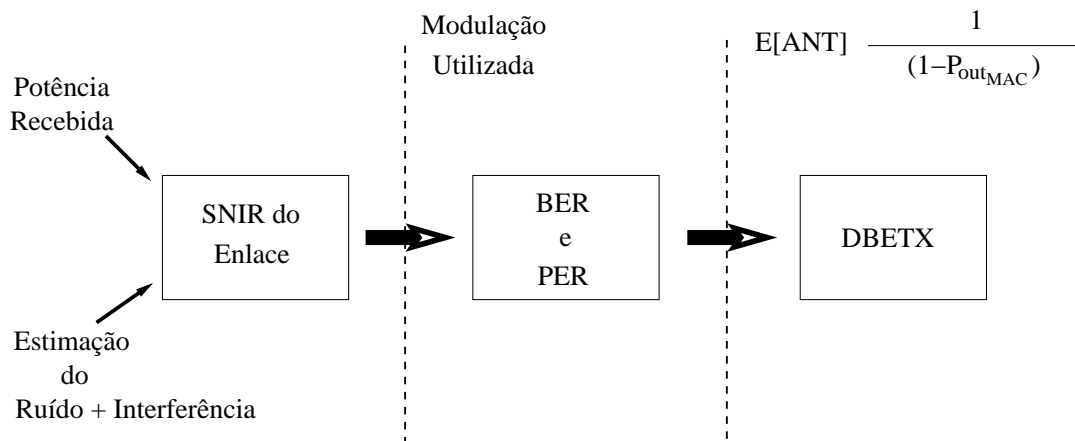


Figura 5.3: Obtenção da métrica DBETX.

onde $p(SNIR)$ é a probabilidade do enlace l apresentar a SNIR especificada.

Nas análises realizadas neste trabalho, a métrica DBETX é baseada na probabilidade de sucesso de uma transmissão em uma direção. Embora a real transmissão de um pacote requiera a transmissão de um ou mais quadros de controle, assume-se que estes quadros são transmitidos em taxas mais baixas e que, por este motivo, apresentam probabilidades de erro negligenciáveis em relação à probabilidade de erro da taxa de transmissão dos dados. Em casos onde esta hipótese não é válida, a extensão do modelo é intuitiva, pois a probabilidade de sucesso da transmissão é calculada através da multiplicação das probabilidades de sucesso individuais dos diferentes quadros.

Para avaliar a eficiência da métrica proposta, são realizadas simulações de uma rede sem fio de múltiplos saltos e os resultados obtidos pela métrica DBETX são comparados àqueles da métrica ETX. Assume-se que os nós são capazes de estimar de forma precisa a pdf da SNIR dos enlaces e as métricas DBETX e ETX são calculadas com base nestas estimativas.

O algoritmo de Dijkstra é utilizado para obter as rotas de cada nó para todos os outros nós da rede. O custo da rota é computado usando-se ambas as métricas de roteamento consideradas. Finalmente, com base nas rotas escolhidas, calculam-se três métricas de avaliação: o número médio de saltos por rota, a disponibilidade média por enlace utilizado (definida como $1 - P_{out_MAC}$) e o número esperado de retransmissões (ANT) por enlace utilizado.

As simulações são realizadas com o auxílio da ferramenta MatLAB. Os resultados são apresentados com uma confiabilidade de 95% e os intervalos de confiança são representados por barras verticais nos gráficos.

Cenário de Simulação

Para criar cenários mais realistas, sempre que possível as configurações se baseiam no padrão IEEE 802.11g [102]. A área de simulação é uma superfície retangular de lados πR e $6R$. Assim, a área da superfície é $6\pi R^2$. A densidade da rede é medida em função do número médio de nós por área de cobertura (uma área de πR^2 m²). A densidade de nós é variada ao longo das simulações para avaliar o efeito da densidade da rede sobre os resultados. A potência média recebida é calculada com base no modelo de propagação *log-distance* (Seção 4.1.1) com o parâmetro $\beta = 2.7$, simulando-se um típico cenário urbano [65]. Os nós são estáticos e assume-se que as variações na qualidade dos canais são originadas de movimentos no ambiente. A frequência da portadora utilizada é de 2.4GHz. Além disso, utiliza-se a modulação 64-QAM. Esta é a modulação utilizada na maior taxa de transmissão prevista pelo padrão IEEE 802.11g e a BER é calculada como em [103]. O nível de ruído mais interferência é assumido constante e configurado para resultar em $P_{Suc} = 10^{-5}$ numa distância R quando não há desvanecimento. O parâmetro NT_{max} é configurado em 7 e o tamanho dos pacotes em 500 bytes. Finalmente, a fim de variar o padrão de desvanecimento dos enlaces da rede, o valor do parâmetro de Ricean, K , de cada enlace é escolhido aleatoriamente no conjunto [0 1 2 4 8 16 32 64]. A Tabela 5.1 resume estes parâmetros.

Resultados Obtidos

A primeira métrica analisada é o número médio de saltos por rota. A Figura 5.4 mostra o número médio de saltos em função da densidade da rede.

Observa-se que para densidades muito baixas o número médio de saltos tende a ser baixo. Isto é um efeito da conectividade reduzida, que reduz a probabilidade de uma rede totalmente conectada. Assim, para densidades muito baixas, a rede tende a ser formada

Tabela 5.1: Parâmetros de simulação.

| Parâmetro | Valores Utilizados |
|--------------------------------|-----------------------|
| Raio de Transmissão (R) | 39m |
| Área de Simulação (retângulo) | $\pi R \times 6R m^2$ |
| Fator de Atenuação (β) | 2.7 |
| Frequência da Portadora | 2.4GHz |
| Modulação | 64-QAM |
| NT_{max} | 7 |
| Tamanho dos Pacotes | 500 bytes |
| Fator de Ricean (K) | 0 1 2 4 8 16 32 64 |

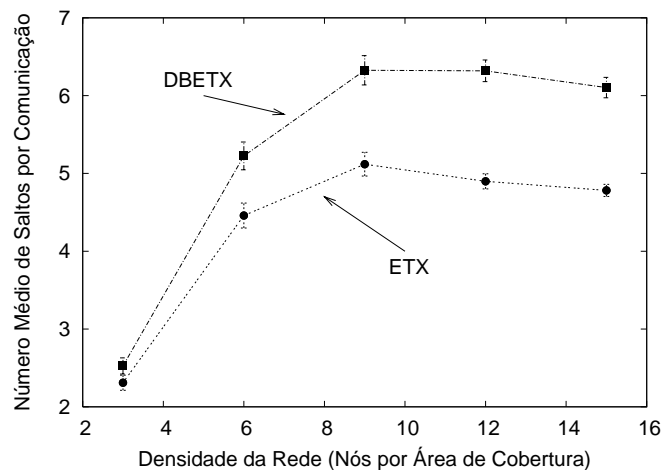


Figura 5.4: Número médio de saltos por comunicação.

por grupos isolados de nós. Este agrupamento resulta em rotas mais curtas. À medida que a densidade da rede aumenta o número médio de saltos por rota também aumenta porque a rede tende a ser totalmente conectada. Além disso, a métrica DBETX proposta, quando comparada à métrica ETX, resulta em rotas com mais saltos porque ela é mais agressiva na seleção de enlaces com mais qualidade, priorizando menos o comprimento de rota. Como resultado, são obtidas rotas mais longas, mas que apresentam menos perdas, como é discutido mais adiante. Por fim, tanto a métrica ETX quanto a métrica proposta DBETX apresentam um comportamento caracterizado por um aumento inicial seguido de uma redução no número médio de saltos com o aumento da densidade. Isto ocorre porque com o aumento da densidade também aumenta a probabilidade de se selecionar saltos mais longos com padrões de desvanecimento favoráveis, permitindo uma redução no comprimento médio das rotas.

A Figura 5.5 mostra o número médio de transmissões por enlace. Quanto menor este valor, melhor é o desempenho da rede, pois um número médio de transmissões reduzido significa menos tempo desperdiçado com retransmissões e, assim, melhor utilização dos recursos da rede.

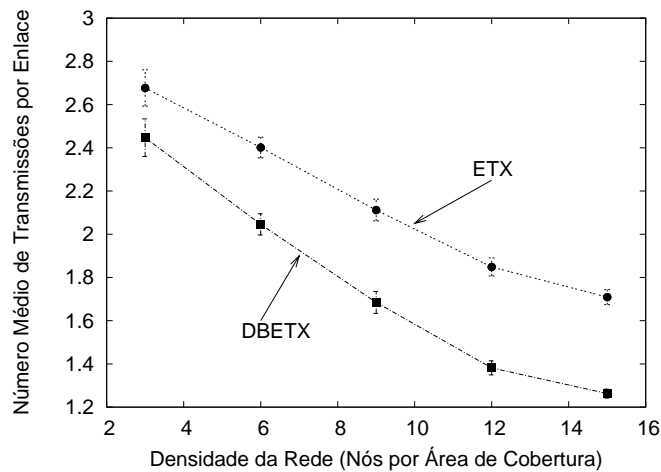


Figura 5.5: Número médio de transmissões por enlace.

Para baixas densidades, o número médio de transmissões por enlace é alto, pois os nós são forçados a utilizar enlaces de má qualidade uma vez que são comuns situações onde enlaces ruins representam a única possibilidade para atingir um nó. Além disso, com menos nós, a distância entre os nós vizinhos aumenta e maiores distâncias resultam em menores SNIRs. Por outro lado, com o aumento da densidade, ambas as métricas de roteamento resultam em números médios de transmissões menores. A maior densidade reduz a distância média entre os nós vizinhos e, conseqüentemente, aumenta a SNIR média. Além disso, o aumento da densidade aumenta a disponibilidade de rotas, permitindo ao algoritmo de roteamento optar, por exemplo, por dois enlaces de boa qualidade ao invés de um único enlace de pior qualidade.

Deve-se destacar que a melhora obtida pela métrica DBETX no número médio de transmissões em relação aos resultados da métrica ETX aumenta com a densidade dos nós. Para uma densidade bastante reduzida de 3 nós por área de cobertura, a métrica DBETX escolhe enlaces com uma ANT média aproximadamente 8% menor. À medida que a densidade aumenta, uma redução mais significativa no número médio de transmissões é obtida. Para uma densidade intermediária de 9 nós por área de cobertura, a redução é de aproximadamente 20%. Esta redução chega a 26% quando a densidade da rede é de 15

nós por área de cobertura.

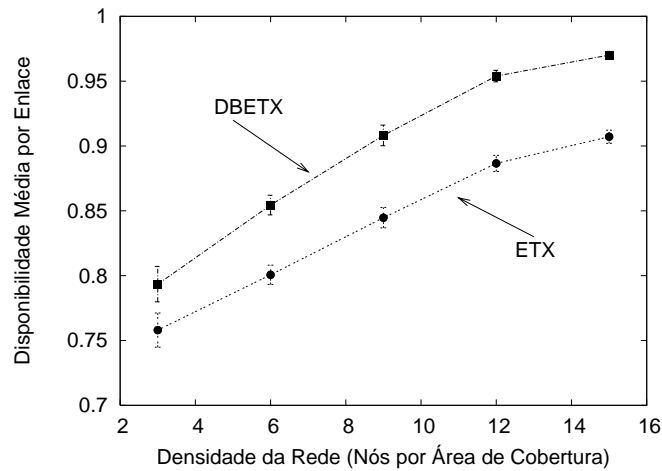


Figura 5.6: Disponibilidade Média por enlace.

A próxima análise se refere à disponibilidade média dos enlaces. Como discutido anteriormente, esta disponibilidade é definida como $1 - P_{out_MAC}$. Valores mais elevados de disponibilidade resultam em comunicações mais estáveis, probabilidades de perda menores e menos interrupções de serviço. A Figura 5.6 mostra que a disponibilidade aumenta com a densidade. Isto é uma consequência direta do maior número de alternativas de rota, permitindo aos nós escolher rotas mais estáveis. Para densidades muito baixas, a disponibilidade média dos enlaces escolhidos pela métrica ETX é em torno de 0.76 e a métrica DBETX resulta numa disponibilidade média 5% maior. A conectividade reduzida obriga os nós a utilizarem enlaces de baixa qualidade para alcançar nós que seriam inatingíveis de outra forma. Com o aumento da densidade, ambas as métricas de roteamento passam a utilizar enlaces com maior disponibilidade. A disponibilidade média obtida pela métrica DBETX é sempre maior que aquela obtida pela métrica ETX. Além disso, para uma rede com densidade igual a 15 nós por área de cobertura, a disponibilidade média obtida pela métrica DBETX é em torno de 0.97, o que é aproximadamente 7% superior à disponibilidade média obtida pela métrica ETX para a mesma densidade da rede. Este resultado confirma que a métrica DBETX busca evitar enlaces com base nos seus piores casos.

Finalmente, baseando-se nos resultados mostrados nas figuras 5.4 e 5.6, pode-se estimar a disponibilidade fim-a-fim das rotas escolhidas como Av^{Hops} , onde Av é a disponibilidade média por enlace, mostrada na Figura 5.6, e $Hops$ é o número médio de saltos por rota, mostrado na Figura 5.4. A disponibilidade fim-a-fim reflete a probabilidade de

todos os enlaces que compõem a rota estarem fora da condição de interrupção na subcamada MAC. Assim, a disponibilidade fim-a-fim representa a probabilidade de uma rota apresentar uma baixa taxa de perda.

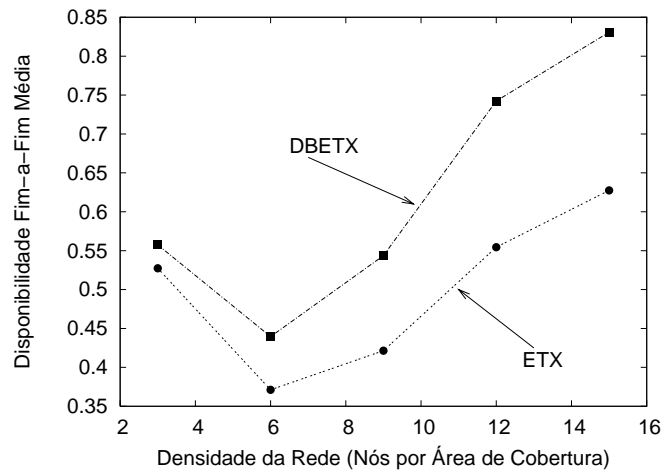


Figura 5.7: Disponibilidade fim-a-fim.

A Figura 5.7 mostra que a métrica DBETX sempre resulta numa disponibilidade fim-a-fim superior à obtida pela métrica ETX. Além disso, o ganho obtido aumenta com a densidade da rede. Deve-se destacar que para redes com densidades muito baixas, a disponibilidade fim-a-fim média é relativamente alta. Isto ocorre porque, neste cenário, a rede tende a ser particionada e o número médio de saltos é menor. Esta observação explica porque os resultados para uma rede com densidade igual a 6 nós por área de cobertura são piores que os resultados obtidos para a rede com densidade igual a 3. Quando a densidade da rede é igual a 6 nós por área de cobertura, a rede é mais conectada e as rotas são mais longas. A melhora obtida pela métrica DBETX sobre os resultados da métrica ETX é de 18% quando a densidade da rede é igual a 6 nós por área de cobertura e chega a 32% quando a densidade é de 15 nós por área de cobertura.

Com base nas observações feitas nesta seção sobre os efeitos do desvanecimento sobre a qualidade dos enlaces, busca-se na próxima seção desenvolver uma métrica de roteamento cooperativo seguindo as diretrizes definidas no começo deste capítulo.

5.2 O Roteamento em Redes com Diversidade Cooperativa

Esta seção define uma métrica eficiente para o roteamento cooperativo. O exemplo mostrado na Seção 4.3.3 mostra que o uso da cooperação de forma oportunista é menos eficiente que o roteamento cooperativo, pois a rota selecionada através de algoritmos convencionais de roteamento pode não apresentar oportunidades significativas de cooperação. No entanto resta ainda a questão sobre a forma mais eficiente de realizar o roteamento cooperativo. A Seção 5.2.1 analisa este problema.

Assume-se a utilização, no nível físico, do protocolo de cooperação *Non-Orthogonal Amplify-and-Forward*, ou NAF, descrito na Seção 4.3.1. Além disso, a fim de criar um cenário realista para as análises, as configurações da interface de rede são feitas baseadas no modo OFDM do padrão IEEE 802.11g [102]. Esta aproximação é razoável uma vez que a idéia é de integrar os protocolos de cooperação aos padrões de comunicação mais utilizados [85]. A taxa mínima de transmissão considerada é 6 Mbps e a máxima de 54 Mbps. Por razões de simplificação, assume-se inicialmente que a taxa de transmissão pode variar de forma contínua entre estes dois extremos. O tempo de transmissão de um pacote é modelado da forma

$$t(\mu s) = \frac{K_d}{C} + K_{oh}, \quad (5.6)$$

onde K_d é uma constante que depende do tamanho do pacote transmitido, C é a capacidade do canal e K_{oh} é uma constante que representa a sobrecarga da transmissão. Assumindo-se o uso de pacotes de 1024 bytes e calculando-se o tempo de transmissão para as taxas mínima e máxima segundo [104], as constantes K_d e K_{oh} são configuradas com os valores 675 e 250, respectivamente.

Tabela 5.2: Taxas mínima e máxima de transmissão das interfaces.

| Taxa de Transmissão | Taxa de Codificação | Bits por Sub-portadora | Capacidade de Interrupção | Tempo de Transmissão |
|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|
| 6 Mbps | 1/2 | 1 | 0.5 bpcu | 1600 μs |
| 54 Mbps | 3/4 | 6 | 4.5 bpcu | 400 μs |

Como mostrado na Tabela 5.2, a capacidade de interrupção da taxa mínima da interface (C_{min}) é 0.5 bpcu, ou seja, se a capacidade do canal for menor que este valor a transmissão não pode ser feita com sucesso nem mesmo na taxa mínima da interface e o enlace estará interrompido. Por outro lado, a capacidade de interrupção da taxa mais alta suportada (C_{max}) é de 4.5 bpcu, o que significa que mesmo que a capacidade do canal seja superior à 4.5 bpcu, a taxa de transmissão será de 54 Mbps, pois a interface não possui uma taxa mais elevada para transmitir os dados.

O uso da cooperação impõe duas novas funções à camada MAC: a escolha do retransmissor cooperativo e a decisão de usar ou não a cooperação numa determinada transmissão. Assume-se, portanto, que a camada MAC é capaz de selecionar o melhor entre os retransmissores cooperativos disponíveis. Além disso, apenas um retransmissor cooperativo é usado por transmissão. Em situações onde mais de um retransmissor cooperativo está disponível, apenas o melhor entre eles é utilizado.

A fim de evitar que o ruído recebido pelo retransmissor cooperativo atrapalhe a transmissão em situações em que os canais h_{SR} e h_{RD} não apresentam condições favoráveis, assume-se a utilização da técnica conhecida como cooperação inteligente (*Smart Cooperation*) [96], onde a configuração cooperativa só é utilizada quando a sua capacidade instantânea (Equação 4.13) é maior que a capacidade instantânea obtida pela configuração não-cooperativa (Equação 4.12). Desta forma, a capacidade instantânea do enlace cooperativo entre os nós emissor e receptor (C') é

$$C' = \max\{C(h_{SD}), C_{NAF}(R^*)\}, \quad (5.7)$$

onde $C_{NAF}(R^*)$ é a capacidade instantânea da configuração cooperativa utilizando o melhor retransmissor cooperativo disponível. Finalmente, assume-se que a subcamada MAC é capaz de selecionar a maior taxa de transmissão possível para uma dada capacidade instantânea C' .

5.2.1 O Problema dos Algoritmos Gulosos em Redes com Desvanecimento

Como discutido na Seção 4.3.3 os trabalhos encontrados na literatura sobre o roteamento em redes cooperativas assumem que as condições instantâneas dos canais sem fio permanecem constantes por um período suficientemente grande para que a camada de rede possa escolher uma rota ótima.

Tipicamente, assume-se que para nós estáticos, essas variações são suficientemente lentas. No entanto, a velocidade da variação dos canais é função não só das velocidades dos nós, mas também da velocidade dos elementos que compõem o ambiente ao redor dos nós [67]. Diferentes trabalhos mostram que o tempo de coerência médio, isto é, o tempo durante o qual o canal é tido como constante, em redes sem fio com nós estáticos é, em geral, da ordem de dezenas ou centenas de milissegundos, podendo chegar a poucos segundos em casos particulares [105, 106, 107, 108]. A Tabela 5.3 resume alguns destes resultados.

Tabela 5.3: Tempo de coerência dos enlaces sem fio com nós estáticos.

| Tipo de Cenário | Frequência (GHz) | Tempo de Coerência Médio (ms) |
|-------------------------|------------------|----------------------------------|
| <i>Outdoor</i> - Urbano | 2.4 | 40 |
| <i>Indoor</i> | 2.4 | entre 24.74 e 211.5 ¹ |
| <i>Outdoor</i> - Urbano | 3.5 | entre 14.34 e 92.55 |
| <i>Outdoor</i> - Urbano | 5.2 | entre 1780 e 1980 ² |

¹ Os valores mostrados são calculados com base no espalhamento doppler máximo para cenários onde a distância entre os nós é informada constante.

² Os valores mostrados são as medianas das medidas.

Recentes estudos mostram que, mesmo em situações de baixa carga, o tempo de ida e volta (*Round Trip Time* - RTT) em redes sem fio é da ordem de uma centena de milissegundos, podendo chegar a alguns segundos [76]. Este RTT elevado em relação ao tempo de coerência dos canais mostra que é inviável para o roteamento reagir a cada mudança na qualidade dos enlaces. Assim, uma rota escolhida segundo uma métrica baseada na configuração instantânea de desvanecimento dos canais, denominado neste trabalho de algoritmo guloso, será usada em condições que podem ser bem diferentes das iniciais. Na busca por otimizar a rota para uma certa configuração, é possível que a rota escolhida seja

suscetível a variações e apresente a longo prazo um desempenho ruim.

Considere uma situação em que o roteamento pode escolher entre três enlaces diferentes: o primeiro, Enlace A, não possui nenhum retransmissor cooperativo disponível; o segundo, Enlace B, possui um possível retransmissor cooperativo disponível; enquanto que o terceiro, Enlace C, possui dois. A Figura 5.8 mostra as densidades de probabilidades destes três enlaces levando-se em conta um desvanecimento do tipo Rayleigh [67], e relações sinal-ruído médias de 5 dB nos canais emissor-receptor e de 15 dB nos canais emissor-retransmissor e retransmissor-receptor.

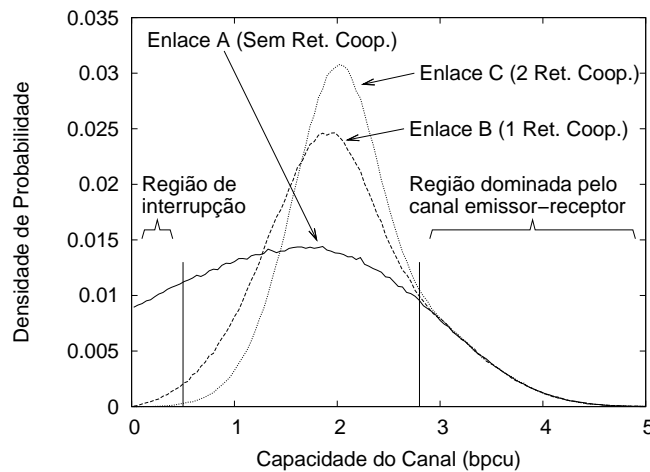


Figura 5.8: Densidade de probabilidade da capacidade dos enlaces cooperativos.

Analisando-se a Figura 5.8, pode-se perceber dois aspectos interessantes. O Enlace A não possui nenhum retransmissor cooperativo e apresenta baixos valores de capacidade com uma probabilidade bem superior aos enlaces que usam a cooperação. Levando-se em conta a capacidade de interrupção de enlace mostrada na Tabela 5.2 ($C_{min}=0.5$), percebe-se que este enlace possui uma probabilidade de interrupção (*outage probability*) bem superior aos outros dois enlaces (esta probabilidade é igual a integral da curva de 0 a 0.5). Em segundo lugar, na região de alta capacidade as densidades de probabilidade dos três enlaces são muito próximas. Isto ocorre porque o protocolo de cooperação não é feito para aumentar a capacidade máxima do enlace, mas sim para melhorar seu pior caso. Desta forma, a região de alta capacidade é resultado de um canal direto (h_{SD}) muito bom. Nestes casos, a configuração utilizada é a configuração não cooperativa (Equação 5.7). O resultado desta densidade similar em altas capacidades é que algoritmos gulosos, que escolhem o enlace com a maior capacidade instantânea, escolherão com grande probabi-

lidade os enlaces A e B em detrimento do enlace C, que apresenta uma probabilidade de interrupção inferior. A Figura 5.9(a) mostra a probabilidade de escolha dos três enlaces por um algoritmo guloso, ou seja, a probabilidade da capacidade instantânea de cada um dos canais ser superior à capacidade instantânea dos outros dois enlaces. Neste cenário, a relação sinal-ruído dos canais que ligam os retransmissores cooperativos aos nós emissor e receptor é 10 dB superior àquela experimentada pelos canais diretos. A Figura 5.9(b) mostra a probabilidade de interrupção dos enlaces.

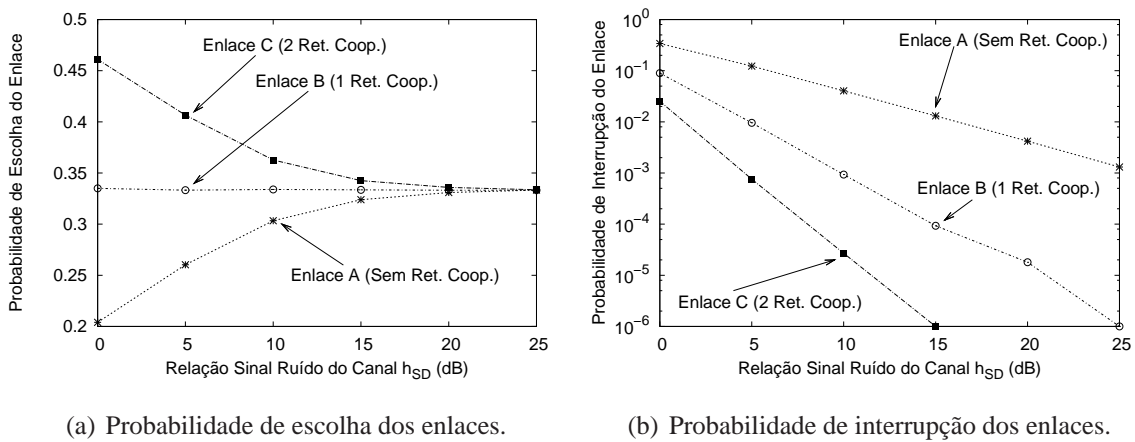


Figura 5.9: Efeito da variação da relação sinal-ruído média.

Observando-se a Figura 5.9, pode-se perceber que embora o Enlace C apresente probabilidades de interrupção sempre muito inferiores às apresentadas pelos outros dois enlaces, um algoritmo guloso escolherá frequentemente os enlaces A e B. Ao tentar melhorar o desempenho da rede para uma dada configuração de canais, os algoritmos gulosos apresentam problemas de desempenho a longo prazo em redes com desvanecimento. Para evitar este problema, propõe-se o uso de informações que reflitam o comportamento a longo prazo dos enlaces cooperativos no cálculo da métrica cooperativa. Com isto, buscam-se rotas que apresentem, com grande probabilidade, boas condições ao longo do tempo.

Mais especificamente, é proposto o uso da probabilidade de interrupção e da capacidade útil média do enlace cooperativo, como descrito a seguir. A partir de C_{min} , pode-se obter a probabilidade de interrupção (*outage probability*) do enlace cooperativo, $P_{out}(l)$, através da expressão

$$P_{out}(l) = Pr(C'(l) < C_{min}). \quad (5.8)$$

A capacidade útil instantânea do enlace é uma medida de capacidade que leva em conta os parâmetros C_{min} e C_{max} das interfaces e é definida neste trabalho como

$$C_{util}(l) = \begin{cases} 0, & C'(l) < C_{min} \\ C'(l), & C_{min} \leq C'(l) \leq C_{max} \\ C_{max}, & C'(l) > C_{max} \end{cases} \quad (5.9)$$

Com isto, para que o comportamento a longo prazo dos enlaces seja levado em conta no estabelecimento das rotas, propõe-se o uso da seguinte métrica de roteamento cooperativo ponderado (RCP):

$$RCP(l) = \left(\frac{K_d}{E[C_{util}(l)]} + K_{oh} \right) \frac{1}{1 - P_{out}(l)}. \quad (5.10)$$

Com uso da métrica RCP, espera-se melhorar os resultados do roteamento cooperativo nas redes com desvanecimento onde os canais variam com uma velocidade elevada em relação ao tempo de resposta do roteamento.

Para analisar a eficiência das diferentes métricas, são realizadas simulações que comparam a métrica proposta de roteamento cooperativo ponderado (RCP), uma métrica de roteamento cooperativo guloso (RCG) e a métrica não-cooperativa de menor número de saltos com uso da cooperação oportunista (MH-CO). Para cada cenário, as análises são feitas com base em 10^6 configurações de desvanecimento. Enquanto a métrica RCP é calculada segundo a Equação 5.10, a métrica RCG é o tempo de transmissão no enlace (Equação 5.6) baseado na primeira configuração de desvanecimento da rede. As métricas avaliadas são o número médio de saltos, a capacidade útil média dos enlaces que compõem a rota, a probabilidade de sucesso fim-a-fim da rota e a probabilidade de sucesso do enlace que apresenta a maior probabilidade de interrupção da rota. A probabilidade de sucesso de um enlace l é definida como $1 - P_{out}(l)$.

O raio de cobertura dos nós, r , é configurado para 70 metros e a potência de transmissão dos nós é definida de forma a resultar numa probabilidade de interrupção dos enlaces não cooperativos de 50% a essa distância. Utiliza-se o modelo de propagação com atenuação exponencial e fator de atenuação igual a 2.7 e o modelo de desvanecimento Rayleigh, ou seja, a SNR dos canais possui distribuição exponencial tendo por média a potência de

recepção calculada com o modelo de propagação exponencial. A área de simulação é um retângulo de lados $\pi r \times 6r$ metros. O nó fonte é colocado nas coordenadas $(\pi \frac{r}{2}, 1.5r)$ e o nó destino nas coordenadas $(\pi \frac{r}{2}, 4.5r)$. Essa configuração com os nós fonte e destino mais próximos do centro da área de simulação visa evitar que o efeito de borda interfira com a densidade de retransmissores cooperativos dos enlaces utilizados pela métrica de menor número de saltos. Para variar a densidade da rede, varia-se o número total de nós. Para cada métrica, a rota ligando o nó fonte ao nó destino é então calculada segundo o algoritmo de Dijkstra. Os parâmetros utilizados são resumidos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Parâmetros de simulação.

| Parâmetro | Valores Utilizados |
|-------------------------------------|-------------------------|
| Raio de Transmissão (r) | 70m |
| Área de Simulação (retângulo) | $\pi r \times 6r m^2$ |
| Posição do Nó Fonte | $\pi \frac{r}{2}, 1.5r$ |
| Posição do Nó Destino | $\pi \frac{r}{2}, 4.5r$ |
| Fator de Atenuação (β) | 2.7 |
| Frequência da Portadora | 2.4GHz |
| Tamanho dos Pacotes | 1024 bytes |
| Padrão de Desvanecimento | Rayleigh |
| Nós Cooperativos no Cenário Híbrido | 50% |

São realizados dois conjuntos de simulações: um onde todos os nós são cooperativos, ou seja, capazes de utilizar o protocolo cooperativo, e outro onde apenas metade dos nós são cooperativos. No segundo conjunto, apenas enlaces entre dois nós cooperativos podem se servir da cooperação. Além disso, apenas nós cooperativos podem funcionar como retransmissores cooperativos. As simulações são feitas com o auxílio da ferramenta MatLAB e os resultados apresentados são acompanhados de intervalos de confiança de 95%, representados por barras verticais nos gráficos.

Cenário Inteiramente Cooperativo

A Figura 5.10 mostra os resultados obtidos para o cenário onde todos os nós são cooperativos. O comprimento médio das rotas escolhidas pode ser visto na Figura 5.10(a). Neste cenário, a métrica não-cooperativa de menor número de saltos escolhe caminhos

ligeiramente menores que as métricas cooperativas que escolhem caminhos de tamanhos aproximadamente iguais. As três métricas resultam em rotas menores à medida que a densidade da rede aumenta. Isso ocorre porque a maior densidade de nós aumenta o número de enlaces e, conseqüentemente, a probabilidade de se encontrar enlaces perto de uma linha reta ligando os nós fonte e destino. As rotas cooperativas são entre 13 e 19% maiores (maior número de saltos) que as rotas não cooperativas. Deve-se destacar que a escolha de rotas mais longas pelas métricas cooperativas não implica uma menor eficiência uma vez que, como mostra a Figura 5.10(b), essas rotas são compostas por enlaces de melhor qualidade. Mais uma vez, as duas métricas cooperativas apresentam resultados equivalentes onde a capacidade útil média dos enlaces por elas escolhidos são entre 25 e 36% superiores às capacidades dos enlaces escolhidos pela métrica não cooperativa.

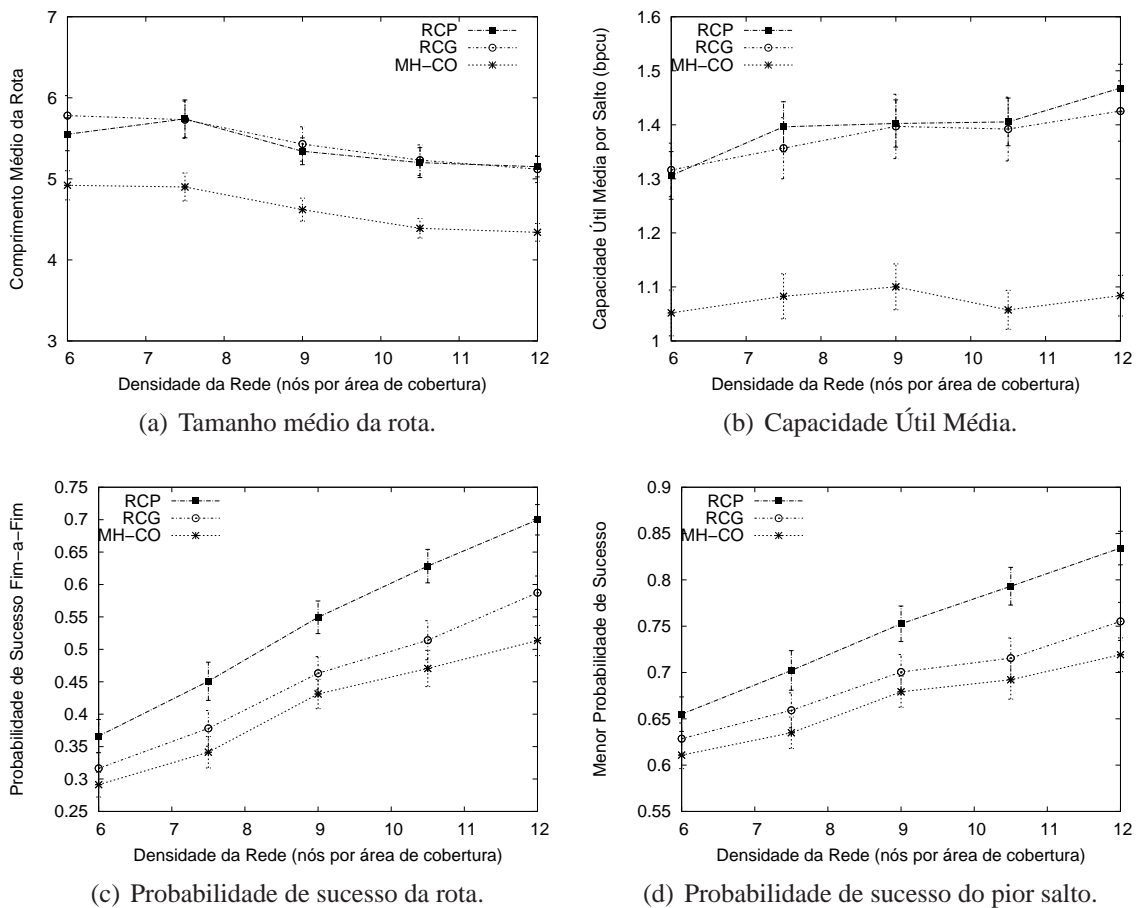


Figura 5.10: Resultados do cenário com todos os nós cooperativos.

Embora os desempenhos das duas métricas cooperativas sejam equivalentes em relação ao comprimento do caminho em número de saltos, a métrica de roteamento coope-

rativo ponderado (RCP) resulta numa probabilidade de sucesso fim-a-fim entre 15 e 19% superior que a métrica de roteamento cooperativo guloso (RCG) como pode ser visto na Figura 5.10(c). Essa diferença se explica pelo fato da métrica RCG buscar maximizar a capacidade da rede com base em uma configuração instantânea sem se preocupar com outras características dos enlaces. Desta forma, é possível que ela escolha enlaces com alta capacidade média (por causa do canal direto h_{SD}), mas que apresentam altas probabilidades de interrupção, pois não possuem muitas possibilidades de cooperação. A métrica RCP, por outro lado, leva a probabilidade de interrupção dos enlaces em conta e por isso evita a inclusão de enlaces cuja probabilidade de interrupção é elevada, como pode ser visto na Figura 5.10(d). Nesta figura, pode-se perceber que a probabilidade de sucesso do enlace com maior probabilidade de interrupção entre os enlaces escolhidos pela métrica RCP é entre 4 e 10% superior à do pior enlace escolhido pela métrica RCG. Como a relação entre a probabilidade de sucesso de um enlace individual e a probabilidade de sucesso fim-a-fim é exponencial, essa diferença na probabilidade de sucesso dos enlaces individualmente resulta em grandes disparidades na probabilidade de sucesso fim-a-fim.

Cenário Híbrido

A Figura 5.11 mostra os resultados obtidos para o cenário híbrido, onde apenas 50% dos nós são cooperativos. Neste cenário, as possibilidades para a utilização da cooperação são bastante reduzidas, uma vez que com 50% de nós cooperativos, aproximadamente, apenas 25% dos enlaces são cooperativos e estes enlaces possuem, em média, 50% menos retransmissores cooperativos disponíveis que no cenário precedente. Este cenário representa situações onde equipamentos legados convivem com equipamentos cooperativos ou cenários onde alguns nós preferem não utilizar a cooperação por motivos egoístas. A convivência entre equipamentos legados e equipamentos que utilizam a cooperação é esperada devido à natural instalação progressiva da tecnologia.

A Figura 5.11(a) mostra o tamanho médio da rota encontrada com as três métricas consideradas. Se esses resultados forem comparados com aqueles obtidos para a rede inteiramente cooperativa (Figura 5.10), conclusões interessantes podem ser tiradas. Primeiramente, a métrica MH-CO apresenta os mesmos resultados, pois neste caso a rota não

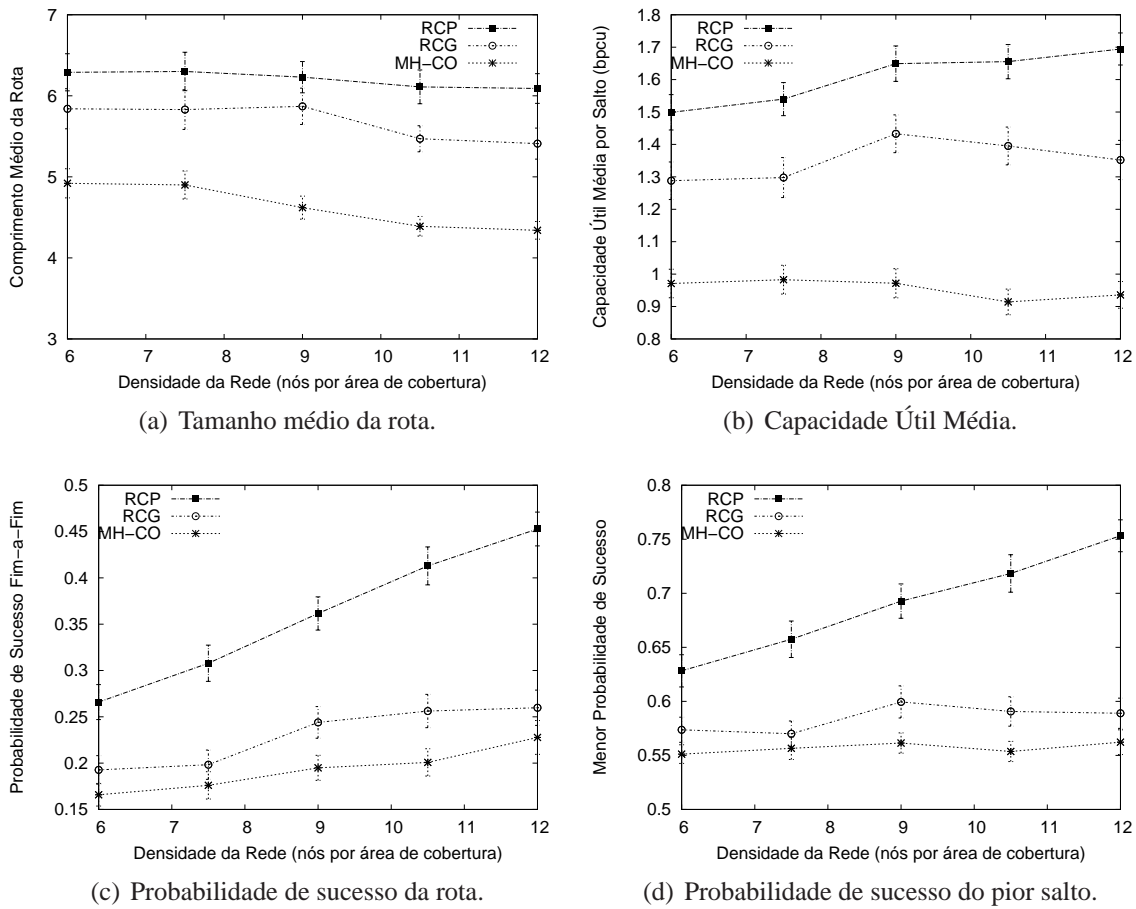


Figura 5.11: Resultados do cenário com 50% dos nós cooperativos.

depende das oportunidades de cooperação. Os resultados da métrica RCG também não mudam de forma significativa, uma vez que ela busca canais com capacidades elevadas, condição ditada predominantemente pelos canais diretos h_{SD} . A métrica proposta (RCP), por outro lado, mostra resultados bastante diferentes. Isto ocorre porque esta métrica é mais sensível às oportunidades de cooperação que a métrica RCG sendo, portanto, mais reativa à redução nas oportunidades de cooperação. Nas redes híbridas, a métrica RCP, que busca preservar a probabilidade de sucesso da comunicação, resulta em rotas maiores que a métrica RCG. Como o número de saltos da rota escolhida pela métrica RCP é maior, estes saltos tendem a ser mais curtos e apresentam uma capacidade útil média mais elevada (Figura 5.11(b)).

A análise da probabilidade de sucesso fim-a-fim neste cenário (Figura 5.11(c)) deixa ainda mais claro a importância da definição de métricas cooperativas que levem eficientemente em conta as oportunidades de cooperação dos enlaces. Neste cenário onde as

oportunidades de cooperação são reduzidas e a escolha da rota deve ser feita mais cuidadosamente, a métrica cooperativa proposta (RCP) resulta numa probabilidade de sucesso fim-a-fim entre 38 e 74% superior à probabilidade de sucesso obtida pela métrica cooperativa gulosa (RCG). Na verdade, o que se observa na Figura 5.11(c) é que a métrica RCP é a única a aproveitar eficientemente a maior possibilidade de utilização da cooperação gerada pelo aumento da densidade da rede, o que fica ainda mais claro quando a probabilidade de sucesso do pior enlace (Figura 5.11(d)) é analisada. A métrica cooperativa RCG, por outro lado, apresenta um comportamento muito próximo daquele mostrado pela métrica não cooperativa com uso de cooperação oportunista.

Os resultados mostrados nesta seção provam que em redes onde as variações causadas pelo desvanecimento são muito rápidas para que o roteamento responda a cada uma dessas variações e recalcule a rota, os algoritmos de roteamento cooperativo gulosos, ou seja, que se baseiam nas condições instantâneas da rede, não representam a opção mais eficiente. É mostrado também que uma métrica ponderada, que considera o comportamento a longo prazo dos enlaces sem fio, resulta em rotas mais estáveis, onde a probabilidade de perdas fim-a-fim é menor. No entanto, a métrica RCP, como definida nesta seção, requer o conhecimento perfeito da função de densidade de probabilidade da capacidade instantânea dos enlaces cooperativos. A fim de eliminar essa restrição, a próxima seção propõe uma métrica de roteamento cooperativo que pode ser calculada a partir das condições médias dos diferentes canais que compõem o enlace cooperativo.

5.2.2 A Métrica de Roteamento Cooperativo

O primeiro passo para a descrição da métrica proposta é a formalização do funcionamento do que vem sendo tratado até agora como enlace cooperativo, ou seja, dos enlaces componentes da rota onde existem possíveis retransmissores cooperativos disponíveis. Deve-se destacar novamente que a capacidade do enlace cooperativo entre dois nós S e D não é função simplesmente do canal direto entre estes dois nós, h_{SD} (Figura 4.2), mas uma agregação das condições de diferentes *enlaces lógicos*. Quando o protocolo de cooperação é levado em consideração, existem diferentes formas de efetuar uma transmissão entre os nós S e D . Neste trabalho, um *enlace lógico* é definido como qualquer configuração,

cooperativa ou não, que pode ser utilizada para transmitir um quadro. Assim, o enlace cooperativo entre os nós S e D é composto por um enlace lógico não-cooperativo, que depende apenas do canal h_{SD} , e de um enlace lógico para cada configuração cooperativa disponível. Uma vez que se adota neste trabalho a utilização de apenas um retransmissor cooperativo, para um dado enlace existem tantas configurações cooperativas quantos retransmissores cooperativos disponíveis. A Figura 5.12 mostra a composição do enlace cooperativo entre dois nós S e D .

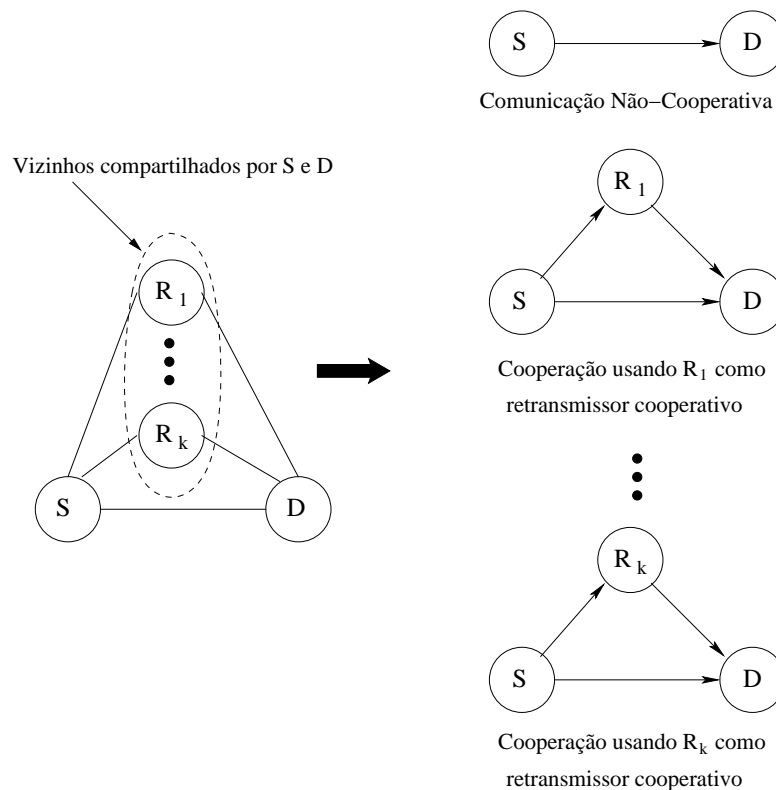


Figura 5.12: Decomposição do enlace cooperativo.

Uma vez que todos os nós no alcance tanto de S quanto de D podem servir como retransmissores cooperativos, o número de retransmissores cooperativos disponíveis é igual ao número de vizinhos compartilhados por S e D . Assim, esse enlace cooperativo pode ser designado por $\overline{SD}_{\{R_1, \dots, R_k\}}$, onde o conjunto de retransmissores cooperativos disponíveis para o enlace é designado como um índice entre chaves. Voltando ao exemplo sobre o roteamento cooperativo mostrado na Figura 4.3, a rota selecionada pelo algoritmo de roteamento cooperativo pode ser expressa como $\{\overline{FC}_{\{K\}}, \overline{CE}_{\{H,I\}}, \overline{EG}_{\{J\}}, \overline{GD}_{\{L\}}\}$.

Em redes com desvanecimento, os canais apresentam flutuações causadas pelo desva-

recimento que são rápidas em comparação ao tempo de resposta do roteamento, mesmo quando as condições médias dos canais são fixas (caso de redes estáticas) ou variem lentamente (redes com baixa mobilidade). Assim, é ineficiente basear a escolha das rotas nas condições instantâneas dos canais, como mostrado na Seção 5.2.1. Uma métrica que leve em conta o padrão de desvanecimento dos enlaces é mais eficaz e resulta em rotas mais estáveis.

Uma abordagem interessante para a descrição do comportamento a longo prazo de um enlace é a sua probabilidade de interrupção, que representa a probabilidade de sua capacidade instantânea estar abaixo de um limiar especificado, chamado de capacidade de interrupção. Se a capacidade instantânea é inferior à capacidade de interrupção de uma dada taxa de transmissão, é impossível para o emissor enviar um quadro com sucesso utilizando esta taxa de transmissão. Desta forma, a métrica proposta se baseia na capacidade dos enlaces cooperativos suportarem cada uma das taxas disponíveis. Esta capacidade de sustentar uma dada taxa de transmissão é, por sua vez, uma função das probabilidades de interrupção dos diferentes enlaces lógicos que compõem o enlace cooperativo. Deve-se, portanto, desenvolver uma forma eficiente de expressar esta relação entre as probabilidades de interrupção e a capacidade do enlace suportar uma dada taxa de transmissão.

Como mostrado na Figura 5.12, o enlace cooperativo é composto por diferentes enlaces lógicos. Assim para que um enlace cooperativo esteja interrompido para uma determinada taxa de transmissão, é necessário que as capacidades instantâneas de todos os seus enlaces lógicos sejam menores que a capacidade de interrupção em questão. Assim, a probabilidade de interrupção de uma taxa de transmissão é a probabilidade do enlace lógico não-cooperativo e de todos os enlaces lógicos cooperativos possuírem ao mesmo tempo capacidades instantâneas inferiores à capacidade de interrupção. No entanto, deve-se destacar que existe uma dependência entre as capacidades dos enlaces lógicos cooperativos e a capacidade do enlace lógico não-cooperativo. Voltando às figuras 4.2 e 5.12, o enlace lógico não-cooperativo é formado apenas pelo canal direto h_{SD} enquanto que os enlaces lógicos cooperativos são formados por combinações deste canal com outros canais que dependem do retransmissor cooperativo escolhido. Com isso, a probabilidade de interrupção (*outage probability*) de um enlace cooperativo ($P_{out_{EC}}$) para uma dada capacidade de interrupção (C_{out}) é

$$P_{out_{EC}}(C_{out}) = P_{out_{l_0}}(C_{out}) \prod_{i=1}^n P_{out_{l_i}}(C_{out} | C_{l_0} < C_{out}), \quad (5.11)$$

onde l_0 é o enlace lógico não-cooperativo, l_i são os enlaces lógicos cooperativos, n é o número de retransmissores cooperativos disponíveis, C_{l_0} é a capacidade instantânea do enlace lógico não-cooperativo e $P_{out_{l_0}}(C_{out})$ é a probabilidade de interrupção do enlace lógico não-cooperativo. O termo $P_{out_{l_i}}(C_{out} | C_{l_0} < C_{out})$ é a probabilidade condicional do enlace lógico cooperativo em questão estar interrompido dado que o enlace lógico não-cooperativo (l_0) está interrompido. C_{l_0} é calculado segundo a Equação 4.12. Com base na estimação do padrão de desvanecimento dos canais e nas equações 4.12 e 4.13, pode-se estimar $P_{out_{l_0}}$ e $P_{out_{l_i}}$.

Embora o modelo apresentado pela Equação 5.11 seja um modelo para uma rede onde a taxa de transmissão é fixa, este modelo pode ser generalizado para redes de taxa de transmissão variável. Seja m o número de taxas de transmissão diferentes disponíveis. Se a capacidade instantânea do enlace cooperativo cai abaixo da capacidade de interrupção da taxa T_{R_i} , o nó não pode sustentar esta taxa de transmissão e é forçado a utilizar uma taxa mais baixa de transmissão. Desta forma, cada uma das taxas de transmissão disponíveis possui sua própria capacidade de interrupção ($C_{out}(T_{R_i})$, $1 \leq i \leq m$). Além disso, a capacidade de interrupção da taxa de transmissão mais baixa ($C_{out}(T_{R_1})$) é o limite a partir do qual o enlace cooperativo está realmente interrompido. As capacidades de interrupção $C_{out}(T_{R_1})$ e $C_{out}(T_{R_m})$ são, portanto, equivalentes à C_{min} e C_{max} mostrados na Seção 5.2.1. No entanto, como neste modelo as taxas de transmissão variam em valores discretos, a Equação 5.9 não é válida e a capacidade útil do enlace é truncada na maior das capacidades de interrupção que atenda a $C_{out}(T_{R_i}) < C'$. Assumindo que os nós sempre utilizam a mais alta taxa de transmissão possível, a probabilidade do enlace cooperativo suportar uma dada taxa de transmissão ($P_{EC}(T_{R_i})$) é

$$P_{EC}(T_{R_i}) = (1 - P_{out_{EC}}(C_{out}(T_{R_i}))) - \sum_{j=i+1}^m P_{EC}(T_{R_j}), m \geq i \geq 0 \quad (5.12)$$

onde $P_{out_{EC}}$ é calculado segundo a Equação 5.11. O termo dentro do somatório modela o uso da maior taxa de transmissão possível. $P_{EC}(T_{R_0})$ é utilizado para representar a pro-

bilidade de interrupção do enlace cooperativo, ou seja, a probabilidade da capacidade instantânea do enlace cooperativo ser menor que $C_{out}(T_{R_1})$. Para se obter esta probabilidade a partir da Equação 5.12, utiliza-se $C_{out}(T_{R_0})$ igual a 0. As demais capacidade de interrupção ($C_{out}(T_{R_i}), 1 \leq i \leq m$) são funções das taxas de transmissão utilizadas.

Tendo obtido a probabilidade de um enlace cooperativo suportar uma dada taxa de transmissão, o modelo pode ser levado adiante para a definição de uma métrica de roteamento. Como são analisados ambientes onde a taxa de transmissão é variável, o desenvolvimento a seguir segue as idéias de Draves *et al.* [75] que propõem, nestes casos, a utilização de uma métrica que reflita o tempo de transmissão dos pacotes através do enlace. Com isso, a métrica de roteamento cooperativo *Cooperation-Aware Routing Metric* (CARM) é proposta como

$$CARM = \sum_{i=0}^m P_{EC}(T_{R_i}) T_p(T_{R_i}), \quad (5.13)$$

onde $T_p(T_{R_i})$ é o tempo de transmissão de um pacote de tamanho fixo quando a taxa de transmissão T_{R_i} é utilizada. Com o intuito de penalizar as perdas causadas pela interrupção do enlace cooperativo, $T_p(T_{R_0})$ é obtido multiplicando-se $T_p(T_{R_1})$ pelo número máximo máximo de transmissões permitidas pela subcamada MAC (NT_{max}). Esta manipulação representa a utilização da menor taxa de transmissão possível, pois o canal está em más condições, e suas sucessivas retransmissões até o seu descarte.

Antes de se avaliar a proposta através de simulações, algumas observações devem ser feitas. Primeiramente, deve-se destacar a assimetria da métrica CARM. Esta assimetria é uma consequência do protocolo de cooperação NAF, que resulta em pesos diferentes para os canais h_{SR} e h_{RD} na capacidade dos enlaces lógicos cooperativos (Equação 4.13). No entanto, se os nós possuem as estimativas dos canais, eles são capazes de calcular a métrica nos dois sentidos. Em segundo lugar, se a escolha do melhor retransmissor cooperativo para um dado enlace se baseia no conhecimento de todos os canais que compõem o enlace cooperativo, os nós possuirão informações suficientes para calcular a métrica sem nenhuma sobrecarga adicional na camada de rede. Isto é, o nó pode utilizar as informações colhidas pelas camadas inferiores para estimar o comportamento dos canais e calcular a métrica. Além disso, a métrica proposta é aditiva e seu emprego pelos proto-

colos de roteamento não exige mais modificações do que as necessárias ao emprego de outras métricas de roteamento com base na qualidade dos enlaces [72]. Por exemplo, se o protocolo DSR [109] é utilizado, o destino da comunicação deve simplesmente escolher a rota que resulta no menor valor total de CARM. Finalmente, deve-se ressaltar a compatibilidade da métrica CARM com nós não-cooperativos, ou seja, que não implementam o protocolo cooperativo. Estes nós nunca usam retransmissores cooperativos e o cálculo da métrica se baseia somente no enlace lógico não-cooperativo.

Com o intuito de analisar a métrica proposta, são realizadas simulações onde os resultados obtidos pela métrica CARM são comparados aos resultados da métrica não-cooperativa de menor número de saltos (MH) e aos resultados da métrica não-cooperativa de menor número de saltos utilizando a cooperação oportunista (MH-CO). Os cenários de simulação utilizados são similares aos cenários utilizados na Seção 5.2.1, com a diferença de que 5 fontes são escolhidas aleatoriamente em cada rodada de simulação e cada uma destas 5 fontes transmite dados para 5 destinos diferentes. Desta forma, 25 rotas diferentes são selecionadas e analisadas em cada rodada de simulação. Após a seleção das rotas, simula-se o envio de 1000 pacotes através de cada uma destas 25 rotas. Durante a fase de transmissão dos pacotes, apenas 1 pacote é transportado na rede a cada instante. Com isto, evita-se o problema da interferência entre fluxos a fim de simplificar o tratamento do protocolo de cooperação.

Tabela 5.5: Parâmetros de simulação.

| Parâmetro | Valores Utilizados |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Raio de Transmissão (r) | 70 m |
| Área de Simulação (retângulo) | $\pi r \times 6r \text{ m}^2$ |
| Fontes por Rodada | 5 |
| Destinos por Rodada | 5 |
| Pacotes Enviados por Rota | 1000 |
| Fator de Atenuação (β) | 2.7 |
| Frequência da Portadora | 2.4GHz |
| Tamanho dos Pacotes | 1024 bytes |
| Padrão de Desvanecimento | Rayleigh |
| NT_{max} | 7 |

A principal diferença no cenário utilizado para a análise da métrica CARM é que

agora a taxa de transmissão não pode mais variar continuamente entre a taxa máxima e mínima de transmissão. Assim como em interfaces de rede reais, assume-se que a taxa de transmissão utilizada pela interface de rede só pode variar em níveis discretos entre as taxas mínima e máxima. O modo OFDM do padrão IEEE 802.11g [102] define 8 taxas de transmissão mas, a fim de manter a simplicidade do sistema simulado, assume-se neste trabalho que a transmissão pode ser feita em 3 taxas diferentes. Além das taxas mínima e máxima (6 e 54 Mbps, respectivamente), possibilita-se a transmissão numa taxa intermediária de 24 Mbps. Os parâmetros das 3 taxas utilizadas são mostrados na Tabela 5.6. É importante ressaltar que a utilização de apenas uma taxa de transmissão intermediária visa apenas simplificar as simulações e não afeta a generalidade das análises.

Tabela 5.6: Taxas de transmissão utilizadas nas simulações.

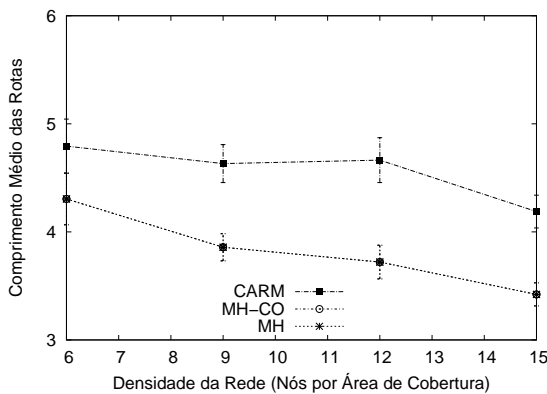
| Taxa de Transmissão | Taxa de Codificação | Bits por Sub-portadora | Capacidade de Interrupção | Tempo de Transmissão |
|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|
| 6 Mbps | 1/2 | 1 | 0.5 bpcu | 1600 μs |
| 24 Mbps | 1/2 | 4 | 2 bpcu | 600 μs |
| 54 Mbps | 3/4 | 6 | 4.5 bpcu | 400 μs |

Utiliza-se a ferramenta MatLAB para as simulações e os resultados apresentados são acompanhados de intervalos de confiança de 95%, representados por barras verticais nos gráficos. A seguir são mostrados os resultados obtidos para o cenário inteiramente cooperativo e posteriormente são mostrados os resultados obtidos em redes híbridas, onde 50% dos nós são cooperativos.

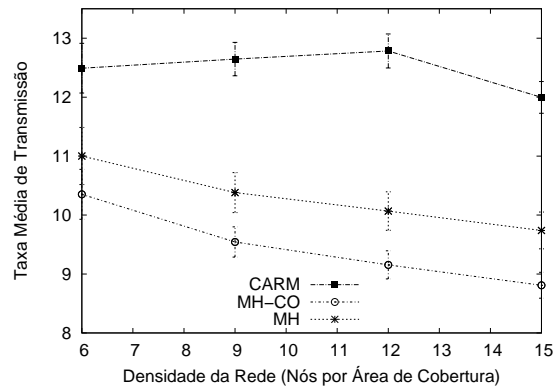
Cenário Inteiramente Cooperativo

A Figura 5.13 mostra os resultados obtidos para o cenário inteiramente cooperativo. O comprimento médio das rotas escolhidas pode ser visto na Figura 5.13(a). Neste cenário, a métrica não-cooperativa de menor número de saltos escolhe caminhos ligeiramente menores que a métrica cooperativa proposta. Deve-se destacar que o uso da cooperação oportunista não altera o tamanho da rota escolhida uma vez que o algoritmo de roteamento usado é o convencional de menor número de saltos não levando em conta as possibilidades de transmissões cooperativas. Assim as curvas MH (*MinHop* sem cooperação) e MH-CO

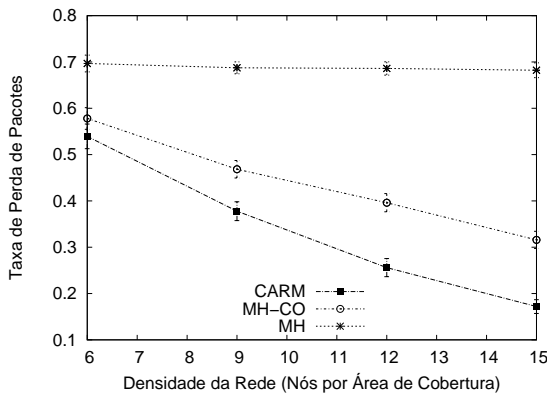
(*MinHop* com cooperação oportunista) são sobrepostas. Assim como pôde ser constatado nas análises da Seção 5.2.1, o comprimento médio das rotas é reduzido à medida em que a densidade da rede aumenta. No caso da métrica CARM, esta redução se deve à maior probabilidade de se encontrar saltos mais longos com boa qualidade, pois mais retransmissores cooperativos ficam disponíveis. Para MH e MH-CO, a redução é resultado de rotas que se desviam menos de uma linha reta ligando os nós fonte e destino.



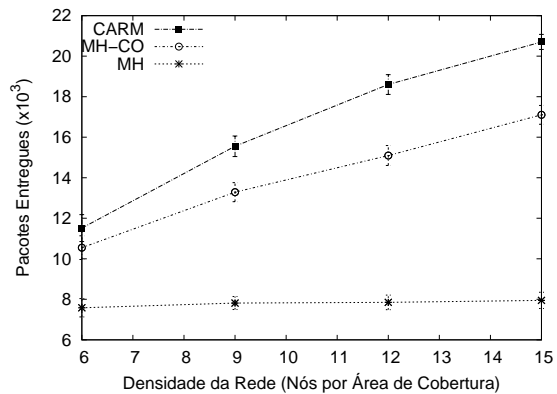
(a) Tamanho médio da rota.



(b) Taxa média de transmissão para as transmissões com sucesso.



(c) Taxa de perda de pacotes.



(d) Pacotes entregues com sucesso.

Figura 5.13: Resultados do cenário inteiramente cooperativo.

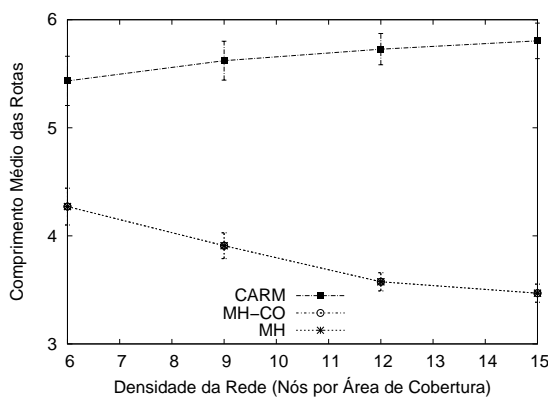
A Figura 5.13(b) mostra a taxa média de transmissão utilizada, levando-se em conta apenas as transmissões bem sucedidas. Esta medida pondera as diferentes taxas de transmissão disponíveis (6, 24 e 54 Mbps) pela frequência com que são utilizadas com sucesso na rede. Neste caso, pode-se perceber que a taxa média de transmissão obtida pela métrica CARM é significativamente superior àquela obtida pela métrica de menor número de saltos (MH) e pelo uso oportunista da cooperação (MH-CO). Um resultado interessante que

pode ser observado nesta figura é que o uso da cooperação oportunista (MH-CO) resulta em uma taxa média de transmissão para as transmissões com sucesso inferior àquela obtida quando a cooperação não é utilizada (MH). Este comportamento pode ser explicado pela característica do protocolo de cooperação que reduz a probabilidade de interrupção quando o canal direto é de má qualidade sem aumentar significativamente a capacidade do enlace quando o canal direto é de boa qualidade. Com isto, transmissões que não seriam possíveis devido à interrupção do enlace se tornam possíveis utilizando baixas taxas de transmissão e aumentam a frequência com a qual a taxa de transmissão mínima é utilizada. Como as transmissões que utilizam as taxas mais elevadas dependem mais do canal direto que do uso da cooperação, o número de transmissões que utilizam as taxas mais elevadas continua aproximadamente o mesmo. Isto resulta num aumento na fração das transmissões que utilizam taxas de transmissão baixas. Por fim, a taxa de perda de pacotes pode ser vista na Figura 5.13(c). Pode-se perceber que quando a cooperação não é utilizada, a taxa de perda se reduz muito pouco com a densidade e continua praticamente constante. Quando a cooperação é utilizada de forma oportunista, percebe-se uma redução na taxa de perdas com o aumento da densidade da rede. Neste caso, o aumento da densidade resulta num aumento no número de retransmissores cooperativos disponíveis, o que reduz a probabilidade de interrupção dos enlaces e, em consequência, a taxa de perda de pacotes obtida. No caso da métrica CARM, observa-se uma redução mais significativa na taxa de perdas com o aumento da densidade da rede. Esta maior redução na taxa de perdas é resultado da escolha de rotas onde existem mais possibilidades de cooperação. A consequência desta redução na taxa de perda pode ser vista na Figura 5.13(d). A utilização da métrica CARM possibilita a entrega de número significativamente mais elevado de pacotes que a utilização de da métrica de número de saltos com ou sem cooperação oportunista.

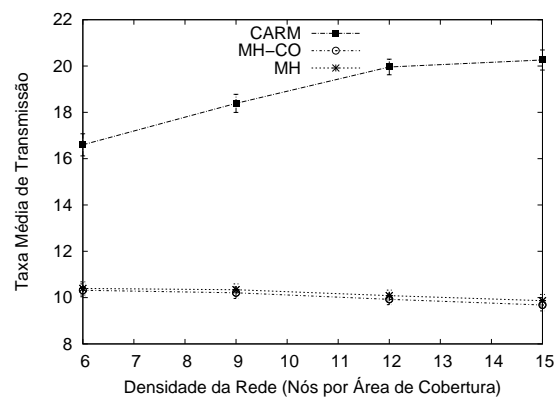
Cenário Híbrido

A análise de redes híbridas, onde apenas parte dos nós são cooperativos, busca avaliar os resultados da métrica CARM em situações de implementação progressiva da cooperação. Deve-se destacar que apenas enlaces entre dois nós cooperativos podem utilizar a

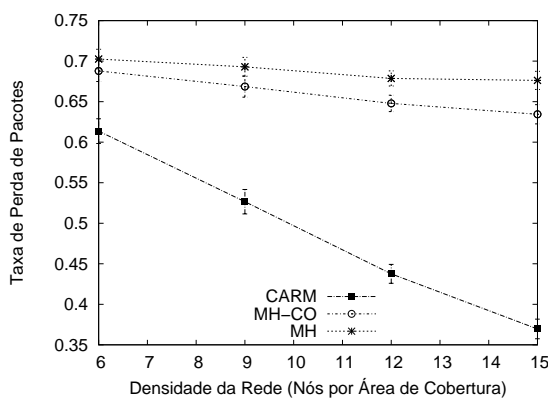
cooperação. Nas redes híbridas, são realizados dois grupos de simulações. No primeiro, fixa-se a porcentagem de nós cooperativos em 50% e varia-se a densidade de nós na rede, enquanto que no segundo a densidade de nós na rede é fixada em 12 nós por área de cobertura e varia-se a porcentagem de nós cooperativos. Os resultados obtidos em função da densidade da rede podem ser vistos na Figura 5.14. Observando-se a Figura 5.14(a), pode-se perceber que o comportamento da curva de métrica CARM é diferente do obtido em redes inteiramente cooperativas. Nas redes híbridas, o uso da métrica CARM resulta num aumento no comprimento médio da rota quando a densidade da rede aumenta. Com o aumento na densidade, alguns enlaces cooperativos passam a apresentar probabilidades de interrupção bastante inferiores àquelas de enlaces que não podem utilizar a cooperação. Além disso, com o aumento da densidade esta diferença de qualidade aumenta, justificando a escolha de rotas com um número superior de enlaces de maior qualidade.



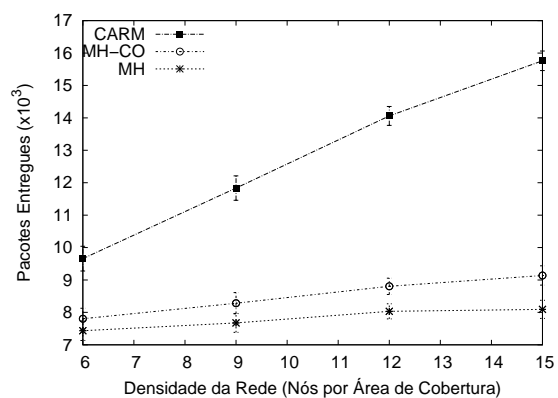
(a) Tamanho médio da rota.



(b) Taxa média de transmissão para as transmissões com sucesso.



(c) Taxa de perda de pacotes.



(d) Pacotes entregues com sucesso.

Figura 5.14: Resultados do cenário com 50% dos nós cooperativos.

A Figura 5.14(b) mostra a taxa média de transmissão para as transmissões realizadas

com sucesso. Neste caso, nota-se uma grande diferença entre os resultados da métrica CARM e os resultados das configurações MH e MH-CO. Dois fatores são responsáveis por essa grande diferença. O primeiro é o melhor uso da cooperação, pois a métrica CARM leva as possibilidades de cooperação em conta no momento da escolha da rota. O segundo é o uso de um número maior de saltos, que resulta na utilização de enlaces mais curtos e, por este motivo, com maior taxa de transmissão média. A métrica CARM proposta usada no algoritmo de roteamento permite a seleção de um caminho da origem até o destino através de enlaces bem mais confiáveis. Isto pode ser comprovado pela Figura 5.14(c) que mostra a taxa de perda de pacotes obtida pelas diferentes configurações e onde a taxa de perdas de pacote com a métrica CARM é muito menor que nas outras configurações. Os resultados também justificam a necessidade de se usar uma métrica de roteamento que leve em conta as possibilidades de cooperação, pois pode-se perceber que os resultados obtidos pela cooperação oportunista são muito próximos daqueles obtidos quando a cooperação não é utilizada. Os resultados também mostram que o uso da cooperação de forma oportunista é ainda menos eficiente em redes híbridas que nas redes inteiramente cooperativas. O motivo desta maior ineficiência é o menor número de enlaces cooperativos disponíveis. Com isto, se torna ainda mais importante a correta escolha da rota para que os benefícios da cooperação possam ser explorados. Como a métrica CARM leva as oportunidades de cooperação em consideração para escolher as rotas, ela continua resultando numa redução acentuada na taxa de perda de pacotes com o aumento da densidade da rede. Assim, o número de pacotes entregues com sucesso, quando a métrica CARM é utilizada, aumenta de forma significativa com o aumento da densidade da rede. Por outro lado, quando a cooperação é utilizada de forma oportunista, o número de pacotes entregues com sucesso é praticamente igual ao número de pacotes entregues quando a cooperação não é utilizada.

Com o intuito de entender como a métrica CARM consegue reduzir a taxa de perda de pacotes mesmo com uma disponibilidade menor de nós cooperativos, a Figura 5.15 mostra o fator de cooperação das rotas escolhidas pela métrica CARM e pela métrica de menor número de saltos quando a cooperação é utilizada de forma oportunista. O fator de cooperação das rotas é definido como o número de roteadores das rotas que são capazes de utilizar a cooperação dividido pelo número de roteadores que não são capazes de usar

a cooperação. Se a escolha da rota não leva em conta as oportunidades de cooperação, espera-se que os roteadores sejam distribuídos igualmente entre os dois grupos, o que resultaria num fator de cooperação próximo de 1. Valores elevados para este fator indicam a escolha de mais nós cooperativos para a rota.

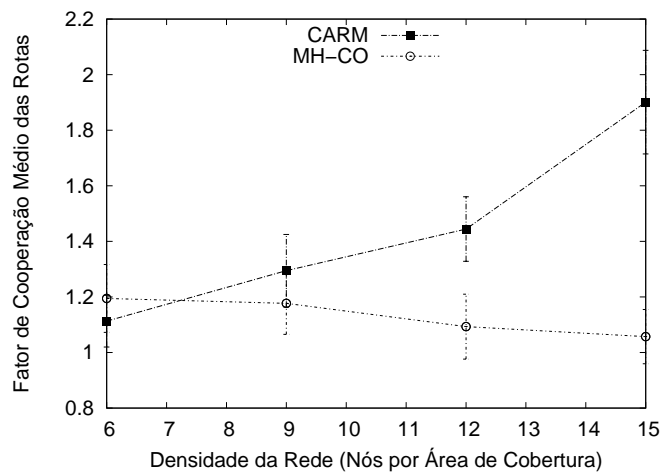


Figura 5.15: Fator de cooperação das rotas.

Como mostrado na Figura 5.15, o uso da métrica de menor número de saltos resulta num fator de cooperação bem próximo de 1 enquanto que a métrica CARM resulta em rotas cujo fator de cooperação aumenta com a densidade da rede. Isto ocorre porque a métrica CARM procura construir rotas com enlaces de maior qualidade e isto é obtido com a utilização de enlaces cooperativos. Com o aumento da densidade, a diferença entre a qualidade dos enlaces cooperativos e a qualidade dos enlaces não-cooperativos aumenta e a métrica CARM busca cada vez mais utilizar enlaces cooperativos.

O segundo grupo de simulações mostra os resultados obtidos em função da porcentagem de nós cooperativos na rede. Os resultados deste grupo de simulações podem ser vistos na Figura 5.16. Como pode-se observar na Figura 5.16(a), à medida que a porcentagem de nós cooperativos diminui, o comprimento médio das rotas selecionadas com base na métrica CARM aumenta. Isto ocorre porque, quando a métrica CARM é utilizada, há uma tendência a buscar rotas que exploram melhor a cooperação e que são formadas por enlaces mais curtos e de melhor qualidade (Figura 5.16(b)). Além disso, a porcentagem de nós cooperativos não possui influência sobre o tamanho da rota selecionada pela métrica de menor número de saltos.

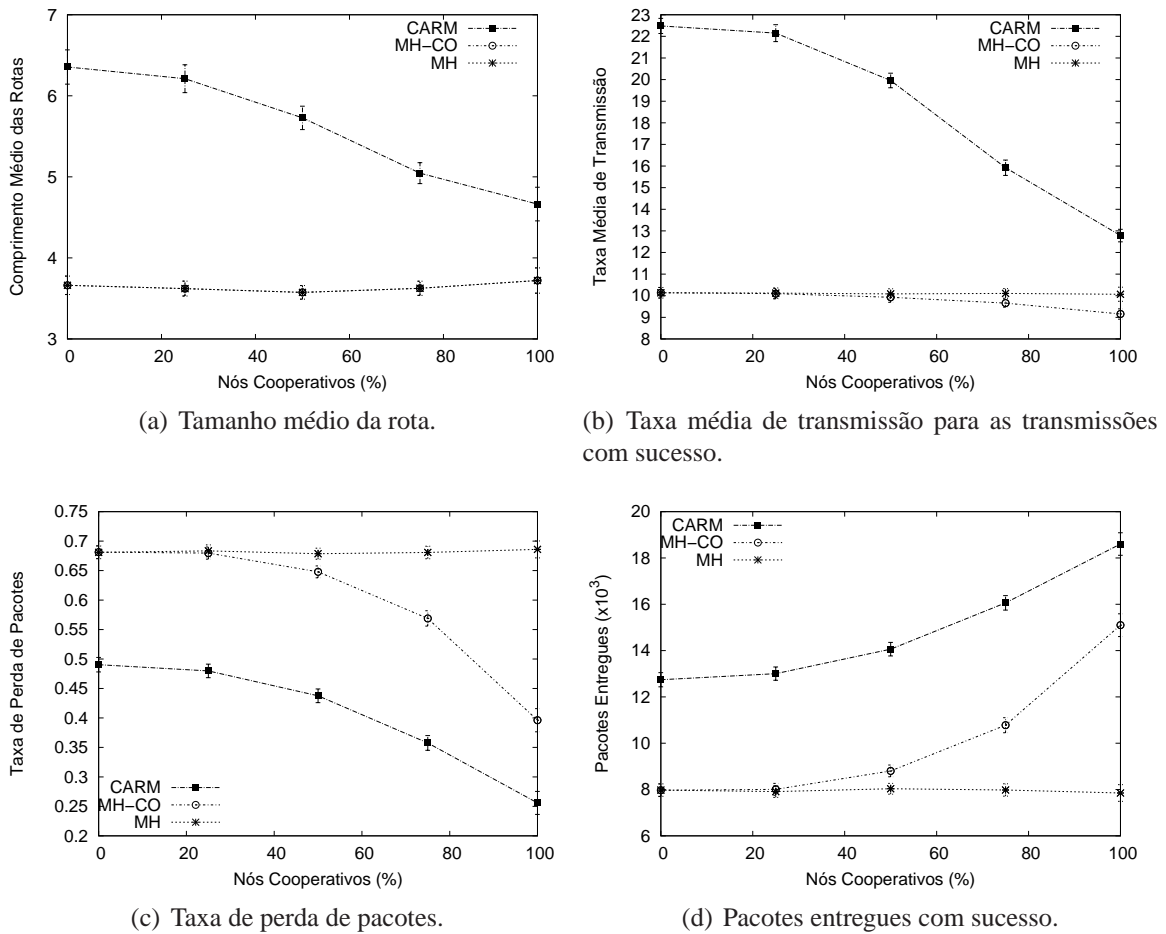


Figura 5.16: Resultados em função da percentagem de nós cooperativos.

A Figura 5.16(c) mostra a taxa de perda de pacotes obtidas pelas diferentes métricas. Quando utiliza-se a métrica de menor número de saltos sem a cooperação oportunista, a percentagem de nós cooperativos não afeta a taxa de perda de pacotes que se mantém em torno de 68%. Quando a cooperação oportunista é utilizada, nota-se que quando a percentagem de nós cooperativos é baixa os resultados são similares àqueles obtidos quando a cooperação não é utilizada. À partir de uma certa percentagem de nós cooperativos a taxa de perda de pacotes começa a reduzir, chegando a 40%. Quando a métrica CARM é utilizada, percebe-se que a taxa de perda de pacotes quando não há nenhum nó cooperativo na rede é próxima de 49%. Esta taxa de perda é significativamente menor que aquela obtida pela métrica de menor número de saltos porque a métrica CARM leva em conta o padrão de desvanecimento dos canais sem fio. Assim, mesmo que não seja possível a utilização da cooperação, a métrica CARM leva em conta a qualidade dos canais diretos entre os diferentes nós para selecionar as rotas. Com o aumento na percentagem de nós coopera-

tivos, a taxa de perdas obtida pela métrica CARM é reduzida. Desta forma, o número de pacotes entregues com sucesso pode ser visto na Figura 5.16(d). Pode-se perceber que a métrica CARM sempre resulta na entrega de um número maior de pacotes.

5.3 Considerações Finais

Uma vez que este trabalho assume o uso de informações obtidas pela subcamada MAC para o cálculo da métrica CARM, a primeira questão que deve ser discutida é a ligação entre esta métrica e diferentes implementações de subcamada MAC cooperativas. Como para os protocolos de roteamento, as subcamadas MAC podem ser divididas em pró-ativas ou reativas com relação à forma com que os retransmissores cooperativos são escolhidos. Um MAC pró-ativo é o caso do protocolo CD-MAC [92], onde o emissor avalia constantemente os possíveis retransmissores cooperativos a fim de conhecer previamente o melhor retransmissor cooperativo para uma dada comunicação. Neste caso, a aplicação da métrica CARM é simples, pois o MAC possui a informação completa sobre todos os canais do enlace cooperativo. Em MACs reativos, como é o caso do trabalho de Bletsas *et al.* [90], o MAC não possui as informações sobre os canais de todos os retransmissores cooperativos, apenas do melhor. A métrica CARM ainda pode ser utilizada neste caso, pois o desenvolvimento nas equações 5.11 e 5.12 buscam exatamente o melhor enlace lógico a cada instante. Assim, se o MAC possui as informações sobre o melhor retransmissor cooperativo a cada instante, ele possui toda a informação necessária ao cálculo da métrica. Para o mecanismo de escolha do retransmissor cooperativo proposto por Bletsas *et al.*, a única modificação necessária é o envio pelo retransmissor cooperativo da informação de estado dos canais quando este se anuncia ao emissor.

Como dito anteriormente, o uso da informação fornecida pela camada MAC sobre todos os canais do enlace cooperativo é uma otimização para reduzir a sobrecarga. No entanto, toda a informação necessária pode ser transmitida através de comunicações na camada de rede. Neste caso, os nós devem estimar somente os canais para seus vizinhos diretos (próximo tópico de discussão) e difundir esta informação para todos os seus vizinhos diretos. As medidas a respeito dos canais que ligam o nó aos vizinhos diretos

fornece as informações sobre os canais h_{SD} e h_{SR} da Figura 5.12, enquanto que a informação difundida pelos vizinhos fornece as informações sobre os canais h_{RD} , pois o retransmissor cooperativo deve ser um vizinho em comum do emissor e do receptor.

Durante as análises realizadas em redes cooperativas sempre se assumiu o desvanecimento do tipo Rayleigh. Embora este seja considerado o pior tipo de canal, ele não é o mais difícil de ser parametrizado, pois só possui um parâmetro, sua SNR média. No entanto, mesmo para canais com distribuições mais complexas como o canal do tipo Ricean, é possível realizar a correta estimação de seus parâmetros. Existem trabalhos na literatura que tratam deste problema [110, 111].

A fim de preservar a generalidade dos resultados, a métrica CARM não foi acoplada a nenhuma implementação específica a nível físico e MAC. No entanto, deve-se destacar que a métrica CARM pode ser otimizada uma vez ligada a camadas inferiores específicas. As simulações apresentadas neste trabalho utilizam modelos simplificados baseados na capacidade dos canais e probabilidades de interrupção, mas, para pilhas mais específicas de protocolos, o modelo pode, por exemplo, ser estendido para trabalhar com a BER ou a PER. Além disso, a interferência entre nós pode ser analisada de forma mais detalhada.

Por fim deve-se ressaltar que o foco maior desta parte do trabalho são as redes ad hoc, mas que estes resultados também podem ser aplicados a casos específicos de redes em malha onde os nós possuem as mesmas capacidades dos nós ad hoc. Em casos onde os nós que compõem a rede em malha possuem funcionalidades extras, a proposta pode ser adaptada para buscar um aumento no desempenho. No caso das redes de sensores, a aplicação dos resultados deve ser alvo de uma análise mais detalhada, pois estudos mostram que o uso eficiente de técnicas de cooperação em redes de sensores está sujeito a condições particulares [112].

Capítulo 6

Conclusões

AS redes sem fio de múltiplos saltos possuem um alcance maior que as redes baseadas em células de comunicação e possibilitam a formação de uma rede de comunicação em áreas onde não existe nenhuma infra-estrutura pré-instalada. O custo reduzido e aplicações em ambientes inóspitos são os dois fatores primordiais do emprego das redes de múltiplos saltos. No entanto, múltiplos enlaces sem fio acrescentam mais dificuldades às comunicações sem fio que são suscetíveis a interferências, forte atenuação e desvanecimentos causados por eventuais obstáculos. Além disso, em muitos cenários de aplicação destas redes, a conservação da energia é essencial, pois se busca que a rede permaneça operacional por longos períodos de tempo e a substituição ou recarregamento das baterias pode ser um processo custoso ou impraticável. Assim, este trabalho foca o aumento da eficiência das redes sem fio de múltiplos saltos.

Na primeira parte deste trabalho é proposto um mecanismo para reduzir o volume de dados enviado por nós sensores em aplicações de estimação de campo. Estas aplicações se baseiam no envio contínuo de dados e, por isso, podem resultar num consumo elevado de energia, pois a transmissão de dados é a tarefa mais energeticamente custosa nas redes de sensores. A idéia chave do mecanismo proposto é de trocar transmissão de dados por processamento local. São propostos algoritmos para a camada aplicação que determinam se as amostras obtidas diferem muito do comportamento esperado. Se a amostra for suficientemente diferente do comportamento esperado, a amostra é enviada, caso contrário, a amostra é descartada ao mesmo tempo que é utilizada para calcular o comportamento

esperado para o futuro. Quando uma amostra é descartada, o nó sorvedouro assume que o processo se comporta como o esperado. O efeito deste mecanismo é transformar a aplicação de estimação de campo, normalmente baseada no envio contínuo de dados, numa aplicação que envia dados com base no acontecimento de eventos de interesse. Neste contexto, um evento de interesse é uma amostra que destoe acima de um determinado limiar do comportamento esperado para o processo.

Inicialmente, os algoritmos propostos são analisados com base em dados sintéticos. Nas análises realizadas a variância temporal do processo é obtida através da modificação de parâmetros do modelo sintético. Os resultados mostram que a variância temporal do processo é fator determinante no desempenho dos algoritmos propostos, o que demonstra a importância da avaliação dos algoritmos com dados reais. Desta forma, são utilizados dados obtidos por uma estação meteorológica para uma avaliação mais detalhada dos algoritmos. Nesta análise, são consideradas duas métricas: a fração de amostras enviadas e o erro médio na reconstrução do processo no nó sorvedouro. Os resultados obtidos mostram um compromisso entre a redução no número de amostras enviadas e o erro gerado na reconstrução do processo. Para configurações onde o erro máximo permitido por amostra é baixo, a redução no número de amostras enviadas também é pequena. Com o aumento do erro máximo permitido na reconstrução, obtêm-se reduções mais significativas no número de amostras enviadas.

A supressão de parte das amostras dificulta a sincronização dos dados recebidos pelo nó sorvedouro, motivando a proposta de um protocolo de transporte específico. O protocolo proposto, denominado EDFE (*Event-Driven Field-Estimation*), é capaz de transportar as amostras selecionadas pelo algoritmo da camada aplicação de forma eficiente e de fornecer informações temporais suficientes para a correta reconstrução do processo no nó sorvedouro. De acordo com o tipo de informação transportada, o protocolo EDFE define dois tipos de pacotes: EBP e RP. Os pacotes do tipo EBP (*Expected Behavior Packet*) transportam os vetores de comportamento esperado que são utilizados pelo nó sorvedouro para reconstruir o processo quando amostras são suprimidas. Os pacotes do tipo RP (*Refining Packets*) transportam as amostras de refinamento, ou seja, as amostras que diferem do comportamento esperado acima do limiar configurado e que devem ser enviada para manter a qualidade da reconstrução. Os pacotes EBP são enviados periodicamente e contêm,

além da marcação temporal (*timestamp*), todas as informações de controle do protocolo. Os pacotes RP, por outro lado, transportam apenas *timestamps*, amostras de refinamento e bytes de supressão, que indicam quando amostras são suprimidas entre amostras de refinamento consecutivas.

O mecanismo proposto é comparado com um esquema de estimação de campo que utiliza a marcação otimizada, ou seja, que envia todas as amostras, mas informa apenas o *timestamp* da primeira amostra de cada pacotes para reduzir a sobrecarga produzida. Os resultados mostram que na faixa de parâmetros analisada o protocolo resulta numa redução de até 50% no número de pacotes enviados ao sorvedouro. Mesmo em condições onde o erro máximo permitido é restrito a 1%, a redução no número de pacotes se aproxima a 10%. As simulações realizadas visam analisar também a robustez do mecanismo proposto às perdas na rede. Observa-se que o erro na reconstrução varia linearmente com a taxa de perda de pacotes da rede e que os parâmetros utilizados na configuração do algoritmo da camada aplicação influenciam a robustez do mecanismo proposto às perdas na rede. Quanto maior o intervalo entre envios consecutivos dos vetores de comportamento esperado, menor a robustez do mecanismo e quanto maior a influência do histórico do processo na obtenção dos vetores de comportamento esperado, maior a robustez do mecanismo.

Na segunda parte deste trabalho, foca-se o roteamento em redes com diversidade cooperativa. A idéia chave é incluir informações sobre as possibilidades de cooperação no roteamento a fim de selecionar rotas onde a cooperação pode ser explorada para melhorar o desempenho da rede. Para alcançar esse objetivo, o roteamento deve levar em conta três fatores: o padrão de desvanecimento dos canais sem fio, as características do protocolo de cooperação utilizado a nível físico e os retransmissores cooperativos disponíveis em cada enlace cooperativo. Na primeira etapa realiza-se uma análise em redes convencionais, que não utilizam a diversidade cooperativa, sobre a utilização de informações sobre o desvanecimento dos canais para selecionar rotas mais estáveis. Numa segunda etapa, são analisados diferentes tipos de políticas de roteamento cooperativo e na etapa final desenvolve-se uma métrica de roteamento cooperativo que se baseia em informações médias dos canais para obter informações sobre o desempenho a longo prazo dos enlaces cooperativos.

A análise em redes convencionais tem como objetivo desenvolver uma métrica baseada na qualidade dos canais que utilize informações sobre o comportamento a longo prazo dos enlaces, de modo a descrever mais precisamente suas características. A métrica DBETX (*Distribution-Based Expected Transmission Count*) se baseia em medidas realizadas pela camada física para estimar a função de densidade de probabilidade (pdf) da SNIR (*Signal-to-Noise-plus Interference Ratio*) dos enlaces. Com base nesta pdf, a métrica DBETX é proporcional a $E[1/P_{Suc}]$ e inversamente proporcional à probabilidade do enlace apresentar altas perdas.

São realizadas simulações para avaliar o desempenho da métrica DBETX. Os resultados da métrica DBETX se mostram melhores que os obtidos pela métrica de qualidade de enlace ETX (*Expected Transmission Count*) em cenários onde o padrão de desvanecimento de diferentes canais são variados. Nestes cenários, a métrica DBETX seleciona rotas mais estáveis cujos enlaces possuem menor probabilidade de perda de pacotes. Os ganhos obtidos pela métrica DBETX aumentam com a densidade da rede, pois mais opções de roteamento são disponíveis.

A partir dos resultados obtidos tornam-se evidentes as vantagens para redes convencionais de uma política de roteamento que leva em conta o comportamento a longo prazo dos enlaces. Busca-se, então, avaliar as vantagens desta política quando a diversidade cooperativa é utilizada. São comparadas diferentes políticas de roteamento cooperativo num ambiente com desvanecimento. Os resultados desta política são comparados aos resultados obtidos pela utilização da cooperação de forma oportunista em rotas selecionadas pela métrica de menor caminho e aos resultados de uma política gulosa de roteamento cooperativo. A política de roteamento gulosa escolhe as rotas com base nas condições momentâneas dos canais e não leva em conta o comportamento a longo prazo dos enlaces. São analisadas redes inteiramente cooperativas, assim como redes híbridas onde apenas parte dos nós suporta a cooperação. Este último tipo de cenário representa situações de implantação gradual da cooperação, que são esperadas na fase inicial de implantação da técnica de comunicação cooperativa.

Os resultados obtidos mostram que, quando as variações dos canais ocorrem a uma velocidade elevada em comparação ao tempo de resposta do roteamento, a política de

roteamento gulosa é pouco eficiente. Esta política se baseia em informações limitadas sobre as possibilidades de cooperação nos enlaces cooperativos. Assim, ao formar rotas com enlaces que apresentem uma capacidade instantânea elevada, a política gulosa pode estar selecionando enlaces com alta probabilidade de interrupção. A simples utilização da cooperação de forma oportunista se mostra ainda menos eficiente, pois apresenta uma grande dependência da rota não-cooperativa que é utilizada como base. Esta rota pode ser composta por enlaces com pouca ou nenhuma oportunidade de cooperação. Em redes inteiramente cooperativas, uma política de roteamento que leva em conta o comportamento a longo prazo dos canais resulta numa probabilidade de sucesso fim-a-fim entre 15 e 19% superior à obtida pela política gulosa, dependendo da densidade da rede. Em redes híbridas, existem menos oportunidades de cooperação e a correta escolha da rota é ainda mais importante. Neste caso, a política proposta resulta numa probabilidade de sucesso fim-a-fim entre 38 e 74% superior à obtida pela política gulosa.

Finalmente, busca-se desenvolver uma métrica de roteamento cooperativo que leve em conta o comportamento a longo prazo dos enlaces cooperativos, mas que possa ser calculada de forma distribuída e sem necessitar do conhecimento perfeito do comportamento do enlace cooperativo. Como resultado, propõe-se a métrica de roteamento CARM (*Cooperation-Aware Routing Metric*) que é calculada a partir de informações sobre os canais sem fio individualmente. Estas informações são unificadas para a obtenção das probabilidades do enlace cooperativo suportar as diferentes taxas de transmissão disponíveis. A partir destas probabilidades, estima-se o tempo médio de transmissão de um pacote através do enlace cooperativo. A métrica proposta é comparada ao roteamento de menor caminho sem o uso da cooperação e ao roteamento de menor caminho com o uso da cooperação de forma oportunista, tanto em cenários inteiramente cooperativos como em cenários híbridos.

Em redes inteiramente cooperativas, os resultados mostram que o roteamento convencional sem o uso da cooperação resulta numa alta taxa de perda que não é afetada pelo aumento da densidade da rede enquanto que a cooperação oportunista parte de uma elevada taxa de perda que é reduzida com o aumento da densidade. O uso da métrica CARM, por outro lado, resulta em reduções significativas na taxa de perda quando a densidade da rede aumenta. Em redes híbridas, os resultados obtidos pela cooperação oportunista se

aproximam dos resultados obtidos por redes que não utilizam a cooperação. A métrica CARM, por outro lado, ainda é capaz de aproveitar a maior disponibilidade de retransmissores cooperativos gerada pelo aumento da densidade e reduzir significativamente a taxa de perda de pacotes. Uma análise mais detalhada revela que a proporção de nós cooperativos escolhidos como roteadores quando a métrica CARM é utilizada aumenta à medida que a densidade da rede aumenta. Isso indica que os nós cooperativos assumem uma maior parcela do trabalho de roteamento e melhoram o desempenho da rede como um todo.

Existem diferentes caminhos para dar prosseguimento às pesquisas desenvolvidas neste trabalho. Um ponto interessante é o desenvolvimento de um mecanismo dinâmico para a configuração do protocolo EDFE. O mecanismo pode ser implementado em todos os nós sensores ou em apenas alguns nós com maior poder computacional que se tornariam responsáveis pela configuração de um grupo de nós com menor poder computacional. Outra direção de pesquisa possível é a análise do roteamento cooperativo em redes com mobilidade onde as condições médias dos canais sem fio variam rapidamente. Nestas situações, há necessidade de uma métrica adequada, pois as estimativas dos canais devem ser feitas num período curto de tempo.

Bibliografia

- [1] RAHNEMA, M. Overview of the GSM system and protocol architecture. *IEEE Communications Magazine* (abril de 1993).
- [2] IEEE. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. IEEE Standard 802.11, 1999.
- [3] IEEE. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Higher-speed physical layer extension in the 2.4 GHz band. IEEE Standard 802.11b, 1999.
- [4] AKYILDIZ, I. F., SU, W., SANKARASUBRAMANIAM, Y., E CAYIRCI, E. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks* 38 (2002), 393–422.
- [5] SCHILLER, J. *Mobile Communications*, second ed. Addison Wesley, 2003.
- [6] AKYILDIZ, I. F., E WANG, X. A survey on wireless mesh networks. *IEEE Radio Communications* (setembro de 2005).
- [7] INTANAGONWIWAT, C., GOVINDAN, R., ESTRIN, D., HEIDEMANN, J., E SILVA, F. Directed diffusion for wireless sensor networking. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 11, 1 (fevereiro de 2003), 2 – 16.
- [8] BHARDWAJ, M., E CHANDRAKASAN, A. P. Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments. Em *IEEE INFOCOM* (junho de 2002).
- [9] ZHU, J., CHEN, S., BENSAOU, B., E HUNG, K.-L. Tradeoff between lifetime and rate allocation in wireless sensor networks: A cross layer approach. Em *IEEE INFOCOM* (maio de 2007), pp. 267–275.

- [10] POTTIE, G. P., E KAISER, W. J. Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM* 43, 5 (maio de 2000), 51–58.
- [11] FEENEY, L. M., E NILSSON, M. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment. Em *IEEE INFOCOM* (março de 2001).
- [12] YE, W., HEIDEMANN, J., E ESTRIN, D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. Em *IEEE INFOCOM* (junho de 2002).
- [13] AL-KARAKI, J. N., E KAMAL, A. E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *IEEE Wireless Communications* 11, 6 (dezembro de 2004).
- [14] FASOLO, E., ROSSI, M., WIDMER, J., E ZORZI, M. In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: a survey. *IEEE Wireless Communications* 14, 2 (abril de 2007), 70–87.
- [15] HILL, J., HORTON, M., KLING, R., E KRISHNAMURTHY, L. The platforms enabling wireless sensor networks. *Communications of the ACM* 47, 6 (junho de 2004), 41–46.
- [16] PUCCINELLI, D., E HAENGGI, M. Wireless sensor networks: applications and challenges of ubiquitous sensing. *IEEE Circuits and Systems Magazine* 5, 3 (2005). Third Quarter.
- [17] MOTEIV. *Tmote Mini Datasheet*. Moteiv Corporation, 2007.
- [18] SOLIS, I., E OBRACZKA, K. Isolines: energy-efficient mapping in sensor networks. Em *IEEE ISCC* (junho de 2005).
- [19] ERRAMILLI, V., MATTA, I., E BESTAVROS, A. On the interaction between data aggregation and topology control in wireless sensor networks. Em *IEEE SECON* (outubro de 2004).
- [20] GUPTA, H., NAVDA, V., DAS, S. R., E CHOWDHARY, V. Efficient gathering of correlated data in sensor networks. Em *ACM MobiHoc* (maio de 2005).

- [21] DING, M., CHENG, X., E XUE, G. Aggregation tree construction in sensor networks. Em *IEEE VTC* (outubro de 2003).
- [22] ALBERT, H., KRAVETS, R., E GUPTA, I. Building trees based on aggregation efficiency in sensor networks. Em *Med-Hoc-Net* (junho de 2006).
- [23] LINDSEY, S., RAGHAVENDRA, C., E SIVALINGAM, K. M. Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 3, 9 (setembro de 2002), 924–935.
- [24] HEINZELMAN, W. B., CHANDRAKASAN, A. P., E BALAKRISHNAN, H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 1, 4 (outubro de 2002), 660–670.
- [25] YAO, Y., E GEHRKE, J. Query processing for sensor networks. Em *ACM CIDR* (janeiro de 2003).
- [26] PERKINS, C., E ROYER, E. Ad-hoc on-demand distance vector routing. Em *2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications* (fevereiro de 1999), pp. 90–100.
- [27] NATH, S., GIBBONS, P. B., SESHAN, S., E ANDERSON, Z. R. Synopsis diffusion for robust aggregation in sensor networks. Em *2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems* (novembro de 2004), pp. 250 – 262.
- [28] MANJHI, A., NATH, S., E GIBBONS, P. B. Tributaries and deltas: efficient and robust aggregation in sensor network streams. Em *ACM SIGMOD International Conference on Management of Data* (junho de 2005), pp. 287 – 298.
- [29] GARCÍA-HERNÁNDEZ, C. F., IBARGÜENGOYTIA-GONZÁLEZ, P. H., GARCÍA-HERNÁNDEZ, J., E PÉREZ-DÍAZ, J. A. Wireless sensor networks and applications: a survey. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security* 7, 3 (março de 2007), 264–273.
- [30] RÖMER, K., E MATTERN, F. The design space of wireless sensor networks. *IEEE Wireless Communications* 11, 6 (dezembro de 2004), 54 – 61.

- [31] TILAK, S., ABU-GHAZALEH, N. B., E HEINZELMAN, W. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM Mobile Computing and Communications Review (MC2R)* (2002).
- [32] WARNEKE, B., LAST, M., LIEBOWITZ, B., E PISTER, K. S. J. Smart dust: communicating with a cubic-millimeter computer. *Computer* 34, 1 (janeiro de 2001), 44–51.
- [33] UC BERKELEY AND MLB Co. *UCB/MLB 29 Palms UAV-Dropped Sensor Network Demo*, 2001. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/pister/29Palms0103/> - visitado em dezembro de 2007.
- [34] SIMON, G., MARÓTI, M., ÁKOS LÉDECZI, BALOGH, G., KUSY, B., NÁDAS, A., PAP, G., SALLAI, J., E FRAMPTON, K. Sensor network-based countersniper system. Em *2nd international conference on Embedded networked sensor systems* (novembro de 2004), pp. 1–12.
- [35] WANG, H., ELSON, J., GIROD, L., E AND KUNG YAO, D. E. Target classification and localization in habitat monitoring. Em *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2003)* (abril de 2003).
- [36] BALDUS, H., KLABUNDE, K., E MUESCH, G. Reliable set-up of medical body-sensor networks. Em *1st European Workshop on Wireless Sensor Networks - EWSN'04* (janeiro de 2004).
- [37] ANTIFAKOS, S., MICHAHELLES, F., E SCHIELE, B. Proactive instructions for furniture assembly. Em *Ubicomp* (setembro de 2002).
- [38] RIEM-VIS, R. Cold chain management using an ultra low power wireless sensor network. Em *WAMES* (junho de 2004).
- [39] KUMAR, A., ISHWAR, P., E RAMCHANDRAN, K. On distributed sampling of smooth non-bandlimited fields. Em *Information Processing In Sensor Networks - IPSN'04* (abril de 2004), pp. 89–98.

- [40] BECKWITH, R., TEIBEL, D., E BOWMEN, P. Pervasive computing and proactive agriculture. Em *2nd International Conference on Pervasive Computing* (abril de 2004).
- [41] MAINWARING, A., POLASTRE, J., SZEWCZYK, R., E CULLER, D. Wireless sensor networks for habitat monitoring. Em *ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications* (setembro de 2002), pp. 88 – 97.
- [42] WILLETT, R., MARTIN, A., E NOWAK, R. Backcasting: adaptive sampling for sensor networks. Em *Information Processing In Sensor Networks - IPSN'04* (abril de 2004), pp. 124 – 133.
- [43] NOWAK, R., MITRA, U., E WILLETT, R. Estimating inhomogeneous fields using wireless sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 22, 6 (2004), 999– 1006.
- [44] RAHIMI, M., PON, R., KAISER, W. J., SUKHATME, G. S., ESTRIN, D., E SIRIVASTAVA, M. Adaptive sampling for environmental robotics. Em *IEEE International Conference on Robotics & Automation* (abril de 2004), pp. 3537–3544.
- [45] BATALIN, M. A., RAHIMI, M., Y.YU, D.LIU, A.KANSAL, SUKHATME, G., KAISER, W., M.HANSEN, POTTIE, G. J., SRIVASTAVA, M., E ESTRIN, D. Towards event-aware adaptive sampling using static and mobile nodes. Relatório Técnico 38, Center for Embedded Networked Sensing - CENS, 2004.
- [46] CHEN, H., LI, J., E MOHAPATRA, P. Race: Time series compression with rate adaptivity and error bound for sensor networks. Em *IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems - MASS 2004* (outubro de 2004).
- [47] LAZARIDIS, I., E MEHROTRA, S. Capturing sensor-generated time series with quality guarantees. Em *International Conference on Data Engineering (ICDE'03)* (março de 2003).
- [48] WEISER, M., E BROWN, J. S. The coming age of calm technology. Em *Beyond calculation: the next fifty years*. Copernicus, 1997, pp. 75 – 85.

- [49] GEORIO. *Alerta Rio*. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro, 2003. <http://www2.rio.rj.gov.br/georio/site/alerta/quadro.asp> - visitado em dezembro de 2004.
- [50] CUNHA, D. O., LAUFER, R. P., MORAES, I. M., BICUDO, M. D. D., VELLOSO, P. B., E DUARTE, O. C. M. B. A bio-inspired field estimation scheme for wireless sensor networks. *Annals of Telecommunications* 60, 7-8 (2005).
- [51] THE MATHWORKS, INC. *The MathWorks - MatLAB and Simulink for Technical Computing*, 1994-2007. <http://www.mathworks.com/> - visitado em dezembro de 2007.
- [52] YU, Y., ESTRIN, D., RAHIMI, M., E GOVINDAN, R. Using more realistic data models to evaluate sensor network data processing algorithms. Em *29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN'04)* (2004), pp. 569–570.
- [53] CUNHA, D. O., E DUARTE, O. C. M. B. Um esquema bio-inspirado para estimação de campo com redes de sensores sem fio. Em *XXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC'2005* (maio de 2005).
- [54] CUNHA, D. O., LAUFER, R. P., MORAES, I. M., BICUDO, M. D. D., VELLOSO, P. B., E DUARTE, O. C. M. B. Bio-inspired field estimation with wireless sensor networks. Em *12th International Conference on Telecommunications - ICT'2005* (maio de 2005).
- [55] CUNHA, D. O., DUARTE, O. C. M. B., E PUJOLLE, G. Event-driven field estimation for wireless sensor networks. Em *IFIP/IEEE International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks - MWCN 2006* (agosto de 2006).
- [56] UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. *Departamento de Ciências Exatas*. LCE - ESALQ - USP, 2005. <http://www.lce.esalq.usp.br/indexn.html> - visitado em fevereiro de 2005.

- [57] SZEWCZYK, R., POLASTRE, J., MAINWARING, A., E CULLER, D. Lessons from a sensor network expedition. Em *1st European Workshop on Wireless Sensor Networks - EWSN'04* (janeiro de 2004).
- [58] LIN, C.-K., SHARMA, D., ZADOROZHNY, V., E KRISHNAMURTHY, P. Efficient data delivery in wireless sensor networks: Cross-layer optimization versus csma/ca. *International Journal Ad Hoc and Sensor Wireless Networks* 6, 2 (2007).
- [59] CUNHA, D. O., DUARTE, O. C. M. B., E PUJOLLE, G. An efficient data transport protocol for event-driven field-estimation on sensor networks. Em *IFIP International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks - MWCN 2007* (setembro de 2007).
- [60] HAYKIN, S., E MOHER, M. *Modern Wireless Communications*. Prentice Hall, 2005.
- [61] PROAKIS, J. G. *Digital Communications*, fourth ed. McGraw Hill Higher Education, 2000.
- [62] DRAVES, R., PADHYE, J., E ZILL, B. Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless networks. Em *SIGCOMM* (2004).
- [63] BISWAS, S., E MORRIS, R. Exor: Opportunistic multi-hop routing for wireless networks. Em *SIGCOMM* (2005).
- [64] CHOUDHURY, R. R., E VAIDYA, N. H. MAC-layer anycasting in ad hoc networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 34, 1 (2004), 75–80.
- [65] RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*, second ed. Prentice Hall PTR, 2001.
- [66] SANCHEZ-GARCIA, J., E SMITH, D. R. Capture probability in ricean fading channels with power control in the transmitters. *IEEE Transactions on Communications* 50, 12 (dezembro de 2002).
- [67] SKLAR, B. Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems Part I: Characterization. *IEEE Communications Magazine* (julho de 1997).

- [68] CAMPISTA, M. E. M., MORAES, I. M., ESPÓSITO, P. M., AMODEI JR, A., CUNHA, D. O., COSTA, L. H., E DUARTE, O. C. M. B. The ad hoc return channel: a low-cost solution for brazilian interactive digital tv. *IEEE Communications Magazine* 45, 1 (janeiro de 2007).
- [69] DAS, S. R., PERKINS, C. E., E ROYER, E. M. Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks. Em *IEEE INFOCOM* (2000).
- [70] SCHMITZ, R., TORRENT-MORENO, M., HARTENSTEIN, H., E EFFELSBERG, W. The impact of wireless radio fluctuations on ad hoc network performance. Em *IEEE LCN* (2004).
- [71] ADYA, A., BAHL, P., PADHYE, J., WOLMAN, A., E ZHOU, L. A multi-radio unification protocol for IEEE 802.11 wireless networks. Em *BroadNets* (2004).
- [72] COUTO, D. D., AGUAYO, D., BICKET, J., E NORRIS, R. High-throughput path metric for multi-hop wireless routing. Em *MOBICOM* (2003).
- [73] HAEGGI, M. On routing in random rayleigh fading networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 4, 4 (julho de 2005).
- [74] KOKSAL, C. E., E BALAKRISHNAN, H. Quality aware routing in time-varying wireless mesh networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 24, 11 (novembro de 2006).
- [75] DRAVES, R., PADHYE, J., E ZILL, B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. Em *MobiCom* (2004).
- [76] CAMPISTA, M. E. M., PASSOS, D. G., ESPOSITO, P. M., MORAES, I. M., ALBUQUERQUE, C. V. N., SAADE, D. C. M., RUBINSTEIN, M. G., COSTA, L. H. M. K., E DUARTE, O. C. M. B. Routing metrics and protocols for wireless mesh networks. *IEEE Network* 1, 22 (janeiro de 2008).
- [77] VILLELA, B. A. M., E DUARTE, O. C. M. B. Uma análise de protocolos de roteamento sob demanda de redes ad hoc. Em *SBT'2003* (outubro de 2003).

- [78] ABOLHASAN, M., WYSOCKI, T. A., E DUTKIEWICZ, E. A review of routing protocols for mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks* 2, 1 (janeiro de 2004), 1–22.
- [79] GESBERT, D., SHAFI, M., SHAN SHIU, D., SMITH, P. J., E NAGUIB, A. From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 21, 3 (2003), 281–302.
- [80] PAULRAJ, A. J., GORE, D. A., NABAR, R. U., E BÖLCSKEI, H. An overview of MIMO communications - a key to gigabit wireless. Em *Proceedings of the IEEE* (fevereiro de 2004), pp. 198–218.
- [81] NOSRATINIA, A., HUNTER, T. E., E HEDAYAT, A. Cooperative communication in wireless networks. *IEEE Communications Magazine* 42, 10 (outubro de 2004).
- [82] SENDONARIS, A., ERKIP, E., E AAZHANG, B. User cooperation diversity, Part I: System description. *IEEE Transactions on Communications* 51, 11 (novembro de 2003).
- [83] SENDONARIS, A., ERKIP, E., E AAZHANG, B. User cooperation diversity, Part II: Implementation aspects and performance analysis. *IEEE Transactions on Communications* 51, 11 (novembro de 2003).
- [84] LANEMAN, J. N., TSE, D. N. C., E WORNELL, G. W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Transactions on Information Theory* 49, 10 (dezembro de 2004).
- [85] ZHAO, Z., E BELFIORE, J.-C. Application of cooperative diversity in 802.11a ad-hoc networks. Em *The First International Workshop on Wireless Mesh and Ad Hoc Networks - WiMAN* (2007).
- [86] NI, W., SHEN, G., JIN, S., FAHLDIECK, T., E MUENZNER, R. *Cooperative Relay in IEEE 802.16j MMR*. IEEE 802.16 Session #43 Tel Aviv, Israel, 2006. www.ieee802.org/16/relay/contrib/C80216j-06_006r1.pdf - visitado em janeiro de 2008.

- [87] IEEE. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications - high-speed physical layer in the 5 GHz band. IEEE Standard 802.11a, 1999.
- [88] NABAR, R., BÖLCSKEI, H., E KNEUBÜHLER, F. Fading relay channels: Performance limits and space-time signal design. *IEEE Journal on Selected Areas of Communication* 22, 6 (agosto de 2004).
- [89] HUCHER, C., OTHMAN, G. R.-B., E BELFIORE, J.-C. Adaptive amplify-and-forward cooperative channel. Em *IEEE International Symposium on Information Theory - ISIT2007* (2007).
- [90] BLETSAS, A., KHISTI, A., REED, D. P., E LIPPMAN, A. A simple cooperative diversity method based on network path selection. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 24, 3 (março de 2006).
- [91] WANG, B., HAN, Z., E RAY LIU, K. J. Distributed relay selection and power control for multiuser cooperative communication networks using buyer/seller game. Em *IEEE INFOCOM* (2007).
- [92] MOH, S., YU, C., PARK, S.-M., E KIM, H.-N. CD-MAC: Cooperative diversity mac for robust communication in wireless ad hoc networks. Em *IEEE International Conference on Communications* (2007).
- [93] JAKLLARI, G., KRISHNAMURTHY, S. V., FALOUTSOS, M., KRISHNAMURTHY, P. V., E ERCETIN, O. A framework for distributed spatio-temporal communications in mobile ad hoc networks. Em *IEEE INFOCOM* (2006).
- [94] FANG, X., HUI, T., PING, Z., E NING, Y. Cooperative routing strategies in ad hoc networks. Em *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2005-Spring)* (2005).
- [95] KHANDANI, A. E., ABOUNADI, J., MODIANO, E., E ZHENG, L. Cooperative routing in wireless networks. Em *Allerton Conference on Communications, Control and Computing* (2003).
- [96] BERES, E., E ADVE, R. Cooperation and routing in multi-hop networks. Em *IEEE International Conference on Communications* (2007).

- [97] CUNHA, D. O., DUARTE, O. C. M. B., E PUJOLLE, G. An enhanced routing metric for fading wireless channels. Em *IEEE Wireless Communications and Networking Conference - IEEE WCNC 2008* (agosto de 2008). A ser publicado.
- [98] CUNHA, D. O., DUARTE, O. C. M. B., E PUJOLLE, G. *Uma Análise do Roteamento em Redes com Diversidade Cooperativa e Canais com Desvanecimento*, 2007. Em submissão.
- [99] CUNHA, D. O., DUARTE, O. C. M. B., E PUJOLLE, G. *Cooperation-Aware Routing on Fast Varying Fading Wireless Channels*, 2008. Em submissão.
- [100] CUNHA, D. O., DUARTE, O. C. M. B., E PUJOLLE, G. *Cooperation-Aware Distributed Routing in Multirate Wireless Channels*, 2008. Em submissão.
- [101] KIM, Y. Y., E QI LI, S. Modeling multipath fading channel dynamics for packet data performance analysis. *Wireless Networks* 6, 6 (dezembro de 2000).
- [102] IEEE. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High-speed physical layer in the 2.4 GHz band. *IEEE Standard 802.11g* (2003).
- [103] YOON, D., CHO, K., E LEE, J. Bit error probability of m-ary quadrature amplitude modulation. Em *IEEE VTS-Fall VTC* (2000).
- [104] HO, M.-J., WANG, J., SHELBY, K., E HAISCH, H. IEEE 802.11g OFDM WLAN throughput performance. Em *IEEE VTC-Fall* (2003).
- [105] MOSS, J., FITTON, M., STREET, A. M., BROWN, K. M., CONSTANTINOU, C. C., E EDWARDS, D. J. Spatio-temporal variability analysis of the wideband microcellular environment. Em *IEEE Vehicular Technology Conference* (1998).
- [106] MACLEOD, H., LOADMAN, C., E CHEN, Z. Experimental studies of the 2.4-GHz ISM wireless indoor channel. Em *3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference (CNSR'05)* (2005).
- [107] TORRES, R. P., COBO, B., MAVARES, D., MEDINA, F., LOREDO, S., E ENGELS, M. Measurement and statistical analysis of the temporal variations of a

- fixed wireless link at 3.5 GHz. *Wireless Personal Communications* 37, 1-2 (abril de 2006).
- [108] SKENTOS, N. D., KANATAS, A. G., DALLAS, P. I., E CONSTANTINOU, P. MIMO channel characterization for short range fixed wireless propagation environments. *Wireless Personal Communications* 36, 4 (março de 2006).
- [109] MALTZ, D. A., JOHNSON, D. B., HU., Y. C., E JETCHEVA, J. G. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks. *Trabalho em andamento, draft-ietf-manet-dsr-09.txt* (abril de 2003).
- [110] GREENSTEIN, L. J., MICHELSON, D. G., E ERCEG, V. Moment-method estimation of the ricean k-factor. *IEEE Communications Letters* 3, 6 (junho de 1999).
- [111] TEPEDELENLIOĞLU, C., ABDI, A., E GIANNAKIS, G. B. The ricean k-factor: Estimation and performance analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 2, 4 (julho de 2003).
- [112] CUI, S., GOLDSMITH, A. J., E BAHAI, A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 22, 6 (2004), 1089– 1098.

Annexe A

Résumé de la Thèse

Les annexes qui suivent correspondent au résumé en français de cette thèse qui a pour titre “Réseaux sans fil multi-sauts : protocoles à applications spécifiques et routage orienté vers la diversité coopérative”. Ce résumé est en accord avec la convention de cotutelle établie entre l’Université Pierre et Marie Curie et l’Universidade Federal do Rio de Janeiro.

La thèse est divisée en six chapitres. Le premier chapitre présente les principaux problèmes des réseaux sans fil multi-sauts et fournit une vision générale des deux principales contributions de la thèse : un mécanisme d’estimation de champs orienté événements pour les réseaux de capteurs et une métrique de routage pour les réseaux ad hoc qui utilisent la diversité coopérative.

Le deuxième chapitre présente les réseaux de capteurs soulignant leurs différentes applications. Le chapitre commence par la description des caractéristiques typiques des noeuds capteurs et discute ensuite les techniques d’agrégation de données qui sont utilisées pour réduire la consommation d’énergie. La dernière partie de ce chapitre est dédiée aux applications de ce type de réseau et détaille la recherche à propos de l’application d’estimation de champs.

Un mécanisme pour améliorer la performance de l’application d’estimation de champs est proposé dans le troisième chapitre. Le mécanisme a deux composants : l’algorithme de la couche application, responsable pour choisir les échantillons qui seront envoyés, et

un protocole de transport qui fournit à l'observateur l'information temporelle nécessaire à la reconstruction du procès surveillé. Après une description détaillée de ces composants, les performances du mécanisme sont analysées en utilisant des données réelles obtenues par une station météorologique.

Le chapitre quatre présente une vision générale des réseaux ad hoc et montre comment les variations des canaux sans fil peuvent perturber les communications. Ensuite, nous discutons les métriques utilisées par les protocoles de routage basés sur la qualité des canaux qui existent dans la littérature. Enfin, la technique de diversité coopérative est présentée. D'abord, sont discutés les principaux protocoles nécessaires à l'implémentation de la coopération au niveau physique ainsi que les techniques de niveau MAC pour choisir le relais qui participera de la communication coopérative. Finalement, l'état de l'art du routage dans les réseaux qui utilisent la diversité coopérative est présenté.

Dans le chapitre cinq nous analysons des solutions pour le routage dans les réseaux qui utilisent la diversité coopérative et proposons une métrique capable de tenir compte de la coopération. D'abord, nous étudions comment développer une métrique capable de refléter les effets de l'évanouissement sur la qualité des liens. Afin d'isoler le problème de l'évanouissement, cette analyse est menée sur un réseau qui n'utilise pas la diversité coopérative. Ainsi, nous proposons une métrique de routage qui se base sur la fonction de densité de probabilité du rapport signal-à-bruit du lien. Ensuite, nous analysons des différentes politiques de routage pour les réseaux qui utilisent la diversité coopérative. Enfin, nous proposons une métrique distribuée pour les réseaux de débit variable qui utilisent la diversité coopérative.

Le dernier chapitre présente les conclusions du travail et des directions futures de recherche.

Le résumé en français de la thèse est divisée en quatre annexes. Annexe B présente la problématique qui a motivé le travail. Annexe C discute notre proposition pour améliorer les performances des réseaux de capteurs sans fil destinées à l'estimation de champs. Ensuite, dans l'Annexe D sont présentées nos propositions pour améliorer le routage dans les réseaux qui utilisent la diversité coopérative. L'Annexe E conclut le travail.

Annexe B

La Problématique

LES réseaux sans fil offrent une grande flexibilité aux utilisateurs ainsi que la possibilité d'avoir un réseau dans un environnement où il n'y a pas d'infrastructure câblée installée. Ces réseaux peuvent être du type cellulaire, où les noeuds du réseau se communiquent directement avec une station base liée au réseau câblé, ou multi-sauts, où les noeuds du réseau doivent jouer le rôle de routeur pour passer l'information d'un terminal vers un autre. Les réseaux cellulaires sont en générale planifiés en avance, ce qui permet de réduire ou contourner les problèmes posés par l'utilisation des canaux sans fil, comme l'interférence et l'atténuation importante des signaux radio. De l'autre côté, la majorité des scénarios des réseaux multi-sauts utilisent des réseaux établis d'une façon aléatoire ou spontanée. En effet, les performances de ce type de réseau sont très sensibles aux caractéristiques des liens sans fil.

Les réseaux sans fil multi-sauts peuvent être divisés en trois groupes : les réseaux de capteurs [4], les réseaux ad hoc [5], et les réseaux maillés [6]. Les réseaux de capteurs utilisent des centaines ou des milliers de noeuds pour surveiller une région. Les noeuds capteurs sont simples et très souvent possèdent une forte limitation d'énergie. En outre, l'objectif de ce type de réseau n'est pas de répondre aux besoins des noeuds, mais de fournir les informations demandées par un observateur qui opère le réseau.

Les réseaux ad hoc utilisent un nombre plus petit de noeuds en comparaison avec les réseaux de capteurs et ses noeuds sont plus puissants. Néanmoins, la principale différence

dans un réseau ad hoc est que le réseau doit répondre aux besoins des noeuds ad hoc, les vrais utilisateurs du réseau. Ainsi, les protocoles développés pour ce type de réseau doivent tenir compte des besoins de tous les noeuds.

Dans les réseaux maillés, l'utilisateur se connecte normalement à un point d'accès sans fil qui est lié aux autres points d'accès à travers un réseau sans fil multi-sauts. Dans ce cas, le réseau sans fil constitue le *backbone* d'un réseau d'accès. Ces réseaux utilisent un nombre réduit de noeuds qui possèdent des fonctionnalités avancées.

Dans cette thèse, les différents aspects des réseaux sans fil multi-sauts sont étudiés et, en conséquence, le travail est divisé en deux parties. Dans la première partie, nous étudions les réseaux de capteurs et leurs applications. Afin de réduire la consommation d'énergie, nous proposons une pile de protocoles dédiée à une application spécifique. L'application choisie est l'estimation de champs qui envoie périodiquement des données à l'observateur. Nous proposons deux algorithmes pour la couche application et un protocole de transport. Ensemble, les algorithmes et le protocole sont capables de réduire le volume de données envoyé à l'observateur sans compromettre significativement la qualité de l'estimation obtenue. Une fois que la transmission radio consomme beaucoup d'énergie, la réduction du volume de données peut réduire la consommation d'énergie dans le réseau.

La deuxième partie de cette thèse analyse le routage dans les réseaux ad hoc qui utilisent la diversité coopérative. La diversité coopérative est une technique qui établit une structure MIMO (*Multiple-Input-Multiple-Output*) virtuelle pour offrir les bénéfices de la diversité spatiale à des noeuds qui ne possèdent qu'une seule antenne. La diversité obtenue est utilisée pour augmenter la robustesse des liens sans fil aux effets de l'évanouissement. Afin de bien profiter de la diversité coopérative, la couche réseau des noeuds doit être adaptée pour permettre de prendre en compte les opportunités de coopération au moment de la sélection des routes. En effet, l'objectif de cette deuxième partie est de développer une métrique de routage pour les réseaux coopératifs capable de refléter le comportement des liens sans fil au fil du temps.

Annexe C

Le Mécanisme d'Estimation de Champs Orienté Événements

LE mécanisme proposé se base sur la construction par chaque noeud d'une périphérie d'attention [48]. À partir de cette périphérie d'attention, les noeuds sont capables de vérifier si un échantillon apporte des informations utiles ou s'il ne les apporte pas. Seulement les échantillons assez différents du comportement attendu sont envoyés vers l'observateur. Ce type d'abordage n'est possible que pour les processus qui présentent au long du temps une caractéristique qui peut être identifiée comme normale ou attendue. Ainsi, notre scénario est d'une application où les noeuds capteurs mesurent la température locale. Le résultat de l'utilisation du mécanisme proposé est la construction d'un modèle d'envoi de données orienté à événements pour une application utilisant typiquement le modèle d'envoi continu de données.

C.1 L'Algorithme de la Couche Application

La fonction de la couche application est d'identifier le comportement attendu et de décider quels sont les échantillons qui doivent être envoyés. La première étape est donc l'identification de la périodicité du processus. La façon la plus simple pour accomplir cette tâche est d'obtenir un nombre élevé d'échantillons et de vérifier l'autocorrélation du

vecteur résultant. Une fois que la périodicité de N échantillons est connue, le noeud peut commencer à calculer le comportement périodique attendu du processus (CP). Comme nous envisageons l'utilisation du mécanisme par des noeuds peu puissants, nous proposons l'utilisation de la fonction suivante.

$$CP_i(k) = P_{i-1}(k) \times \alpha + CP_{i-1}(k) \times (1 - \alpha), \quad (\text{C.1})$$

où CP_i est un vecteur qui contient le comportement attendu au long de la période i , P_{i-1} est le vecteur avec les échantillons obtenus pendant la période $i - 1$, α est un paramètre qui détermine l'importance du comportement passé du processus sur le comportement attendu et k est l'indice des échantillons, où $1 \leq k \leq N$. Il y a d'autres fonctions qui peuvent servir à obtenir le comportement attendu, mais l'optimisation de cette procédure n'est pas traitée dans ce travail.

Après la définition du vecteur de comportement périodique attendu (*Expected Behavior Vector* - EBV), le noeud compare les échantillons obtenus avec ce comportement et n'envoie que les échantillons qui diffèrent du comportement attendu par au moins une limite configurable. Ces échantillons sont appelés *échantillons de raffinement*. En outre, pour que l'observateur soit capable de bien reconstruire le processus, il faut que le comportement attendu lui soit envoyé périodiquement. Afin de maintenir la consistance entre les analyses faites par le noeud et la reconstruction faite par l'observateur, le noeud doit baser ses décisions de suppression d'un échantillon sur le dernier EBV envoyé à l'observateur.

Nous proposons deux types d'algorithmes pour la couche application [50]. Dans le premier algorithme, aucun échantillon de raffinement n'est envoyé pour la période où le noeud envoie l'EBV. En effet, l'EBV est utilisé pour remplacer les échantillons de la période. Cette procédure évite que l'utilisation de l'algorithme génère, à cause de la surcharge des EBV, un nombre d'échantillons plus élevé que l'original. Néanmoins, l'utilisation des EBVs pour remplacer des périodes peut mener à la perte d'un événement d'intérêt car aucun échantillon de raffinement ne sera envoyé. Le deuxième algorithme assure qu'aucun événement d'intérêt ne sera perdu. La procédure adoptée est d'envoyer aussi bien les EBVs que les échantillons de raffinement dans les périodes où les EBVs

sont envoyés. Le compromis de cet algorithme est sa sensibilité à la configuration. Si mal configuré, l'algorithme peut, à cause de la surcharge des EBVs, résulter dans l'envoi d'un nombre plus élevé d'échantillons que le nombre originalement acquis par le capteur.

Les performances des deux algorithmes sont analysées avec des données synthétiques [50, 53, 54] et les résultats montrent que les différents paramètres peuvent être utilisés pour assurer que l'utilisation du deuxième algorithme ne générera pas un nombre d'échantillons supérieur au nombre original d'échantillons acquis par le noeud, même si la restriction d'erreur dans la reconstruction est forte. Ainsi, comme le premier algorithme peut mener à la perte d'événements d'intérêt, nous avons choisi d'utiliser que le deuxième algorithme pour la suite des analyses.

Le deuxième algorithme est, donc, analysé avec des données réelles obtenues par une station météorologique [55]. Les résultats obtenus montrent que, dans un scénario réaliste, le deuxième algorithme peut réduire le nombre d'échantillons envoyé de presque 50% avec une erreur moyenne plus petite que 2.5%.

C.2 Le Protocole de Transport

Typiquement, l'estimation de champs est faite en envoyant une marcation temporelle (*timestamp*) par échantillon. Pourtant, ce type de procédure présente une forte surcharge, car les *timestamps* ont normalement 4 octets. En effet, il est intéressant de n'envoyer qu'un *timestamp* par paquet. Une autre façon d'envoyer les données est d'inclure le *timestamp* du premier échantillon et d'informer l'intervalle d'échantillonnage pour que la position temporelle des échantillons suivants soient déterminées par rapport au *timestamp* du premier échantillon. Nous appelons cet abordage *marcation optimisée*. Néanmoins, aucun de ces abordages n'est adapté à notre algorithme, qui se base sur la suppression des échantillons. En effet, il nous faut un protocole de transport capable d'assurer que les positions temporelles des échantillons de raffinement soient reconnues par l'observateur.

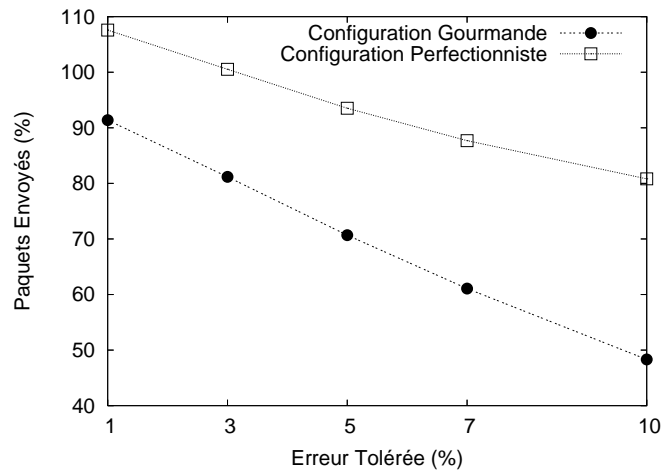
Nous proposons le protocole EDFE (*Event-Driven Field Estimation protocol*) qui est responsable pour le transport efficace des données sélectionnées par l'algorithme de la

couche application [59]. En outre, le protocole EDFE fournit assez d'information temporelle pour assurer la reconstruction du processus surveillé.

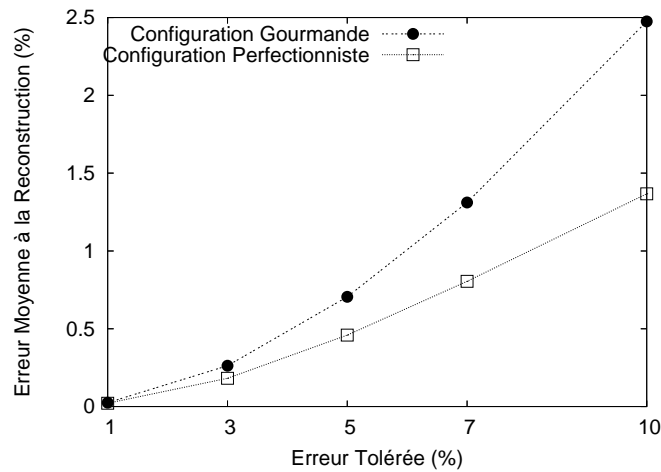
Afin de réduire la surcharge du protocole, sont utilisés deux types différents de paquets. Les paquets de type EBP (*Expected Behavior Packet*) sont utilisés pour envoyer les informations concernant les vecteurs de comportement attendus (EBVs). La surcharge du protocole est concentrée dans ces paquets, car ils transportent toutes les informations de contrôle du protocole, telle que le nombre d'échantillons par période, l'intervalle d'échantillonnage et l'information pour reconnaître quand des échantillons ont été supprimés. Les paquets de type RP (*Refining Packet*) sont utilisés pour envoyer les échantillons de raffinement et les *octets de suppression*. Les octets de suppression sont utilisés pour informer que des échantillons ont été supprimés entre deux échantillons de raffinement envoyés dans un paquet RP. L'identification d'un octet de suppression est réalisé à travers un bit de contrôle envoyé dans les paquets EBP. Ce bit de contrôle est configuré selon les caractéristiques du processus surveillé. La seule surcharge incluse dans les paquets RP est le *timestamp* du premier échantillon de raffinement du paquet.

Afin d'analyser les performances du mécanisme proposé, nous simulons l'utilisation du protocole EDFE pour transporter les données sélectionnées par le deuxième algorithme de la couche application et nous comparons les résultats avec ceux d'une application d'estimation de champs qui utilise le mécanisme de Marcation Optimisée [59]. Une fois que les résultats de notre mécanisme sont dépendents de la configuration d'un certain nombre de paramètres, nous basons nos analyses sur deux configurations idéales : une configuration *Gourmande* et une configuration *Perfectionniste*. La configuration gourmande envoie toujours le minimum possible d'échantillons tandis que la configuration perfectionniste produit toujours l'erreur la plus petite à la reconstruction. Les simulations ne tiennent compte que du calcul local d'un noeud sur le même ensemble de données réelles utilisé antérieurement. La Figure C.1 montre les résultats obtenus. Le nombre de paquets envoyés est montré entant qu'un pourcentage du nombre envoyé par le mécanisme de marcation optimisée.

Comme nous pouvons observer sur la Figure C.1, la configuration gourmande envoie entre 16 et 31% moins de paquets que la configuration perfectionniste. En outre, dans



(a) Paquets envoyés selon l'erreur tolérée.



(b) Erreur moyenne selon l'erreur tolérée.

FIG. C.1 – Résultats des configurations idéales.

les cas où l'erreur tolérée est très petite, la configuration perfectionniste envoie plus de paquets que le mécanisme de marcation optimisée. La cause de ce comportement est que la configuration perfectionniste envoie des EBVs très fréquemment. Même si la configuration perfectionniste comme telle n'est pas utile à l'application car elle envoie beaucoup de paquets, l'erreur réduite générée par cette configuration (Figure C.1(b)) indique qu'une configuration intermédiaire entre les deux configurations idéales peut être intéressante. Il faut aussi souligner que pour une erreur moyenne plus petite que 0.025%, la configuration gourmande envoie presque 10% moins des paquets que le mécanisme de marcation optimisée. Pour une erreur moyenne autour de 2.5%, cette configuration envoie la moitié des paquets envoyés par le mécanisme de marcation optimisée.

Nous avons aussi réalisé des simulations des réseaux dans des scénarios où il y a des pertes de paquets. Les résultats montrent que la robustesse du mécanisme est affectée par la configuration de l'algorithme de la couche application. Une robustesse plus haute est obtenue quand l'intervalle entre l'envoi des EBVs consécutifs est réduit et quand l'historique du processus présente une forte influence dans les calculs du comportement attendu.

C.3 Considérations Finales

Comme les résultats discutés dans les sections précédentes ont montré, la configuration correcte du mécanisme proposé est très importante pour ses performances. Ainsi, le développement d'un module d'apprentissage et auto-configuration est une extension intéressante du travail. Il y a deux architectures possibles pour ce module. Dans la première, l'observateur configure les noeuds selon les données reçues dans une phase initiale. Dans la deuxième architecture, les noeuds sont eux-mêmes responsables par l'analyse des données acquises afin de définir la meilleure configuration pour le mécanisme. Si le réseau est composé par des noeuds qui présentent des différents niveaux de capacité, les noeuds plus puissants peuvent être responsables de configurer ses voisins moins puissants.

L'utilité du protocole proposé est plus importante dans des systèmes où des techniques de réduction de la fréquence spatiale d'échantillonnage [42, 44, 45] sont utilisées. Dans ces scénarios, les noeuds qui restent actives possèdent des mesures sans corrélation avec celles de ces voisins et les techniques d'agrégation de données n'apportent pas de bénéfice. En outre, il est important de remarquer que le mécanisme est destiné aux mesures des processus physiques périodiques. Cette restriction limite l'applicabilité du mécanisme, mais il faut souligner qu'une grande partie des processus physiques présentent ce comportement.

Finalement, le protocole de transport offre un service non-confirmé, similaire au protocole UDP. Ainsi, à l'exception des EBVs qui doivent arriver avec une périodicité et qui présentent un nombre fixe d'échantillons, l'observateur ne peut pas distinguer les échantillons supprimés des échantillons perdus par le réseau. En outre, la réception des EBVs

peut signaler qu'un noeud est toujours active.

Annexe D

La Métrique de Routage pour les Réseaux qui Utilisent la Diversité Coopérative

LA diversité coopérative est une technique qui vise offrir les bénéfices de la diversité spatiale aux réseaux avec des noeuds équipés d'une seule antenne. Néanmoins, organiser la coopération entre les noeuds d'un réseau ad hoc constitue un défi. Les couches physique et MAC des noeuds doivent être modifiées pour supporter la coopération. En outre, une couche réseau adaptée à la coopération permet d'améliorer les performances du réseau. Si la couche réseau n'est pas adaptée, la coopération ne peut être utilisée que d'une façon opportuniste. Dans ce cas, la route est sélectionnée sans tenir compte des opportunités de coopération et, si possible, la coopération est utilisée juste au niveau MAC. Dans le routage coopératif, la route est déjà choisie pour faciliter l'utilisation de la coopération au niveau MAC. Cette thèse vise ce deuxième abordage.

L'objectif de cette deuxième partie de la thèse est de développer une métrique de routage capable de refléter les possibilités de coopération de chaque lien. Nous identifions trois facteurs importants pour cette métrique : le profil d'évanouissement des canaux, les particularités du protocole de coopération de la couche physique et les relais disponibles.

Afin d'étudier le problème, nous faisons deux types d'analyses. La première analyse

est faite sur les réseaux non-coopératifs, où la diversité coopérative n'est pas utilisée, et cherche à identifier une façon efficace d'intégrer l'information sur l'évanouissement des canaux dans une métrique de routage. Ensuite, nous étudions le problème des réseaux coopératifs. D'abord, nous analysons différentes politiques de routage coopératif pour ensuite proposer une métrique de routage coopératif.

D.1 L'Analyse dans les Réseaux Non-Coopératifs

L'objectif de cette analyse est de développer une métrique de routage capable de tenir compte du profil d'évanouissement des liens sans fil. Selon le profil d'évanouissement du canal, la puissance reçue peut varier significativement au long du temps et la variation de la puissance reçue se reflète dans une variation de la probabilité de succès des transmissions sur le lien. Nos analyses montrent que des liens avec la même probabilité de succès moyenne ($E[P_{suc}]$) peuvent présenter des profils d'erreur différents selon leur profil d'évanouissement.

Afin d'améliorer les performances des réseaux à évanouissement, nous proposons la métrique DBETX (*Distribution-Based Expected Transmission Count*) [97]. Cette métrique est calculée à partir des mesures de la couche physique et des informations disponibles localement comme le niveau de bruit et la modulation utilisée. Le noeud utilise les mesures de la couche physique pour estimer la fonction de densité de probabilité (pdf) de la SNIR des liens. Pour une modulation donnée, il est possible d'obtenir le taux d'erreur binaire (BER) et ensuite le taux d'erreur par paquet (PER). Une fois que la probabilité de succès d'une transmission (P_{suc}) est égale à 1-PER, il est possible d'obtenir le nombre moyen de transmissions nécessaires sur un lien, proportionnel à $1/P_{suc}$, à partir de la SNIR. En outre, la métrique DBEXT tient compte du nombre maximum de transmissions à la couche MAC et pénalise les liens qui présentent un taux de perte élevé.

Pour tenir compte de la limite de transmissions de la couche MAC, au lieu d'utiliser directement la transformation $1/P_{suc}$ pour obtenir le nombre moyen de transmissions nécessaires, la métrique DBETX se base sur la fonction ANT (*Average Number of Trans-*

missions) qui est définie comme

$$ANT(x) = \begin{cases} \frac{1}{P_{Suc}(x)} & P_{Suc}(x) > P_{lim} \\ \frac{1}{P_{lim}} & P_{Suc}(x) \leq P_{lim} \end{cases} \quad (D.1)$$

où P_{lim} est égal à

$$P_{lim} = \frac{1}{NT_{max}}. \quad (D.2)$$

NT_{max} est le nombre maximum de transmissions à la couche MAC.

La métrique DBETX est donc définie comme

$$DBETX(l) = E[ANT](l) \frac{1}{1 - P_{out_{MAC}}(l)}, \quad (D.3)$$

où $P_{out_{MAC}}(l)$ est la probabilité de coupure à la couche MAC du lien l . Le concept de coupure à la couche MAC est introduit dans ce travail et représente la situation où la probabilité de succès du lien résulte dans un nombre moyen de transmissions supérieur à NT_{max} . Dans cette situation, il y a une forte probabilité de perte de paquets à cause du dépassement de la limite de transmissions à la couche MAC. La probabilité de coupure à la couche MAC d'un lien est la probabilité de P_{Suc} être plus petite que P_{lim} .

TAB. D.1 – Paramètres des Simulations.

| Paramètre | Valeur Configurée |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Portée des Noeuds (R) | 39m |
| Surface de Simulation | $\pi R \times 6R \text{ m}^2$ |
| Facteur d'atténuation (β) | 2.7 |
| Fréquence de la Porteuse | 2.4GHz |
| Modulation | 64-QAM |
| NT_{max} | 7 |
| Taille des Paquets | 500 bytes |
| Facteur de Ricean des Canaux (K) | 0 1 2 4 8 16 32 64 |

Afin d'analyser l'efficacité de la métrique DBETX, nous simulons des scénarios avec évanouissement et comparons les résultats de la métrique DBETX avec les résultats de la métrique ETX, qui est la métrique basée sur la qualité des canaux la plus étudiée dans la littérature [72]. Les configurations des simulations sont basées sur les caractéristiques des

interfaces IEEE 802.11a [87] et IEEE 802.11g [102] pour produire des résultats réalistes. La modulation adoptée est le 64-QAM, qui est utilisée par les deux standards pour obtenir le débit le plus fort (54Mbps), et le nombre maximum de transmissions sans perte d'une trame de données (NT_{max}) est égal à 7. Pour les comparaisons, nous avons calculé les routes entre chaque noeud du réseau et tous les autres. Le Tableau 2 résume les principales caractéristiques du scenario simulé.

Les résultats obtenus montrent que la métrique DBETX choisit des routes plus longues (en nombre de sauts), mais qui sont composées par des liens de plus haute qualité. La Figure D.1 montre la disponibilité moyenne par lien obtenue par chaque métrique. La disponibilité est définie comme $1 - P_{out_{MAC}}$.

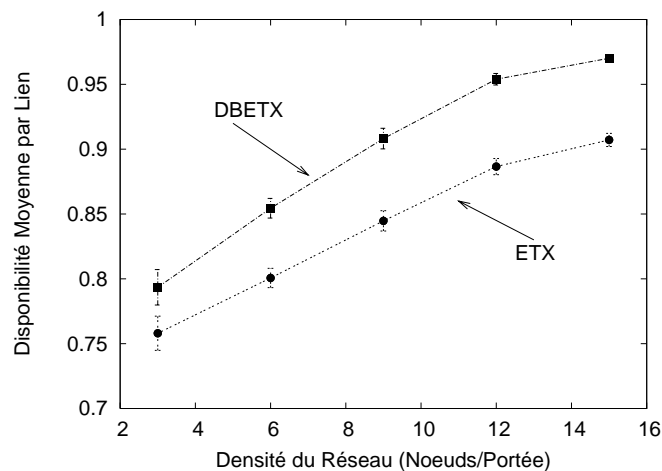


FIG. D.1 – Disponibilité moyenne par lien.

Selon la Figure D.1, la disponibilité moyenne des liens choisis par la métrique DBETX est entre 5 et 7% supérieure à celle des liens choisis par la métrique ETX. Une disponibilité plus élevée est liée à un taux de perte plus petit. La différence entre les disponibilités moyennes se montre plus importante quand nous analysons la disponibilité de bout-en-bout des routes. Cette disponibilité est calculée comme Av^{Hops} , où Av est la disponibilité moyenne par lien, montrée dans la Figure D.1, et $Hops$ est la longueur moyenne des routes en nombre de sauts. Les résultats sont montrés dans la Figure D.2.

Comme nous pouvons observer dans la Figure D.2, la métrique DBETX choisit des routes avec une disponibilité de bout-en-bout plus élevée. Pour une densité du réseau égale à 15 noeuds par portée, la disponibilité de bout-en-bout obtenue par la métrique

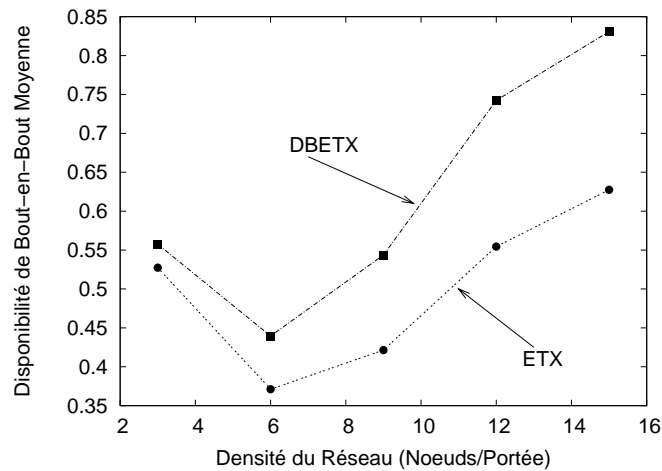


FIG. D.2 – Disponibilité de bout-en-bout.

DBETX est 32% plus élevé que celle obtenue par la métrique ETX. Il faut souligner que pour une densité très basse, la disponibilité de bout-en-bout est plus élevée car le réseau est partitionné, les noeuds sont organisés en groupes et les routes sont plus courtes.

D.2 L'Analyse dans les Réseaux Non-Coopératifs

Les analyses des réseaux non-coopératifs démontrent qu'il est possible d'améliorer les performances du réseau par l'utilisation des informations plus complètes à propos des canaux. Maintenant, nous vérifions comment agréger les informations de tous les relais disponibles pour un lien source-destination.

Le premier pas vers une métrique coopérative qui agrège des informations à propos des relais disponibles est de remarquer que la capacité instantanée d'un lien entre deux noeuds, S et D , n'est pas seulement fonction du canal direct entre ces deux noeuds, h_{SD} . Cette capacité instantanée est aussi fonction des conditions instantanées de différents liens logiques. Nous appelons liens logiques tous les configurations possibles, coopératives ou pas, pour transmettre une trame du noeud S au noeud D . Si nous prenons compte du protocole coopératif, il y a différentes formes d'envoyer une trame du noeud S au noeud D . Alors, le lien coopératif entre S et D est composé d'un lien logique non-coopératif (que n'utilise que le canal h_{SD}) et un lien logique coopératif pour chaque configuration coopérative possible. Une fois que nous n'utilisons qu'un relais à la fois, nous avons

autant de configurations coopératives que de relais disponibles. La Figure D.3 montre la composition du lien coopératif entre les noeuds S et D .

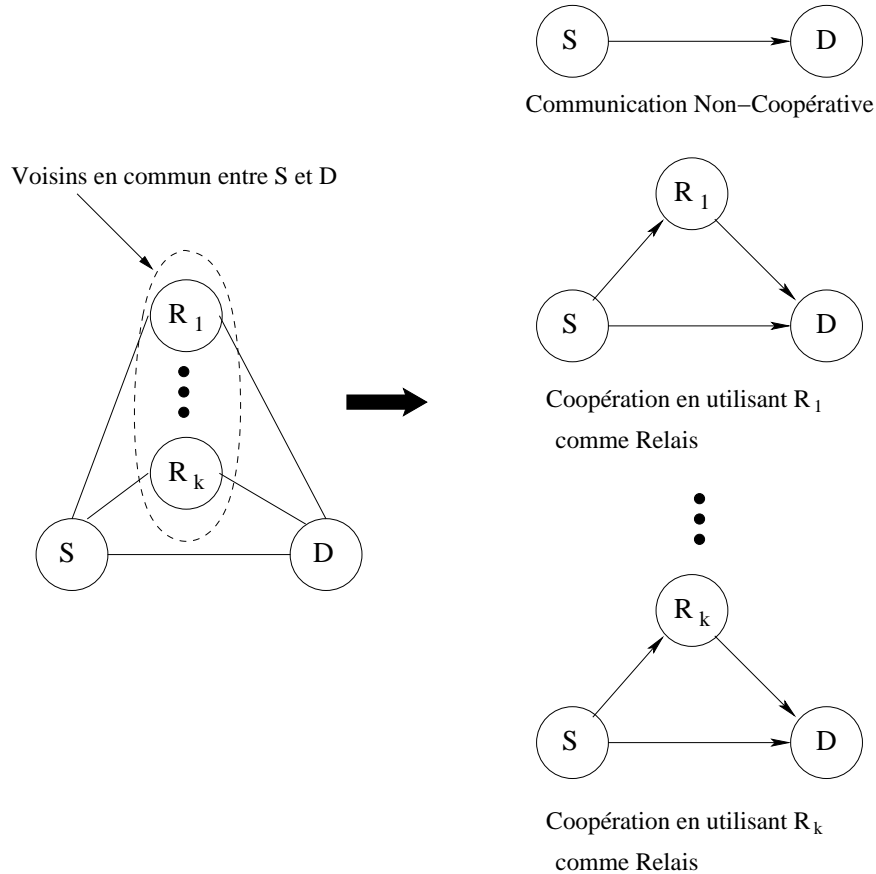


FIG. D.3 – Le lien coopératif et ses liens logiques.

Comme tous les noeuds qui sont au même temps à la portée de S et de D peuvent servir de relais, la quantité de voisins en commun de ces deux noeuds nous donne la quantité de relais disponibles et, par conséquent, le nombre de liens logiques coopératifs. Nous représentons le lien coopératif entre S et D par $\overline{SD}_{\{R_1, \dots, R_k\}}$, où les indices montrent les relais disponibles pour la communication.

En outre, si nous supposons que la couche MAC est capable de choisir pour chaque transmission le lien logique qui présente la plus haute capacité, la capacité instantanée du lien coopératif est égale à la capacité du lien logique qui présente la capacité instantanée la plus haute. Dans toutes nos évaluations nous supposons que la couche MAC est capable de faire le choix optimal du relais.

D.2.1 Les Différentes Politiques de Routage Coopératif

Dans la littérature, nous avons pu trouver deux abordages pour le routage dans les réseaux coopératifs : l'utilisation du routage classique avec coopération opportuniste quand possible [94] et le choix des routes en prenant compte de la coopération mais basé sur les conditions instantanées des canaux [95, 96]. La première option est inefficace parce que la coopération n'est pas prise en compte lors du choix de la route et la deuxième, que nous appelons d'algorithmes gourmands, n'est optimale que dans des conditions très spécifiques où les canaux varient très lentement. Comme le Tableau D.2 le montre, dans des conditions réalistes, même quand les noeuds sont statiques, les canaux varient trop rapidement pour permettre un choix de routes basé sur des conditions instantanées [105, 106, 107, 108].

TAB. D.2 – Temps de cohérence moyen quand les noeuds sont statiques.

| Type d'environnement | Fréquence (GHz) | Temps de cohérence moyen (ms) |
|-------------------------|-----------------|-------------------------------|
| <i>Outdoor</i> - Urbain | 2.4 | 40 |
| <i>Indoor</i> | 2.4 | entre 24.74 e 211.5 |
| <i>Outdoor</i> - Urbain | 3.5 | entre 14.34 e 92.55 |
| <i>Outdoor</i> - Urbain | 5.2 | entre 1780 e 1980 |

Alors, nous proposons le développement d'une métrique de routage dont l'objectif est de chercher la route qui a la probabilité la plus forte de présenter des bonnes conditions instantanées [98, 99]. Notre proposition se base sur l'utilisation des statistiques de longue durée des canaux, au lieu d'utiliser des conditions instantanées des canaux. Une fois que les analyses sur les réseaux non-coopératifs ont montré qu'une vision plus complète des canaux peut réduire les pertes et augmenter l'efficacité du réseau, nous proposons l'utilisation de deux informations à propos des canaux : la probabilité de coupure et la capacité utile moyenne. Comme nous voulons implémenter la coopération dans des réseaux de débit variable, la probabilité de coupure est la probabilité du canal de présenter une capacité instantanée plus petite que la capacité nécessaire pour soutenir le débit le plus faible de l'interface réseau. Pour développer la notion de capacité utile (C_{utile}), nous prenons compte de deux choses : (i) en pratique, si le canal ne peut pas supporter le débit le plus faible, la transmission échouera et la capacité réelle sera égale à zéro et (ii) même si le

canal présente une capacité instantanée (C') élevée, il est impossible de profiter de cette capacité au delà de la capacité nécessaire pour soutenir le débit le plus élevé de l'interface.

Pour procéder aux analyses sur les réseaux coopératifs, nous utilisons un scénario basé sur les interfaces IEEE 802.11a e IEEE 802.11g où le débit le plus faible est de 6Mbps et le plus élevé est de 54Mbps. Nous supposons, aussi, des paquets de données de 1024 octets. Dans toutes nos simulations, la capacité instantanée du lien coopératif est égale à la plus haute capacité de ses liens logiques. Le Tableau D.3 résume les caractéristiques de ces deux débits.

TAB. D.3 – Les débits le plus faibles et le plus fort de l'interface.

| Débit | Taux de Codification | Bits par Sub-porteuse | Capacité d'Otage | Temps de Transmission |
|---------|----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| 6 Mbps | 1/2 | 1 | 0.5 bpcu | 1600 μs |
| 54 Mbps | 3/4 | 6 | 4.5 bpcu | 400 μs |

Selon notre définition,

$$C_{utile}(l) = \begin{cases} 0, & C'(l) < C_{min} \\ C'(l), & C_{min} \leq C'(l) \leq C_{max} \\ C_{max}, & C'(l) > C_{max} \end{cases} \quad (D.4)$$

Pour modéliser le temps de transmission, nous supposons qu'il y a une surcharge fixe (K_{oh}) plus un temps variable selon la capacité utile du canal (K_d/C_{utile}). Basé sur les valeurs montrées au Tableau D.3, $K_{oh} = 250\mu s$ et $K_d = 675$.

Nous définissons la métrique coopérative pondérée (RCP) comme

$$RCP(l) = \left(\frac{K_d}{E[C_{utile}(l)]} + K_{oh} \right) \frac{1}{1 - P_{out}(l)}. \quad (D.5)$$

Pour vérifier l'efficacité de la métrique RCP, nous réalisons des simulations pour la comparer avec une métrique coopérative gourmande (RCG) basée sur des conditions instantanées ainsi qu'avec l'utilisation du routage traditionnel de route la plus courte en utilisant la coopération quand possible (MH-CO). La métrique RCG choisit la route minimi-

sant le temps de transmission nécessaire dans une réalisation aléatoire d'évanouissement.

Le scénario est celui d'une région rectangulaire avec les noeuds source et destination fixes pour éviter des variations comme celles observées lors de l'analyse des réseaux non-coopératifs. Le nombre de noeuds dans la région est varié pour changer la densité du réseau. Les résultats présentés sont les moyennes de toutes les mesures et les intervalles de confiance de 95% sont représentés par des barres verticales. Le Tableau D.4 résume le scénario.

TAB. D.4 – Paramètres de simulation.

| Paramètre | Valeur Utilisée |
|---|-------------------------------|
| Portée (r) | 70m |
| Surface de Simulation | $\pi r \times 6r \text{ m}^2$ |
| Position du Noeud Source | $\pi \frac{r}{2}, 1.5r$ |
| Position du Noeud Destination | $\pi \frac{r}{2}, 4.5r$ |
| Facteur d'Atténuation (β) | 2.7 |
| Fréquence de la Porteuse | 2.4GHz |
| Taille des Paquets | 1024 bytes |
| Profil d'Évanouissement | Rayleigh |
| Noeuds coopératifs dans le scénario hybride | 50% |

Nous commençons nos analyses par un scénario entièrement coopératif où tous les noeuds implémentent le protocole coopératif. La Figure D.4 montre la probabilité de succès de bout-en-bout obtenue par les différentes métriques.

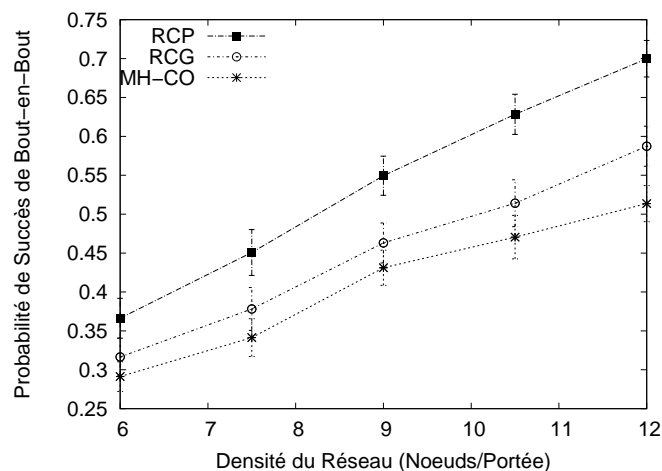


FIG. D.4 – Probabilité de Succès de bout-en-bout.

La Figure D.4 montre une grande différence entre les métriques RCG et RCP. L'utili-

sation de l'information plus complète à propos des canaux faite par RCP, résulte dans des probabilités de succès beaucoup plus élevées que celles obtenues par RCG. La probabilité de succès de la métrique RCG est plus proche de celle obtenue par la métrique MH-CO que de celle obtenue par RCP. La pondération de la métrique RCP basée sur la probabilité de coupure pénalise les liens qui présentent des taux de pertes élevés. Pour confirmer cette affirmation, la Figure D.5 montre le taux de perte du lien de la route qui présente le taux de perte le plus élevé.

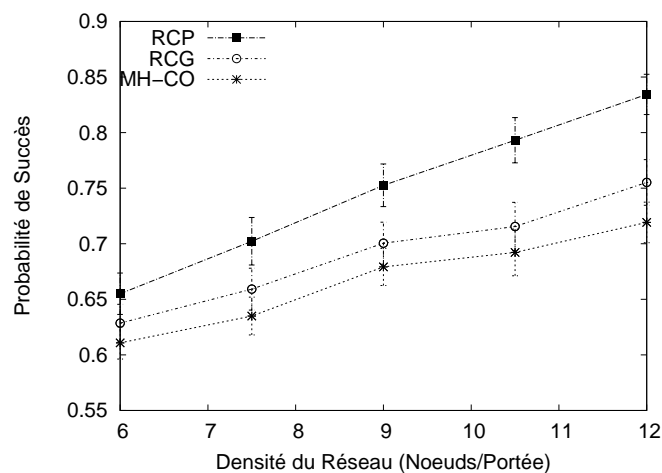


FIG. D.5 – Probabilité de Succès du Lien qui présente le taux de perte le plus élevé.

Comme nous pouvons observer dans la Figure D.5, la probabilité de succès minimum des liens choisis par la métrique RCP est plus élevée que celles de la métrique RCG et de MH-CO. Cette différence devient plus importante parce que la probabilité de succès de bout-en-bout est la multiplication de la probabilité de succès de tous les liens de la route. Donc, une seule probabilité de succès réduite peut dégrader fortement les performances.

Ensuite, nous passons à l'analyse sur des réseaux hybrides, où il y a aussi bien des noeuds coopératifs que des noeuds non-coopératifs. En analysant ces réseaux hybrides, nous avons pour but de vérifier les performances des métriques quand il y a des équipements anciens qui ne sont pas coopératifs. Le scénario est exactement le même analysé antérieurement, mais avec 50% des noeuds non-coopératifs.

Nous pouvons observer sur la Figure D.6 que les probabilités de succès de bout-en-bout sont bien réduites en comparaison avec les cas entièrement coopératif. Cela nous montre l'importance de la coopération pour l'augmentation des performances du réseau.

En plus, la différence qui sépare les résultats de la métrique RCP des autres est beaucoup plus élevée. Cela est résultat de la prise en compte d'une façon explicite des relais disponibles et de leurs qualités faite par RCP. Dans ce scénario, la métrique RCG est incapable d'exploiter tous les bénéfices de la coopération.

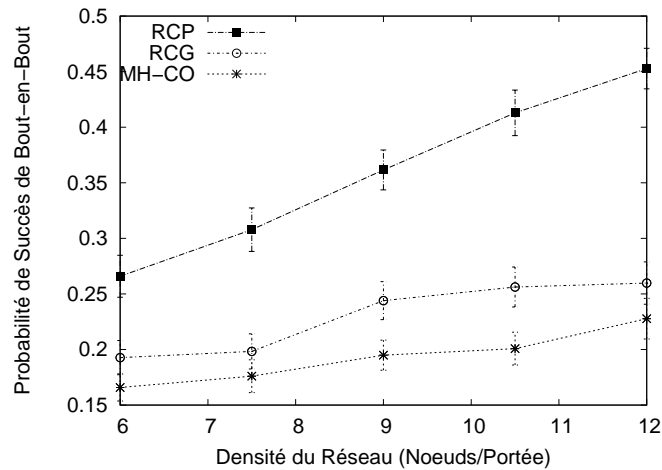


FIG. D.6 – Probabilité de Succès de bout-en-bout dans le réseau hybride.

Après ces analyses initiales qui nous montrent l'importance de choisir des routes en prenant compte des relais disponibles et de la qualité de leurs liens, nous proposons une métrique distribuée qui prend en compte ces deux facteurs [100].

D.2.2 Une Métrique pour la Prise en Compte de la Coopération

Pour développer la métrique proposée, l'idée est d'évaluer les probabilités du lien coopératif de supporter chaque débit existant dans le système et aussi la probabilité de que ce lien soit en coupure. Basés sur ces probabilités et sur les différents débits, nous pouvons estimer le temps moyen pour qu'un paquet traverse le lien. Cela est similaire à l'idée de la métrique ETT [75], mais en prenant compte de la coopération.

Pour faire nos analyses, nous revenons à la représentation du lien coopératif montrée dans la Figure D.3. Comme cette figure le montre, nous pouvons décomposer le lien coopératif en plusieurs liens logiques. La probabilité d'un lien coopératif de supporter un certain débit est, donc, la probabilité d'au moins un de ses liens logiques supporter ce débit. De la même façon, pour que le lien coopératif soit en coupure, il faut que tous ses

liens logiques soient en coupure.

Pour bien caractériser les liens dans un réseau de débit fixe, il ne nous faut que la probabilité de coupure du lien. Pour une capacité de coupure (C_{out}) donnée, la probabilité de coupure du lien coopératif ($P_{out_{EC}}$) est

$$P_{out_{EC}}(C_{out}) = P_{out_{l_0}}(C_{out}) \prod_{i=1}^n P_{out_{l_i}}(C_{out}|C_{l_0} < C_{out}), \quad (D.6)$$

où $P_{out_{l_0}}$ est la probabilité de coupure du lien logique non-coopératif et $P_{out_{l_i}}(C_{out}|C_{l_0} < C_{out})$ est la probabilité de coupure du lien logique coopératif i , étant donné que le lien non-coopératif soit en coupure.

Ce modèle peut être généralisé pour le cas des réseaux de débit variable. Dans ce cas, nous supposons un réseau où les noeuds peuvent utiliser m débits différents. Chaque débit a sa propre capacité de coupure ($C_{out}(T_{R_i})$, $1 \leq i \leq m$) et si la capacité instantanée du lien coopératif est plus petite que la capacité de coupure du débit T_{R_i} , le lien ne peut pas soutenir ce débit. En plus, $C_{out}(T_{R_1})$ est la limite à partir de laquelle le lien coopératif entre en coupure car il ne peut même pas soutenir le débit le plus faible. Si nous supposons que les noeuds utilisent toujours le débit le plus haut possible, la probabilité du lien coopératif soutenir un débit donné T_{R_i} est

$$P_{EC}(T_{R_i}) = (1 - P_{out_{EC}}(C_{out}(T_{R_i}))) - \sum_{j=i+1}^m P_{EC}(T_{R_j}), \quad m \geq i \geq 0, \quad (D.7)$$

où T_{R_0} est utilisé pour représenter la coupure du lien coopératif. La métrique coopérative CARM (*Cooperation-Aware Routing Metric*) est alors définie comme une pondération des temps de transmission des différents débits par les probabilités $P_{EC}(T_{R_i})$.

$$CARM = \sum_{i=0}^k P_{EC}(T_{R_i}) T_p(T_{R_i}), \quad (D.8)$$

où $T_p(T_{R_i})$ est le temps de transmission d'un paquet en utilisant le débit i . Pour pénaliser les liens qui présentent des pertes, $T_p(T_{R_0})$ est obtenu en multipliant $T_p(T_{R_1})$ par le nombre maximum de transmissions que la couche MAC permet avant de considérer le paquet perdu.

Nous réalisons des simulations similaires à celles de la section précédente. Pourtant, nous utilisons trois débits différents : 6, 24 et 54 Mbps. Le nombre maximum de transmissions par la couche MAC est configuré en 7. En outre, pour chaque topologie nous choisissons 5 sources et pour chaque source 5 destinations différentes. Les caractéristiques des trois débits sont résumées dans le Tableau D.5.

TAB. D.5 – Les débits de l'interface.

| Débit | Taux de Codification | Bits par Sub-porteuse | Capacité d'Otage | Temps de Transmission |
|---------|----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| 6 Mbps | 1/2 | 1 | 0.5 bpcu | 1600 μs |
| 24 Mbps | 1/2 | 4 | 2 bpcu | 600 μs |
| 54 Mbps | 3/4 | 6 | 4.5 bpcu | 400 μs |

Nous comparons les résultats de la métrique CARM à ceux du nombre le plus petit de sauts (MH) et à ceux du nombre le plus petit en utilisant la coopération opportuniste quand possible (MH-CO). La Figure D.7 montre les taux de pertes moyens avec les différents mécanismes de routage.

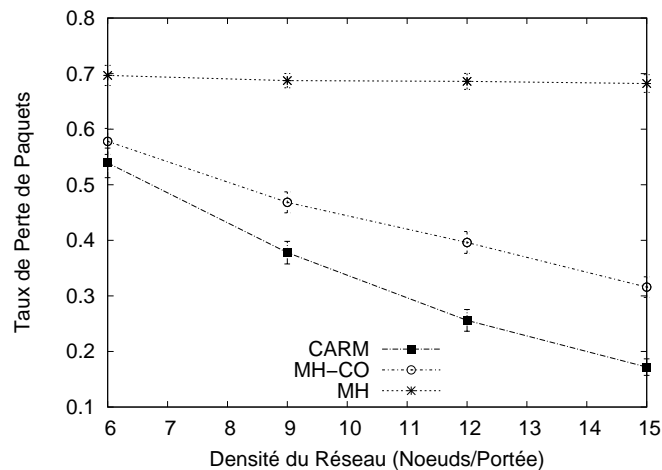


FIG. D.7 – Taux de perte moyen des routes.

Comme nous pouvons observer sur la Figure D.7, le taux de perte de CARM est beaucoup plus petit que celui produit par la coopération opportuniste. De plus, ce taux de perte réduit significativement avec l'augmentation de la densité du réseau car plus de relais sont disponibles. Le routage MH conventionnel ne profite pas de la coopération et est donc insensible à cette variation.

Nous analysons maintenant un réseau hybride avec 50% de noeuds non-coopératifs. Dans cette configuration, la métrique CARM passe à choisir des routes légèrement plus longues. La raison principale est la prise en compte des relais disponibles et de la qualité résultant des liens. La métrique CARM choisit des routes plus longues mais composées par des liens de plus haute qualité. La conséquence de ce choix est un taux de perte plus petit. La coopération opportuniste n'exploite pas d'une façon optimale les relais et présente des taux de pertes similaires aux taux de pertes du réseau non-coopératif. De plus, pour la coopération opportuniste la sensibilité aux variations de densité est réduite. Le taux de perte de la métrique CARM réduit visiblement avec l'augmentation de la densité du réseau car cette métrique exploite bien les relais disponibles. La Figure D.8 montre les résultats.

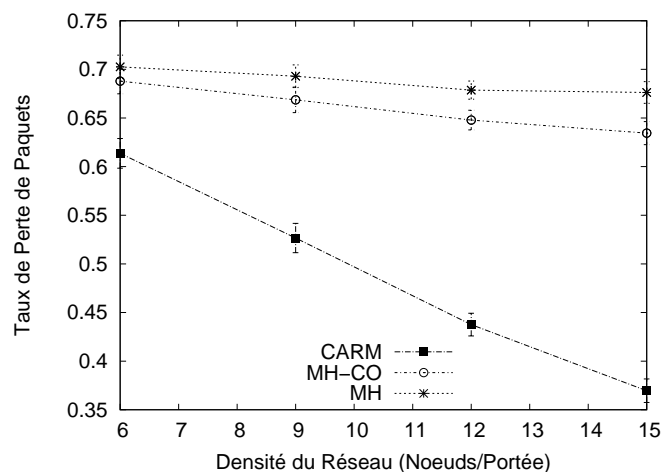


FIG. D.8 – Taux de perte moyen des routes dans le réseau hybride.

Finalement, nous analysons la proportion de noeuds coopératifs et non-coopératifs choisis comme routeurs. Nous définissons le facteur de coopération comme le rapport entre le nombre de routeurs coopératifs d'une route et le nombre de routeurs non-coopératifs de la route. Il faut remarquer que la coopération ne peut être utilisée que si les deux routeurs du lien sont coopératifs. Une fois que nous avons 50% des noeuds non-coopératifs, dans les cas où la coopération n'est pas prise en compte il est normal que ce facteur s'approche de 1. En revanche, quand la coopération est prise en compte, cette proportion tend à augmenter. La Figure D.9 montre les résultats.

Comme nous pouvons remarquer sur la Figure D.9, la métrique CARM choisit de routes composées en majorité par des noeuds coopératifs. La proportion de noeuds co-

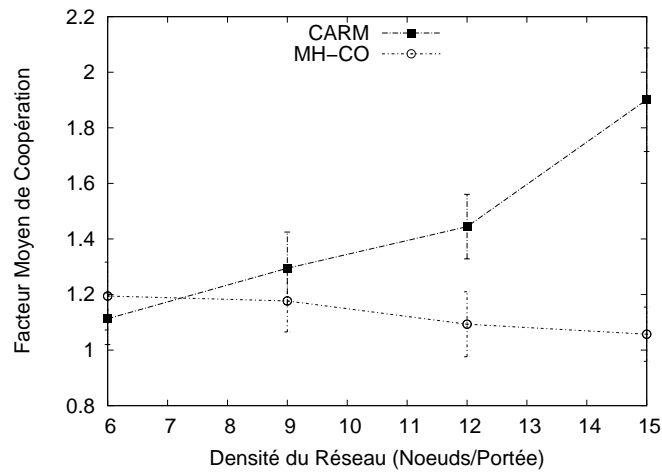


FIG. D.9 – Facteur de coopération des routes.

opératifs utilisés augmente avec la densité du réseau car plus d'options sont disponibles. Nous pouvons conclure que la métrique CARM améliore les performances du réseau en utilisant plus intensivement la coopération et que dans un réseau hybride les noeuds coopératifs peuvent être surchargés pour améliorer les performances de tout le réseau.

Annexe E

Conclusions

CETTE thèse est divisée en deux parties. Dans la première partie, nous proposons une pile de protocoles dédiée à une application d'estimation de champs. Nous proposons deux algorithmes pour la couche application et un protocole de transport. Ensemble, les algorithmes et le protocole sont capables de réduire le volume de données envoyé à l'observateur sans compromettre la qualité de l'estimation obtenue.

La deuxième partie de cette thèse analyse le routage dans les réseaux ad hoc qui utilisent la diversité coopérative. Dans cette deuxième partie nous développons une métrique de routage pour les réseaux coopératifs capable de refléter le comportement des liens sans fil au long du temps. L'utilisation de la métrique proposée nous permet de sélectionner des routes qui présentent un taux de perte de bout-en-bout réduit. En outre, les résultats se montrent plus significatifs dans des réseaux hybrides, qui représentent un scénario d'implémentation progressive de la coopération.

Un point intéressant pour donner suite aux travaux de cette thèse est le développement d'un mécanisme dynamique de configuration pour le protocole EDFE. Une autre direction future intéressante est de faire une extension des analyses à propos de la coopération pour les réseaux mobiles. Dans ce cas, les conditions moyennes des liens sans fil varient rapidement et l'estimation des canaux doit être faite plus rapidement.