Um Mecanismo Cognitivo para Adaptação Automática da Taxa de Transmissão em Redes IEEE 802.11

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação devidamente corrigida e defendida por Luciano Jerez Chaves e aprovada pela Banca Examinadora.

Campinas, 15 de junho de 2010.

Prof. Dr. Edmundo R. M. Madeira
(Orientador)

Profª. Drª. Islene C. Garcia
(Coorientadora)

Dissertação apresentada ao Instituto de Computação, UNICAMP, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DO IMECC DA UNICAMP
Bibliotecária: Miriam Cristina Alves – CRB8 / 8059

Chaves, Luciano Jerez
C398u Um mecanismo cognitivo para adaptação automática da taxa de transmissão em redes IEEE 802.11/Luciano Jerez Chaves -- Campinas, [S.P. : s.n.], 2010.

Orientadores: Edmundo Roberto Mauro Madeira; Islene Calciolari Garcia.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Computação.

1.Sistemas de comunicação sem fio. 2. Redes locais de computação. 3. Algoritmos de computador. I. Madeira, Edmundo Roberto Mauro. II. Garcia, Islene Calciolari. III. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Computação. IV. Título.

Título em inglês: A cognitive mechanism for automatic data rate adaptation in IEEE 802.11 networks.

Palavras-chave em inglês (Keywords): 1. Wireless data communication systems. 2. Local area networks. 3. Computer algorithms.

Área de concentração: Redes de Computação

Titulação: Mestre em Ciência da Computação

Banca examinadora: Prof. Dr. Edmundo Roberto Mauro Madeira (IC-UNICAMP)
Prof. Dr. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa (COPPE-UFRJ)
Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca (IC-UNICAMP)

Data da defesa: 11/06/2010

Programa de Pós-Graduação: Mestrado em Ciência da Computação

TERMO DE APROVAÇÃO

Dissertação Defendida e Aprovada em 11 de junho de 2010, pela Banca examinadora composta pelos Professores Doutores:

Prof. Dr. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa
COPPE / UFRJ

Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca
IC / UNICAMP

Prof. Dr. Edmundo Roberto Mauro Madeira
IC / UNICAMP

Instituto de Computação
Universidade Estadual de Campinas

Um Mecanismo Cognitivo para Adaptação Automática da Taxa de Transmissão em Redes IEEE 802.11

Luciano Jerez Chaves[1]

15 de junho de 2010

Banca Examinadora:

- Prof. Dr. Edmundo R. M. Madeira (Orientador)
  IC - UNICAMP
- Prof. Dr. Luís Henrique M. K. Costa
  COPPE - UFRJ
- Prof. Dr. Nelson Luis S. da Fonseca
  IC - UNICAMP
- Prof. Dr. Eleri Cardozo (Suplente)
  FEEC - UNICAMP
- Prof. Dr. Luiz Eduardo Buzato (Suplente)
  IC - UNICAMP

[1]O aluno recebeu recursos financeiros do CNPq (processo 132321/2008-4) entre 03/2008 e 02/2009; e da FAPESP (processo 2008/07770-8) entre 03/2009 e 02/2010.

Resumo

A utilização das redes sem fio vem se tornando cada vez mais frequente, e o IEEE 802.11 é o padrão escolhido pela maioria dos dispositivos. Com o objetivo de adaptar-se às condições instáveis dos canais de transmissão sem fio, este padrão especifica diversos esquemas de codificação e modulação de dados que devem ser, obrigatoriamente, implementados pelas interfaces sem fio. Como consequência, essas interfaces passam a suportar múltiplas taxas de transmissão, definidas em função da combinação entre a codificação e a modulação utilizada. Entretanto, não faz parte da especificação o processo para a escolha dinâmica de qual taxa de transmissão utilizar, deixando livre para os fabricantes a definição de um algoritmo para solucionar este problema, conhecido por adaptação automática da taxa de transmissão. Apesar de diversas soluções terem sido propostas na literatura, o desempenho alcançado por elas está limitado por fatores como a dificuldade na estimativa da qualidade do canal e o compartilhamento injusto dos recursos entre as estações da rede. Para lidar com estes desafios, este trabalho apresenta um mecanismo cognitivo para adaptação automática da taxa de transmissão denominado *COgnitive Rate Adaptation* (CORA). Este é um mecanismo completamente distribuído, capaz de equipar as estações da rede com as funcionalidades de autoconfiguração e auto-otimização da taxa de transmissão. O CORA é capaz de reagir rapidamente às mudanças nas condições do canal para evitar a degradação do desempenho, além de convergir para a melhor taxa de transmissão durante os períodos de estabilidade. Para isso, o mecanismo utiliza uma abordagem simplista para avaliar a qualidade do canal sem fio, além de apresentar características específicas que contribuem com a justiça no compartilhamento dos recursos entre as estações. O mecanismo proposto é avaliado através de simulações, e os resultados são comparados com algumas soluções existentes na literatura e também com algoritmos utilizados nos dispositivos comerciais. Os resultados obtidos confirmam o bom desempenho do mecanismo proposto em relação aos demais algoritmos avaliados.

Abstract

Wireless networks have become frequently used nowadays, and IEEE 802.11 is the standard chosen for practically all devices. Aiming to adapt to changing conditions of wireless channels, this standard specifies several modulation and coding schemes that must be implemented by all wireless interfaces. As a result, these interfaces can support multiple data rates, which are named according to the selected modulation and coding schemes. However, this standard does not define how to dynamically select the transmission rate to be used, allowing manufacturers to create and implement their own algorithm to solve this problem, known as the rate adaptation problem. Despite that several solutions have been proposed in the literature, the performance achieved by them is limited by factors such as the difficulty in estimating wireless channel conditions and unfair resource sharing among network nodes. In order to tackle these challenges, this work introduces a cognitive mechanism for rate adaptation called CORA. This is a completely distributed mechanism, capable of equipping network stations with self-configuration functionality to dynamically adapt the data rate. This mechanism is also able to quickly react to changes on channel conditions in order to avoid performance degradation, and can converge to the best data rate during periods of stability. To do this, CORA makes use of a simplistic approach for assessing the channel conditions, besides presenting specific features that may ensure fair resource sharing among nodes. The proposed mechanism is evaluated by simulations, and the results are compared with some solutions existing in the literature and also with algorithms that are used in commercial devices. Simulation results confirm performance benefits with respect to the other rate adaptation algorithms evaluated.

Sumário

Resumo **vii**

Abstract **ix**

1 Introdução **1**
1.1 Motivação 2
1.2 Objetivos e contribuições 4
1.3 Organização da dissertação 6

2 Fundamentos Básicos **7**
2.1 Redes sem fio IEEE 802.11 7
2.1.1 Tipos de redes sem fio IEEE 802.11 8
2.1.2 Subcamada MAC 9
2.1.3 Camada física 11
2.1.4 Adaptação automática da taxa de transmissão 12
2.1.5 Anomalia de desempenho 13
2.2 Redes em malha sem fio 14
2.3 Redes cognitivas 16
2.4 Conclusão 18

3 Trabalhos Relacionados **21**
3.1 Algoritmos de adaptação automática da taxa de transmissão 21
3.1.1 Algoritmos baseados em histórico 22
3.1.2 Algoritmos baseados na relação sinal/ruído 26
3.1.3 Algoritmos híbridos 27
3.2 Tabela resumo 28
3.3 Conclusão 30

4 Mecanismo Cognitivo para Adaptação da Taxa de Transmissão **31**
4.1 Considerações para o projeto 31

4.2 O arcabouço cognitivo CogProt . . . 34
4.3 Adaptação cognitiva da taxa de transmissão . . . 36
4.3.1 Visão geral . . . 37
4.3.2 Características do projeto . . . 39
4.3.3 O algoritmo . . . 42
4.3.4 Parâmetros configuráveis . . . 45
4.3.5 Funções auxiliares . . . 47
4.4 Conclusão . . . 51

5 Avaliação de Desempenho do Mecanismo Cognitivo Proposto 53
5.1 Implementação . . . 53
5.2 Configuração das simulações . . . 56
5.3 Cenário 1: pares de comunicação . . . 58
5.3.1 Um par comunicante . . . 58
5.3.2 Diversos pares comunicantes . . . 69
5.4 Cenário 2: rede infraestruturada . . . 74
5.4.1 Adaptação independente por enlace sem fio . . . 76
5.4.2 Diferentes métricas de otimização . . . 80
5.5 Cenário 3: rede em malha sem fio . . . 83
5.6 Conclusão . . . 88

6 Conclusão 89

Referências Bibliográficas 94

A Comandos para Configuração do Simulador *NS2* 103

Lista de Abreviaturas

AAA	Ajuste Automático da Agressividade, p. 38
ACK	*ACKnowledgment*, p. 10
AODV	*Ad hoc On-Demand Distance Vector*, p. 57
AP	*Access Point*, p. 8
ARF	*Auto Rate Fallback*, p. 22
AARF	*Adaptive Auto Rate Fallback*, p. 22
A-RTS	*Adaptive RTS*, p. 25
BER	*Bit Error Rate*, p. 11
BPSK	*Binary Phase Shift Keying*, p. 12
BSS	*Basic Service Set*, p. 8
CARA	*Collision-Aware Rate Adaptation*, p. 24
CCA	*Clear Channel Assessment*, p. 24
CCK	*Complementary Code Keying*, p. 11
CLRA	*Cross-Layer Rate Adaptation*, p. 25
CORA	*COgnitive Rate Adaptation*, p. 4
CSMA/CA	*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*, p. 9
CTS	*Clear To Send*, p. 10
CW	*Contention Window*, p. 9
DCF	*Distributed Coordination Function*, p. 9
DIFS	DCF *InterFrame Space*, p. 9
DSDV	*Destination-Sequenced Distance-Vector*, p. 57
DSSS	*Direct Sequence Spread Spectrum*, p. 11
DSSS-BK	*Direct Sequence Spread Spectrum - Barker Code*, p. 11

DSSS-CCK *Direct Sequence Spread Spectrum - Complementary Code Keying*, p. 11

DTP Diff-Time Proporcional, p. 38

EfTT *Effective Transmission Time*, p. 49

ExTT *Expected Transmission Time*, p. 23

EWMA *Exponentially Weighted Moving Average*, p. 38

FER *Frame Error Rate*, p. 24

FTP *File Transfer Protocol*, p. 80

GPS *Global Positioning System*, p. 1

IBSS *Independent Basic Service Set*, p. 8

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, p. 1

IP *Internet Protocol*, p. 80

MAC *Medium Access Control*, p. 7

NAV *Network Allocation Vector*, p. 10

NS2 *Network Simulator*, p. 5

OAR *Opportunistic Auto Rate*, p. 27

OFDM *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, p. 12

OODA *Observação, Orientação, Decisão e Ação*, p. 17

PCF *Point Coordination Function*, p. 9

PDF *Probability Density Function*, p. 5

PER *Packet Error Rate*, p. 13

QAM *Quadrature Amplitude Modulation*, p. 12

QoS *Quality of Service*, p. 41

QPSK *Quadrature Phase Shift Keying*, p. 12

RBAR *Receiver-Based Auto Rate*, p. 26

RRAA *Robust Rate Adaptation Algorithm*, p. 24

RSSI *Received Signal Strength Indication*, p. 26

RTS *Request To Send*, p. 10

SIC Serviço de Informações Cognitivas, p. 35

SARA *Stochastic Automata Rate Adaptation*, p. 23

SIFS *Short InterFrame Space*, p. 10

SINR	*Signal to Interference-plus-Noise Ratio*, p. 11
SNR	*Signal to Noise Ratio*, p. 11
TCP	*Transmission Control Protocol*, p. 57
UDP	*User Datagram Protocol*, p. 57
UML	*Universal Modelling Language*, p. 54
VoIP	Voz sobre IP, p. 80
Wi-Fi	*Wireless Fidelity*, p. 2
WLAN	*Wireless Local Area Network*, p. 1
WMAN	*Wireless Metropolitan Area Network*, p. 1
WPAN	*Wireless Personal Area Network*, p. 1
YARAa	*Yet Another Rate Adaptation algorithm*, p. 25

Lista de Algoritmos

4.1 COgnitive Rate Adaptation 43
4.2 Transmite Quadros 44
4.3 Ajuste Automático da Agressividade 48
4.4 Diff-Time Proporcional 51

Lista de Figuras

1.1 Hierarquia de padrões para as redes sem fio especificadas pelo IEEE. . . . 2
1.2 Evolução do padrão IEEE 802.11 ao longo dos anos. 3

2.1 Diferentes tipos de redes sem fio IEEE 802.11. 8
2.2 Modo de acesso básico de uma rede IEEE 802.11 utilizando o DCF. 10
2.3 Comparativo de tempo gasto pelas transmissões IEEE 802.11b. 14
2.4 Organização de uma rede em malha sem fio híbrida. 15
2.5 O ciclo de realimentação OODA. 18

4.1 Rede IEEE 802.11b infraestruturada com estações em diferentes posições. . 32
4.2 Arquitetura de uma estação de rede equipada com o CogProt. 35
4.3 Ciclo de realimentação da qualidade OODA do CogProt. 36
4.4 Ciclo de realimentação da qualidade OODA implementado pelo CORA. . . 37
4.5 Curvas normais com mesmo μ e diferentes valores de σ. 46
4.6 Representação gráfica do *diff-time* no protocolo CSMA/CA. 49

5.1 Diagrama de classes UML da implementação do CORA no *NS2*. 55
5.2 Cenário 1: topologia com um par de estações comunicantes. 58
5.3 Vazão instantânea média para cada taxa de transmissão IEEE 802.11g. . . 60
5.4 Vazão instantânea média para o algoritmo de REFERÊNCIA de adaptação. 60
5.5 Vazão agregada média em função do desvio padrão σ e do parâmetro EWMA α. 61
5.6 Vazão agregada média em função do intervalo I e do desvio padrão σ. . . . 62
5.7 Vazão agregada média em função do intervalo I e do parâmetro EWMA α. 63
5.8 Comparativo entre a vazão da função de AAA e valores fixos de σ. 64
5.9 Vazão instantânea média da função de AAA e de valores fixos de σ. 65
5.10 Vazão média em função de I e α para AAA, pior e melhor valor fixo de σ. 66
5.11 Vazão média para os algoritmos de adaptação com um par de comunicação. 67
5.12 Adaptação da taxa realizada pelos algoritmos ao longo do tempo. 68
5.13 Vazão instantânea dos algoritmos de adaptação com um par de comunicação. 69
5.14 Cenário 1: topologia com diversos pares de estações comunicantes. 70
5.15 Influência do número de estações no valor do *diff-time proporcional*. 72

5.16 Vazão média em função do número de pares de comunicação UDP. 73
5.17 Vazão média em função do número de pares de comunicação TCP. 73
5.18 Cenário 2: topologia da rede infraestruturada. 74
5.19 Vazão agregada média para comunicações UDP no cenário infraestruturado. 77
5.20 Vazão média por fluxo para comunicações UDP no cenário infraestruturado. 77
5.21 Vazão agregada média para conexões TCP no cenário infraestruturado. . . 79
5.22 Vazão média por fluxo para conexões TCP no cenário infraestruturado. . . 79
5.23 Vazão média para aplicações VoIP e FTP utilizando métricas distintas. . . 81
5.24 FER e PER para aplicações VoIP e FTP utilizando métricas distintas. . . 82
5.25 Atraso e *jitter* para aplicações VoIP e FTP utilizando métricas distintas. . 83
5.26 Cenário 3: topologia da rede em malha sem fio. 84
5.27 Vazão média para fluxos de *download* e *upload* com protocolos UDP e TCP. 87

Lista de Tabelas

2.1 Técnicas de espalhamento espectral, modulação digital e taxa de codificação. 12

3.1 Resumo das características dos algoritmos de adaptação da taxa. 29

4.1 Parâmetros das redes IEEE 802.11a/b/g. 50

5.1 Ganho percentual médio do CORA em relação aos demais algoritmos. . . . 67
5.2 Vazão média para 16 pares de comunicação utilizando protocolo UDP. . . . 71
5.3 Vazão média para 7 estações clientes utilizando o protocolo UDP. 75
5.4 Vazão média para 16 fluxos TCP de *upload*. 85
5.5 Vazão média para 24 fluxos UDP de *download*. 86

Capítulo 1

Introdução

As tecnologias sem fio permitem aos usuários maior flexibilidade de comunicação e têm se tornado disponíveis mais facilmente do que os serviços tradicionais, que exigem a instalação de cabos para prover conectividade. Atualmente, pode-se pensar na comunicação sem fio como uma alternativa flexível para a extensão da cobertura da infraestrutura fixa de comunicação. Encontram-se exemplos de aplicações desde serviços de comunicação temporários — utilizados em conferências e eventos esportivos; até comunicação permanente em localidades remotas e zonas rurais.

No contexto das comunicações sem fio, que envolvem uma esfera de serviços como telefonia celular, televisão, rádio, *Global Positioning System* (GPS), etc.; existem as **redes sem fio** para transmissão de dados, que podem ser definidas como um agrupamento de computadores e/ou outros dispositivos conectados sem o uso de cabos, mas sim através de radiofrequência ou infravermelho [Kurose e Ross, 2005]. O fato de ter a mobilidade como principal característica tem facilitado a aceitação dessas redes, normalmente utilizadas na construção das redes de acesso de banda larga (também conhecidas por redes de última milha), responsáveis por realizar a interligação dos usuários finais com a Internet.

O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) tem desenvolvido uma hierarquia de padrões complementares para especificar o funcionamento das redes sem fio, classificadas de acordo com a área de abrangência. Esta hierarquia vai desde as redes pessoais de curta distância (*Wireless Personal Area Network* - WPAN), especificadas pelo padrão IEEE 802.15; passando pelas redes locais (*Wireless Local Area Network* - WLAN) padrão IEEE 802.11; até as redes metropolitanas (*Wireless Metropolitan Area Network* - WMAN) especificadas pelos padrões IEEE 802.16 e 802.20. A Figura 1.1 ilustra essa classificação, apresentando os logotipos e nomes comerciais dessas tecnologias, além da informação de alcance aproximado para cada uma delas. É importante lembrar que essas são apenas as tecnologias especificadas pelo IEEE, e não são as únicas existentes em cada categoria.

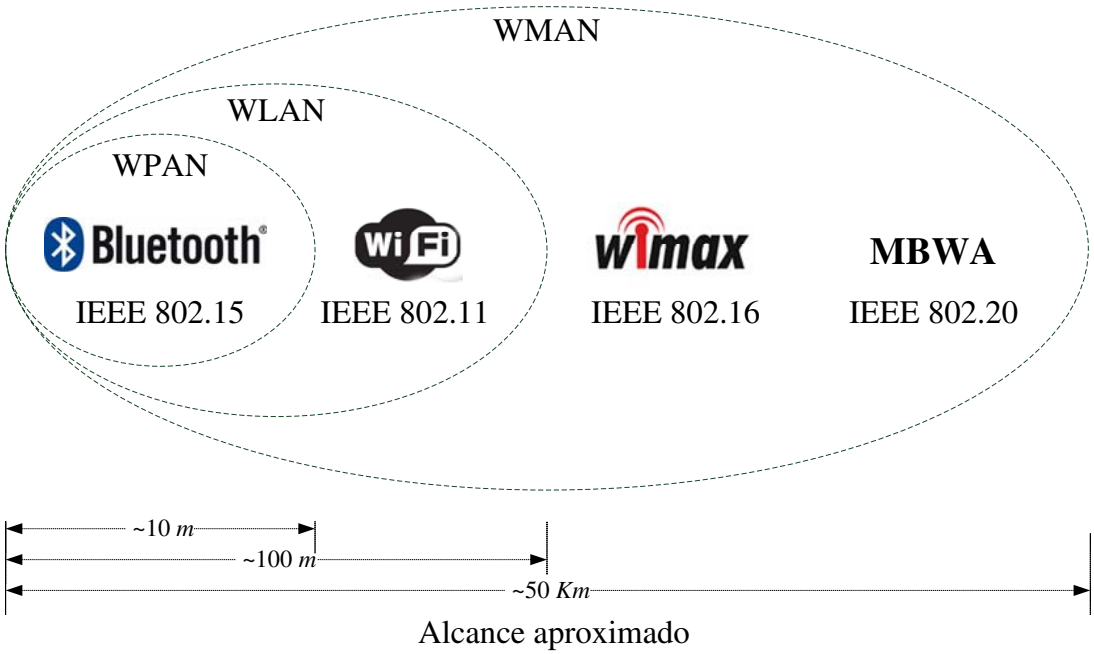


Figura 1.1: Hierarquia de padrões para as redes sem fio especificadas pelo IEEE.

Nesta dissertação, as redes de interesse são as WLANs especificadas pelo padrão IEEE 802.11 [802.11, 2007], e conhecidas comercialmente por redes Wi-Fi (abreviatura para *Wireless Fidelity*). Essas redes tornaram-se populares nos últimos anos, devido à estabilidade do padrão e, principalmente, ao baixo custo dos equipamentos. Com isso, além dos computadores fixos e portáteis, vários outros dispositivos já possuem interfaces com essa tecnologia, como impressoras, câmeras fotográficas, dispositivos de armazenamento, celulares, etc.

1.1 Motivação

A taxa de dados praticada em ambientes que utilizam tecnologia sem fio deve ser razoável, já que de nada adiantaria a disponibilidade e flexibilidade desses ambientes sem manter a tradicional funcionalidade das redes fixas conhecidas e utilizadas há tanto tempo. Por essa razão, assim como acontece no projeto de outras tecnologias, a especificação original das redes WLANs sofreu modificações ao longo do tempo, objetivando adequar-se às evoluções dos sistemas computacionais através do aumento da capacidade dessas redes. A Figura 1.2 apresenta a linha de evolução do padrão IEEE 802.11 durante os últimos anos. A principal característica desse processo evolutivo não é somente a maior velocidade alcançada pelas redes, mas também o aumento no número de taxas de transmissão disponíveis para uso.

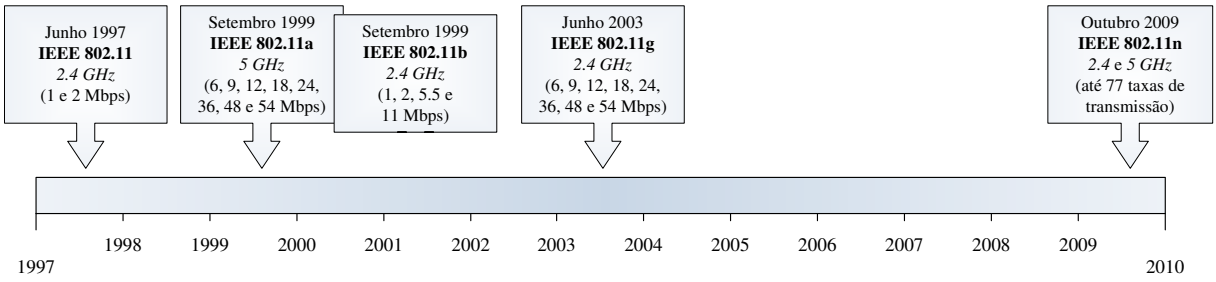


Figura 1.2: Evolução do padrão IEEE 802.11 ao longo dos anos [Mccann, 2010].

Cada taxa de transmissão é resultado da combinação de técnicas para codificação, modulação e transmissão dos dados, que serão detalhadas ao longo deste trabalho. Para simplificar, cada taxa é nomeada de acordo com a vazão teórica de *bits* que pode ser alcançada pelas técnicas utilizadas (por exemplo, taxas de 1 Mbps e 5.5 Mbps). Entretanto, a vazão na prática é reduzida por conta da sobrecarga introduzida pelos protocolos utilizados na rede.

As taxas disponíveis para uso têm suas particularidades. No geral, as menores taxas são lentas, mas consideradas robustas porque são imunes às pequenas variações na qualidade do sinal. Por conta disso, elas aumentam a área de cobertura, são efetivas em ambientes com ruído e interferência, e são úteis para transmissões de longa distância. Por outro lado, as taxas com vazões maiores melhoram o desempenho da rede, mas demandam de uma elevada qualidade do sinal para que possam ser utilizadas com sucesso.

Segundo o padrão IEEE 802.11, é obrigatório que todos os dispositivos sejam capazes de utilizar qualquer uma das taxas de transmissão especificadas, mas não há nenhuma regra sobre qual delas deve ser utilizada. Logo, cada fabricante fica livre para desenvolver e implementar o seu próprio algoritmo de **adaptação automática da taxa de transmissão**, foco de pesquisa deste trabalho.

A escolha apropriada de qual taxa utilizar é fundamental para o bom aproveitamento dos recursos disponíveis nas redes sem fio [Hou et al., 2008; Kim et al., 2006c]. Segundo [Joshi et al., 2008], normalmente existe uma taxa de transmissão que maximiza o desempenho, dada as condições do canal sem fio. Sendo assim, um algoritmo de adaptação deve ser capaz de encontrar essa taxa dinamicamente, eliminando a necessidade de intervenção do administrador da rede nessa configuração.

O algoritmo de adaptação automática da taxa de transmissão é útil nos diversos ambientes, tanto estáveis quanto dinâmicos. Nos ambientes estáveis, onde as estações estão fixas em suas posições e as condições do canal sem fio permanecem constantes ao longo do tempo, o algoritmo auxilia no processo de configuração inicial, identificando qual a taxa que maximiza o desempenho e deve ser utilizada durante todo o tempo de funcionamento da rede. Já nos ambientes dinâmicos, onde a qualidade do sinal varia ao longo do tempo

por conta de ruídos, interferências e pela movimentação das estações, o algoritmo deve ser capaz de identificar as mudanças que ocorrem no canal sem fio para ajustar a taxa corretamente, aumentando o desempenho (normalmente medido em função da vazão de dados) quando é possível, mas sempre mantendo a conectividade entre as estações nos momentos em que a qualidade do canal diminui.

Segundo [Kim et al., 2006b], a importância da adaptação da taxa de transmissão nas WLANs é refletida na padronização do IEEE 802.11n [802.11n, 2009], que prevê o uso de até 77 taxas de transmissão distintas. Para auxiliar os algoritmos de adaptação, foram criados campos específicos no cabeçalho dos quadros com o objetivo de transportar informações relevantes para este processo, como o indicador de qualidade de sinal. Entretanto, esses recursos auxiliares não estão disponíveis nas versões mais antigas e utilizadas do padrão (802.11a, .11b e .11g). A ausência de suporte por parte da especificação dessas redes dificulta o projeto dos mecanismos[1] de adaptação. São justamente os algoritmos utilizados por essas redes que serão abordados neste trabalho.

A ausência de uma solução padrão motivou o desenvolvimento de diversos algoritmos, alguns deles referenciados por estarem em operação em dispositivos comerciais [Bicket, 2005; Smithies, 2005; Kamerman e Monteban, 1997]. Como os suplementos .11a, .11b e .11g não fornecem nenhum recurso para auxiliar na escolha da taxa, a abordagem normalmente utilizada pelos mecanismos de adaptação consiste em estimar a qualidade do canal para, somente depois, ajustar a taxa de transmissão [Biaz e Wu, 2008]. Dessa forma, é necessário coletar informações no transmissor (possivelmente também no receptor), para avaliá-las de acordo com o propósito do algoritmo. As métricas mais utilizadas incluem sondagem através do envio de quadros em diferentes taxas [Bicket, 2005; Smithies, 2005; Kamerman e Monteban, 1997; Lacage et al., 2004; Xia e Hamdi, 2008], contagem das falhas e sucessos consecutivos durante a transmissão de quadros [Haratcherev et al., 2004; Joshi et al., 2008; Kamerman e Monteban, 1997; Lacage et al., 2004], e uso de indicadores de qualidade do sinal [Haratcherev et al., 2004; Holland et al., 2001; Sadeghi et al., 2002; Xia e Hamdi, 2008].

Mesmo com diversas soluções existentes na literatura, nenhuma delas se mostrou eficiente em situações específicas, principalmente em cenários com elevado grau de congestionamento [Cardoso e Rezende, 2008; Kim et al., 2006a; Ramachandran et al., 2007; Wong et al., 2006]. Além desse problema, alguns mecanismos não levam em consideração as limitações computacionais existentes nos equipamentos de rede, enquanto outros demandam alteração no padrão para seu correto funcionamento, dificultando a utilização dessas soluções na prática.

[1] Neste trabalho, os termos "algoritmo" e "mecanismo" são utilizados como sinônimos quando se referem à adaptação da taxa de transmissão.

1.2 Objetivos e contribuições

Para lidar com os desafios apresentados, este trabalho propõe um novo algoritmo para adaptação automática da taxa de transmissão nas redes IEEE 802.11, especificamente para os suplementos .11a, .11b e .11g. O mecanismo proposto, denominado *COgnitive Rate Adaptation* (CORA), tem como objetivo equipar as estações da rede com as funcionalidades de autoconfiguração e auto-otimização da taxa de transmissão. Para isso, é utilizado o conceito de redes cognitivas, uma nova abordagem para solucionar os desafios impostos pelas redes de computadores através do uso das tecnologias de ponta em diversas áreas de pesquisa, como aprendizado de máquina, representação do conhecimento, gerenciamento de redes, etc. [Mahmoud, 2007]. As redes cognitivas utilizam as capacidades de autoconfiguração e auto-otimização para adaptar-se à demanda dinamicamente, atendendo as necessidades dos usuários no âmbito das políticas definidas pelo administrador, além de otimizar os recursos de maneira geral.

Para alcançar esses objetivos, o mecanismo proposto CORA utiliza como base o CogProt [Kliazovich et al., 2010], um arcabouço cognitivo voltado para configuração e otimização de protocolos de comunicação, capaz de introduzir ciclos de otimização nas camadas da rede para melhorar o desempenho segundo alguma métrica de interesse. A instanciação desse arcabouço pelo mecanismo proposto foi incrementada com funções específicas, capazes de fornecer ao algoritmo as informações necessárias para o processo de avaliação do canal sem fio e da escolha da taxa de transmissão.

Através de um ciclo de otimização da qualidade que é executado em intervalos regulares de tempo, o algoritmo proposto monitora o ambiente medindo o desempenho em função da métrica de qualidade que deseja-se otimizar (normalmente, a vazão de dados). Os dados obtidos são armazenados em uma base de conhecimento que reflete o histórico de comportamento da rede. Com as informações disponíveis nesta base de conhecimento, o mecanismo ajusta uma função de densidade de probabilidade (*Probability Density Function* - PDF) normal (também denominada PDF gaussiana), e sorteia uma nova taxa de transmissão para ser utilizada durante a próxima iteração do ciclo. As características da PDF normal utilizada no sorteio garantem o bom funcionamento do algoritmo, como será visto durante o detalhamento da proposta. Da forma como foi projetado, o CORA rapidamente identifica e reage às mudanças nas condições do canal para evitar a degradação do desempenho, mas também é capaz de convergir para a melhor taxa de transmissão quando a rede permanece estável.

Esta dissertação contribui com os seguintes aspectos:

- Detalhamento do estado da arte em algoritmos para adaptação da taxa de transmissão nas redes sem fio IEEE 802.11, incluindo uma revisão bibliográfica do assunto e apresentando os princípios básicos para o projeto de novos mecanismos;

- Proposta do CORA: um novo mecanismo para adaptação automática da taxa de transmissão, utilizando o arcabouço cognitivo CogProt como base, e acrescentando funcionalidades para tornar o mecanismo mais preciso e confiável;
- Implementação do mecanismo proposto no simulador de redes de computadores *Network Simulator* (*NS2*) [NS2, 2009];
- Avaliação de desempenho do algoritmo proposto, bem como de outros algoritmos existentes na literatura, através de um processo comparativo entre os resultados obtidos nas simulações realizadas no *NS2*.

1.3 Organização da dissertação

Os capítulos desta dissertação estão organizados como segue:

- O Capítulo 2 contém uma revisão sobre os conceitos necessários para a compreensão desta dissertação. São discutidos detalhes sobre o padrão IEEE 802.11, incluindo o problema da adaptação automática da taxa de transmissão e o efeito da anomalia de desempenho nessas redes. Também são descritas as redes em malha sem fio, assim como o paradigma de redes cognitivas.
- O Capítulo 3 apresenta uma ampla revisão bibliográfica dos algoritmos de adaptação da taxa de transmissão. As soluções existentes são categorizadas de acordo com seu princípio de funcionamento, e as vantagens e limitações dessas categorias também são discutidas nesse capítulo.
- O Capítulo 4 detalha a proposta do novo mecanismo cognitivo para adaptação automática da taxa de transmissão nas redes IEEE 802.11. São discutidas as considerações de projeto, bem como as principais propriedades e funcionalidades do algoritmo em questão.
- O Capítulo 5 mostra os resultados obtidos durante a avaliação de desempenho do algoritmo proposto, assim como de outros mecanismos já existentes. Todo o processo de avaliação foi realizado através de simulações no *NS2*.
- O Capítulo 6 conclui esta dissertação, destacando as principais contribuições e potenciais extensões para o trabalho realizado.

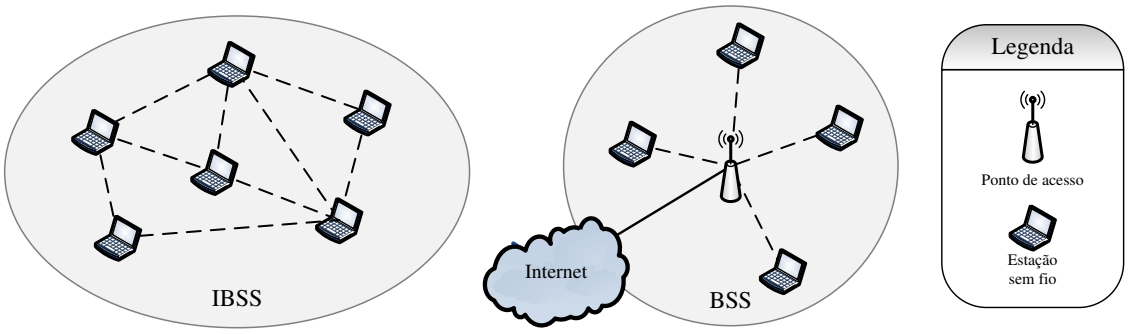
Capítulo 2

Fundamentos Básicos

Este capítulo aborda alguns conceitos básicos sobre os assuntos envolvidos nesta dissertação. Primeiramente, na Seção 2.1, são apresentadas as redes sem fio regidas pelo padrão IEEE 802.11 e seus suplementos. Esse padrão compreende a subcamada de acesso ao meio e a camada física. A análise cuidadosa dessas camadas é fundamental para a compreensão do problema da adaptação da taxa de transmissão, cujo mecanismo proposto neste trabalho visa solucionar. Nesta seção também é apresentado o efeito da anomalia de desempenho inerente às redes com suporte a múltiplas taxas de transmissão. Na sequência, a Seção 2.2 descreve a arquitetura de redes em malha sem fio, cujo objetivo é viabilizar a implementação de redes de acesso sem fio em larga escala e com altas taxas de transmissão. Essa arquitetura possui características bem peculiares, que devem ser consideradas durante o projeto de novos protocolos e mecanismos. O último assunto abordado são as redes cognitivas. A Seção 2.3 apresenta uma introdução aos conceitos e propriedades deste novo paradigma para o desenvolvimento e gerência dos sistemas de comunicação. Para finalizar, as conclusões obtidas são apresentadas na Seção 2.4.

2.1 Redes sem fio IEEE 802.11

As redes sem fio IEEE 802.11, que estão especificadas em [802.11, 2007] (incluindo seus suplementos .11a, .11b, e .11g, originalmente apresentados em [802.11a, 1999; 802.11b, 1999; 802.11g, 2003]), tornaram-se a tecnologia utilizada pela maioria das WLANs. Esse conjunto de padrões foi proposto para uso em bandas públicas nas faixas de 2.4 e 5 GHz, e compreendem a camada física e a subcamada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC). A subcamada MAC especifica os métodos para acesso ao meio e a estrutura dos quadros utilizados pela camada de enlace. Já a camada física descreve as técnicas que devem ser utilizadas na transmissão das ondas eletromagnéticas, garantindo o suporte a múltiplas taxas de transmissão de dados e permitindo a comutação dinâmica



(a) Rede sem fio *ad hoc*. (b) Rede sem fio infraestruturada.

Figura 2.1: Diferentes tipos de redes sem fio IEEE 802.11.

desta taxa para aumentar o desempenho da rede.

O restante desta seção está organizado como segue. A Subseção 2.1.1 apresenta os tipos de redes suportados pelo padrão em questão, classificados de acordo com os serviços disponíveis. Na sequência, a Subseção 2.1.2 detalha o protocolo utilizado pela subcamada MAC para controlar o acesso das estações ao meio compartilhado. A Subseção 2.1.3 descreve as técnicas utilizadas pela camada física para transmitir os quadros de dados através das ondas eletromagnéticas. Para finalizar, são apresentados o problema da adaptação automática da taxa de transmissão na Subseção 2.1.4, e o efeito da anomalia de desempenho na Subseção 2.1.5.

2.1.1 Tipos de redes sem fio IEEE 802.11

Segundo [Gummalla e Limb, 2000], de acordo com os serviços, disposição e funcionalidade lógica das estações nas WLANs, estas podem ser divididas em duas classes: centralizadas e distribuídas; conhecidas como infraestruturada e *ad hoc*, respectivamente. A Figura 2.1 ilustra esses tipos de redes sem fio. Nesta figura, a linha contínua representa uma conexão com cabos, enquanto as linhas tracejadas representam conexões sem fio.

Nas **redes *ad hoc***, as estações sem fio agrupam-se em uma topologia de malha para formarem um conjunto básico de serviço independente (*Independent Basic Service Set* - IBSS). A responsabilidade pela organização e controle nessas redes é distribuída entre as próprias estações, que funcionam como roteadores capazes de encaminhar, de forma comunitária, os quadros advindos das estações vizinhas.

Já nas **redes infraestruturadas**, as estações agrupam-se em uma topologia estrela para formarem um conjunto básico de serviço (*Basic Service Set* - BSS), que contém uma estação central denominada **ponto de acesso** (*Access Point* - AP), e uma ou mais estações cliente. O AP é o elemento responsável pelo envio e recebimento de dados dos

clientes sem fio que estão associados a ele. Ele também é responsável por prover serviços essenciais como distribuição de endereços e conectividade à Internet (ou à rede corporativa). Normalmente, o AP é conectado a uma infraestrutura de rede cabeada, o que justifica o nome utilizado por esse tipo de rede.

2.1.2 Subcamada MAC

A subcamada MAC dessas redes prevê dois métodos para controlar o acesso ao meio: o opcional *Point Coordination Function* (PCF) e o obrigatório *Distributed Coordination Function* (DCF).

O PCF pode ser utilizado somente pelas redes infraestruturadas, onde o acesso compartilhado passa a ser controlado pelo AP. Por ser opcional e restritivo a esse tipo de rede, o PCF tornou-se pouco utilizado, levando a maioria dos fabricantes a não implementarem esse método em seus equipamentos.

Já o DCF pode ser utilizado por todos os tipos de redes, e atua como método básico de controle de compartilhamento do meio entre estações através do uso do protocolo *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA). Neste protocolo, uma estação que possui quadros de dados para enviar precisa invocar um mecanismo de detecção de portadora, a fim de comparar o sinal recebido em sua interface de rádio com um limitante para verificar se o meio encontra-se livre ou ocupado. Se o meio está ocupado, é preciso esperar a conclusão da transmissão em andamento. Quando o meio estiver livre, a estação deve aguardar por um intervalo de tempo denominado DCF *InterFrame Space* (DIFS) antes de enviar o quadro.

Após o DIFS, é necessário ainda calcular um tempo aleatório de ***backoff*** que irá retardar o início da transmissão. Se o temporizador de *backoff* já possuir um valor maior do que zero significa que o *backoff* já foi calculado anteriormente, e é suficiente decrementá-lo. Caso contrário, calcula-se um novo valor utilizando a seguinte equação:

$$backoff = aSlotTime \times random() \tag{2.1}$$

onde *aSlotTime* é um intervalo de tempo (em microssegundos) estabelecido de acordo com as características da camada física; enquanto *random()* é um inteiro pseudoaleatório gerado a partir de uma distribuição uniforme dentro do intervalo $[0, CW]$. A **janela de contenção** (*Contention Window* - CW) é também um número inteiro no intervalo $31 \leqslant CW \leqslant 1023$, calculado pela equação a seguir, em função da tentativa de retransmissão r de cada quadro:

$$CW = 2^a - 1 \quad \begin{cases} a = 5 + r, & se\ 0 \leqslant r \leqslant 5; \\ a = 10, & se\ r > 5. \end{cases} \tag{2.2}$$

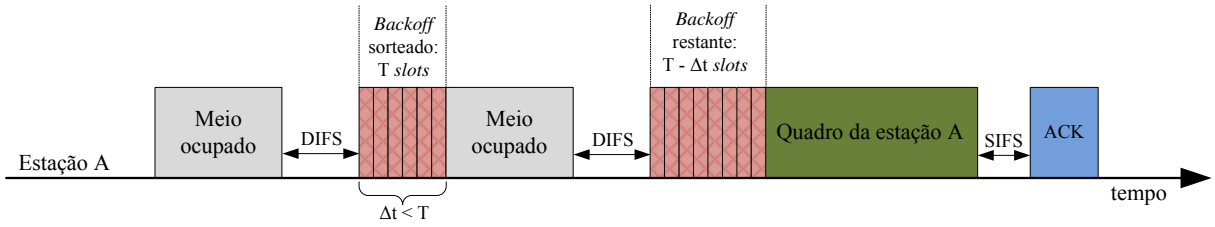


Figura 2.2: Modo de acesso básico de uma rede IEEE 802.11 utilizando o DCF.

Com o temporizador de *backoff* definido para um valor não nulo, a estação faz a contagem regressiva desse valor somente enquanto o meio físico permanecer ocioso. Se durante esta contagem alguma outra transmissão ocorrer, o temporizador deve permanecer congelado até que o meio encontre-se novamente livre por um intervalo de tempo DIFS.

Quando o contador atingir zero, a estação envia o quadro e, para as transmissões *unicast*, aguarda o reconhecimento positivo através do *ACKnowledgment* (ACK) emitido pelo receptor. O quadro de ACK é enviado após aguardar um intervalo no fim do recebimento do quadro de dados. Este intervalo é denominado *Short InterFrame Space* (SIFS), e seu tamanho é menor do que o DIFS, para garantir a prioridade na transmissão dos quadros reconhecimento. Se o ACK não for recebido, a estação transmissora reenvia o quadro de dados, utilizando um CW maior, segundo a Equação 2.2. Se o número de retransmissões (r) exceder um limite máximo, o quadro finalmente será considerado perdido pela camada de enlace.

A Figura 2.2 ilustra o funcionamento do protocolo CSMA/CA durante a transmissão de um quadro pela estação A em um ambiente onde existem transmissões concorrentes. Nessa figura é possível visualizar a interrupção na contagem regressiva do temporizador de *backoff*, e o reinício dessa contagem após DIFS intervalo de tempo ocioso.

Um refinamento do DCF pode ser utilizado como mecanismo de reserva, a fim de evitar colisões em ambientes congestionados ou com presença de terminais ocultos (estações fora da área de cobertura dos demais elementos da rede). Quando uma estação deseja transmitir um quadro, ela primeiro envia em *broadcast* um pequeno quadro de controle denominado *Request To Send* (RTS). A estação destino reconhece o RTS enviando de volta um *Clear To Send* (CTS), também em *broadcast*. Quando essa troca de quadros é realizada com sucesso, as demais estações tomam ciência da transmissão, atualizando seus *Network Allocation Vectors* (NAVs), uma estrutura de dados que contém as informações de início e duração de todas as transmissões pendentes. Assim, nenhuma transmissão é interrompida por outras estações. Entretanto, o uso desse mecanismo não é eficiente em ambientes típicos, já que a existência dos terminais ocultos é pequena. Por isso, o RTS/CTS não permanece habilitado na maioria dos dispositivos comerciais [Wu e Hou, 2005].

2.1.3 Camada física

Os sinais eletromagnéticos emitidos pelas interfaces de redes sem fio sofrem influência de diversos fatores. Dentre eles, o **ruído** é o maior limitante do desempenho destes sistemas de comunicação. Geralmente são impostos pelas características do meio físico ou provenientes de interferências de sinais indesejáveis. A quantidade de ruído presente em uma transmissão é medida em termos da razão entre a potência do sinal e a potência do ruído (*Signal to Noise Ratio* - SNR). Em casos onde existe uma fonte de **interferência** representativa (por exemplo, sinais gerados por equipamentos que operam na mesma faixa de frequência como telefone sem fio, *bluetooth*, micro-ondas, etc.), pode-se utilizar a razão entre a potência do sinal e a potência da interferência adicionada ao ruído (*Signal to Interference-plus-Noise Ratio* - SINR).

Outra influência indesejável nas transmissões sem fio é o efeito de **multipercurso**. Ele ocorre quando a trajetória do sinal entre o transmissor e o receptor percorre caminhos desiguais, produzindo um sinal distorcido. Quanto maior a diferença temporal de chegada, maior a quantidade de erros devido à interferência entre os próprios símbolos transmitidos. Esse efeito é tanto pior quanto maior for a distância entre as estações comunicantes.

Para que as redes possam lidar com o multipercurso e operar em ambientes com diferentes níveis de interferência e ruído, a camada física IEEE 802.11 especifica o suporte a múltiplas taxas de transmissão. Cada taxa é resultado da combinação de uma técnica de **espalhamento espectral**, um processo de **modulação digital** e um método para **correção de erros**. Para utilizar uma taxa de transmissão alta é preciso um sinal de boa qualidade, que possa ser demodulado gerando uma pequena proporção de *bits* errados (*Bit Error Rate* - BER). Isso é fundamental para que o processo de decodificação consiga recuperar os poucos *bits* perdidos, mantendo a integridade do quadro. Como nem sempre a qualidade do sinal é alta, existem modulações e codificações menos eficientes, porém capazes de recuperar mais *bits* perdidos com sucesso.

A Tabela 2.1 a seguir apresenta um resumo das técnicas utilizadas pelos diferentes padrões 802.11. Cada taxa de transmissão (*bit-rate*) utiliza algum método de correção de erro com taxa de codificação expressa por k/n, onde n *bits* codificados são transmitidos para cada k bits de dados. Os *bits* codificados são transformados em símbolos através do processo de modulação digital, e estes símbolos são transmitidos pela interface de rádio utilizando alguma técnica de espalhamento espectral. A **taxa de transmissão** alcançada em cada combinação é calculada multiplicando-se a taxa de codificação, a quantidade de *bits* por símbolo, e o número de símbolos que podem ser transmitidos por segundo.

O padrão original IEEE 802.11 especifica o uso do DSSS-BK como técnica de espalhamento, operando com taxas de 1 e 2 Mbps na faixa de frequência de 2.4 GHz. O 802.11b permite o uso de taxas maiores (5.5 e 11 Mbps) com a substituição do *Barker Code* pelo *Complementary Code Keying* (CCK), reduzindo a sobrecarga de codificação. Já o 802.11a

Tabela 2.1: Técnicas de espalhamento espectral, modulação digital e taxa de codificação.

Bit-rate (Mbps)	Padrão	Espalhamento Espectral	Modulação Digital	Bits por símbolo	Taxa de codificação	Símbolos por segundo
1	b	DSSS-BK	BPSK	1	1/11	11×10^6
2	b	DSSS-BK	QPSK	2	1/11	11×10^6
5.5	b	DSSS-CCK	QPSK	1	4/8	11×10^6
11	b	DSSS-CCK	QPSK	2	4/8	11×10^6
6	a/g	OFDM	BPSK	1	1/2	12×10^6
9	a/g	OFDM	BPSK	1	3/4	12×10^6
12	a/g	OFDM	QPSK	2	1/2	12×10^6
18	a/g	OFDM	QPSK	2	3/4	12×10^6
24	a/g	OFDM	QAM-16	4	1/2	12×10^6
36	a/g	OFDM	QAM-16	4	3/4	12×10^6
48	a/g	OFDM	QAM-64	6	2/3	12×10^6
54	a/g	OFDM	QAM-64	6	3/4	12×10^6

e .11g utilizam o *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) em conjunto com diferentes técnicas de modulação para aumentar as taxas de transmissão em função da melhor taxa de codificação e de mais *bits* por símbolo. Além disso, enquanto o DSSS envia somente um símbolo por vez, o OFDM é capaz de transmitir 48 símbolos em paralelo.

2.1.4 Adaptação automática da taxa de transmissão

A utilização de técnicas distintas pela camada física torna essas redes mais robustas, capazes de operar com eficiência em ambientes sob diferentes níveis de interferência e ruído. Como existem várias taxas disponíveis, é desejável que a melhor entre elas seja utilizada sempre que possível.

Como visto anteriormente, um algoritmo de adaptação automática da taxa de transmissão é útil em diversos ambientes, tanto estáveis quanto dinâmicos. Todavia, é importante que o algoritmo perceba as mudanças que ocorrem no canal sem fio para ajustar a taxa corretamente, aumentando o desempenho quando possível, mas mantendo a conectividade entre as estações caso a qualidade do canal diminua. No Capítulo 5 são apresentadas simulações que exemplificam os benefícios alcançados com o uso destes algoritmos.

Segundo [Joshi et al., 2008], o desempenho dos enlaces sem fio está intimamente relacionado com a taxa de transmissão. A propagação das ondas pelo canal varia ao longo do tempo e do espaço, provocando alterações no SNR por conta de fatores como a atenuação do sinal, movimentação de objetos, interferência e ruído. A consequência disso

é que não existe uma única taxa que seja ótima em todos os cenários [Xia e Hamdi, 2008]. Em geral, existe uma taxa ótima que maximiza o desempenho (normalmente medido em função da vazão) para uma dada condição do canal. Se é utilizada uma taxa maior do que a ótima, então a vazão é reduzida por conta do incremento no número de tentativas de retransmissões. Isso acontece porque a proporção de quadros errados (*Packet Error Rate* - PER) aumenta junto com a taxa de transmissão quando o SNR permanece constante. Por outro lado, uma taxa muito conservadora limita a vazão, já que o canal fica reservado por mais tempo para cada estação.

Além disso, à medida que a distância aumenta, o sinal sofre atenuação e o SNR diminui. Se este indicador de qualidade ficar abaixo de um limitante inferior, definido em função da taxa utilizada, então a conexão não poderá permanecer ativa por conta do BER elevado [Holland et al., 2001]. Quanto maior a taxa, maior é esse limitante. Neste sentido, surge um compromisso entre utilizar uma taxa de transmissão alta, que melhora a vazão de dados, e uma taxa de transmissão baixa, que aumenta a área de cobertura mantendo a conexão ativa entre as estações [Biaz e Wu, 2008].

Em linhas gerais, para determinar a melhor taxa de transmissão em cada momento, é preciso que o transmissor avalie as condições do canal sem fio. Esse processo é feito com auxílio de informações históricas (como recebimento de confirmações, quadros perdidos, contagem de retransmissões, etc.), ou utilizando indicadores de qualidade do sinal (como o SNR no receptor ou no próprio transmissor). De posse dessas informações, é preciso interpretar corretamente os dados disponíveis para decidir pela taxa de transmissão apropriada. As diferentes soluções existentes para o problema de adaptação automática da taxa de transmissão, bem como as vantagens e desvantagens de cada uma delas, serão apresentadas em detalhes no Capítulo 3.

2.1.5 Anomalia de desempenho

Um problema decorrente do uso de diversas taxas de transmissão na mesma rede é o efeito da anomalia de desempenho, primeiramente investigado por [Heusse et al., 2003]. A proposta do protocolo CSMA/CA visa atribuir igual probabilidade de acesso ao meio, fazendo com que, em longos períodos de tempo, a captura do canal possa ser alternada de maneira justa entre todas as estações presentes na rede. O problema é que, para transmitir quantidades iguais de dados, uma estação com taxa de transmissão mais baixa precisa reservar o canal por mais tempo do que uma estação com a taxa máxima. A Figura 2.3 apresenta um comparativo do tempo de transmissão e da vazão de dados para quadros com mesma carga útil de 1500 *bytes*, utilizando as quatro taxas de transmissão disponíveis nas redes IEEE 802.11b.

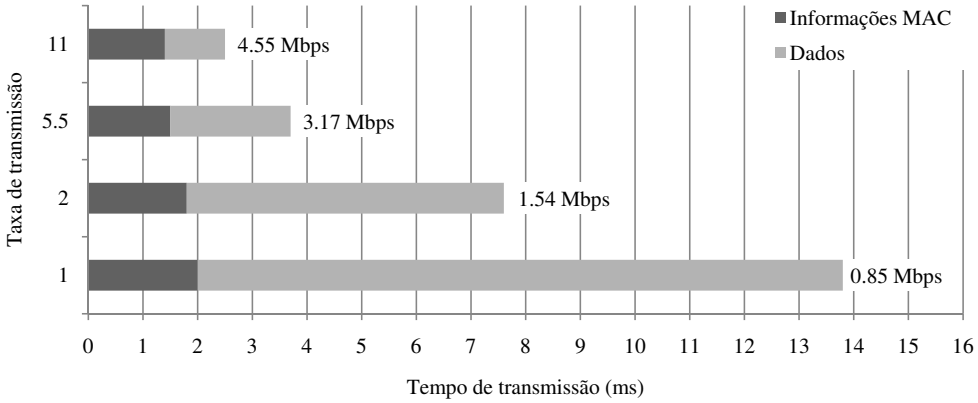


Figura 2.3: Comparativo de tempo gasto pelas transmissões utilizando as taxas disponíveis nas redes IEEE 802.11b [Awerbuch et al., 2006].

Se os quadros transmitidos pelas estações possuem tamanhos diferentes e todas as estações podem capturar o canal com mesma probabilidade, o uso desse canal torna-se desigual quando as estações utilizam taxas de transmissão diferentes. Em [Heusse et al., 2003] é feito um estudo analítico desse efeito nas redes com múltiplas taxas sob intenso tráfego de dados. Os resultados são validados através de simulação, e demonstram que a utilização da taxa de transmissão baixa por ao menos uma estação faz com que a vazão obtida por todas as estações seja consideravelmente reduzida.

Existem trabalhos na literatura que tentam amenizar o efeito da anomalia de desempenho. Em [Tavanti et al., 2007] é proposto um novo mecanismo para acesso ao meio, cuja ideia é dividir o canal entre as estações em função do tempo que cada uma utiliza. Outra abordagem é ajustar o tamanho da janela de contenção CW em função da taxa de transmissão utilizada em cada estação [Kim et al., 2005a], ou em função do indicador de qualidade de sinal SNR [Ferreira, 2007].

O efeito da anomalia de desempenho deve ser considerado durante o projeto de novos algoritmos de adaptação da taxa de transmissão, evitando sempre o uso de taxas de transmissão baixas quando uma taxa maior mostra-se satisfatória [Loiacono et al., 2007]. Essa característica se mostra presente no mecanismo proposto neste trabalho.

2.2 Redes em malha sem fio

A arquitetura de redes em malha sem fio é constituída por elementos (estações) que cooperam entre si formando uma rede *ad hoc* com encaminhamento distribuído. Diferente das redes *ad hoc* tradicionais, onde as estações são equivalentes em termos funcionais, a arquitetura de redes em malha sem fio apresenta uma organização hierárquica [Bruno

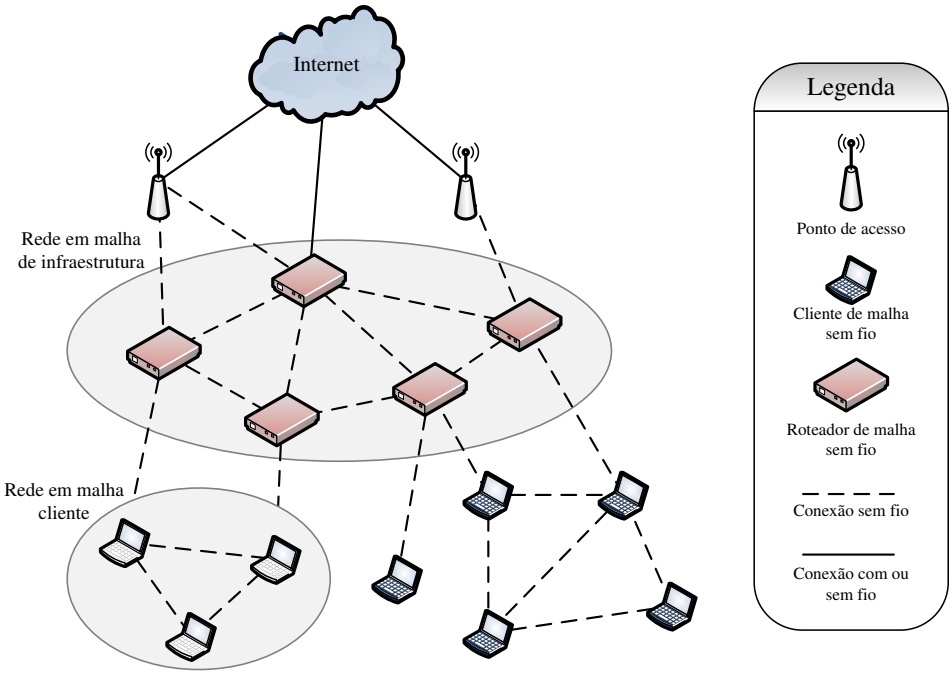


Figura 2.4: Organização de uma rede em malha sem fio híbrida.

et al., 2005]. Existem estações com mobilidade mínima denominadas **roteadores de malha**, que realizam as funções de roteamento e encaminhamento de mensagens formando uma infraestrutura de distribuição (*backbone*) sem fio. Essas estações dedicadas podem funcionar como elementos de acesso (*gateways*) às outras redes com tecnologias diferentes, inclusive à infraestrutura fixa de comunicação. Além desses roteadores de malha, existem as estações denominadas **clientes de malha**, que completam a rede. Esses clientes podem ou não ser elementos com mobilidade, que se ligam aos roteadores para compartilharem e usufruírem dos recursos disponíveis. É importante notar que os clientes também podem realizar funções de encaminhamento de pacotes, de forma que a capacidade da rede é incrementada quando novas estações são adicionadas. De fato, as redes em malha sem fio são avaliadas como uma arquitetura capaz de viabilizar a implementação de redes de acesso sem fio em larga escala e com altas taxas de transmissão [Ghosh et al., 2005].

Segundo [Akyildiz et al., 2005], essas redes podem ser classificadas em três tipos: (1) **infraestruturado**, onde os roteadores de malha formam uma infraestrutura que provê serviços aos clientes; (2) **cliente**, onde não existem roteadores de malha e os clientes se organizam como em uma rede *ad hoc* tradicional; e (3) **híbrido**, que é a junção dos dois tipos anteriores e, segundo a literatura, esse deve ser o tipo mais utilizado em ambientes reais. A Figura 2.4 ilustra uma rede em malha sem fio híbrida.

Algumas vantagens dessa arquitetura são discutidas por [Bruno et al., 2005]. É uma

arquitetura de custo reduzido e escalável, pois utiliza encaminhamento com múltiplos saltos dos pacotes pelas estações intermediárias. As estações que compõem a infraestrutura sem fio são equipamentos dedicados com mobilidade mínima, viabilizando a implementação de mecanismos sofisticados e específicos, conferindo maior confiabilidade à rede. As principais aplicações das redes em malha sem fio são a provisão de acesso à Internet com altas taxas de transmissão em redes comunitárias, construção de sistemas de transportes inteligentes e comunicação ubíqua para sistemas de monitoramento médico e segurança pública.

Em princípio, muitos protocolos projetados para as redes *ad hoc* tradicionais podem ser adaptados paras as redes em malha sem fio, inclusive os mecanismos de adaptação automática da taxa de transmissão. Entretanto, segundo [Akyildiz et al., 2005], para que essas redes tornem-se realmente úteis, é preciso uma análise cuidadosa das características específicas que podem comprometer o desempenho de tais mecanismos. Dentre essas características, pode-se destacar:

- Nas redes em malha sem fio os roteadores dedicados formam uma infraestrutura de distribuição robusta, diferente das redes *ad hoc* convencionais, onde a conectividade depende de elementos limitados e não confiáveis;

- A arquitetura deve suportar integração com outras redes, até mesmo com diferentes tecnologias, para prover e usufruir de serviços distintos. Para isso, é preciso padronização e interoperabilidade dos protocolos;

- A mobilidade da rede acontece, em sua maioria, nos clientes de malha, gerando diferentes graus de mobilidade entre os elementos. Assim, é possível utilizar soluções específicas para cada região da rede;

- Existe uma hierarquia dentro dessas redes, onde as estações executam funções diferentes e possuem capacidades computacional e energética distintas.

Muitos desafios de pesquisa ainda estão presentes quando se refere às redes em malha sem fio [Ancillotti et al., 2008; Kim et al., 2006b]. O projeto de novas soluções utilizando informações provenientes das várias camadas da arquitetura, conhecido por **abordagem *cross-layer***, tem se mostrado essencial no desenvolvimento de mecanismos eficientes e robustos [Conti et al., 2004; Srivastava e Motani, 2005]. Além dessa abordagem, o paradigma de redes cognitivas tem se mostrado promissor no desenvolvimento de novas soluções para os sistemas de comunicação sem fio cada vez mais complexos. Por essa razão, este novo conceito é apresentado em detalhes na seção a seguir.

2.3 Redes cognitivas

O constante avanço tecnológico tem permitido que as redes de computadores fiquem cada vez mais sofisticadas e complexas. Isso torna a tarefa de gerência um trabalho dispendioso e suscetível a erros. As metodologias atuais de controle e gerência ainda são muito dependentes da intervenção humana. Além disso, não se mostram viáveis para serem utilizadas nesses ambientes, já que são pouco confiáveis e não são escaláveis.

Diante das dificuldades apresentadas, uma abordagem promissora é o uso de princípios cognitivos no ajuste dinâmico dos parâmetros da pilha de protocolos dos elementos de rede. Essa ideia foi introduzida por [Mitola, 2001], através do conceito de rádios cognitivos capazes de prover compartilhamento de espectro, evitando interferência entre os sistemas de comunicação. Na verdade, os rádios cognitivos são limitados à capacidade de ajuste dos parâmetros da camada física e de enlace, seguindo objetivos de otimização locais. Por outro lado, um conceito mais amplo de redes cognitivas considera redes equipadas com elementos capazes de observar e coletar informações sobre as condições do ambiente e, então, utilizando o conhecimento obtido anteriormente, planejar e agir com base nestas informações para atingir objetivos de alto nível [Thomas et al., 2006].

As redes sem fio cognitivas são aquelas que podem, dinamicamente, alterar sua topologia e/ou seus parâmetros operacionais para atender às necessidades de um usuário em particular e, ao mesmo tempo, garantir que as políticas de operação e regulação sejam mantidas, visando otimizar o desempenho da rede como um todo.

Em geral, uma rede cognitiva é formada por um conjunto distribuído de **entidades cognitivas** (também chamados de agentes cognitivos), que possuem alguma capacidade de raciocínio. As entidades cognitivas podem interagir entre si, a fim de trabalharem em cooperação. Além disso, essas entidades devem ser capazes de aprender e tomar decisões com o intuito de alcançar objetivos fim-a-fim, definidos em função dos requisitos dos usuários e das regras de negócio da rede [Mahmoud, 2007; Thomas, 2007].

O processo de planejamento e tomada de decisão é realizado pelo que definimos **ciclo de realimentação da qualidade** (*quality feedback loop*). Esse ciclo modela o aprendizado e descreve como as interações passadas com o ambiente podem direcionar as atuais e futuras interações. A Figura 2.5 ilustra o ciclo de realimentação originalmente proposto por [Boyd, 1995]. Este ciclo é conhecido por *Observação, Orientação, Decisão e Ação* (OODA), inicialmente utilizado por oficiais militares para compreender o processo de raciocínio de seus adversários.

As etapas do ciclo OODA são detalhadas em seguida. A primeira etapa de **observação** é realizada através do monitoramento e das medições realizadas no ambiente, o que inclui o pré-processamento dos dados obtidos. A etapa de **orientação** é responsável pela interpretação e abstração dos dados, além da checagem de consistência, cálculo de

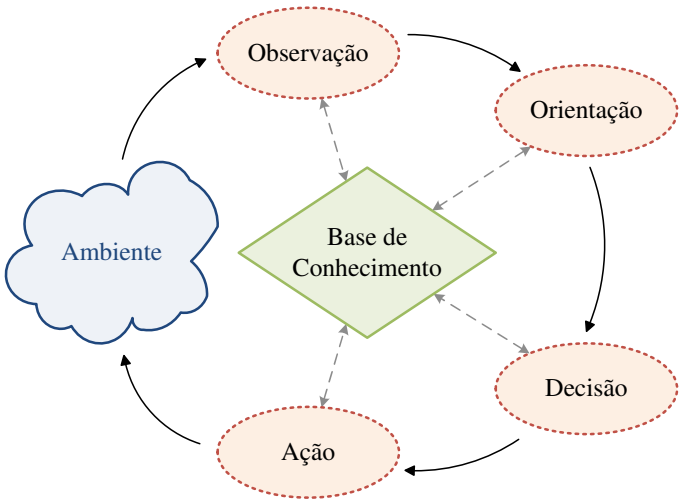


Figura 2.5: O ciclo de realimentação OODA [Boyd, 1995].

predições e raciocínio. A etapa de **decisão** consiste na avaliação das alternativas existentes e na escolha de ações de reconfiguração. A etapa final de **ação** é realizada através das modificações nas entidades cognitivas, com base nas ações escolhidas pela etapa anterior. Também é preciso manter uma **base de conhecimento**, onde a experiência obtida com as ações passadas possa ser armazenada, e sirva como guia durante as orientações futuras.

Segundo [Thomas, 2007], o uso dos ciclos de realimentação da qualidade são efetivos porque os ambientes onde as decisões estão sendo tomadas são complexos, mas não aleatórios. Existe uma organização, que pode não ser aparente em uma análise superficial, mas pode ser alcançada através de iterações repetidas desses ciclos de realimentação em uma abordagem de tentativa e erro.

Uma pesquisa sobre tendências no desenvolvimento de redes de comunicação foi realizada por [Fortuna e Mohorcic, 2009]. As conclusões obtidas por eles indicam que o trabalho conjunto de pesquisadores nas diferentes áreas da computação tem se mostrado o caminho promissor no projeto e implementação das redes cognitivas, capazes de lidar com a crescente complexidade dos sistemas modernos. Dentre as diferentes estratégias utilizadas, pode-se destacar técnicas de inteligência artificial, que visam ajustar um sistema de maneira que ele seja capaz de perceber o ambiente no qual está inserido, além de tomar ações que maximizem sua chance de alcançar o sucesso; os algoritmos genéticos, que implementam heurísticas de busca imitando o processo de evolução biológica natural; o aprendizado de máquina, onde os sistemas automaticamente reconhecem e interpretam padrões complexos para tomar decisões inteligentes com base nestes dados; dentre outras abordagens.

2.4 Conclusão

Neste capítulo foi feita uma revisão dos conceitos necessários para a compreensão deste trabalho. O padrão IEEE 802.11 foi apresentado em detalhes, cobrindo tanto a camada física quanto a subcamada de acesso ao meio. Foram comentados os tipos de organização dessas redes, bem como foram descritos o problema da adaptação automática da taxa de transmissão e o efeito da anomalia de desempenho.

Como pôde ser visto, o sucesso das redes sem fio gerou novas propostas de arquiteturas. Neste contexto, foram apresentadas as redes em malha sem fio, que se mostram uma solução promissora na construção de redes de acesso sem fio em larga escala e com taxas de transmissão altas. Também foi discutido sobre as dificuldades no gerenciamento de sistemas de comunicação cada vez mais complexos. Como alternativa, foi apresentado o paradigma de redes cognitivas, cujo objetivo é permitir que os elementos das redes sejam capazes de observar as condições do ambiente e, então, planejar e agir sobre estas condições.

O próximo capítulo apresenta uma ampla revisão bibliográfica dos algoritmos de adaptação da taxa de transmissão. As soluções existentes são categorizadas de acordo com seu princípio de funcionamento, e as vantagens e limitações de cada categoria também são discutidas nesse capítulo.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Normalmente, os fabricantes de equipamentos sem fio querem estender a área de cobertura e, ao mesmo tempo, maximizar a vazão de dados na rede. Entretanto, existe um compromisso entre esses dois objetivos, que pode ser equilibrado através da seleção adequada da taxa de transmissão [Biaz e Wu, 2008]. Como visto no capítulo anterior, o padrão IEEE 802.11 define como obrigatório o suporte a diferentes taxas, mas deixa livre o projeto e a implementação dos algoritmos de adaptação, resultando em diversas propostas na literatura para o problema em questão.

Este capítulo contém uma revisão bibliográfica detalhada do assunto abordado. A Seção 3.1 apresenta os diversos algoritmos existentes na literatura. Estes algoritmos são divididos em categorias, e as principais vantagens e desvantagens de cada uma delas são discutidas. Uma tabela resumo com as principais características desses algoritmos é apresentada na Seção 3.2, incluindo também informações a respeito do mecanismo proposto nesta dissertação. Para finalizar o capítulo, a Seção 3.3 destaca as conclusões obtidas nesta revisão bibliográfica.

3.1 Algoritmos de adaptação automática da taxa de transmissão

O processo de adaptação da taxa de transmissão pode ser dividido em duas etapas. A primeira delas consiste em acessar o enlace sem fio para avaliar as condições de qualidade do mesmo. Somente depois, na segunda etapa, é selecionada a taxa mais apropriada para uso, com base nas informações coletadas anteriormente. Neste contexto, os algoritmos existentes são classificados em três categorias, de acordo com a abordagem utilizada para avaliar a qualidade do enlace [Ancillotti et al., 2008; Biaz e Wu, 2008]: (1) algoritmos baseados em histórico, que utilizam informações das transmissões dos quadros para inferir

as condições futuras do enlace sem fio; (2) algoritmos baseados na relação sinal/ruído, que fazem uso de indicadores de qualidade do sinal; e (3) algoritmos híbridos, que utilizam uma combinação das abordagens. As principais soluções de cada categoria são apresentadas a seguir.

3.1.1 Algoritmos baseados em histórico

O primeiro algoritmo de adaptação da taxa desenvolvido para as redes IEEE 802.11 foi o ***Auto Rate Fallback* (ARF)**, proposto por [Kamerman e Monteban, 1997]. O mecanismo é simples e intuitivo, com objetivo de maximizar a vazão através do uso da maior taxa a cada momento. O transmissor envia os primeiros quadros com a menor taxa disponível, além de iniciar um contador regressivo. Se o contador zerar, ou se dez quadros consecutivos forem enviados com sucesso, o transmissor passa a utilizar a taxa imediatamente superior à atual, e reinicia o contador. Se a primeira transmissão com a nova taxa falhar, ou se duas transmissões consecutivas quaisquer falharem, a taxa é reduzida e o contador é novamente reiniciado.

Este algoritmo possui problemas conhecidos, como a instabilidade e ausência de convergência [Lacage et al., 2004]. Se a taxa ótima para uma dada condição da rede consiste em um valor intermediário, o ARF constantemente tentará enviar dados na taxa imediatamente superior, mesmo quando existe um longo histórico de insucessos nessas tentativas. Além disso, quando as condições do ambiente variam com alta frequência, o mecanismo não é capaz de adaptar a taxa corretamente porque utiliza limitantes fixos para controlar o incremento ou decremento desta taxa. Outro problema relevante diz respeito à transmissão de quadros de uma mesma estação para destinos diferentes. O algoritmo (em sua proposta original) não prevê esta situação, penalizando alguns enlaces em favor de outros. Mesmo com as limitações apresentadas, alguns trabalhos na literatura [Kim et al., 2006a,b; Sadeghi et al., 2002] afirmam que este algoritmo, ou alguma variante dele, é utilizado em vários dispositivos comerciais.

Para melhorar o desempenho alcançado pelo ARF, um novo algoritmo denominado ***Adaptive Auto Rate Fallback* (AARF)** foi proposto por [Lacage et al., 2004]. Este algoritmo realiza o ajuste exponencial nos limitantes utilizados pelo ARF, visando diminuir a instabilidade resultante de mudanças desnecessárias na taxa. Quando o primeiro quadro enviado após um incremento da taxa falha, o AARF dobra o tamanho do limitante de incremento para retardar a próxima tentativa. Caso contrário, este limitante é restaurado ao seu valor original.

Ambas as soluções apresentadas (ARF e AARF) ajustam a taxa de transmissão com base apenas nos sucessos e perdas de quadros. Entretanto, nem sempre há uma relação forte entre estas informações e a real qualidade do enlace, já que quadros podem ser

perdidos em decorrência de colisões [Ancillotti et al., 2008]. Neste sentido, [Bicket, 2005] apresentou uma nova abordagem em seu algoritmo de adaptação da taxa, denominado **SampleRate**. Este é algoritmo padrão do *driver* `MadWifi` [MadWiFi, 2010], e tem como objetivo aumentar a vazão de dados na rede através da seleção da taxa que resulte no menor tempo de transmissão esperado (*Expected Transmission Time* - ExTT), definido como sendo o tempo necessário para enviar um quadro com sucesso, incluindo o *backoff*, retransmissões e o recebimento do ACK.

O SampleRate decrementa a taxa de transmissão caso presencie quatro perdas consecutivas de quadros. Além disso, o algoritmo calcula o ExTT para alguma taxa diferente da atual a cada 10 segundos, através do envio de um único quadro de sondagem. A troca efetiva entre taxas é realizada somente quando existir uma nova opção com desempenho melhor do que o atual. Para otimizar o funcionamento, o conjunto de taxas elegíveis é reduzido através da eliminação dos candidatos incapazes de melhorar o desempenho da taxa atual. Isto ocorre quando a vazão da taxa candidata em um cenário sem perdas não consegue ultrapassar a vazão atual de dados.

Na mesma linha do SampleRate, o **Minstrel Rate Control Algorithm**, proposto por [Smithies, 2005], é um mecanismo disponível tanto no `MadWiFi` quanto no *kernel* do *Linux* (a partir da versão 2.6.28 [Fietkau, 2008]). Este algoritmo tenta aumentar a vazão, com base apenas em medidas de desempenho simples. Dos quadros enviados na rede, 10% são transmitidos com alguma taxa aleatória, e as informações obtidas neste processo de sondagem são utilizadas na construção de uma tabela que lista a taxa com a melhor vazão, a taxa com a segunda melhor vazão e a taxa com a maior probabilidade de entrega do quadro. Os outros 90% dos quadros são enviados de acordo com esta tabela, onde cada tentativa de transmissão do mesmo quadro utiliza uma das taxas apresentadas, nesta mesma ordem. Se as três primeiras tentativas falharem, as demais retransmissões são realizadas com a menor taxa existente.

Uma solução bem diferente das demais foi apresentada por [Joshi et al., 2008], denominada ***Stochastic Automata Rate Adaptation* (SARA)**. Este algoritmo atribui probabilidades de seleção para cada uma das taxas disponíveis, ajustando dinamicamente estes valores em função dos resultados das transmissões: incrementa a probabilidade em caso de sucesso ou reduz em caso de falhas. Desta maneira, as taxas com bom histórico de sucessos ficam com probabilidade de seleção maior do que as demais. Em intervalos regulares de tempo, o algoritmo escolhe aleatoriamente uma taxa (considerando as probabilidades definidas), e utiliza esta escolha para todas as transmissões durante o próximo intervalo. Como a taxa que minimiza as perdas é a que tem a maior probabilidade de seleção, ela será a mais utilizada pela estação em longo prazo.

A principal dificuldade encontrada no uso deste algoritmo diz respeito à identificação de mudanças no canal em uma rede estável. Nesses ambientes, o SARA incrementa

constantemente a probabilidade de seleção da mesma taxa que minimiza a perda de quadros, diminuindo a probabilidade de uso das demais taxas. Como consequência, se ocorre uma rápida mudança na qualidade do canal, é preciso muito tempo para o algoritmo identificar e adaptar a taxa corretamente.

Os algoritmos apresentados até aqui utilizam as informações de perda de quadros para estimar a qualidade do enlace. Entretanto, a perda de um quadro pode ser consequência da baixa qualidade do enlace ou de uma colisão. Segundo [Biaz e Wu, 2008], um algoritmo que não identifica a causa da perda torna-se ineficiente, já que a taxa de transmissão só deve ser modificada em resposta à degradação do sinal, e não às colisões. Neste sentido, surgiram novas soluções que incorporam esta diferenciação.

O ***Collision-Aware Rate Adaptation* (CARA)**, idealizado por [Kim et al., 2006a], opera de maneira similar ao ARF, aumentando ou diminuindo a taxa de acordo com as falhas e sucessos. Porém, ele utiliza mensagens RTS/CTS adaptativas para identificar o motivo da perda de um quadro, em conjunto com o *Clear Channel Assessment* (CCA). Quando um quadro é perdido, a próxima tentativa é precedida por um RTS. Se este RTS ou o quadro de dados forem perdidos, então o algoritmo infere que a qualidade do enlace é precária, e permite a redução da taxa de transmissão. Caso contrário, nenhuma ação é tomada. Já o CCA consiste em, após um intervalo SIFS do fim da transmissão, escutar o canal para verificar se existe alguma transmissão em andamento. Como neste momento um quadro de ACK é aguardado, se alguma outra transmissão estiver em andamento então o algoritmo infere que houve uma colisão.

Apesar de ser uma abordagem simplista, este mecanismo sofre dos mesmos problemas do ARF no que diz respeito à estabilidade e convergência, com um agravante provocado pelo custo adicional decorrente do uso dos quadros de RTS/CTS em ambientes congestionados. Além disso, a análise de apenas um quadro para decidir pelo uso ou não do RTS/CTS pode gerar instabilidade, já que em ambientes congestionados a probabilidade de ocorrer uma colisão é grande, o que forçará o algoritmo a ativar e desativar estes quadros de controle intermitentemente.

Por sua vez, o ***Robust Rate Adaptation Algorithm* (RRAA)**, mecanismo proposto por [Wong et al., 2006], apresenta uma nova abordagem tanto para o uso do RTS/CTS como para a troca da taxa. O RRAA visa maximizar a vazão medindo o *Frame Error Rate* (FER) para os quadros enviados durante a última janela de tempo. Ao final desta janela, o FER obtido é comparado com dois limitantes: o inferior e o superior. Se o FER for menor do que o limitante inferior, a qualidade do sinal é considerada boa e a próxima taxa selecionada será maior do que a atual. Se o FER for maior do que o limitante superior, sucede-se o contrário. Nos demais casos, quando o FER encontra-se entre os limitantes, a taxa permanece inalterada.

Para reduzir colisões é utilizada a abordagem denominada *Adaptive RTS* (A-RTS). Se um quadro perdido não foi precedido pelo RTS, uma colisão é o motivo potencial da perda. Neste caso, o contador k é incrementado em uma unidade, e os próximos k quadros transmitidos serão precedidos pelo RTS. Quando um quadro é perdido mesmo sendo precedido pelo RTS, ou quando ocorre um sucesso no envio sem o RTS, o contador k é reduzido à metade, já que o ambiente não aparenta estar congestionado. Esta abordagem pode ser considerada mais eficiente do que a utilizada pelo CARA, pois evita a oscilação no uso dos quadros de RTS/CTS.

[Cardoso e Rezende, 2008] propuseram um mecanismo especialmente voltado para adaptação da taxa de transmissão em redes densas, denominado ***Yet Another Rate Adaptation algorithm* (YARAa)**. Este é um algoritmo que visa aumentar a vazão de dados na rede. Para isso, ele utiliza o ExTT calculado da mesma maneira que no SampleRate, mas acrescenta o monitoramento do tempo dispendido aguardando transmissões concorrentes durante o processo de envio de um quadro. Este tempo, denominado *diff-time*, é utilizado pelo algoritmo como aproximação do nível de congestionamento da rede. De acordo com o *diff-time*, o algoritmo decide por utilizar taxas maiores ou menores, considerando as probabilidades das perdas serem causadas por colisões ou por baixa qualidade de sinal.

Uma solução *cross-layer* denominada ***Cross-Layer Rate Adaptation* (CLRA)** foi apresentada por [Khan et al., 2008]. O objetivo central é selecionar a taxa de transmissão de maneira que o tráfego gerado pela aplicação seja igual ao tráfego efetivamente transmitido pela interface de rede sem fio. Para fazer isso, o algoritmo estima a demanda da aplicação e a vazão média das diferentes taxas disponíveis. Assim, é possível selecionar a taxa correta diretamente a partir de uma equação. Para tornar mais preciso o processo de adaptação, o CLRA também utiliza uma abordagem simples para diferenciar perdas de quadros: mede-se o FER para as transmissões realizadas dentro de uma janela de quadros. Se o FER for maior do que um limitante, ative o RTS/CTS durante a próxima janela. Se nesta próxima janela o FER não mudar, então a condição do enlace está ruim, e é preciso diminuir a taxa utilizada. Por outro lado, se o FER diminuir é porque existem colisões no ambiente, então mantenha o RTS/CTS ativo para evitá-las.

Esta abordagem produz um efeito indesejável no comportamento da rede. Quando a demanda das aplicações é pequena, o algoritmo irá selecionar uma taxa de transmissão baixa, mesmo sendo possível utilizar uma taxa de transmissão maior. Essa escolha pode intensificar o problema da anomalia de desempenho nas redes sem fio, já discutido na Subseção 2.1.5.

As principais limitações dos algoritmos baseados em histórico estão relacionadas com a necessidade de diferenciação das perdas para evitar ajustes desnecessários na taxa principalmente em ambientes congestionados, como é o caso dos algoritmos ARF, AARF,

SampleRate e SARA; o uso de métricas complexas ou não realistas para estimativa de qualidade do canal, como acontece com o algoritmo CLRA que precisa monitorar constantemente a demanda por vazão de cada aplicação; e o longo tempo de convergência, consequência da recursividade no uso de informações sobre transmissões para ajustar as próprias transmissões.

3.1.2 Algoritmos baseados na relação sinal/ruído

Esta segunda categoria engloba os algoritmos de adaptação que se baseiam na relação sinal/ruído para escolher a taxa de transmissão. Normalmente, eles utilizam indicadores como o SNR e o SINR, ou mesmo o *Received Signal Strength Indication* (RSSI), que representa a quantidade de potência presente em um sinal de rádio. Nessa abordagem, é preciso confrontar os dados obtidos com uma tabela que mapeia o valor do indicador utilizado para a taxa de transmissão apropriada.

O desafio mais importante é que a taxa precisa ser definida pela estação transmissora no momento do envio do quadro, mas o indicador de sinal relevante para o processo de adaptação encontra-se disponível apenas na estação receptora, já que esta será responsável por demodular e decodificar os quadros. Alguns mecanismos (como os apresentados nesta subseção), providenciam o retorno desta informação através de "carona" nos quadros de dados ou pelo RTS/CTS, sendo conhecidos como soluções de malha fechada. Outros algoritmos tentam inferir, no próprio transmissor, a qualidade que o sinal terá no receptor, evitando a necessidade de alterações nos protocolos. Estes últimos são os algoritmos de malha aberta, e serão exemplificados na subseção a seguir.

O ***Receiver-Based Auto Rate*** **(RBAR)**, proposto por [Holland et al., 2001], é um algoritmo de malha fechada que realiza a escolha da taxa de transmissão durante a troca de quadros RTS/CTS. Quando uma estação deseja transmitir um quadro, ela envia um RTS que servirá para o receptor medir o SNR e estimar as condições do enlace nos momentos seguintes, quando efetivamente receber o quadro de dados. Assim, a estação receptora é capaz de selecionar a taxa de transmissão apropriada e enviar esta informação de volta no quadro de CTS. Neste algoritmo, a adaptação da taxa é realizada para cada pacote, e não há necessidade de diferenciar entre os tipos de perdas dos quadros.

Este mecanismo demanda alterações no formato dos quadros de RTS e CTS que, ao invés de transportarem informações de duração das transmissões conforme especificado pelo padrão, carregarão a taxa utilizada e o tamanho do quadro de dados. Assim, é possível que as demais estações atualizem seus NAVs em função das informações existentes nestes quadros de controle. Essas modificações tornam esta solução incompatível com a especificação do IEEE 802.11 existente, dificultando sua utilização em ambientes reais.

Com o objetivo de amenizar o efeito da anomalia de desempenho nas redes com múltiplas taxas, o ***Opportunistic Auto Rate* (OAR)** foi apresentado por [Sadeghi et al., 2002]. O objetivo deste algoritmo é atingir justiça temporal no uso do canal entre as estações. A escolha da taxa de transmissão é realizada através da troca de quadros RTS/CTS, exatamente como feito pelo RBAR. Entretanto, o OAR transmite quadros de dados consecutivos, de acordo com a taxa escolhida: quanto maior a taxa, mais quadros em sequência. Para isso, o algoritmo faz uso da fragmentação da subcamada MAC, que permite que uma estação envie diversos quadros espaçados apenas de um intervalo de tempo SIFS, garantindo que nenhuma transmissão de outra estação será intercalada. Dessa forma, o OAR permite que as estações com taxas maiores utilizem o canal por aproximadamente a mesma quantidade de tempo que as estações com taxas menores.

O uso das informações de qualidade do sinal no processo de adaptação da taxa de transmissão elimina problemas anteriormente existentes, como o longo tempo de convergência e a necessidade de diferenciação das perdas. Entretanto, é necessário um mapeamento preciso entre o indicador utilizado e a taxa de transmissão apropriada. Esta relação pode ser difícil de se obter para os diversos tipos de ambientes, dificultando a utilização destes mecanismos na prática [Wong et al., 2006].

3.1.3 Algoritmos híbridos

Após uma análise dos mecanismos existentes, [Haratcherev et al., 2004] propuseram um mecanismo híbrido para adaptação da taxa, onde as técnicas apresentadas anteriormente são cuidadosamente combinadas para aproveitar o melhor de cada uma delas. Este algoritmo, denominado **Hybrid Rate Control**, utiliza as informações históricas de vazão e FER como base para o funcionamento; e o indicador de sinal SINR para restringir o conjunto de taxas elegíveis que devem ser avaliadas. O objetivo do algoritmo é reduzir o atraso e o *jitter* dos quadros, e a abordagem consiste no envio de quadros de sondagem para medir estas informações nas taxas adjacentes. Além disso, o SINR dos quadros de ACK são utilizados para inferir a qualidade do sinal no receptor, eliminando as taxas que definitivamente não podem melhorar o desempenho, e permitindo adaptações rápidas nos ambientes instáveis. Observe que nenhuma informação de qualidade do sinal trafega do receptor para o transmissor, caracterizando um algoritmo de malha aberta.

Outro algoritmo híbrido é o **SmartSender**, proposto por [Xia e Hamdi, 2008]. Ele tenta maximizar a vazão através da mesma estratégia do algoritmo anterior: usar informações históricas como base do mecanismo, e o indicador de sinal como regulador da escolha da taxa. As métricas utilizadas são o ExTT e contagem de sucessos e falhas consecutivas na transmissão de quadros, visando alcançar estabilidade ao longo prazo com a primeira métrica, e aumentar a capacidade de reação através da segunda. O RSSI dos quadros de

ACK são utilizados para criar uma margem de segurança na escolha da taxa, não permitindo que sondagens incorretas ou condições anormais do enlace alterem drasticamente, e de maneira inapropriada, a taxa de transmissão.

Ambos os algoritmos são classificados como malha aberta, pois medem o SINR dos quadros de ACK no próprio transmissor. Para que esta abordagem seja válida, eles assumem que o enlace sem fio é simétrico. Entretanto, esta suposição pode não ser verdadeira para todos os cenários, o que pode reduzir o desempenho do algoritmos [Biaz e Wu, 2008].

3.2 Tabela resumo

A Tabela 3.1 apresenta um resumo das principais características dos algoritmos de adaptação automática da taxa de transmissão apresentados neste capítulo. Esta tabela também inclui, na última linha, as informações acerca do mecanismo proposto neste trabalho, denominado CORA.

A coluna *classificação* faz referência às três classes de algoritmos apresentadas na seção anterior. A maior parte desses algoritmos é baseado no histórico. Mesmo sendo mais lentos para identificar e reagir às mudanças da rede, estas são as soluções utilizadas pelos equipamentos reais, já que a medição dos indicadores de qualidade do sinal ainda impõe desafios consideráveis. Quanto à informação de *localização*, pode-se perceber que somente os algoritmos baseados na relação sinal/ruído utilizam dados do receptor para ajustar a taxa de transmissão. Esta prática, apesar de trazer bons resultados, implica em modificações no protocolo para o transporte das informações do receptor para o transmissor.

No que diz respeito ao objetivo de cada algoritmo, a *métrica de otimização* mais utilizada é a vazão de dados. Já o *indicador de qualidade* utilizado para inferir as condições do canal sem fio varia entre as soluções. O indicadores diretamente relacionados às perdas de quadros (sucessos e falhas nas transmissões e FER), são os que impõem os maiores desafios, dentre eles, a *diferenciação de perdas* causadas por colisões ou por baixa qualidade do canal. Essa diferenciação pode ser feita de maneira ativa, com o uso de quadros de RTS/CTS adaptativos (mecanismos CARA, RRAA e CLRA); ou por algum indicador mais genérico, como é o caso do *diff-time* no YARAa.

Em relação ao *intervalo entre a troca da taxa*, a abordagem sinal/ruído é a mais rápida, adaptando a taxa de maneira independente para cada quadro. Essa granularidade não pode ser alcançada pelos mecanismos históricos, que precisam construir uma amostra confiável de algumas dezenas de quadros para inferirem as condições do enlace sem fio.

Assim como a maioria das soluções, o mecanismo proposto (CORA) utiliza informações históricas no transmissor para ajustar a taxa. Além disso, ele usa a própria métrica que se deseja otimizar como indicador de qualidade do canal. Esta métrica é configurável, mas a

Tabela 3.1: Resumo das características dos algoritmos de adaptação da taxa.

Algoritmo	Classificação	Localização	Métrica de otimização	Indicador de qualidade	Diferenciação de perdas	Intervalo entre troca da taxa
ARF	histórico	transmissor	vazão	Sucessos e falhas em transmissões consecutivas	-	2 a 10 quadros ou 0.06 segundos
AARF	histórico	transmissor	vazão	Sucessos e falhas em transmissões consecutivas	-	2 a $(10 * 2^x)$ quadros
SampleRate	histórico	transmissor	vazão	ExTT	-	10 segundos
Minstrel	histórico	transmissor	vazão	vazão	-	0.1 segundos
SARA	histórico	transmissor	FER	Sucessos e falhas em transmissões	-	configurável
CARA	histórico	transmissor	vazão	Sucessos e falhas em transmissões consecutivas	RTS/CTS e CCA	2 a 10 quadros
RRAA	histórico	transmissor	vazão	FER	A-RTS	5 a 40 quadros
YARAa	histórico	transmissor	vazão	ExTT	*diff-time*	2 segundos
CLRA	histórico	transmissor	Demanda da aplicação	vazão	RTS/CTS e FER	configurável
RBAR	sinal/ruído	receptor	vazão	SNR	-	1 quadro
OAR	sinal/ruído	receptor	justiça temporal	SNR	-	1 quadro
Hybrid	híbrido	transmissor	atraso e *jitter*	SINR, FER e vazão	-	1 quadro
SmartSender	híbrido	transmissor	vazão	ExTT e RSSI	-	1 segundo
CORA	histórico	transmissor	configurável (vazão)	configurável (vazão)	*diff-time proporcional*	configurável (0.1 segundos)

vazão de dados foi definida como métrica padrão. A diferenciação explícita entre os tipos de perdas de quadro não é necessária, mas o algoritmo utiliza o *diff-time proporcional* para melhorar o desempenho do mecanismo em redes com elevado grau de congestionamento. Foi desenvolvida uma função específica para reduzir o tempo de convergência do algoritmo, e a velocidade entre as trocas das taxas também pode ser ajustada para algum valor diferente do padrão, definido para 0.1 segundos.

3.3 Conclusão

Neste capítulo, foi feita uma revisão sobre dos algoritmos de adaptação automática da taxa de transmissão para as redes IEEE 802.11. Os principais conceitos envolvidos foram apresentados, comentando os trabalhos mais relevantes sobre o assunto em questão.

Como foi mostrado nas seções anteriores, existem vários algoritmos para a adaptação automática da taxa de transmissão. Eles estão divididos em categorias, de acordo com a abordagem utilizada para avaliar a qualidade do canal sem fio. Os algoritmos baseados em histórico fazem uso das informações sobre transmissões dos quadros para inferir as condições futuras da rede. Em geral, estes algoritmos são computacionalmente simples, mas possuem longo tempo de convergência e, em alguns casos, precisam diferenciar as perdas causadas por colisões das perdas causadas por baixa qualidade do sinal. Já os algoritmos baseados na relação sinal/ruído utilizam indicadores de qualidade do sinal para selecionar a taxa apropriada. Esses algoritmos são mais eficientes do que os demais, porém sofrem com a dificuldade de mensurar corretamente estes indicadores e mapeá-los para a taxa de transmissão apropriada. A terceira categoria inclui os algoritmos híbridos, que combinam as duas técnicas anteriores, aproveitando o melhor de cada uma delas.

No capítulo seguinte é apresentado o mecanismo de adaptação proposto neste trabalho. Este mecanismo é voltado para as redes IEEE 802.11a, .11b e .11g e tem como objetivo equipar as estações com as funcionalidades de autoconfiguração e auto-otimização da taxa de transmissão. O algoritmo proposto é, assim como a maior parte das soluções apresentadas, escalável e interoperável, por utilizar uma arquitetura completamente descentralizada. Além disso, podemos destacar a simplicidade computacional, permitindo sua implementação em equipamentos comerciais e sua utilização nas diferentes arquiteturas de redes sem fio.

Capítulo 4

Mecanismo Cognitivo para Adaptação da Taxa de Transmissão

Como discutido nos capítulos anteriores, um bom algoritmo para a adaptação automática da taxa de transmissão nas redes sem fio é fundamental para melhorar o desempenho e garantir o aproveitamento dos recursos disponíveis. Neste contexto, este capítulo apresenta um novo mecanismo de adaptação da taxa para as redes IEEE 802.11, denominado CORA. O seu objetivo inicial é aumentar a vazão de dados, mantendo o sistema estável enquanto não ocorrem alterações significativas no canal sem fio, e convergindo a escolha da taxa para o melhor valor nos demais casos.

O restante deste capítulo está organizado como segue. A Seção 4.1 apresenta as considerações para o projeto de um mecanismo de adaptação da taxa, obtidas através da análise das diversas soluções discutidas no capítulo de trabalhos relacionados. Na sequência, a Seção 4.2 introduz o arcabouço cognitivo CogProt, utilizado como ponto de partida para o desenvolvimento do novo mecanismo proposto. Na Seção 4.3 é apresentado o mecanismo CORA. Além da visão geral, são discutidas algumas características do projeto, bem como uma análise dos parâmetros configuráveis e das funções previstos pelo algoritmo. Por fim, na Seção 4.4, são apresentadas algumas conclusões deste projeto.

4.1 Considerações para o projeto

Após a análise das diferentes abordagens utilizadas pelos algoritmos de adaptação da taxa apresentados no capítulo anterior, esta seção sumariza as principais considerações que devem ser observadas durante o projeto e o desenvolvimento de um novo mecanismo de adaptação automática da taxa de transmissão. Estas considerações estão organizadas por temas, nos parágrafos a seguir.

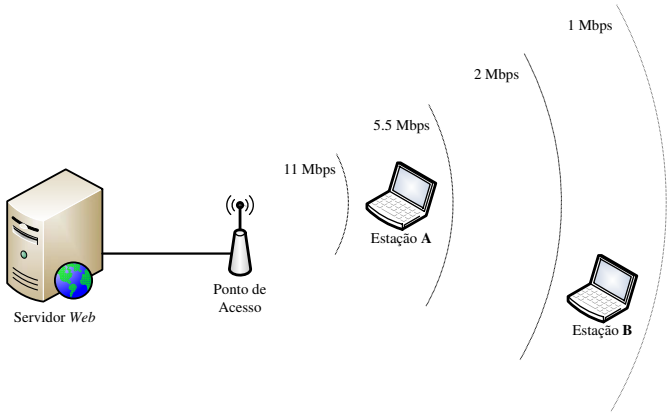


Figura 4.1: Rede IEEE 802.11b infraestruturada com estações em diferentes posições.

Adaptação independente por enlace sem fio. A primeira consideração para o projeto sugere que a coleta de informações e a escolha da taxa de transmissão sejam realizadas separadamente para cada enlace sem fio, com o objetivo de garantir a convergência independente destas taxas para os seus respectivos valores ótimos.

A Figura 4.1 exemplifica, através de uma rede IEEE 802.11b infraestruturada, um cenário simples que pode ser afetado pela ausência dessa adaptação independente da taxa de transmissão. Tanto a estação `A` quanto a estação `B` enviam quadros somente para o ponto de acesso. Logo, a taxa de transmissão ótima em cada estação é única (5.5 e 1 Mbps, respectivamente). O problema ocorre no AP, que envia quadros tanto para a estação `A` quanto para a estação `B`. Neste caso, se o algoritmo não for capaz de identificar que os destinos são diferentes (utilizam enlaces sem fio diferentes), a escolha da taxa não irá convergir para o melhor valor, e todas as transmissões acabam sendo prejudicadas.

Avaliação da qualidade do enlace. É preciso tomar alguns cuidados com o método utilizado para avaliar a qualidade do enlace sem fio. Informações obtidas através de sondagem podem gerar equívocos quando as amostras compreendem poucos quadros. A rede varia rapidamente em ambientes dinâmicos, e uma sondagem equivocada pode induzir o algoritmo a um comportamento diferente do esperado para as condições atuais. Neste caso, acontece a degradação do desempenho e torna-se ainda mais difícil a identificação e correção do erro. Esse comportamento é definido por [Loiacono et al., 2007] como efeito da “bola de neve”.

Já a contagem de sucessos ou falhas em transmissões consecutivas não é válida para todos os cenários. Segundo [Wong et al., 2006], a maior parte dos ambientes reais sofre algum tipo de interferência, por isso apresentam comportamento aleatório para perdas de quadros. Além disso, não se pode estabelecer uma relação direta entre o comportamento

de taxas adjacentes, muito menos assumir que uma taxa menor vai sempre melhorar a probabilidade de entrega dos quadros [Bicket, 2005]. Por sua vez, os indicadores de qualidade de sinal não devem ser utilizados como fonte única de informação para os mecanismos de adaptação, já que não existe uma relação precisa entre estes indicadores e a probabilidade de entrega de quadros em cada taxa [Joshi et al., 2008].

Identificação de colisões. Para aumentar a eficiência dos algoritmos que adaptam a taxa com base no histórico, é importante diferenciar corretamente os quadros perdidos por baixa qualidade do canal dos quadros perdidos por colisões. Deve-se evitar a redução da taxa de transmissão por conta de colisões para não prejudicar a rede, já que as transmissões serão ainda mais lentas, ocupando o canal por mais tempo [Wong et al., 2006].

Os RTS/CTS adaptativos têm sido utilizados por alguns mecanismos como ferramenta para realizar esta diferenciação, mas é importante ter cuidado para não provocar instabilidade no uso destes quadros. Além disso, os algoritmos de adaptação não devem tentar eliminar todas as colisões do ambiente. Segundo [Bononi et al., 2004], é importante que existam algumas colisões nos ambientes congestionados para que o valor do *backoff* aumente, garantindo a característica de aleatoriedade no acesso ao canal sem fio.

Justiça. Quando várias estações estão transmitindo dados concorrentemente, e o tráfego gerado por elas vai além da capacidade da rede, é desejável que a largura de banda disponível seja dividida igualitariamente entre estas estações [Jain et al., 1984; Qiao e Shin, 2002; Wang e Mutka, 2008; Xue et al., 2006]. Este mesmo conceito é aplicável no contexto da adaptação da taxa de transmissão. Se uma estação envia quadros para diversos destinos em enlaces diferentes, e o canal não comporta todo o tráfego gerado, as transmissões nestes enlaces devem receber "fatias" proporcionais da largura de banda disponível. Esta divisão deve ser calculada com base na demanda de transmissão, e a distância entre as estações não deveria prejudicar a vazão em cada comunicação.

Entretanto, a escolha de taxas menores para atender às estações distantes é inevitável, e esta configuração acaba acentuando o efeito da anomalia de desempenho. Neste sentido, é importante que a escolha da taxa de transmissão prejudique o mínimo possível nesta divisão dos recursos entre as estações. Garantir que os algoritmos utilizem sempre a maior taxa dentre as consideradas satisfatórias para as condições do canal contribui para este fim, mesmo que esta maior taxa eleve um pouco a perda de quadros. Assim, é possível atenuar o efeito da anomalia de desempenho, não permitindo que uma taxa pequena seja escolhida para maximizar apenas um enlace, ao custo de aumentar o nível de contenção no ambiente e reduzir a vazão alcançada pelas transmissões concorrentes. Note que utilizar taxas mais altas não implica em aumentar a vazão do fluxo, que pode ser controlada através de mecanismos específicos na camada de transporte.

Interoperabilidade e escalabilidade. No que diz respeito à interoperabilidade e escalabilidade, os algoritmos de adaptação devem ser projetados para serem compatíveis com o padrão estabelecido. Logo, é possível que eles sejam adicionados aos poucos nas redes existentes, sem que as demais estações precisem se adequar a esta integração. Também é importante que a troca de informações de controle entre as estações seja mínima, reduzindo a sobrecarga de tráfego na rede.

Além disso, deve-se levar em consideração as restrições de processamento, armazenamento e disponibilidade energética dos equipamentos comerciais; de maneira a viabilizar a implementação e utilização do algoritmo em ambientes reais.

Frequência de adaptação da taxa. As últimas considerações estão relacionadas com a frequência de adaptação da taxa de transmissão. Os algoritmos apresentados variam esta frequência desde o envio de cada quadro pelo enlace até a escala de segundos. Esta escolha depende da abordagem utilizada em cada algoritmo mas, independente de qual seja ela, a efetividade do mecanismo está atrelada à velocidade com que ele é capaz de identificar e responder às variações no enlace sem fio [Kim et al., 2006c].

Diversos autores discutem a influência do tempo no processo de adaptação da taxa de transmissão [Ancillotti et al., 2008; Bicket, 2005; Lacage et al., 2004]. Todos concordam que, para os algoritmos baseados no histórico realizarem a adaptação de maneira apropriada, a correlação entre o intervalo de amostragem e as variações na qualidade do canal deve ser da mesma ordem de tempo.

As considerações discutidas nesta seção foram observadas durante o projeto do mecanismo CORA. Este mecanismo utiliza como base um arcabouço cognitivo denominado CogProt, que será apresentado na sequência.

4.2 O arcabouço cognitivo CogProt

O **CogProt** é um arcabouço cognitivo para configuração e otimização de protocolos de comunicação, proposto por [Kliazovich et al., 2010]. Ele foi desenvolvido a partir do conceito de redes cognitivas apresentado na Seção 2.3. Seu objetivo é equipar as estações da rede com as funcionalidades de autoconfiguração e auto-otimização dos parâmetros da pilha de protocolos, permitindo que estas estações possam constantemente ajustar-se às condições atuais da rede e evitar a degradação de desempenho.

Os processos de autoconfiguração e auto-otimização são realizados através da reconfiguração periódica dos parâmetros de interesse, com base na experiência obtida no passado recente. Para permitir essas reconfigurações, o CogProt introduz um **Plano Cognitivo *Cross-Layer***, conforme ilustrado na Figura 4.2.

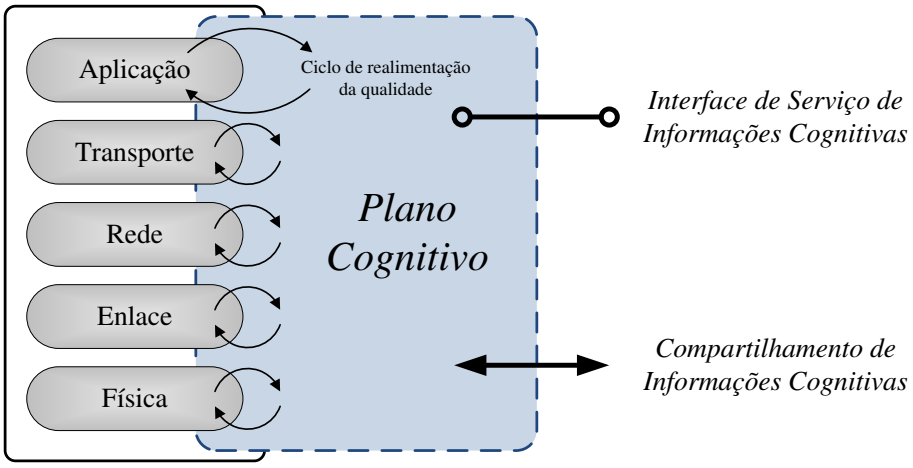


Figura 4.2: Arquitetura de uma estação de rede equipada com o CogProt.

Este plano cognitivo é o responsável pela otimização dos diversos parâmetros nas diferentes camadas da pilha de protocolos. Para cada parâmetro de interesse P é criado um **Ciclo de Realimentação da Qualidade**, que irá monitorar o desempenho e executar ações de reconfiguração, com o intuito de convergir P para o melhor valor segundo as condições atuais da rede. Este ciclo de realimentação da qualidade segue a divisão de etapas conhecida como OODA: *Observação, Orientação, Decisão e Ação*; originalmente proposta por [Boyd, 1995]. A Figura 4.3 ilustra, em alto nível de abstração, as ações realizadas pelo CogProt em cada uma das etapas deste ciclo.

Ao final de um intervalo I, o algoritmo coleta e armazena as informações de desempenho obtidas com o uso de P_a como valor atual para o parâmetro P. Essas informações de desempenho são mensuradas de acordo com a métrica de qualidade desejada, que pode variar em função do parâmetro P. Esta etapa de *observação* permite que o algoritmo construa uma base de conhecimento local, contendo informações de desempenho para cada um dos possíveis valores de P. Durante a etapa de *orientação*, o algoritmo procura na base de conhecimento pelo melhor valor conhecido P_i, e atribui este valor como média para um gerador de números aleatórios que segue uma função de densidade de probabilidade (PDF) normal. Dependendo da utilização, a escolha do melhor valor pode ser realizada somente com as informações locais existentes na base de conhecimento, ou apoiada pelo compartilhamento de informações cognitivas entre estações vizinhas da rede. Além disso, pode-se utilizar políticas de reconfiguração que são acessadas através de uma interface denominada Serviço de Informações Cognitivas (SIC). A etapa de *decisão* consiste em obter, a partir da PDF normal acima mencionada, um novo valor aleatório P_n para o parâmetro em questão. Para finalizar, a etapa de *ação* efetivamente atribui este novo valor ao parâmetro P, realizando as configurações necessárias na pilha de protocolos.

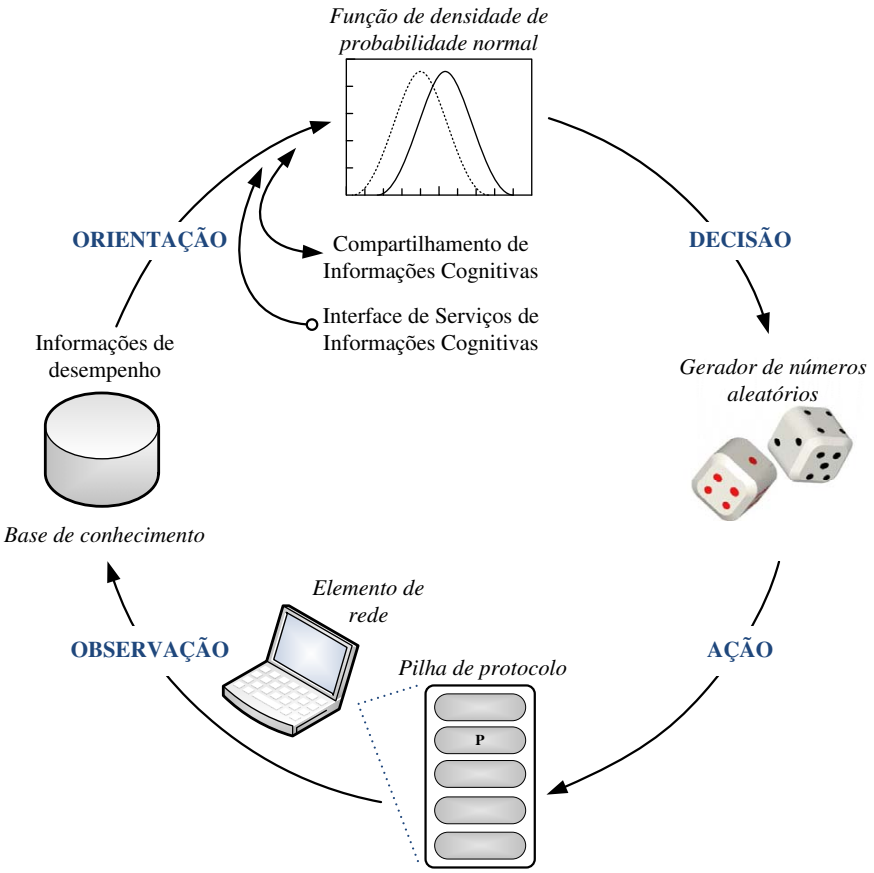


Figura 4.3: Ciclo de realimentação da qualidade OODA do CogProt.

Este processo de otimização é repetido a cada intervalo I, e continuamente ajusta a média da distribuição normal para o valor de P que provê o melhor desempenho de acordo com a métrica escolhida. Como resultado, a média da PDF normal converge para o valor ótimo conhecido. Consequentemente, a maior parte dos valores aleatoriamente escolhidos a partir desta função serão também valores ótimos, dadas as configurações da curva normal. Entretanto, o mecanismo permite que qualquer valor seja escolhido e testado, podendo resultar na reconfiguração da média da distribuição, o que caracteriza a adaptação do mecanismo frente às mudanças nas condições da rede.

4.3 Adaptação cognitiva da taxa de transmissão

O *COgnitive Rate Adaptation* (CORA) é um mecanismo projetado para otimizar o desempenho da camada de enlace através do ajuste dinâmico da taxa de transmissão [Chaves et al., 2009]. Este mecanismo consiste na instanciação do arcabouço cognitivo CogProt,

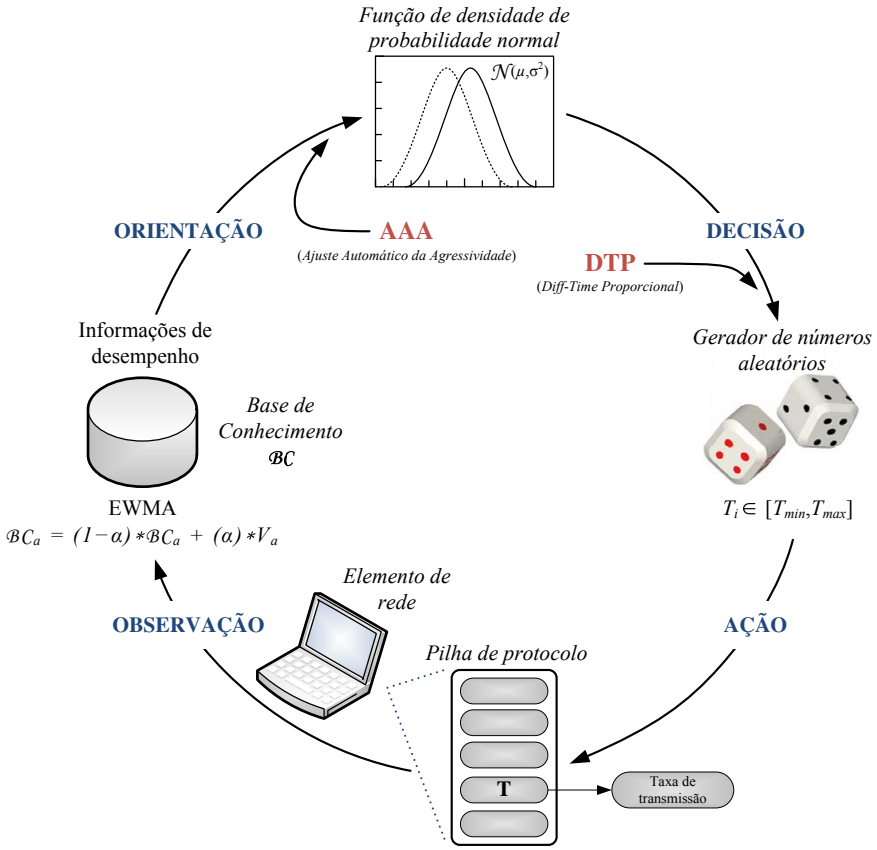


Figura 4.4: Ciclo de realimentação da qualidade OODA implementado pelo CORA.

acrescido de funções projetadas para capturar e avaliar informações sobre o canal sem fio, com o objetivo de melhorar o processo de escolha da taxa de transmissão.

Para apresentar esse mecanismo, esta seção está organizada como segue. Uma visão geral do CORA é apresentada na Subseção 4.3.1. Na sequência, a Subseção 4.3.2 comenta as principais características do mecanismo proposto, com base nas considerações para o projeto apresentadas na Seção 4.1. Por sua vez, a Subseção 4.3.3 detalha o funcionamento do algoritmo, seguida de uma discussão, na Subseção 4.3.4, a respeito dos parâmetros configuráveis e seus efeitos no comportamento do mecanismo. Por último, as funções auxiliares projetadas para melhorar o desempenho do CORA são discutidas na Subseção 4.3.5.

4.3.1 Visão geral

O CORA implementa um dos ciclos de realimentação da qualidade OODA permitidos pelo CogProt. Os passos realizados em cada etapa desta implementação são ilustrados na Figura 4.4, e descritos na sequência.

Para o contexto deste trabalho, o parâmetro de interesse é a taxa de transmissão (T), e a métrica de desempenho utilizada em um primeiro momento é a vazão de dados na camada de enlace (V). Para cada taxa de transmissão existente é associado, de maneira ordenada, um número i, onde $min \leqslant i \leqslant max$, com $i \in \mathbb{N}$. As taxas T_{min} e T_{max} são aquelas com menor e maior vazão de dados, respectivamente. Além disso, os valores de vazão para cada taxa $T_i \in [T_{min}, T_{max}]$ já conhecidos estão armazenados na base de conhecimento local ($\mathcal{BC}$). De posse destas informações, cada etapa do ciclo de realimentação da qualidade é executada como segue:

Observação: Seja T_a a taxa de transmissão atualmente utilizada. Nesta etapa, o algoritmo monitora o comportamento do sistema medindo a vazão de dados na camada de enlace V_a obtida com o uso da taxa T_a durante o último ciclo. Com esta informação, os dados na base de conhecimento são atualizados utilizando uma média móvel exponencialmente ponderada (*Exponentially Weighted Moving Average* - EWMA), como segue:

$$\mathcal{BC}_a = (1 - \alpha) * \mathcal{BC}_a + (\alpha) * V_a \tag{4.1}$$

onde $\mathcal{BC}_a$ é a informação de vazão já existente na base de conhecimento para a taxa T_a e α é o peso atribuído à informação recentemente mensurada V_a. Em outras palavras, a vazão obtida para a taxa atual é utilizada para calcular um novo valor médio de vazão desta taxa, fazendo com que a base de conhecimento reflita o histórico de desempenho para todas as taxas disponíveis.

Orientação: Durante esta etapa, o mecanismo identifica qual a melhor taxa de transmissão conhecida até o momento. Para isso, ele procura na base de conhecimento pela taxa T_i que possui a maior vazão V_i. O índice i é então definido como sendo a média μ de uma PDF normal $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$, que será utilizada a seguir. De acordo com o valor de i, o desvio padrão σ da PDF normal também pode ser alterado pela função auxiliar de Ajuste Automático da Agressividade (AAA), que será apresentada na sequência.

Decisão: Nesta etapa, o algoritmo vai selecionar qual taxa de transmissão T_n que efetivamente será utilizada pela interface de rede até a próxima iteração deste ciclo (intervalo de tempo I). Esta escolha é feita realizando-se um sorteio de $r \in [min, max]$, com $r \in \mathbb{R}$, de acordo com a PDF normal já configurada na etapa anterior. Posteriormente, r é aproximado para o natural n mais próximo (fazendo $n = \lfloor r + 0.5 \rfloor$), podendo ser ajustado pela função auxiliar de Diff-Time Proporcional (DTP), que também será apresentada na sequência.

Ação: Para finalizar, a interface de rede tem sua taxa de transmissão alterada para T_n, completando a execução do ciclo de realimentação da qualidade.

O uso da PDF normal no processo de escolha aleatória da taxa T_n é fundamental para o funcionamento do algoritmo. Sendo a média μ da distribuição o melhor valor conhecido para n, há uma maior probabilidade de que este seja, efetivamente, o valor aleatório sorteado. Entretanto, o algoritmo eventualmente escolherá valores diferentes, permitindo o ajuste da taxa de transmissão frente às mudanças na qualidade do canal.

A função auxiliar de AAA é utilizada pelo CORA com o objetivo de melhorar a estabilidade na escolha da taxa T_n enquanto as condições do canal sem fio permanecem constantes, além de permitir uma rápida convergência no caso de alguma mudança. Para isso, a função altera o desvio padrão σ da distribuição normal, aumentando ou diminuindo a probabilidade de se escolher a mesma taxa nas consecutivas iterações do ciclo de realimentação da qualidade. Já a função auxiliar de DTP tem como objetivo diminuir o efeito da anomalia de desempenho causada pela escolha imprecisa das taxas de transmissão, principalmente nos cenários congestionados. O algoritmo utiliza uma variação da métrica denominada *diff-time* [Cardoso e Rezende, 2008], que reflete o nível de contenção do ambiente. De acordo com o valor aferido, pode-se incentivar o uso de taxas de transmissões maiores, com o objetivo de reduzir a carga na rede mantendo a mesma vazão de dados. Ambas as funções (AAA e DTP) são detalhadas na Subseção 4.3.5. A relação entre o desvio padrão σ e a estabilidade na escolha da taxa de transmissão também será abordada na Subseção 4.3.4.

4.3.2 Características do projeto

Para garantir a presença das características desejáveis em um algoritmo de adaptação da taxa de transmissão, o projeto do CORA levou em consideração as informações apresentadas na Seção 4.1. Para facilitar a compreensão do mecanismo proposto, os parágrafos a seguir descrevem como estas considerações foram incorporadas ao mecanismo proposto.

Adaptação independente por enlace sem fio. Se uma única instância do ciclo de realimentação da qualidade for implementada em cada estação, a média da PDF normal não será capaz de convergir para o melhor valor de cada enlace. Neste caso, as transmissões para os diferentes vizinhos serão prejudicadas. Com o objetivo de solucionar este problema, o CORA foi projetado de maneira que as estações implementem uma instância deste ciclo para cada vizinho (enlace sem fio) ativo na rede, permitindo a convergência da média das respectivas PDFs normais para os valores que proveem o melhor desempenho.

A melhor taxa de transmissão conhecida para cada enlace sem fio é armazenada pelo mecanismo em uma estrutura de dados identificada por $\mathcal{T}$. Imediatamente antes de iniciar a transmissão de um quadro, a estação consulta o endereço de destino para selecionar a taxa de transmissão apropriada, e somente depois o quadro é enviado.

Avaliação da qualidade do enlace. O CORA é um algoritmo baseado no histórico que, assim como o algoritmo Minstrel [Smithies, 2005] apresentado anteriormente, avalia o desempenho da própria métrica que se deseja otimizar ao invés de utilizar indicadores para inferir a qualidade do canal. Dessa maneira, o mecanismo decide por utilizar a taxa que resulte nos melhores valores para a métrica em questão, eliminando as dificuldades decorrentes do uso dos diversos indicadores e reduzindo a complexidade do algoritmo.

A métrica de otimização inicialmente proposta para o mecanismo CORA é a vazão de dados na camada de enlace. O valor para esta métrica é calculado somando-se a quantidade de *bytes* reconhecidos pelo destino (através dos quadros de ACK), e dividindo este valor pelo intervalo de tempo considerado. Como a adaptação da taxa é realizada de maneira independente para cada enlace sem fio[1], e uma mesma estação pode enviar quantidades diferentes de quadros para diversos vizinhos, é preciso considerar esta proporção durante o cálculo da vazão. É ainda importante lembrar que taxas de transmissão distintas podem ser utilizadas para cada vizinho, o que influencia no tempo de transmissão de cada quadro (conforme visto na Subseção 2.1.5). No CORA, a vazão de dados V_a obtida com o uso da taxa T_a em um enlace e é calculada segundo a equação a seguir:

$$V_{ea} = \frac{b_{ei}}{t_{ei}} \tag{4.2}$$

onde b_{ei} é a quantidade de *bytes* que foram transmitidos para o vizinho e e corretamente reconhecidos pelos quadros de ACK durante o intervalo I; e t_{ei} é o tempo total dispendido com transmissões de quadros para o vizinho e durante o mesmo intervalo I. Este tempo inclui todo o custo adicional inserido pelo protocolo CSMA/CA, considerando também o tempo gasto com os quadros transmitidos e não confirmados (provavelmente perdidos), e suas subsequentes retransmissões. Em outras palavras, a vazão é calculada dividindo a quantidade de *bytes* confirmados pelo vizinho e pelo tempo durante o qual o transmissor enviou quadros para este vizinho.

Identificação de colisões. A vazão na camada de enlace foi definida como sendo a métrica de otimização padrão para o CORA. O uso desta métrica é reflexo direto do objetivo do algoritmo: aumentar a vazão de dados. Da maneira como o algoritmo foi concebido, é possível guiar o processo de adaptação da taxa sem a necessidade de identificar perdas de quadros causadas por colisão ou por redução na qualidade do sinal. Além disso, este mecanismo não interfere diretamente nas colisões existentes no ambiente, e é compatível com as redes que utilizam os quadros RTS/CTS.

Apesar do mecanismo não realizar a diferenciação entre os tipos de perdas, ele utiliza a função de DTP para inferir o nível de disputa pelo acesso ao meio. Essa função, que

[1]Um enlace sem fio representa a ligação entre dois elementos vizinhos de uma rede sem fio.

será apresentada em detalhes na Subseção 4.3.5, avalia a quantidade de transmissões concorrentes no ambiente, que estão diretamente relacionadas com a probabilidade de ocorrerem colisões entre os quadros.

Justiça. Através da função de DTP o mecanismo CORA contribui para manter a justiça no compartilhamento da largura de banda entre os enlaces sem fio. Quando o canal começa a saturar, o desempenho das estações é reduzido e, por consequência, há uma tendência dos algoritmos em escolherem taxas de transmissão menores. Neste caso, a função de DTP tenta produzir o efeito contrário, forçando o uso de taxas maiores para diminuir o tempo de transmissão, reduzindo a anomalia de desempenho e permitindo que a vazão nos demais enlaces seja menos prejudicada. Além disso, a adaptação independente por enlace sem fio contribui para que os fluxos de dados direcionados às estações distantes do emissor não sejam prejudicados, melhorando o compartilhamento dos recursos na rede.

Interoperabilidade e escalabilidade. Para garantir estas propriedades, o mecanismo CORA foi projetado para ser executado pelas estações da rede de maneira independente, onde cada uma possui sua própria base de conhecimento local, caracterizando um sistema completamente descentralizado. Além disso, é possível que as estações equipadas com o CORA operem tanto em uma rede do tipo infraestruturado quanto *ad hoc*, juntamente com estações que executam outro (ou nenhum) algoritmo de adaptação da taxa. Isto é possível porque o CORA não demanda compartilhamento de informações cognitivas entre estações. Os requisitos de *hardware* para a execução deste mecanismo são pequenos, e nenhuma alteração na especificação do padrão IEEE 802.11 é necessária. Todas estas características permitem a implementação do algoritmo nos dispositivos comerciais, viabilizando sua utilização em ambientes reais. Esta implementação é apontada no Capítulo 6 como um dos trabalhos futuros considerados.

Outra característica importante é o suporte a diferentes métricas de otimização. Assim como no CogProt, o CORA permite que o ciclo de realimentação da qualidade utilize a métrica de otimização mais conveniente. A métrica inicialmente definida é voltada para as aplicações que se beneficiam de alta vazão de dados. Entretanto, o tráfego existente em uma rede em operação pode ser diversificado, e cada tipo de aplicação pode apresentar requisitos específicos de Qualidade de Serviço (*Quality of Service* - QoS). Neste contexto, pode-se utilizar outras métricas de otimização, como o FER, o atraso e a variação do mesmo (*jitter*), o consumo energético, etc. Cada estação da rede pode utilizar uma métrica de otimização diferente, ou mesmo operar com duas ou mais métricas, desde que sejam independentes em cada enlace sem fio.

Como o CORA é descentralizado e permite o uso de diferentes métricas de otimização, estações de uma rede em malha sem fio podem ser beneficiadas com o uso deste mecanismo.

Conforme discutido em [Akyildiz e Wang, 2009; Hou et al., 2008], o processo de adaptação da taxa neste tipo de rede deve levar em consideração as funcionalidades previstas para cada estação. Os roteadores que compõem a infraestrutura dessas redes são responsáveis por prover conectividade e integração entre várias tecnologias sem fio. Já os clientes estão interessados em usufruir dos serviços disponíveis nessa arquitetura. Assim, existem requisitos de QoS diferentes na mesma rede. Enquanto os clientes podem querer aumentar a vazão de dados, os roteadores devem se preocupar com o compartilhamento justo da largura de banda disponível (de acordo com as políticas de utilização da rede).

Também é possível que o CORA seja utilizado em conjunto com o padrão IEEE 802.11e [802.11e, 2005]. Este padrão define um conjunto de melhorias na subcamada MAC (dentre elas, a divisão do tráfego em classes), a fim de atender aos requisitos de QoS das aplicações. Neste sentido, o uso de um algoritmo de adaptação da taxa capaz de ajustar a métrica de otimização de acordo com essas diferentes classes de tráfego pode contribuir para melhorar o desempenho da rede [Kim et al., 2005b; Xiao e Li, 2005].

Frequência de adaptação da taxa. A frequência de adaptação da taxa de transmissão é definida pelo valor do parâmetro configurável I, que representa o tempo em segundos entre duas iterações consecutivas do ciclo de realimentação da qualidade. O valor padrão definido é de 0.1 segundos, a fim de garantir uma amostra representativa para a avaliação da métrica de desempenho. Entretanto, este é um valor reconfigurável.

4.3.3 O algoritmo

Com o conhecimento adquirido das características do mecanismo proposto, apresenta-se a seguir o Algoritmo 4.1, intitulado COgnitive Rate Adaptation. Este algoritmo apresenta em detalhes o processo para a adaptação da taxa de transmissão, e deve ser executado por todas as estações equipadas com o mecanismo cognitivo CORA.

O laço principal do algoritmo, que compreende as linhas 1 – 30, é executado indefinidamente, com um intervalo de I segundos entre cada iteração. Internamente a este laço, a estação realiza a adaptação independente da taxa para cada um dos enlaces pelos quais estão sendo transmitidos quadros (linhas 2 – 28). Durante o processo de adaptação em cada enlace, o algoritmo é dividido segundo as etapas definidas pelo ciclo de realimentação da qualidade. Na etapa de observação (linhas 4 e 5), a vazão de dados obtida com o uso da taxa T_a no enlace e é mensurada através da Equação 4.2; e a base de conhecimento $\mathcal{BC}$ é atualizada através da EWMA definida na Equação 4.1. Na etapa de orientação, ocorre a busca na base de conhecimento pela taxa com a melhor vazão (linhas 7 – 14). A média da PDF normal é então atualizada para o melhor valor na linha 17, e o desvio padrão também pode ser alterado pela função de AAA (linha 19), caso esta função esteja sendo

Algoritmo 4.1 COgnitive Rate Adaptation

min/max → índice da menor/maior taxa disponível
V_{ea} → vazão de dados no último intervalo, calculada segundo a Equação 4.2
α → peso de V_{ea} no cálculo da EWMA, segunda a Equação 4.1
$\mathcal{BC}$ → matriz que representa a base de conhecimento, indexada pelo enlace e taxa
$\mathcal{T}$ → vetor que armazena as taxas atuais, indexado pelo enlace
I → intervalo entre iterações consecutivas do laço principal

1: **laço**
2: **para todo** enlace e ativo na estação **faça**
3: /* *etapa de observação* */
4: $V_{ea} \leftarrow b_{ei} \,/\, t_{ei}$;
5: $\mathcal{BC}[e,a] \leftarrow (1-\alpha) * \mathcal{BC}[e,a] + \alpha * V_{ea}$;
6: /* *etapa de orientação* */
7: $i_n \leftarrow min$;
8: $v_n \leftarrow \mathcal{BC}[e, min]$;
9: **para** t de $min+1$ até max **faça**
10: **se** $\mathcal{BC}[e,t] > v_n$ **então**
11: $i_n \leftarrow t$;
12: $v_n \leftarrow \mathcal{BC}[e,t]$;
13: **fim se**
14: **fim para**
15: $\mu_{old} \leftarrow \mu$;
16: $\sigma_{old} \leftarrow \sigma$;
17: $\mu \leftarrow i_n$;
18: **se** função de AAA ativa **então**
19: $\sigma \leftarrow$ AAA $(\mu_{old},\ \sigma_{old},\ \mu)$;
20: **fim se**
21: /* *etapa de decisão* */
22: $n \leftarrow \lfloor$ `random` $(\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)) + 0.5 \rfloor$;
23: **se** função de DTP ativa **então**
24: $n \leftarrow$DTP (n);
25: **fim se**
26: /* *etapa de ação* */
27: $\mathcal{T}[e] \leftarrow T_n$;
28: **fim para**
29: `sleep` (*I segundos*);
30: **fim laço**

Algoritmo 4.2 TRANSMITE QUADROS

Entrada: qdr: quadro a ser transmitido;
Saída: T_{qdr}: taxa a ser utilizada na transmissão do quadro qdr;

1: $dst \leftarrow$ `destino` (qdr);
2: $tip \leftarrow$ `tipo` (qdr);
3: **se** tip é controle **ou** dst é *multicast* **ou** dst é *broadcast* **então**
4: $\quad T_{qdr} \leftarrow T_{min}$;
5: **senão**
6: $\quad T_{qdr} \leftarrow \mathcal{T}[dst]$;
7: **fim se**
8: **retorne** T_{qdr};

usada pelo algoritmo. Durante a etapa de decisão, um valor aleatório é sorteado na linha 22, obedecendo à PDF normal previamente configurada. Este valor é arredondado, e pode ou não sofrer alterações pela função de DTP. Para finalizar, a etapa de ação armazena a taxa T_i escolhida para o enlace e na estrutura de dados $\mathcal{T}$.

Com a taxa de transmissão de cada enlace armazenada em $\mathcal{T}$, antes de enviar qualquer quadro, a estação utiliza a função TRANSMITE QUADROS para identificar o destino e selecionar a taxa apropriada. O Algoritmo 4.2 descreve este função. A taxa a ser utilizada na transmissão vai depender do destino (enlace) e do tipo do quadro, que são obtidos através das funções nas linhas 1 e 2, respectivamente. O destino é representado pelo endereço da subcamada MAC, que serve como identificador do enlace; enquanto o tipo do quadro pode assumir um de três valores: controle, gerenciamento ou dados. Para garantir a coexistência e interoperabilidade entre todas as implementações do protocolo, o padrão IEEE 802.11 determina que:

1. Os quadros de controle, bem como quaisquer quadros com destino *multicast* ou *broadcast*, devem ser transmitidos utilizando, necessariamente, uma das taxas definidas pelo conjunto ***BSSBasicRateSet***. Este conjunto contém as taxas obrigatoriamente suportadas por todas as estações da rede.

2. Os quadros de dados ou de gerenciamento com endereçamento *unicast* podem ser enviados utilizando qualquer taxa pertencente ao conjunto ***OperationalRateSet***. Este é um superconjunto do *BSSBasicRateSet*, e contém qualquer taxa que possa ser utilizada na rede.

Dessa forma, o teste realizado na linha 3 do Algoritmo 4.2 garante o cumprimento da primeira regra, já que $T_{min} \in$ *BSSBasicRateSet* (obrigatoriamente). Nos demais casos, atendidos pela segunda regra, a linha 6 garante que a taxa escolhida pelo algoritmo de adaptação será utilizada para o envio do quadro.

4.3.4 Parâmetros configuráveis

Exitem três parâmetros configuráveis no CORA: o valor α utilizado no cálculo da EWMA durante a fase de observação; o valor I que define o intervalo entre as iterações do ciclo de otimização; e o desvio padrão σ utilizado pela PDF normal.

O parâmetro α reflete o efeito da informação mais recente no cálculo do desempenho médio que será armazenado na base de conhecimento. O objetivo do α é suavizar as tendências de comportamento, eliminando mudanças bruscas provocadas por estados inconsistentes. Essa abordagem é utilizada por outros algoritmos com a mesma finalidade [Bicket, 2005; Xia e Hamdi, 2008]. Este parâmetro pode assumir valores reais no intervalo $\alpha \in (0, 1]$. A escolha de um valor próximo de 1 para α faz com que a vazão mensurada durante o último intervalo seja predominante no cálculo do desempenho médio, e permite que o algoritmo rapidamente reaja às mudanças nas condições do canal. Por sua vez, valores de α próximos de 0 resultam um comportamento mais conservativo, já que as informações mais antigas tornam-se relevantes. O valor escolhido para este parâmetro deve ser capaz de ignorar pequenos estados transientes mas também permitir que o sistema identifique as mudanças no comportamento da rede.

O segundo parâmetro de interesse I é o que define o intervalo entre as iterações do ciclo de realimentação da qualidade, e pode assumir qualquer valor real $I > 0$. Durante este intervalo, o mecanismo CORA permanece ocioso, enquanto a estação opera normalmente enviando quadros com a taxa de transmissão aleatoriamente escolhida na execução anterior do ciclo.

A escolha de um valor baixo para I força o algoritmo a executar o ciclo de otimização diversas vezes, introduzindo custo adicional de processamento. Além disso, intervalos pequenos podem produzir informações não confiáveis, já que a quantidade de quadros enviados é reduzida, e qualquer anormalidade torna-se significante. Em contrapartida, estes intervalos pequenos diminuem o tempo de convergência do algoritmo, já que mais taxas são aleatoriamente escolhidas e testadas enquanto a rede está em funcionamento.

A escolha de um valor alto para I diminui o processamento e melhora a confiabilidade dos dados. Entretanto, faz com que o algoritmo não seja capaz de aproveitar curtos intervalos de tempo durante os quais a qualidade do sinal pode melhorar. Intervalos grandes também penalizam as estações quando a taxa aleatoriamente escolhida não é boa, já que esta taxa será utilizada para transmitir todos os quadros do próximo intervalo.

O último parâmetro configurável é o desvio padrão σ utilizado pela PDF normal $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$. Este parâmetro é o responsável por controlar o que foi denominado neste trabalho como **agressividade do mecanismo** no processo de escolha aleatória das taxas.

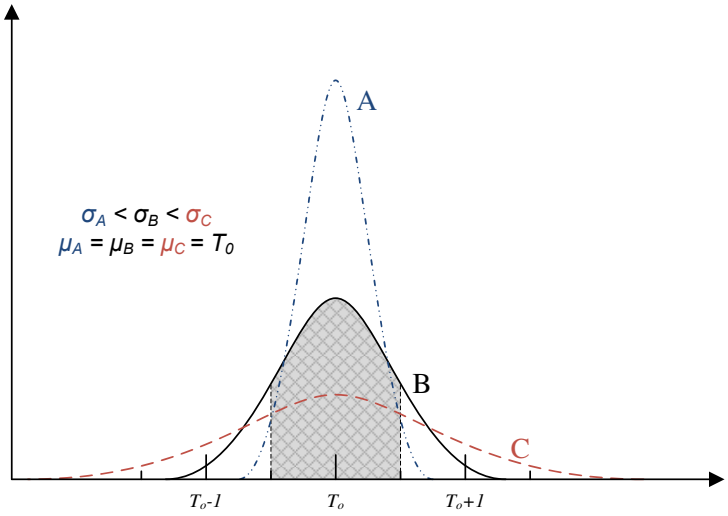


Figura 4.5: Curvas normais com mesmo μ e diferentes valores de σ.

Para ilustrar este conceito, a Figura 4.5 apresenta três PDFs normais com a mesma média $\mu = T_o$ e diferentes valores para o desvio padrão σ.

Seja T_o o inteiro correspondente à melhor taxa de transmissão conhecida para algum enlace da rede. Como apresentado na Subseção 4.3.1, qualquer valor real aleatório $r \in [T_o - 0.5, T_o + 0.5)$ será aproximado para a taxa T_o. A probabilidade do número aleatório sorteado encontrar-se nesse intervalo é calculada através da integral

$$\int_{T_o-0.5}^{T_o+0.5} f(x, \mu, \sigma^2)\, dx. \tag{4.3}$$

onde $f(x, \mu, \sigma^2)$ é a equação que descreve a curva normal. Em outras palavras, esta probabilidade é dada pela área abaixo da curva no intervalo $[T_o - 0.5, T_o + 0.5)$. Para a curva normal `B` na Figura 4.5, esta é a área que se encontra hachurada.

Diminuindo o valor de σ, como feito para a curva `A`, a probabilidade do número aleatório sorteado encontrar-se no intervalo $[T_o - 0.5, T_o + 0.5)$ aumenta, já que a área abaixo da curva neste intervalo é maior. Ao mesmo tempo, as chances do valor aleatório resultar no uso de taxas diferentes de T_o diminui. Neste caso, a agressividade do algoritmo em avaliar taxas diferentes da melhor taxa conhecida foi reduzida. Esse comportamento é inverso para a curva `C`, onde o desvio padrão maior aumenta a agressividade do algoritmo.

A escolha do valor de σ afeta diretamente o tempo de convergência e a estabilidade do sistema, a depender do nível de mudanças ao qual o enlace sem fio está submetido. Conforme será visto na subseção a seguir, a função de AAA pode auxiliar no controle do valor deste parâmetro.

4.3.5 Funções auxiliares

Com o objetivo de aprimorar o funcionamento do mecanismo, foram propostas duas funções auxiliares para o CORA. O uso destas funções não é obrigatório, mas como será visto no Capítulo 5, os ganhos obtidos justificam sua adoção em todos os casos. A primeira delas está relacionada com o processo de configuração do desvio padrão σ da PDF normal, enquanto a segunda tenta melhorar o comportamento do algoritmo em redes com elevado grau de disputa pelo acesso ao meio, aumentando um pouco o nível de justiça nestes ambientes. Essas funções são apresentadas em detalhes nos parágrafos a seguir.

Ajuste Automático da Agressividade. Como discutido na Subseção 4.3.4, o desvio padrão σ utilizado pela PDF normal define o fator de agressividade do mecanismo CORA. Este fator reflete a probabilidade de sortear uma taxa diferente da melhor taxa conhecida, para ser utilizada durante o próximo intervalo I. É através desta escolha aleatória de taxas que o mecanismo vai identificar as mudanças na qualidade do enlace sem fio e alterar a média μ da distribuição para o melhor valor.

A escolha do desvio padrão σ está limitada por um compromisso entre a estabilidade e o tempo de convergência do mecanismo. Se o valor escolhido é pequeno (agressividade baixa), o sistema se comporta bem em condições estáveis da rede, mas demora para identificar uma mudança no canal e alterar a média da distribuição. Se o valor escolhido é grande (agressividade alta), o mecanismo converge rápido para o melhor valor, mas prejudica o desempenho enquanto o canal permanece estável, já que aumenta a frequência de testes em taxas diferentes da melhor taxa conhecida.

Para contornar esta dificuldade, foi proposta a função de Ajuste Automático da Agressividade (AAA). A ideia é aumentar o valor de σ quando ocorrem mudanças no canal, e diminuir o valor de σ quando o canal permanece estável. Assim, é possível manter o desvio padrão configurado sempre com um valor próximo do ideal.

As variações na qualidade do canal (inferidas durante a etapa de orientação), são refletidas no valor de μ que será utilizado como média da distribuição normal durante o próximo intervalo. Se o valor de μ para o próximo intervalo é diferente da média utilizada pela distribuição na iteração imediatamente anterior (μ_{old}), então a taxa com o melhor desempenho no último intervalo não é mais a mesma dos intervalos anteriores, caracterizando uma modificação nas condições do canal sem fio.

A função de AAA é descrita pelo Algoritmo 4.3. O novo valor para o desvio padrão deve estar contido no intervalo $[\sigma_{min}, \sigma_{max}]$, com $\sigma_{min} > 0$, sendo modificado por um fator de incremento aaa_{fi} e uma parcela de decremento aaa_{pd}. O objetivo é aumentar o desvio padrão de maneira multiplicativa, e reduzir por um fator constante. Assim, é possível permitir que o mecanismo seja rápido ao identificar uma mudança no canal, mas caminhe para a estabilidade nos demais casos.

Algoritmo 4.3 Ajuste Automático da Agressividade

Entrada: μ_{old}: média utilizada no último intervalo; σ_{old}: desvio padrão utilizado no último intervalo; μ: média que será utilizada no próximo intervalo;
Saída: σ: desvio padrão que será utilizada no próximo intervalo;

1: **se** $\mu \neq \mu_{old}$ **então**
2: /* *a melhor taxa modificou – aumentar o desvio padrão* */
3: $\sigma = \sigma_{old} * aaa_{fi}$;
4: **se** $\sigma > \sigma_{max}$ **então**
5: $\sigma = \sigma_{max}$;
6: **fim se**
7: **senão**
8: /* *a melhor taxa permaneceu – diminuir o desvio padrão* */
9: $\sigma = \sigma_{old} - aaa_{pd}$;
10: **se** $\sigma < \sigma_{min}$ **então**
11: $\sigma = \sigma_{min}$;
12: **fim se**
13: **fim se**
14: **retorne** σ;

Diff-Time Proporcional. A segunda extensão proposta para o mecanismo CORA é o uso do *diff-time* no processo de escolha aleatória da taxa de transmissão. O *diff-time* é uma métrica proposta por [Cardoso e Rezende, 2008], cujo objetivo é refletir o nível de disputa em um canal sem fio. Ela foi projetada para aumentar o benefício do algoritmo YARAa em redes com alta densidade de estações, mas pode ser utilizada em qualquer cenário sem prejudicar o desempenho.

Para entender o *diff-time* é preciso recordar o funcionamento do protocolo CSMA/CA, apresentado na Subseção 2.1.2. A Figura 4.6 ilustra este protocolo durante a transmissão de um quadro pela estação `A`. Quando uma estação deseja transmitir um quadro, ela monitora o meio de transmissão até que este esteja livre. A partir deste momento, a estação aguarda um tempo DIFS mais um intervalo *backoff* sorteado em função da janela de contenção. O contador de *backoff* é decrementado enquanto o meio encontra-se ocioso, mas é parado enquanto outras estações transmitem quadros. Quando o contador chega a zero, a estação faz a transmissão do quadro.

Neste exemplo da figura, a estação `A` obteve sucesso na transmissão do seu quadro, mas poderia ter ocorrido uma colisão e uma retransmissão seria necessária. A retransmissão envolve o sorteio de um novo valor de *backoff* em uma janela de contenção maior, elevando o tempo de retransmissão não somente pelo reenvio, mas também pelo tempo de espera (em média) maior.

O tempo de transmissão esperado (ExTT) de um quadro, considerando as possíveis

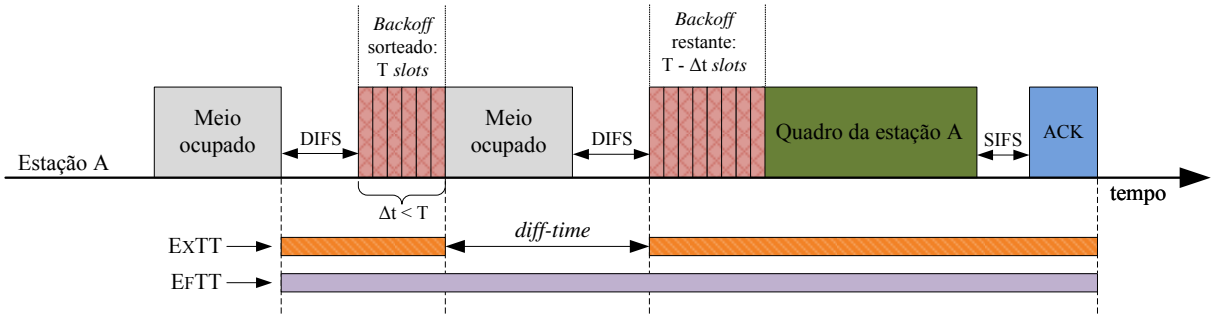


Figura 4.6: Representação gráfica do *diff-time* no protocolo CSMA/CA.

retransmissões, pode ser calculado a partir da seguinte estimativa, proposta por [Bicket, 2005] e utilizada pelo algoritmo SampleRate:

$$ExTT(b,r,n) = difs + \sum_{a=0}^{r} backoff(a) + (r+1) * (sifs + T_{ack} + T_{header} + ((n*8)/b)) \quad (4.4)$$

onde b (*bit-rate*) corresponde à taxa de transmissão da camada física, r (*retries*) indica o número de tentativas de transmissão até o sucesso e n é a quantidade de *bytes* no quadro. Nesta equação, $backoff(a)$ é calculado multiplicando o $aSlotTime$ pela média amostral da distribuição uniforme definida dentro do intervalo $[0, CW]$; com CW escolhido de acordo com a tentativa a, conforme definido pela Equação 2.2. Valores de $a > 0$ significam retransmissões do mesmo quadro, sendo a primeira transmissão identificada por $a = 0$.

Os demais parâmetros utilizados pela Equação 4.4 estão descritos na Tabela 4.1. T_{header} é o tempo para a transmissão do preâmbulo da camada física, e T_{ack} é o tempo de transmissão do quadro ACK, calculado em função da taxa de transmissão utilizada (b'). Vale lembrar que na especificação 802.11b há dois tipos de preâmbulos na camada física: o longo, com 18 *bytes*; e o curto, com 9 *bytes*.

O ExTT tem o intuito de medir o impacto das retransmissões na vazão. No entanto, ele não fornece o tempo de transmissão efetivo (*Effective Transmission Time* - EfTT), uma vez que não é contabilizado o tempo que o contador de *backoff* permanece paralisado em função de outras transmissões. Assim como no YARAa, o CORA calcula o EfTT monitorando o tempo decorrido entre o momento em que o quadro é retirado da fila para ser transmitido e o instante em que o ACK da camada de enlace retorna confirmando o recebimento. Desses dois intervalos de tempo é calculada a diferença: o *diff-time*.

No exemplo da Figura 4.6, pode-se observar que o contador regressivo do *backoff* foi interrompido uma única vez, produzindo o *diff-time* indicado na figura. Entretanto, esse comportamento poderia ser diferente. Se a estação `A` fosse a única transmitindo dados, o contador não seria paralisado, e o *diff-time* seria sempre nulo. Por outro lado, se houvesse

Tabela 4.1: Parâmetros das redes IEEE 802.11a/b/g [802.11, 2007].

Padrão	*aSlotTime*	DIFS	SIFS	T_{header}	T_{ack}
802.11a	$9\,\mu s$	$34\,\mu s$	$16\,\mu s$	$20\,\mu s$	$T_{header} + 14 * 8/b$'
802.11b	$20\,\mu s$	$50\,\mu s$	$10\,\mu s$	$96\,\mu s/192\,\mu s$	$T_{header} + 14 * 8/b$'
802.11g	$9\,\mu s$	$28\,\mu s$	$10\,\mu s$	$20\,\mu s$	$T_{header} + 14 * 8/b$'

mais estações disputando o meio, o contador poderia ser paralisado mais vezes, gerando um *diff-time* maior. Assim, o *diff-time* pode ser utilizado como um indicador de nível de disputa no canal sem fio, e auxiliar o processo de escolha da taxa de transmissão.

Quando o valor do *diff-time* é considerado alto, a vazão de dados na camada de enlace pode ser reduzida não pela baixa qualidade do canal, mas sim pelo excesso de colisões no ambiente. Nestes casos, o uso de taxas de transmissão maiores pode gerar melhores resultados, contribuindo com a divisão justa do canal, reduzindo o tempo gasto em cada transmissão e ajudando a diminuir o efeito da anomalia de desempenho.

Todavia, para saber se o *diff-time* é considerado alto ou baixo, é preciso definir um valor limitante (dtp_{thrs}). Como o tempo de transmissão de um quadro pode variar de acordo com a taxa de transmissão utilizada, e como o *diff-time* é uma métrica que reflete tempo, é preciso fazer uma normalização destes valores. Neste sentido, o CORA utiliza o *diff-time proporcional*, que representa o aumento de tempo (em porcentagem) que o *diff-time* impõe sobre o ExTT.

O Algoritmo 4.4 descreve a função de DTP utilizada pelo mecanismo CORA. Para calcular o *diff-time proporcional* na linha 1 do algoritmo, são utilizados os valores médios de EfTT e ExTT, calculados através de médias móveis exponencialmente ponderadas (EWMAs) para reduzir a alta variância dos valores instantâneos.

Quando o mecanismo identifica que há uma disputa elevada no canal sem fio (teste da linha 2), é sorteado um valor aleatório (rv) a partir de uma PDF uniforme, com $rv \in [0, 1]$. Este valor é utilizado para decidir, com uma certa probabilidade (teste da linha 4), se a função irá ou não modificar o valor aleatório n recebido como parâmetro. Em caso positivo, este valor é acrescido de uma unidade, de maneira que a próxima taxa a ser testada seja a imediatamente superior à sorteada pelo CORA.

Com o uso das funções auxiliares apresentadas nesta seção, é possível melhorar o desempenho do mecanismo CORA, tanto em ambientes congestionados quanto dinâmicos. É importante reforçar que o uso destas funções nos demais ambientes não reduz o desempenho do mecanismo. Essa propriedade é verdadeira pois o *diff-time proporcional* em ambientes não congestionados vai resultar em valores próximos de zero, fazendo com que a

Algoritmo 4.4 DIFF-TIME PROPORCIONAL

Entrada: n: valor aleatório obtido a partir da PDF normal;
Saída: n: valor aleatório da entrada, modificado ou não;

1: $dtp \leftarrow (\,\text{EFTT} * 100 \,/\, \text{EXTT}\,) - 100$;
2: **se** $dtp \geqslant dtp_{thrs}$ **então**
3: $\quad rv \leftarrow$ `random` $(\mathcal{U}(0,1))$;
4: $\quad$ **se** $rv \geqslant hrt_{prob}$ **então**
5: $\quad\quad n \leftarrow n + 1$;
6: $\quad$ **fim se**
7: **fim se**
8: **retorne** n;

função de DTP não altere o valor de n. Além disso, em ambientes estáveis, a função de AAA converge o desvio padrão para o valor $\sigma_{min} > 0$, garantindo alguma probabilidade (mesmo que pequena) de escolha de alguma taxa diferente da atual.

4.4 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado o mecanismo CORA, uma solução cognitiva para a adaptação automática da taxa de transmissão em redes 802.11. Este é um mecanismo descentralizado que pode ser implementado nos dispositivos comerciais com recursos limitados, por conta da baixa demanda por processamento. Além disso, o CORA pode ser incrementalmente implantado em redes reais, já que não necessita de alterações no padrão e as estações que executam o CORA são capazes de operar em conjunto com outras estações que não implementam este mecanismo.

Os problemas relacionados à adaptação automática da taxa de transmissão, discutidos nos capítulos anteriores, foram considerados durante o desenvolvimento do mecanismo proposto. O CORA, em sua proposta original, não considera a perda de quadros para guiar a escolha da taxa. Consequentemente, não há necessidade de identificar o motivo da perda. Além disso, o mecanismo proposto não depende de indicadores de qualidade de sinal como o SNR ou SINR. A adaptação independente por enlace sem fio e o suporte a diferentes métricas de qualidade permitem que ele seja utilizado nas redes em malha sem fio, atendendo aos requisitos desta arquitetura.

No capítulo seguinte, o CORA é avaliado através de simulações, e os resultados obtidos são comparados com outros algoritmos da literatura. As características descritas na Subseção 4.3.2, bem como as funções auxiliares propostas na Subseção 4.3.5 também são avaliadas. Conforme será mostrado, a solução proposta apresenta melhorias em relação aos algoritmos utilizados na comparação.

Capítulo 5

Avaliação de Desempenho do Mecanismo Cognitivo Proposto

Neste capítulo é apresentada a avaliação de desempenho do mecanismo cognitivo CORA e dos demais algoritmos de adaptação automática da taxa de transmissão, que foram utilizados durante o processo comparativo. Todos os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos através de simulações realizadas no *Network Simulator* (*NS2*) [NS2, 2009].

Foram considerados diferentes cenários, abrangendo as redes 802.11 tipo infraestruturado e *ad hoc*, bem como as redes em malha sem fio. O objetivo é demonstrar o funcionamento do mecanismo proposto nos diversos ambientes, além de avaliar as propriedades e o comportamento do CORA em função dos parâmetros configuráveis e das funções auxiliares existentes no mecanismo.

O restante deste capítulo está organizado como segue. Na Seção 5.1 está descrito o processo de implementação do mecanismo cognitivo no simulador de redes utilizado. A seguir, na Seção 5.2, são apresentadas as configurações e os parâmetros utilizados durante o processo de simulação. As descrições dos cenários simulados, os gráficos comparativos e as análises dos resultados obtidos encontram-se nas Seções 5.3, 5.4 e 5.5. Por fim, na Seção 5.6, são apresentadas as conclusões obtidas durante a avaliação de desempenho do mecanismo proposto CORA.

5.1 Implementação

Para avaliar o comportamento dos algoritmos de adaptação da taxa de transmissão, o simulador de redes *NS2* (versão 2.33) foi utilizado em conjunto com a biblioteca `dei80211mr` (versão 1.1.4) [SIGNET, 2008]. Esta biblioteca, que faz parte da distribuição *all-in-one* do *NS2*, contém uma implementação que oferece suporte à simulações de redes sem fio especificadas pelos padrões 802.11b e .11g, com diferentes taxas de transmissão. Além

disso, esta biblioteca inclui um modelo de erro baseado na SINR percebida na recepção de cada quadro, e também um modelo de interferência gaussiano mais preciso do que o originalmente utilizado pelo simulador.

A biblioteca `dei80211mr` já possui dois algoritmos de adaptação da taxa de transmissão implementados: o *Auto Rate Fallback* (ARF) e o *Receiver-Based Auto Rate* (RBAR); além de um terceiro mecanismo intitulado de REFERÊNCIA. Este mecanismo de REFERÊNCIA não é implementável na prática, já que ele obtém a SINR que o quadro terá no receptor antes mesmo de seu envio. Dessa forma, ele escolhe sempre a melhor taxa para a transmissão de cada quadro sem precisar armazenar nenhuma informação sobre o enlace.

Para equipar esta biblioteca com as funcionalidades do CORA, foram criadas duas novas classes: `CORAClass` e `CORALink`; além de inserir modificações na classe `Mac802_11mr`. A Figura 5.1 apresenta o digrama de classes *Universal Modelling Language* (UML) de parte da biblioteca, destacando as modificações realizadas.

`Mac802_11mr` é uma classe já existente na biblioteca, que contém a implementação completa do conjunto de funcionalidades previstas pela subcamada MAC das redes IEEE 802.11b e .11g. As funções e atributos desta classe são omitidos no diagrama, que mostra apenas as funções adicionais implementadas por conta do mecanismo CORA.

As classes `RateAdapter` e `TimerHandler` também fazem parte da implementação original da biblioteca. A primeira delas é responsável por armazenar as taxas de transmissões disponíveis para uso (`available_rates[]`), bem como o índice da taxa que deve ser utilizada pela interface para transmitir os quadros (`current_idx`). Esta classe contém funções para a manipulação deste índice, e a semântica de sua alteração é a de modificar a taxa de transmissão utilizada pela interface sem fio. Por sua vez, a `TimerHandler` controla os mecanismos necessários para manipulação de contadores regressivos. Ela oferece as funções `resched()`, responsável por iniciar um contador regressivo; e `expire()`, que é executada sempre que este contador expirar.

A nova classe `CORAClass` estende as classes `RateAdapter` e `TimerHandler`, com o objetivo de ajustar o `current_idx` de acordo com a proposta do mecanismo. Esta classe armazena o valor do parâmetro I (`interval`) e implementa a função `sendData()`, executada antes do envio de cada quadro pela camada de enlace, e responsável por alterar a taxa de transmissão conforme o Algoritmo 4.2.

Como o CORA realiza a adaptação de maneira independente por enlace sem fio, foi criada a classe `CORALink`. Uma instância de `CORAClass` contém vários objetos da classe `CORALink`, um para cada enlace ativo. Estes objetos são alocados no vetor `links[]`, e armazenam o identificador (`link_id`), a tabela de desempenho (`performance_table[]`) e a métrica de qualidade (`performance_metric`) utilizada por seus respectivos enlaces. Os demais parâmetros que podem assumir valores diferentes para cada enlace (incluindo a PDF normal, os parâmetros do CORA e os parâmetros utilizados pelas funções auxiliares)

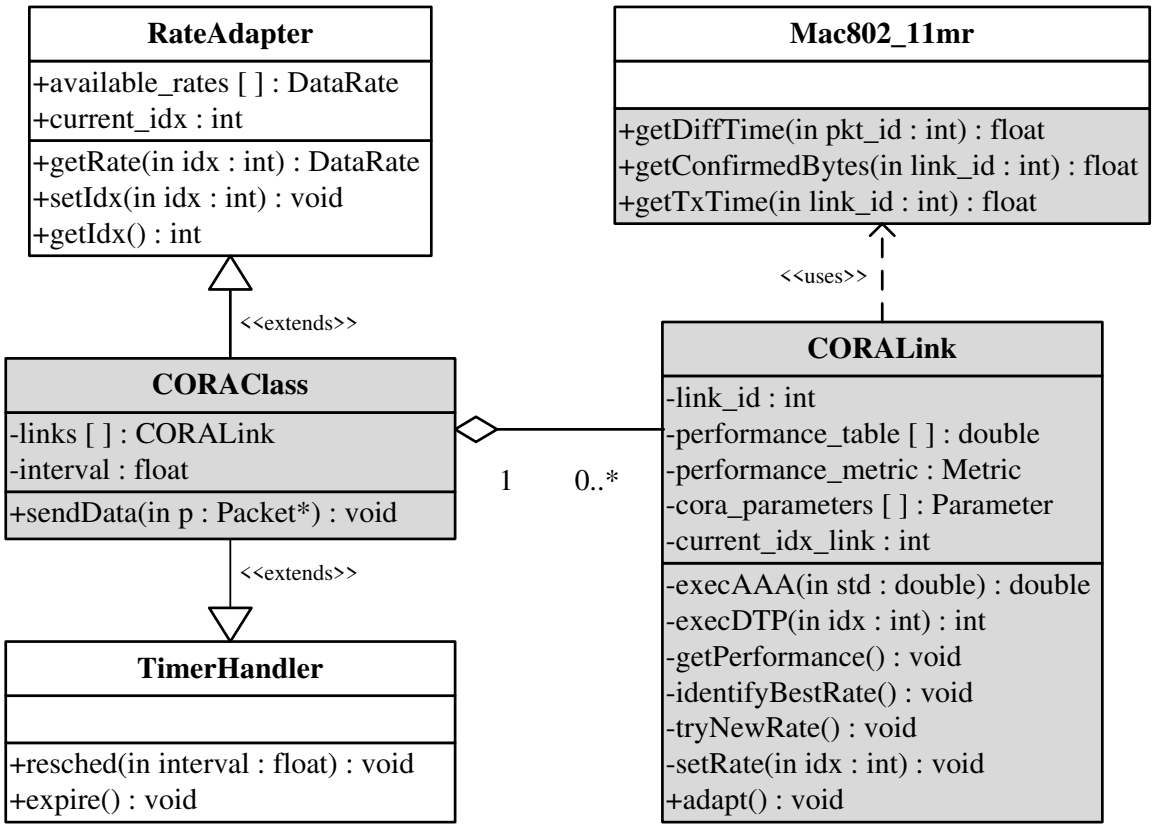


Figura 5.1: Diagrama de classes UML da implementação do CORA no *NS2*.

também são armazenados nesta classe, representados pelo vetor `cora_parameters[]`. Por fim, o `current_idx_link` armazena o índice correspondente à taxa de transmissão que deve ser utilizada por este enlace.

O processo de adaptação da taxa de transmissão ocorre como segue. O término do contador regressivo provoca a execução do método `adapt()` em cada objeto `CORALink` existente no vetor `links[]`. Este método realiza a adaptação da taxa de transmissão de seu respectivo enlace sem fio, utilizando os métodos `getPerformance()`, `identifyBestRate()`, `tryNewRate()` e `setRate()`. Estes quatro métodos são responsáveis por executar, nesta mesma ordem, as etapas de *observação*, *orientação*, *decisão* e *ação* do ciclo de realimentação da qualidade apresentado na Figura 4.4.

As informações de desempenho necessárias pelo `getPerformance()` durante o cálculo da vazão podem ser obtidas através das funções `getConfirmedBytes()` e `getTxTime()`, que foram implementadas na classe `Mac802_11mr`. Estas funções retornam a quantidade de bytes corretamente transmitidos e confirmados pelo enlace, e o tempo dispendido durante as transmissões de quadros. De posse da vazão, a EWMA é calculada e armazenada em `performance_table[current_idx_link]`. Por sua vez, o método

`identifyBestRate()` percorre esta tabela à procura do índice i, referente à melhor posição, para alterar a média da distribuição normal. Se $i \neq$ `current_idx_link`, o desvio padrão σ da distribuição normal também é modificado pela função `execDTP()`. O método `tryNewRate()` gera um índice aleatório $i \in [0, \texttt{tamanho}(\texttt{available_rates[]})]$ a partir da distribuição normal. O *diff-time proporcional* é recuperado pela função `getDiffTime()`, e este índice i é modificado para seu novo valor de acordo com a execução de `execAAA()`. Para finalizar, o método `setRate()` atribui o valor de i ao `current_idx_link`.

Terminado este processo, sempre que a camada de enlace seleciona um quadro para envio, o método `sendData()` da classe `CORAClass` verifica o cabeçalho do quadro para identificar o endereço MAC de destino (identificador do enlace), e busca pelo valor de `current_idx_link` associado ao enlace em questão. De posse deste índice, a função modifica o `current_idx` de `RateAdapter` para o valor recuperado através do método `setIdx()`, concluindo a alteração da taxa. A partir deste momento, a implementação já existente na biblioteca se encarrega de alterar os parâmetros necessários na subcamada MAC e camada física para que o quadro seja transmitido com a taxa escolhida.

Além do mecanismo CORA, também foi implementado na biblioteca `dei80211mr` o algoritmo SampleRate, de acordo com o código existente no *driver* `MadWiFi` [MadWiFi, 2010]. Este algoritmo, assim como o ARF, o RBAR e o algoritmo de REFERÊNCIA, serviram de comparação durante a avaliação de desempenho do CORA. Os resultados obtidos são apresentados a partir da Seção 5.3, depois dos detalhes de configuração da simulações que estão descritos na seção a seguir.

5.2 Configuração das simulações

Para avaliar o mecanismo CORA e os demais algoritmos, foram definidos três cenários: pares de comunicação *ad hoc*, rede infraestruturada, e rede em malha sem fio. O simulador *NS2* foi configurado para operar em conformidade com uma rede IEEE 802.11g, que oferece até oito taxas de transmissão para uso. No Apêndice A estão listados os parâmetros e comandos utilizados neste processo de configuração, obtidos com base nas informações existentes em [Xiuchao, 2004] e na especificação do padrão em questão [802.11g, 2003].

O modelo de propagação de ondas utilizado foi o *Free Space*, em conjunto com um modelo de erro que se baseia na SINR percebida durante a recepção dos quadros para decidir se o mesmo será aceito ou descartado. Estes são os únicos modelos disponíveis para uso na biblioteca `dei80211mr`, e foram definidos como a combinação padrão para as simulações realizadas.

A principal métrica de desempenho considerada durante as simulações deste capítulo é a vazão agregada média, calculada a partir da seguinte equação:

$$\overline{V_{ag}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{f} \overline{v_{ij}} \quad \begin{cases} \overline{v_{ij}} = \frac{b_{ij}}{\Delta t} \\ \Delta t = T - \tau \end{cases} \tag{5.1}$$

onde n é o número de repetições da simulação (utilizando sementes diferentes), f é a quantidade de fluxos simultâneos existentes na simulação, T é o tempo total da simulação, τ é o intervalo transiente inicial e b_{ij} é a quantidade de bytes transmitidos pelo fluxo j na simulação i durante o intervalo $[\tau, T]$.

Todas as simulações foram repetidas 30 vezes (n), e os resultados apresentados possuem intervalos de confiança de 95%. Os fluxos de dados são sempre iniciados em tempos aleatórios inferiores aos 5 primeiros segundos de simulação, sendo que os 10 segundos iniciais são desconsiderados como transiente (τ). A duração total de cada simulação (T) é de 110 segundos, salvo em algumas topologias onde outro valor é apresentado.

Nas simulações das redes tipo *ad hoc* e infraestruturada foi utilizado o agente de roteamento `DumbAgent`, disponível no *NS2*. Este é um bom agente para avaliação de um mecanismo da camada de enlace, pois estabelece comunicação de apenas um salto, sem reencaminhamento de pacotes nem mensagens de controle. Já a arquitetura de redes em malha sem fio não é compatível com este agente, e o algoritmo de roteamento *Destination-Sequenced Distance-Vector* (DSDV) foi utilizado em seu lugar. O DSDV é um protocolo pró-ativo com múltiplos saltos, onde a rota para as demais estações na rede são armazenadas em tabelas, eliminando os atrasos decorrentes da descoberta destas rotas sob demanda. Este comportamento não pode ser alcançado com o uso dos protocolos reativos, como o *Ad hoc On-Demand Distance Vector* (AODV).

Diversos tamanhos de quadros foram avaliados durante as simulações, obtendo resultados semelhantes para todos eles. Por esta razão, somente as simulações onde os fluxos transportam quadros de 1500 *bytes* são apresentadas. Além disso, foram realizadas simulações com os protocolos *Transmission Control Protocol* (TCP) e *User Datagram Protocol* (UDP). Na maioria dos cenários, ambos apresentaram comportamento semelhante com diferença apenas nos valores absolutos, reduzindo a vazão por conta do controle de congestionamento do TCP.

As seções a seguir descrevem os cenários e apresentam os resultados obtidos durante as simulações. Além da vazão agregada média, são discutidos também a capacidade de adaptação da taxa de transmissão e o comportamento do CORA em função de suas funções auxiliares e seus parâmetros configuráveis.

5.3 Cenário 1: pares de comunicação

A proposta deste primeiro cenário é verificar o comportamento dos algoritmos quando utilizados na comunicação entre pares de estações operando no modo *ad hoc*. Foram definidas duas topologias. A primeira, detalhada na Subseção 5.3.1, foi projetada para avaliar a capacidade dos mecanismos em alterar a taxa de transmissão quando ocorrem mudanças na qualidade do canal, além de verificar o comportamento do CORA em função de seus parâmetros e do uso da função de Ajuste Automático da Agressividade. A segunda topologia, detalhada na Subseção 5.3.2, tem como objetivo avaliar os mecanismos quando o número de estações disputando o acesso ao meio aumenta, incluindo também a análise dos benefícios alcançados pelo uso da função de Diff-Time Proporcional presente no CORA.

5.3.1 Um par comunicante

A primeira topologia para este cenário, ilustrada na Figura 5.2, contém um par de estações se comunicando através de um único fluxo de dados em saturação da estação `F` para estação `M`. Para avaliar a capacidade dos mecanismos em alterar as taxas de transmissão quando ocorre desvanecimento do sinal, a estação `F` é mantida fixa em sua posição original e a estação `M` começa a mover-se para longe de `F`, com velocidade constante de 0.5 m/s, até atingir a distância de 300 m entre elas. Ao chegar a esta distância, a estação `M` inverte o sentido do movimento e retorna para sua posição inicial (reaproximação). Somente para esta topologia, a duração total da simulação (T) foi definida para 1210 s.

As primeiras simulações realizadas com esta topologia são apresentadas no parágrafo a seguir, e têm como objetivo exemplificar os benefícios alcançados pela adaptação automática da taxa de transmissão.

Benefícios da adaptação. Para verificar o desempenho alcançado com o uso de cada uma das oito taxas disponíveis nas redes IEEE 802.11g (6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 e 54 Mbps), a Figura 5.3 apresenta a vazão instantânea média do único fluxo de dados durante os primeiros 600 s de simulação, período no qual a distância entre as estações `F` e `M` está aumentando. Nesta figura, as taxas estão indicadas na legendas de `Mod6` a `Mod54`.

Figura 5.2: Cenário 1: topologia com um par de estações comunicantes.

Como a qualidade do sinal reduz ao longo do tempo, induzindo variações nas condições do canal, pode-se perceber que existe uma taxa de transmissão que maximiza a vazão em cada momento da simulação. Nos primeiros 40 s, esta taxa é a de 54 Mbps (`Mod54`). Já entre 180 e 310 s, a melhor taxa para ser utilizada é a de 12 Mbps (`Mod12`). Assim, é importante escolher sempre a melhor taxa de transmissão dentre todas as disponíveis, de maneira que a vazão de dados seja máxima em todos os momentos. A Figura 5.4 ilustra a vazão instantânea neste cenário, obtida com o uso do algoritmo de REFERÊNCIA para adaptação da taxa de transmissão.

A análise destes gráficos ilustra o benefício alcançado pela escolha apropriada da taxa de transmissão, de acordo com as condições do enlace sem fio. No cenário apresentado, o algoritmo de REFERÊNCIA produz uma vazão média de 7.9 Mbps, enquanto a maior vazão média alcançada com o uso de uma taxa fixa foi de 4.7 Mbps (neste caso, com o uso da taxa `Mod12`). Essa diferença representa um aumento de 68% na vazão média. Além disso, a escolha correta da taxa de transmissão foi capaz de manter a conectividade entre as estações durante toda a simulação, enquanto que, após a marca de 400 s, a taxa `Mod12` não consegue transmitir mais quadros devido à baixa qualidade do sinal.

Como é possível observar na Figura 5.3, a taxa de transmissão `Mod9` não gerou o melhor resultado em nenhum momento. Por esta razão, ela foi retirada do conjunto *OperationalRateSet* nas demais simulações realizadas neste capítulo. Outros trabalhos na literatura também utilizam esta mesma abordagem para lidar com este problema [Bicket, 2005; Lacage et al., 2004; Wong et al., 2006].

Por ser um ambiente controlado onde não existem colisões entre quadros nem interferência de transmissões concorrentes, esta primeira topologia foi utilizada para avaliar o comportamento do mecanismo CORA em função das possíveis combinações de valores para seus parâmetros. Essa avaliação é apresentada a seguir, antes dos resultados comparativos entre o CORA e os demais algoritmos.

Parâmetros configuráveis do CORA. Para configurar corretamente o mecanismo CORA, foi preciso avaliar o efeito das possíveis combinações de seus parâmetros na vazão agregada obtida pela rede. Para isso, foram realizadas simulações desta primeira topologia sem o uso das funções de AAA e DTP, combinando diferentes valores para cada um dos parâmetros I, α e σ. Os resultados desta avaliação foram gerados a partir de um fluxo UDP em saturação. O mesmo comportamento pode ser observado para conexões TCP, que foram omitidas por esta razão.

Foram testados valores para o intervalo de execução $I \in \{0.05, 0.1, 0.3, 0.5\}$, para o parâmetro EWMA $\alpha \in \{0.3, 0.5, 0.7, 0.9\}$ e para o desvio padrão $\sigma \in \{0.2, 0.3, 0.5, 0.8\}$. Para visualizar os resultados, foram desenhados gráficos de superfície que representam a vazão agregada média obtida em função da combinação dos diversos parâmetros, dois a dois.

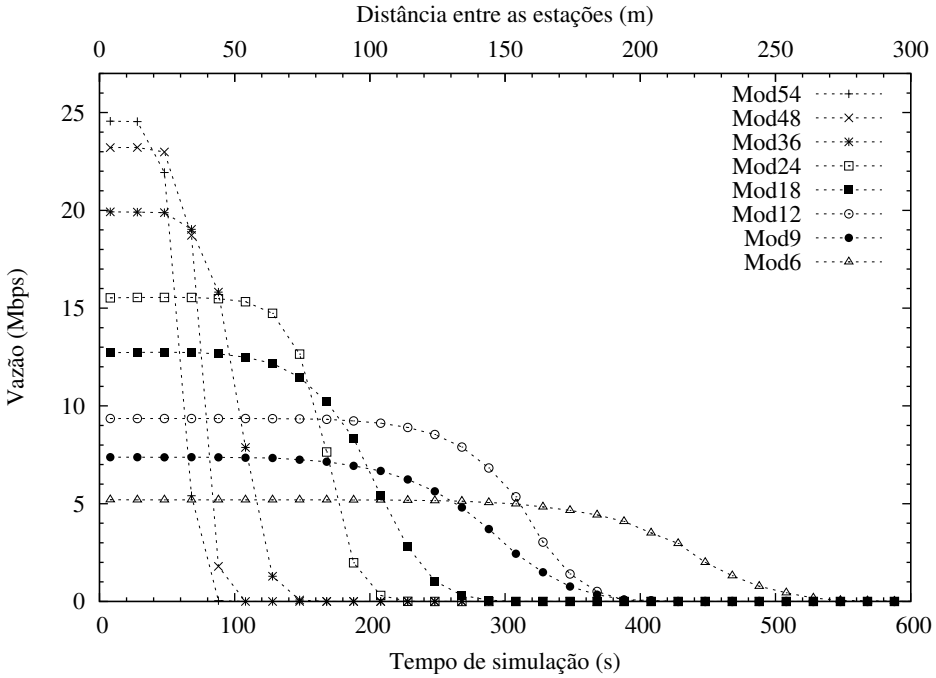


Figura 5.3: Vazão instantânea média em função da variação do SNR ao longo do tempo para cada taxa de transmissão em uma rede IEEE 802.11g.

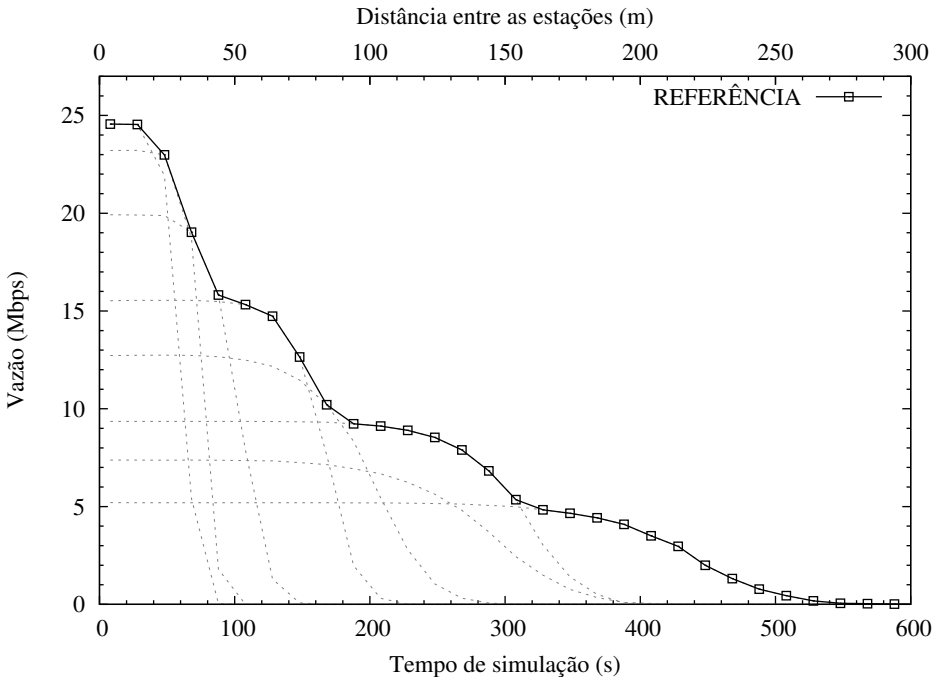
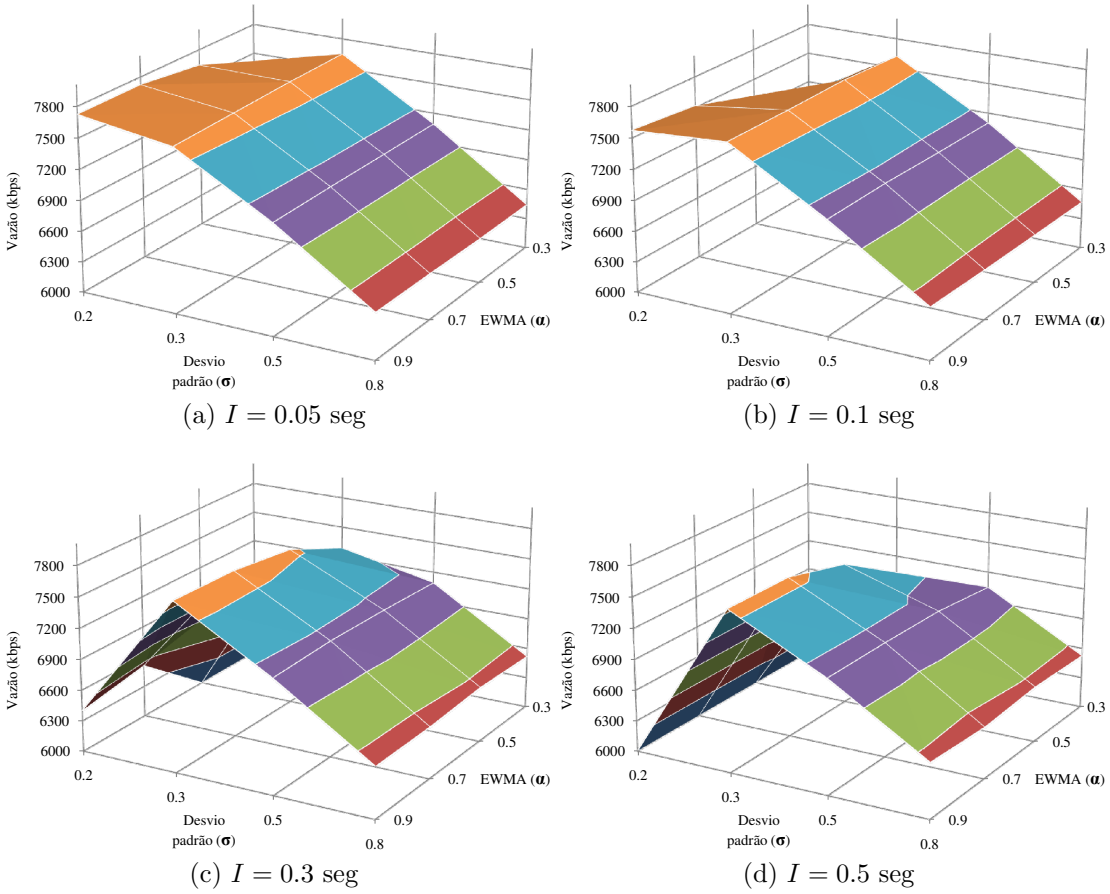


Figura 5.4: Vazão instantânea média em função da variação do SNR ao longo do tempo para o algoritmo de REFERÊNCIA de adaptação da taxa em uma rede IEEE 802.11g.



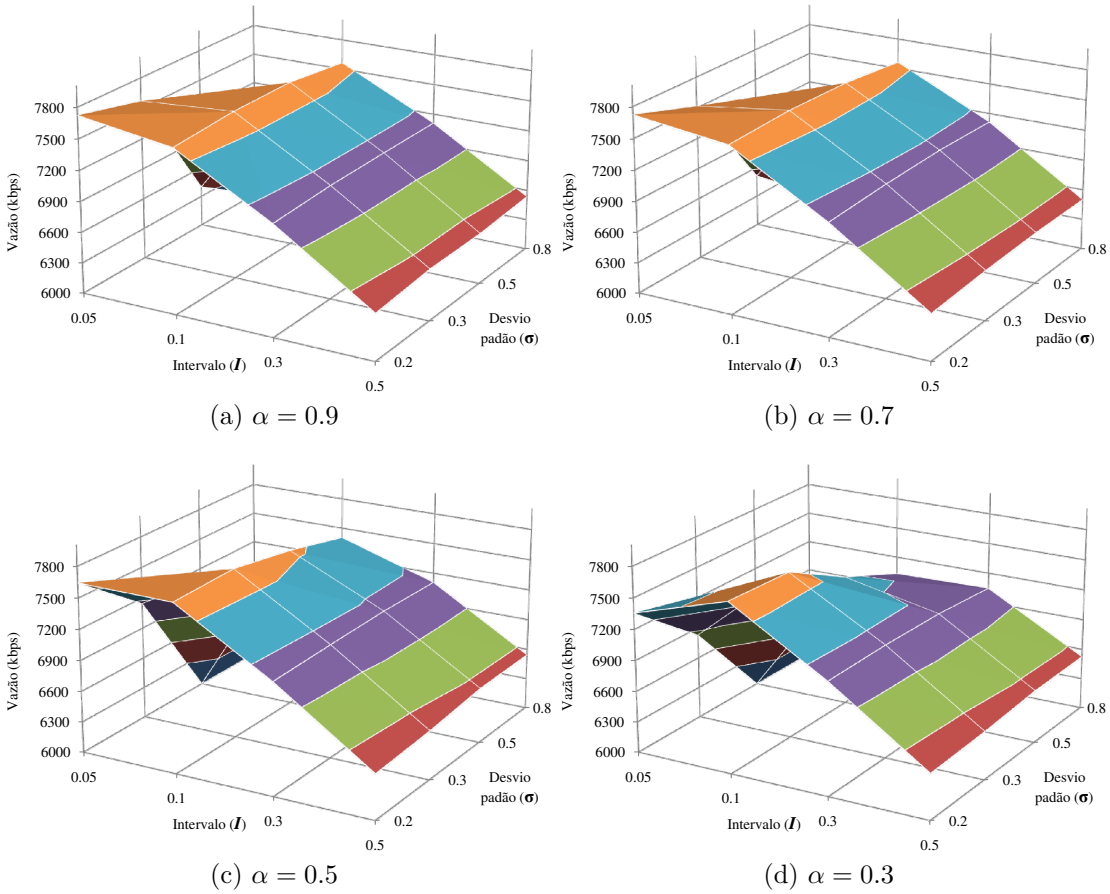
(a) $I = 0.05$ seg (b) $I = 0.1$ seg

(c) $I = 0.3$ seg (d) $I = 0.5$ seg

Figura 5.5: Vazão agregada média em função do desvio padrão σ e do parâmetro EWMA α.

A Figura 5.5 exibe a vazão agregada média para as diferentes combinações do desvio padrão σ e do parâmetro EWMA α. Pode-se observar que, independente de qual seja o intervalo de execução I, valores altos para desvio padrão reduzem a vazão obtida e não se mostram uma boa opção. O menor valor para o desvio padrão avaliado ($\sigma = 0.2$) só se mostra eficiente quando o intervalo I é pequeno (Figura 5.5(a) e Figura 5.5(b)). Isso acontece porque a lentidão no processo de convergência causada pelo pequeno desvio padrão é compensada pela quantidade de valores aleatórios sorteados em uma mesma unidade de tempo. Este comportamento não se repete quando o intervalo aumenta (Figura 5.5(c) e Figura 5.5(c)), resultando na degradação do desempenho. Assim, pode-se concluir que valores de $\sigma \approx 0.3$ são a melhor opção para as condições avaliadas.

Também é possível identificar que valores de EWMA $\alpha \approx 0.9$ melhoram o desempenho quando a agressividade é pequena (desvio padrão baixo), permitindo que a dificuldade em sortear uma taxa de transmissão diferente da atualmente utilizada seja compensada pela rápida mudança na média da PDF normal, devido ao maior peso das informações recentes.



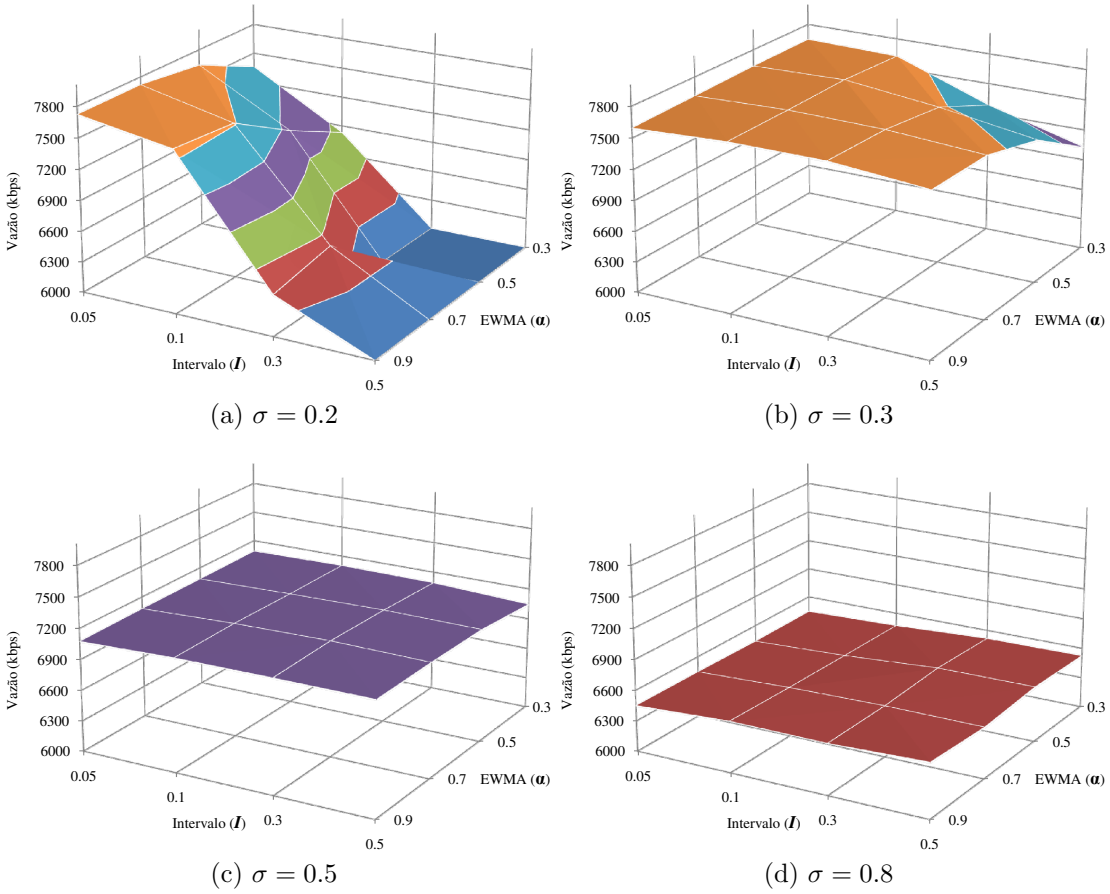
(a) $\alpha = 0.9$ (b) $\alpha = 0.7$

(c) $\alpha = 0.5$ (d) $\alpha = 0.3$

Figura 5.6: Vazão agregada média em função do intervalo I e do desvio padrão σ.

A Figura 5.6 exibe a vazão agregada média para as diferentes combinações do intervalo I e do desvio padrão σ. É possível visualizar que valores de $I \geqslant 0.3$ reduzem a vazão, independente dos demais parâmetros. Isso acontece porque uma escolha aleatória ruim para taxa de transmissão demora muito para ser corrigida, influenciando diretamente no resultado final. À medida que o I diminui, a quantidade de valores aleatórios sorteados em uma unidade de tempo cresce. Por conta disso, a vazão somente será boa nesta situação se o desvio padrão for pequeno, para que a maior parte dos valores aleatórios sorteados sejam próximos do melhor valor conhecido a cada momento. Essa abordagem faz com que o mecanismo mantenha a melhor taxa em uso durante grande parte do tempo, além de constantemente avaliar as demais taxas candidatas.

Com base nestes gráficos, as melhores escolhas seriam um intervalo $I \approx 0.1$ e um desvio padrão $\sigma \approx 0.3$. A escolha do valor de EWMA α influencia pouco na vazão agregada obtida pela rede, mas é possível observar que valores maiores para este parâmetro ajudam a melhorar um pouco o desempenho.



(a) $\sigma = 0.2$ (b) $\sigma = 0.3$

(c) $\sigma = 0.5$ (d) $\sigma = 0.8$

Figura 5.7: Vazão agregada média em função do intervalo I e do parâmetro EWMA α.

Por fim, a Figura 5.7 exibe a vazão agregada média para as diferentes combinações do intervalo de execução I e do parâmetro EWMA α. É fácil perceber que valores altos para o desvio padrão (Figura 5.7(c) e Figura 5.7(d)) não produzem bons resultados, independente da combinação dos demais parâmetros. Esse comportamento foi observado durante a análise da Figura 5.5, mas torna-se bastante evidente nestes novos gráficos.

Novamente, é possível perceber que valores muito pequenos para o desvio padrão (Figura 5.7(a)) só produzem bons resultados se acompanhados de intervalos I pequenos e EWMA α grandes; combinação esta capaz de manter a vazão elevada, além de identificar uma mudança na qualidade do canal e convergir para a melhor taxa de transmissão.

Com base na análise das Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, foram definidos os valores padrão para os parâmetros do CORA, que são utilizados nas demais simulações desta avaliação de desempenho: $I = 0.1$, $\alpha = 0.9$ e $\sigma = 0.3$. Estes valores refletem as características do cenário utilizado: enlace com variações constantes na qualidade do sinal e poucas

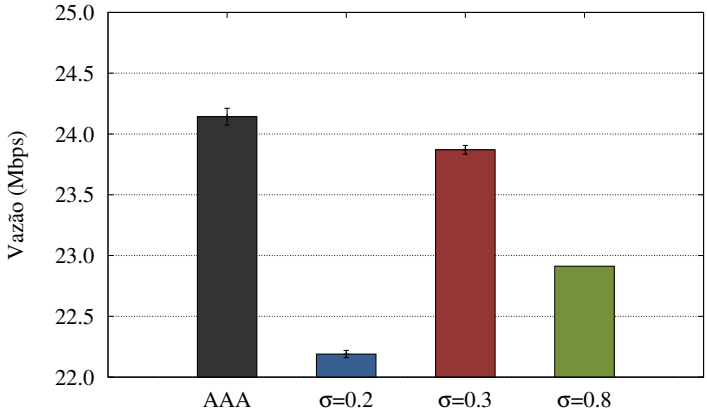


Figura 5.8: Comparativo entre a vazão agregada média obtida com a função de AAA e com valores fixos para o desvio padrão σ.

trocas de taxa, o que demanda por agressividade baixa ($\sigma = 0.3$) e alta relevância para as informações recentes ($\alpha = 0.9$); bem como tráfego em saturação na rede, permitindo que um intervalo pequeno ($I = 0.1$) seja suficiente para formar amostras de quadros significativas. Como será apresentado no momento oportuno, estes valores não representam necessariamente a combinação ótima para os demais cenários, mas os resultados obtidos com o uso deles pode ser considerado satisfatório.

Já para os demais algoritmos avaliados (ARF, SampleRate e RBAR), a configuração de parâmetros utilizada é a padrão, que compreende os valores apresentados na Tabela 3.1.

Ajuste Automático da Agressividade. Apesar de ter sido definido um valor fixo para o desvio padrão $\sigma = 0.3$, a função auxiliar de AAA, que será utilizada pelo mecanismo CORA nas simulações adiante, irá modificar este valor de acordo com o comportamento da rede. Por esta razão, antes de apresentar os resultados comparativos desta topologia, foi feita uma avaliação desta função. Novamente são apresentados somente os resultados gerados a partir de comunicações UDP em saturação.

A Figura 5.8 mostra um comparativo entre a vazão agregada média obtida com o uso de valores fixos para o desvio padrão $\sigma \in \{0.2, 0.3, 0.8\}$, e com o uso da função de AAA. São considerados apenas os 50 s iniciais da simulação, durante os quais ocorre o primeiro processo de convergência. O intervalo transiente inicial não foi eliminado, e os seguintes parâmetros foram utilizados pela função de AAA: $\sigma_{min} = 0.25$, $\sigma_{max} = 0.8$, $aaa_{fi} = 2.0$ e $aaa_{pd} = 0.05$. Estes valores foram definidos através de simulações e da observação das figuras já apresentadas. Nestas condições, a função de AAA produz um ganho de 8.8% em relação ao $\sigma = 0.2$, 1.15% em relação ao $\sigma = 0.3$ e 5.36% em relação ao $\sigma = 0.8$.

Para compreender a origem destes ganhos, a Figura 5.9 apresenta a vazão instantânea

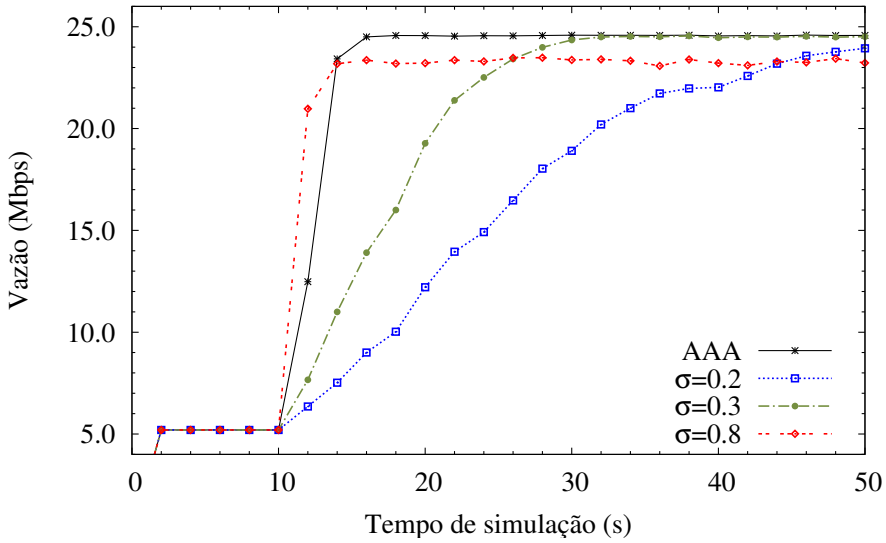


Figura 5.9: Vazão instantânea média obtida com a função de AAA e com valores fixos para o desvio padrão nos segundos iniciais da simulação.

média ao longo dos segundos iniciais de simulação. O CORA realiza a primeira adaptação aos 10 s, iniciando um processo de convergência.

Como inicialmente não há informações de vazão para as taxas de transmissão, o CORA inicia sua operação com a menor taxa (6 Mbps). Entretanto, as estações comunicantes estão próximas o suficiente para que a transmissão possa ocorrer utilizando a taxa de 54 Mbps. Para que o CORA seja capaz de rapidamente alterar a taxa para este valor, é necessário agressividade no sorteio dos valores aleatórios.

A análise desta figura indica que o uso do desvio padrão grande ($\sigma = 0.8$) agiliza o processo de convergência, sendo concluído próximo de 20 s. Porém, o desvio padrão alto reduz a vazão máxima alcançada durante o período de estabilidade. O contrário acontece com o uso de um desvio padrão pequeno ($\sigma = 0.2$ ou $\sigma = 0.3$). Estes valores mantêm a vazão elevada enquanto a rede permanece estável, ao custo do retardo no processo de convergência. Como é possível observar, o uso da função de AAA faz com que a convergência seja rápida, além de manter elevada a vazão durante a estabilidade.

É importante lembrar que estes ganhos foram obtidos avaliando-se apenas um processo de convergência. Durante o funcionamento da rede, todas as alterações na qualidade do canal que implicam na troca da taxa de transmissão criam um novo processo de convergência, que pode ser beneficiado com o uso desta função.

A Figura 5.10 exibe a vazão agregada média obtida pela melhor e pela pior opção de desvio padrão fixo, além da vazão obtida com o desvio padrão controlado pela função de AAA. Estes valores consideram toda a simulação (1210 s), e são apresentados em função da

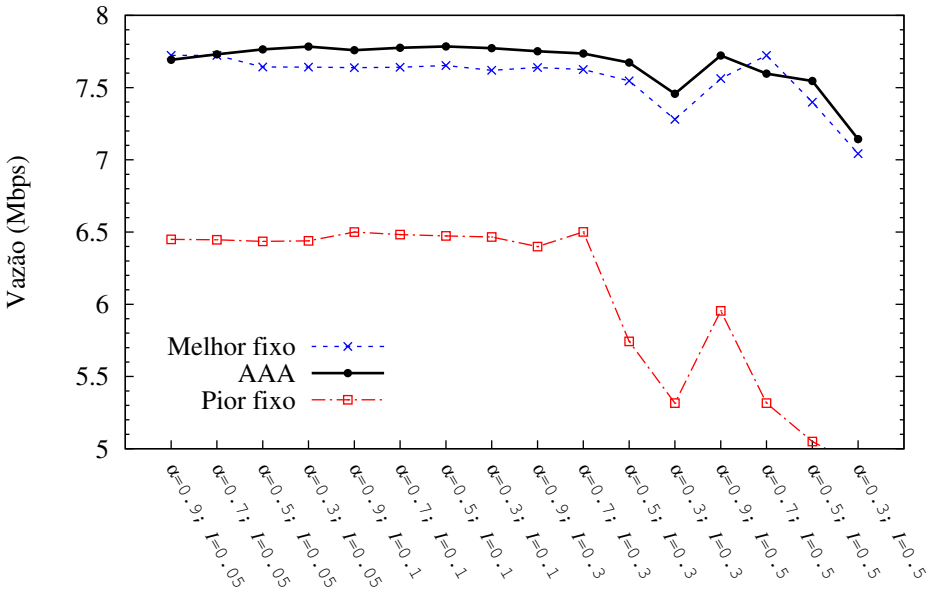


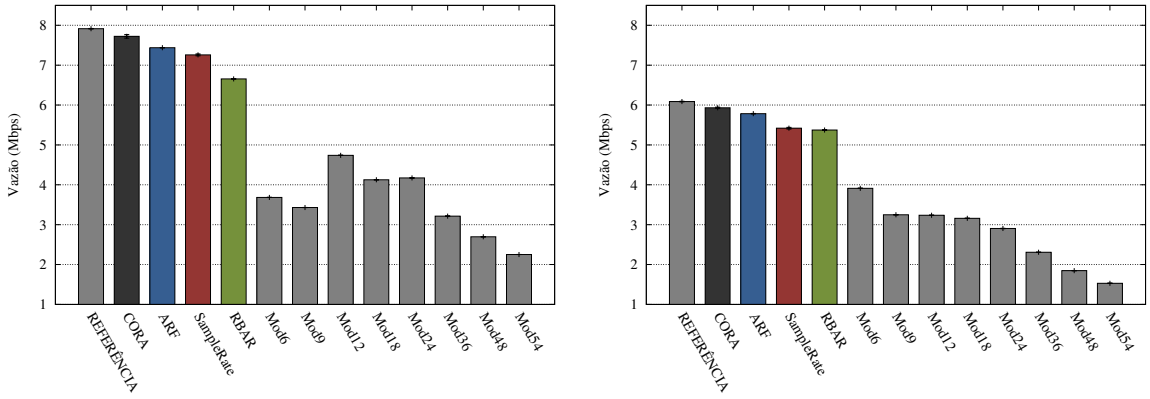
Figura 5.10: Vazão agregada média em função dos parâmetros I e α obtida pela função de AAA, o melhor e o pior desvio padrão.

combinação dos demais parâmetros (I e α). O desempenho obtido com o uso da função de AAA é superior ao alcançado pelo melhor desvio padrão fixo na maioria dos casos. Pode-se ainda observar que as combinações que produzem resultados inferiores utilizam intervalos grandes de I com EWMA α pequenos, exatamente o oposto dos valores escolhidos para estes parâmetros.

Resultados comparativos. Com a análise dos parâmetros concluída, foram realizadas simulações desta primeira topologia (apenas um par de comunicação), para avaliar os mecanismos de adaptação da taxa de transmissão. A Figura 5.11 exibe a vazão agregada média alcançada em cada um dos mecanismos, e também pelas taxas de transmissão fixas.

A análise desta figura reforça a necessidade da adaptação da taxa de transmissão, já que nenhum taxa fixa (`Mod6` até `Mod54`) apresentou resultados melhores do que os mecanismos de adaptação em um cenário onde há variação na qualidade do canal devido à movimentação de uma das estações. Também é possível perceber que a proporção entre a vazão agregada média obtida pelos algoritmos de adaptação (CORA, ARF, SampleRate e RBAR) é semelhante para ambos os protocolos UDP e TCP, apesar de haver uma nítida diferença nos valores absolutos.

Os resultados obtidos pelo mecanismo CORA superam os demais, além de serem os mais próximos da vazão obtida pelo algoritmo de REFERÊNCIA, alcançando 97.57%



(a) Protocolo UDP (b) Protocolo TCP

Figura 5.11: Vazão média obtida pelos algoritmos de adaptação e pelas taxas fixas em uma rede *ad hoc* com um par de comunicação utilizando os protocolos UDP e TCP.

Tabela 5.1: Ganho percentual médio do CORA em relação aos demais algoritmos.

Mecanismo	Protocolo UDP	Protocolo TCP
ARF	3.84 %	2.54 %
SampleRate	6.40 %	9.45 %
RBAR	16.02 %	10.39 %

deste valor máximo em comunicações UDP e 97.40% em conexões TCP. O ganho, em porcentagem, obtido pelo CORA em relação aos demais pode ser visualizado na Tabela 5.1.

Para melhor compreender como é realizada a adaptação da taxa pelos mecanismos, a Figura 5.12 exibe os resultados de simulações nas quais a taxa selecionada para a transmissão de cada quadro é monitorada. Foram avaliadas somente fontes de tráfego UDP durante a primeira metade da simulação, enquanto as estações se afastam. A segunda metade, que compreende a etapa de reaproximação das estações, apresenta um comportamento simétrico. Como as estações envolvidas nesta simulação se afastam gradualmente, ocorre a diminuição na qualidade do sinal ao longo do tempo. A partir de 520 s (linha vertical pontilhada), nenhuma das taxas de transmissão disponíveis na rede é capaz de enviar quadros corretamente, e a comunicação entre as duas estações não pode ser sustentada.

O mecanismo de REFERÊNCIA realiza as melhores escolhas que asseguram a probabilidade de perda de quadro para o qual foi configurado. O CORA, por sua vez, depende de testes em taxas aleatórias para seu funcionamento. Por isso, durante toda a simulação é possível visualizar transmissões utilizando taxas diferentes da melhor opção para aquele

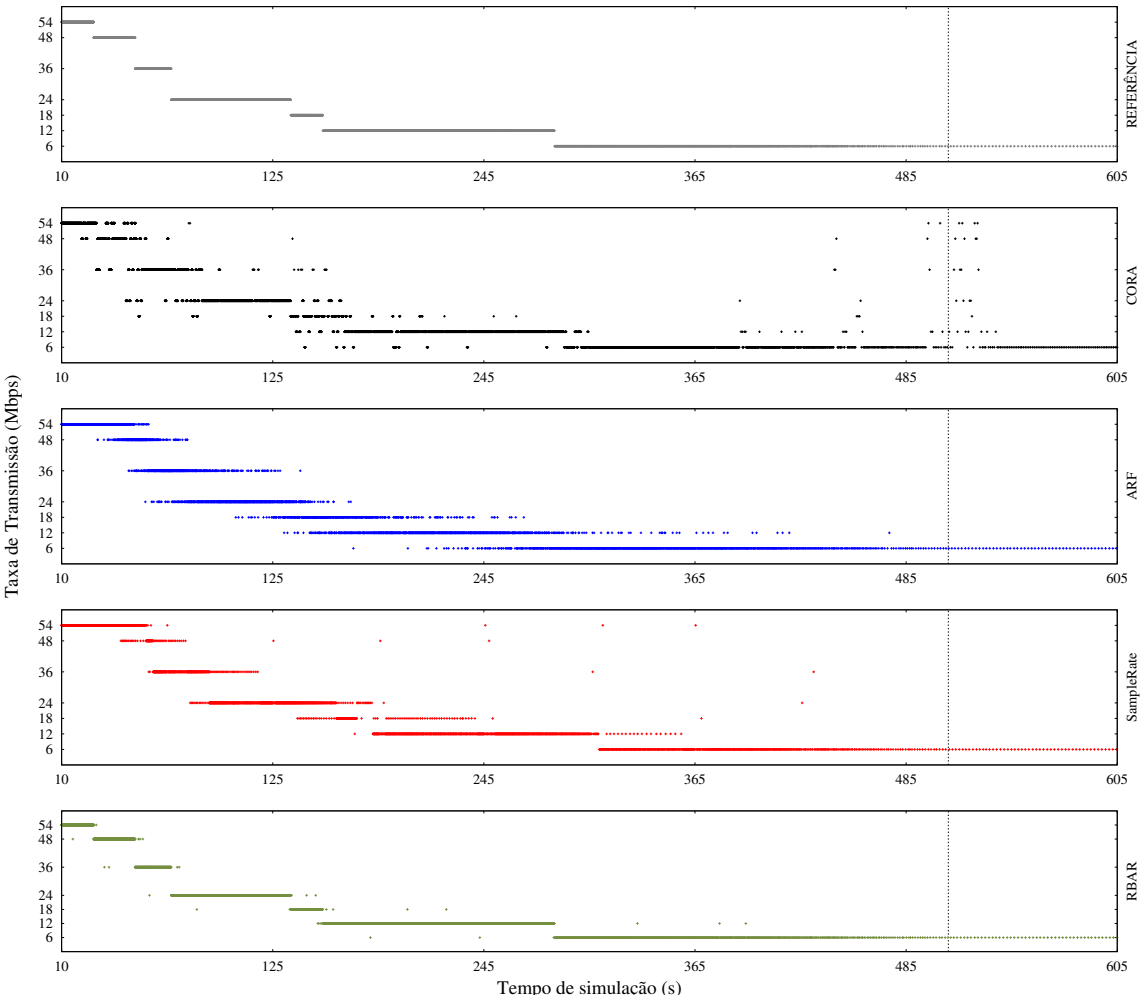


Figura 5.12: Adaptação da taxa realizada pelos algoritmos ao longo do tempo em uma rede *ad hoc* com um par de comunicação utilizando protocolo UDP.

momento. Observe que próximo dos 520 s, quando a comunicação entre as estações é interrompida, o CORA envia alguns quadros nas diferentes taxas disponíveis, na tentativa de restabelecer esta comunicação. Como nenhuma destas tentativas obtém sucesso, o mecanismo estabiliza com o uso da taxa mais robusta de 6 Mbps.

O ARF alterna frequentemente a taxa entre valores vizinhos, degradando o desempenho. Essa característica pode ser observada pelo efeito visual de sobreposição das linhas, visível no gráfico. Já o SampleRate realiza a sondagem em diversas taxas, mas não consegue decidir pela troca de taxa rapidamente por conta do alto intervalo entre as adaptações[1], o que também provoca o efeito visual de sobreposição no gráfico. O RBAR, por sua

[1]O intervalo padrão entre adaptações utilizado pelo SampleRate é de 10 segundos.

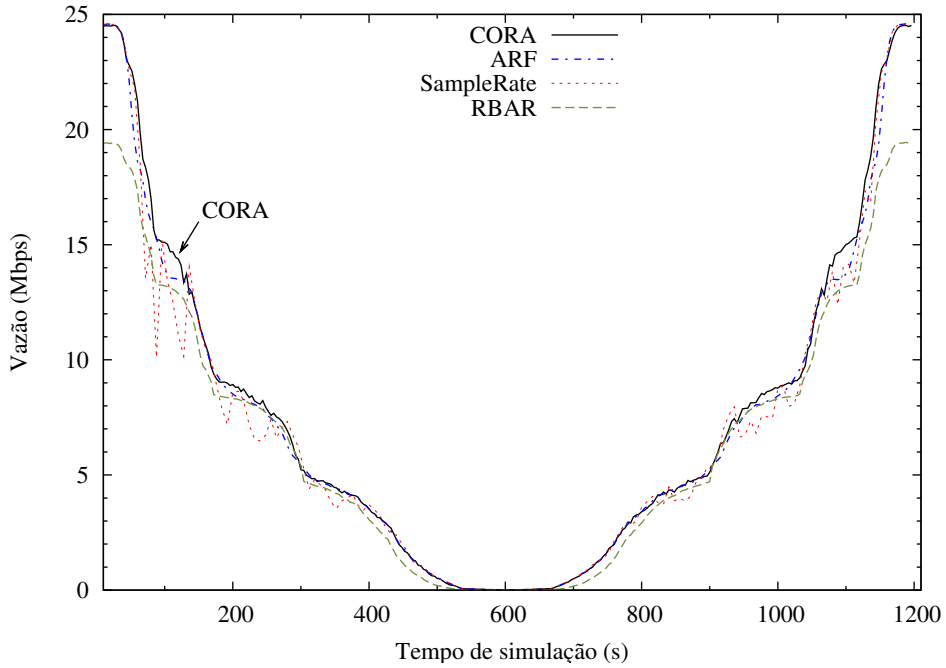


Figura 5.13: Vazão instantânea dos algoritmos de adaptação ao longo do tempo em uma rede *ad hoc* com um par de comunicação utilizando protocolo UDP.

vez, é um mecanismo baseado na SINR. Dessa forma, ele realiza boas escolhas da taxa de transmissão, aproximando-se do algoritmo de REFERÊNCIA mas cometendo alguns pequenos erros ocasionados pela diferença de tempo entre a chegada do quadro RTS e do quadro de dados. Mesmo com toda esta acurácia na escolha da taxa, a vazão obtida por este mecanismo é penalizado pelo uso do RTS/CTS.

Para visualizar o reflexo da escolha das taxas de transmissão na vazão alcançada na rede, a Figura 5.13 exibe a vazão instantânea obtida em cada mecanismo ao longo do tempo, utilizando tráfego UDP. Através desta figura é possível visualizar que o CORA mantém a vazão acima dos demais algoritmos em praticamente todo tempo de simulação.

5.3.2 Diversos pares comunicantes

A segunda topologia deste cenário foi criada com o intuito de verificar como os mecanismos se comportam à medida que aumenta o número de estações disputando o acesso ao meio. Para isso, foi estabelecida uma área de 400 m × 400 m que pode abrigar quantidade variável de estações comunicantes. As posições de origem e destino de cada par são escolhidas aleatoriamente, e as estações permanecem imóveis durante toda a simulação, definida para 110 s. A Figura 5.14 ilustra esta topologia.

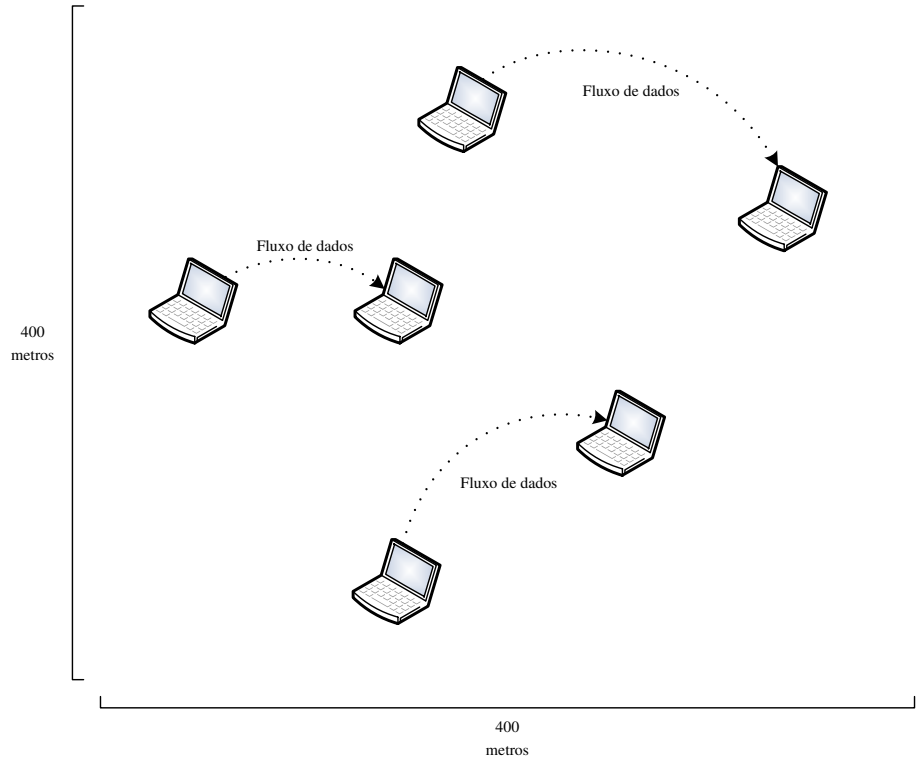


Figura 5.14: Cenário 1: topologia com diversos pares de estações comunicantes.

A presença de diversas estações tentando transmitir seus quadros resulta em interferência e colisões no ambiente. Assim, esta topologia também foi utilizada para avaliar o funcionamento da função de Diff-Time Proporcional (DTP) utilizada pelo CORA.

Os parâmetros utilizados pelo algoritmo CORA nestas simulações são os mesmos escolhidos para a topologia anterior. Estes parâmetros não representam, necessariamente, a melhor combinação para a topologia em questão. Entretanto, para validar o bom desempenho alcançado por eles, foram realizadas simulações com diferentes combinações de I e α, deixando o desvio padrão sob responsabilidade da função de AAA. A Tabela 5.2 apresenta a vazão agregada média, obtida para 16 fluxos simultâneos de dados utilizando o protocolo UDP. As entradas da tabela estão organizadas de forma decrescente em relação à vazão, e a quinta linha (em destaque), corresponde à combinação de parâmetros escolhida para as simulações.

Pode-se observar que a vazão de dados aumenta à medida que o valor de I diminui. Entretanto, esse incremento na vazão é pouco significativo para as primeiras posições, já que o intervalo de confiança obtido é tão grande quanto (ou maior que) o ganho obtido na vazão. A combinação de parâmetros utilizada nas simulações ($I = 0.1$ e $\alpha = 0.9$) permanece na quinta posição, com uma vazão apenas 0.5% inferior à primeira posição.

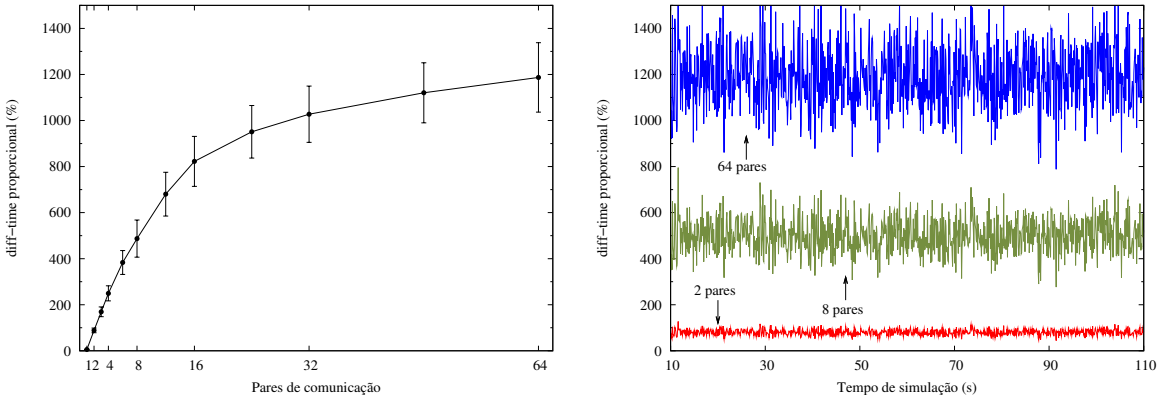
Tabela 5.2: Vazão agregada média para 16 pares de comunicação utilizando protocolo UDP com diferentes combinações dos parâmetros I e α.

Posição	Parâmetros		Vazão de dados	Intervalo de
	I	α	(Mbps)	Confiança
1	0.05	0.7	10.296	0.053
2	0.05	0.9	10.293	0.058
3	0.05	0.5	10.285	0.052
4	0.05	0.3	10.277	0.042
5	**0.1**	**0.9**	**10.244**	**0.051**
6	0.1	0.7	10.161	0.051
7	0.1	0.5	10.033	0.043
8	0.1	0.3	9.904	0.057
9	0.3	0.9	9.884	0.052
10	0.3	0.7	9.749	0.041
11	0.5	0.9	9.735	0.050
12	0.3	0.5	9.710	0.053
13	0.5	0.3	9.661	0.044
14	0.5	0.5	9.647	0.054
15	0.5	0.7	9.569	0.055
16	0.3	0.3	9.534	0.043

Diff-Time Proporcional. Quando há poucas estações tentando transmitir quadros, ou a maior parte das estações gera pouco tráfego, o tempo de transmissão estimado (ExTT), calculado a partir da Equação 4.4, é uma boa aproximação para o tempo de transmissão efetivo (EfTT). No entanto, com o aumento da concorrência pelo acesso ao meio, há um aumento da divergência entre estes tempos. Para visualizar este comportamento, a Figura 5.15 exibe os valores de *diff-time proporcional* obtidos a partir de diferentes níveis de disputa no acesso ao meio, utilizando uma quantidade crescente de pares de estações transmitindo dados através do protocolo UDP.

Nesta avaliação, as fontes de tráfego estão em saturação. No entanto, o *diff-time proporcional* é monitorado para identificar o nível de disputa pelo acesso ao meio, e não a quantidade de estações transmitindo. Por esta razão, o número de estações que levam aos níveis de concorrência indicados na Figura 5.15 podem ser diferentes dos apresentados, caso as fontes não estejam transmitindo em saturação. Mesmo assim, este comportamento não afeta o desempenho do mecanismo CORA, já que a informação da quantidade de estações é irrelevante durante o processo de adaptação da taxa de transmissão.

A partir da Figura 5.15(a) é possível observar o aumento na disputa pelo acesso ao



(a) Em função no numero de estações. (b) Ao longo do tempo.

Figura 5.15: Influência do número de estações no valor do *diff-time proporcional*.

meio através do aumento no valor do *diff-time proporcional* quando a quantidade de pares de comunicação cresce. Em contrapartida, a variância no valor médio do *diff-time proporcional* aumenta nos ambientes mais congestionados. Esse comportamento pode ser observado na Figura 5.15(b), onde é exibido o valor do *diff-time proporcional* ao longo da simulação, para 2, 8 e 64 pares de estações comunicantes.

Com base nestes resultados e nas simulações realizadas, foi definido o valor limite $dtp_{thrs} = 400$ para a função de DTP. Se o *diff-time proporcional* encontrado for superior a este limite, o valor aleatório i possui 50% de chances de ser incrementado ($hrt_{prob} = 0.5$), com o objetivo de melhorar o desempenho do mecanismo em ambientes congestionados.

Resultados comparativos. Com os parâmetros da função de DTP definidos, foram realizadas simulações desta segunda topologia já utilizando esta função, com o objetivo de avaliar os mecanismos sob diferentes níveis de contenção no ambiente. A Figura 5.16 exibe a vazão agregada média obtida em função do número de pares de comunicação para fluxos de dados utilizando o protocolo UDP. A Figura 5.17 apresenta o mesmo comparativo para os fluxos utilizando o protocolo TCP.

Não há diferença significativa no comportamento das curvas entre as comunicações UDP (Figura 5.16) e as conexões TCP (Figura 5.17). Nas duas figuras, o algoritmo de REFERÊNCIA apresenta os melhores resultados, seguido pelo mecanismo CORA que, apesar da queda no desempenho em função do aumento da contenção no ambiente, ainda apresenta bons resultados se comparado com o SampleRate ou com o ARF.

Já o RBAR, diferentemente das outras abordagens, apresenta um desempenho relativamente constante. Isso acontece porque, além da escolha das taxas deste mecanismo ser muito semelhante à escolha realizada pelo mecanismo de REFERÊNCIA, ele faz uso

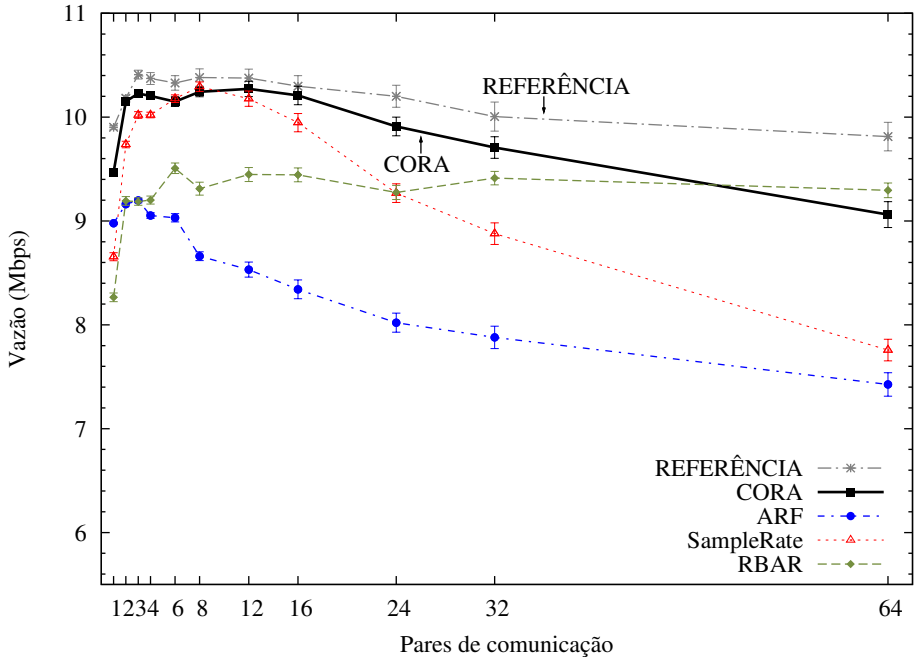


Figura 5.16: Vazão agregada média dos algoritmos de adaptação em função do número de pares de comunicação utilizando o protocolo UDP.

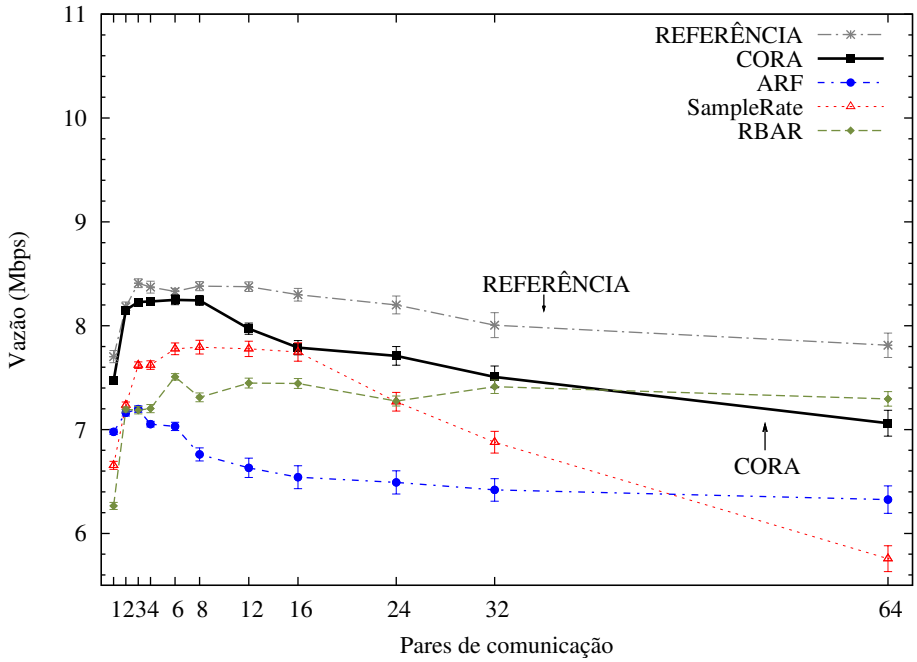


Figura 5.17: Vazão agregada média dos algoritmos de adaptação em função do número de pares de comunicação utilizando o protocolo TCP.

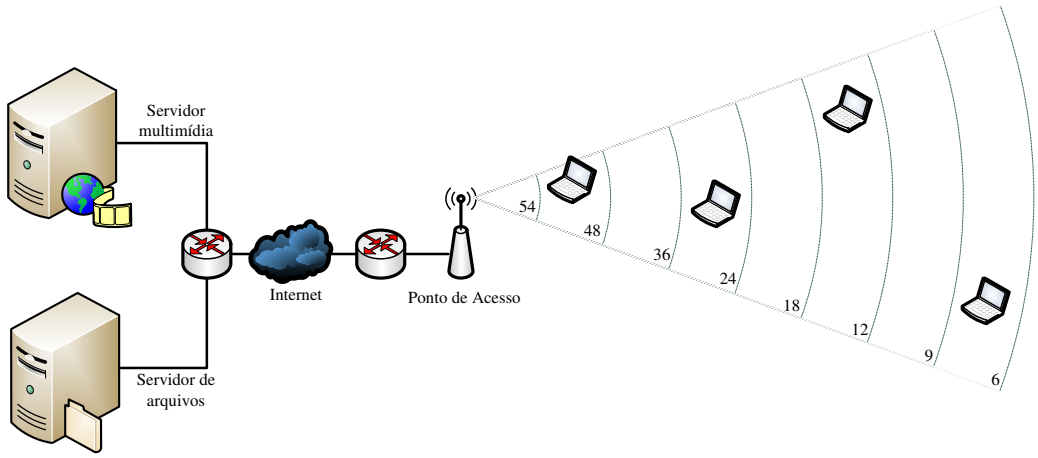


Figura 5.18: Cenário 2: topologia da rede infraestruturada.

dos quadros de RTS/CTS, que prejudica quando não há colisões mas gera bons resultados quando o nível de contenção no ambiente aumenta. Sendo assim, há uma tendência deste algoritmo alcançar maior vazão do que os demais mecanismos em situações extremas, não por conta da melhor escolha da taxa mas sim pelo uso dos quadros de RTS/CTS, diminuindo as colisões. Este fato pode ser contornado ativando o uso destes quadros de controle em conjunto com os demais algoritmos. Uma extensão para o mecanismo CORA com o objetivo de prover esta funcionalidade é apontada no Capítulo 6 como um dos trabalhos futuros relacionados.

Os bons resultados obtidos pelos algoritmos de REFERÊNCIA, CORA e RBAR não são observados para os algoritmos ARF e SampleRate. Estes últimos possuem o desempenho severamente penalizado à medida que o número de estações aumenta. Esse comportamento, observado também por [Cardoso e Rezende, 2008; Ramachandran et al., 2007; Wong et al., 2006], torna-se ainda mais acentuado nas comunicações UDP, onde não existe o controle de congestionamento presente nas conexões TCP.

5.4 Cenário 2: rede infraestruturada

Para avaliar o comportamento dos mecanismos de adaptação em um cenário infraestruturado, foi definida uma topologia com um ponto de acesso (AP) conectado à Internet através de uma rede cabeada, e diversas estações clientes espalhadas sob a área de cobertura sem fio deste AP. Os fluxos de dados são gerados em servidores de arquivos e multimídia na Internet, tendo como destino as estações clientes. Neste cenário, os algoritmos de adaptação são executados apenas pelo AP, já que todo o fluxo de dados é do tipo *download*, direcionado para os clientes móveis. A Figura 5.18 ilustra esta topologia.

Tabela 5.3: Vazão agregada média para sete estações clientes utilizando protocolo UDP com diferentes combinações dos parâmetros I e α.

Posição	Parâmetros		Vazão de dados	Intervalo de
	I	α	(Mbps)	Confiança
1	0.3	0.3	10.909	0.272
2	0.5	0.3	10.629	0.250
3	0.5	0.5	10.565	0.249
4	**0.1**	**0.9**	**10.276**	**0.246**
5	0.05	0.3	10.067	0.243
6	0.3	0.5	10.049	0.233
7	0.5	0.7	9.613	0.265
8	0.1	0.3	9.274	0.250
9	0.3	0.9	9.087	0.275
10	0.05	0.5	9.030	0.264
11	0.1	0.7	8.897	0.244
12	0.05	0.7	8.733	0.250
13	0.1	0.5	8.564	0.249
14	0.5	0.9	8.450	0.231
15	0.3	0.7	8.310	0.263
16	0.05	0.9	8.286	0.246

Este cenário foi utilizado para validar a adaptação da taxa de transmissão de maneira independente em cada enlace sem fio, como será apresentando na Subseção 5.4.1. Os resultados obtidos destacam o bom desempenho alcançado pelo mecanismo proposto em comparação com os demais algoritmos. Além desta análise, na Subseção 5.4.2 encontram-se os resultados obtidos a partir de um estudo de caso para avaliar os benefícios do suporte a diferentes métricas de otimização previsto pelo CORA.

Antes dos resultados comparativos, foram realizadas simulações para verificar a vazão agregada média obtida pelo CORA em função dos parâmetros I e α, assim como feito no cenário anterior. A Tabela 5.3 apresenta estes resultados, obtidos para sete fluxos simultâneos de dados direcionados para sete estações clientes distintas, utilizando o protocolo UDP. As entradas da tabela estão organizadas de forma decrescente em relação à vazão, e a quarta linha (em destaque), corresponde à combinação de parâmetros escolhida para as simulações.

Neste cenário, a diferença na vazão é mais significativa entre as combinações dos parâmetros. Ainda assim, o par de valores utilizados neste trabalho ($I = 0.1$ e $\alpha = 0.9$) permanece nas primeiras posições, com desempenho 5.8% inferior à primeira posição.

5.4.1 Adaptação independente por enlace sem fio

Com o intuito de avaliar a escolha independente da taxa de transmissão em cada enlace sem fio, as estações clientes foram distribuídas de maneira que a taxa de transmissão ótima para a comunicação entre cada estação e o AP seja diferente da utilizada pelas demais estações. Foram construídas topologias com duas, três e sete estações clientes; e os fluxos de dados utilizam os protocolos UDP e TCP. Os resultados obtidos diferem para cada um destes protocolos, por isso serão apresentados separadamente.

Através da análise da Figura 5.19, que apresenta a vazão agregada média para comunicações UDP, o mecanismo CORA somente apresenta resultados próximos aos obtidos pelo algoritmo de REFERÊNCIA para a topologia com duas estações clientes. Entretanto, a análise apenas da vazão agregada média não é suficiente para avaliar os algoritmos nas condições impostas. Por esta razão, a Figura 5.20 apresenta as informações de vazão média de dados para cada um dos fluxos, de maneira independente. Para facilitar a interpretação, as barras foram coloridas em escala de cinza. Quanto mais escuro é o cinza da barra (maior número na legenda), mais longe a estação está localizada do AP. Além da vazão média por fluxo, a Figura 5.20 também traz um indicador de justiça no compartilhamento da largura de banda entre as estações. Para calcular este indicador, foi utilizado o índice de justiça proposto por [Jain et al., 1984]. O cálculo é realizado a partir da seguinte equação:

$$J_f = \frac{\left(\sum_{j=1}^{n} \overline{v}_j\right)^2}{n \sum_{j=1}^{n} {\overline{v}_j}^2} \tag{5.2}$$

onde n é o número total de fluxos de dados existentes no cenário e $\overline{v}_j$ é a vazão média de dados no fluxo j calculado para todas as repetições da simulação. Como os fluxos criados possuem sempre a mesma demanda por vazão, a distribuição justa dos recursos é alcançada quando a vazão de todos os fluxos são iguais. Dessa forma, não é preciso realizar nenhum tipo de normalização para calcular o índice de justiça do Jain, que é apresentado na forma de porcentagem, na parte inferior das barras nos gráficos.

Através da análise conjunta das Figuras 5.19 e 5.20, pode-se observar que para as comunicações UDP, os mecanismos SampleRate e RBAR produzem bons resultados, mantendo a vazão agregada média elevada. O índice de justiça alcançado por estes algoritmos nas três topologias analisadas não são os maiores, variando entre 91% e 98%.

Por sua vez, o ARF apresenta um rendimento agregado inferior aos demais algoritmos em todas as quantidades de clientes, além dos menores índices de justiças para três e sete clientes. Isso acontece porque este mecanismo é incapaz de ajustar a taxa de transmissão de

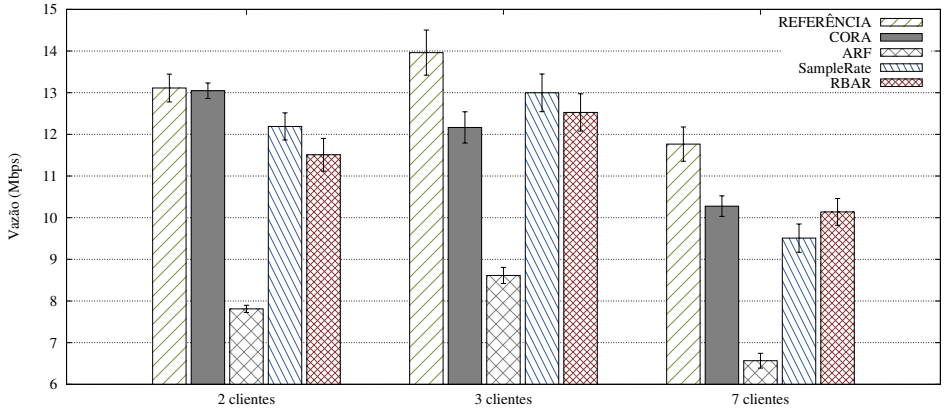


Figura 5.19: Vazão agregada média para comunicações UDP no cenário infraestruturado.

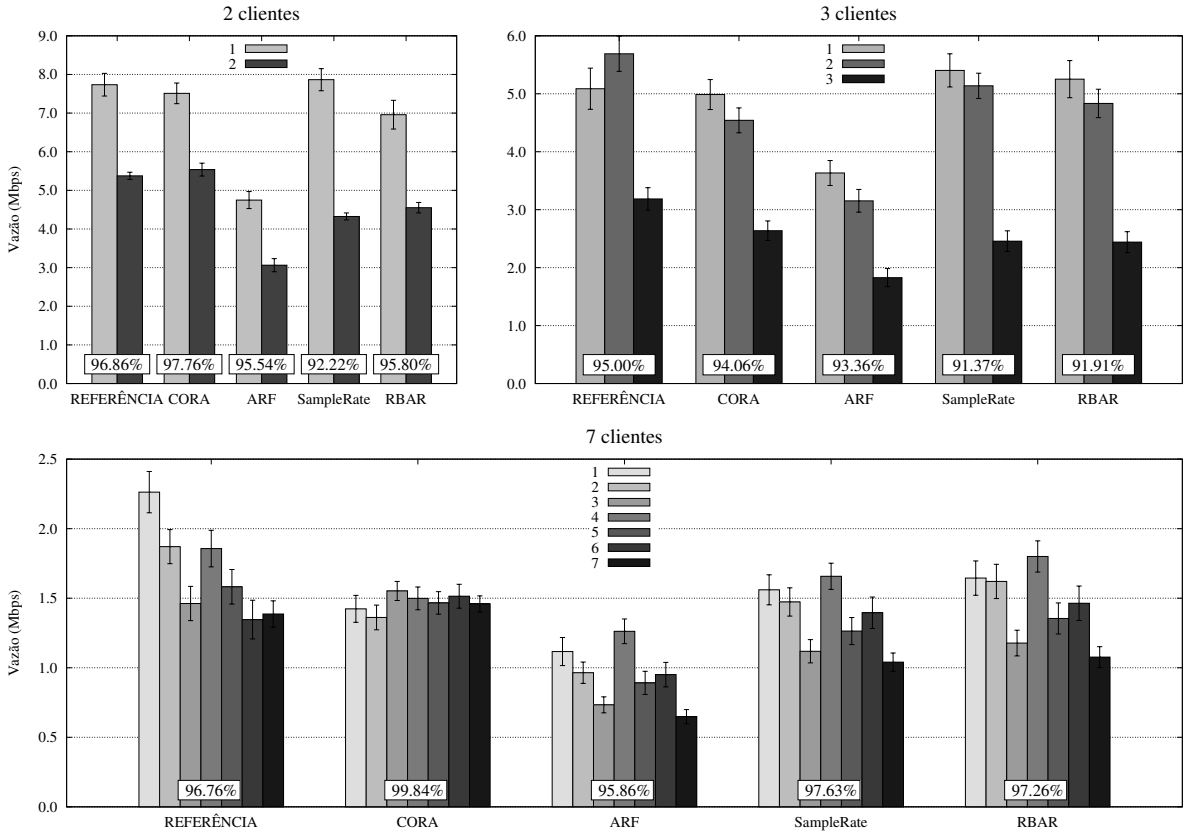


Figura 5.20: Vazão média por fluxo para comunicações UDP no cenário infraestruturado.

maneira independente para cada enlace sem fio. Assim, grande parte das taxas utilizadas nas transmissões não são as melhores possíveis, reduzindo o desempenho principalmente quando a quantidade de enlaces é grande, como na topologia com sete clientes.

Já o CORA apresenta vazão agregada média superior aos outros algoritmos para duas estações clientes, alcançando também nesta topologia o maior índice de justiça entre todos (97.76%). Para três clientes, a vazão agregada média é inferior à obtida pelo RBAR e pelo SampleRate. Entretanto, o índice de justiça alcançado pelo CORA é relativamente maior em relação a estes dois algoritmos, refletindo a redução no desempenho como consequência da divisão mais justa da largura de banda entre os fluxos. Com sete estações clientes, o desempenho do CORA é um pouco superior ao alcançado pelos demais algoritmos, além de apresentar o melhor índice de justiça (99.84%) para a vazão dos fluxos de dados entre todos os algoritmos avaliados.

Observe que não é possível garantir a justiça na vazão dos fluxos somente através da escolha da taxa de transmissão. Para atingir este objetivo, é preciso um trabalho conjunto entre a escolha da taxa de transmissão e mecanismos de controle de tráfego nas demais camadas da arquitetura de redes, principalmente a camada de transporte. Existem trabalhos na literatura [He et al., 2005; Jakubczak et al., 2008; Qiao e Shin, 2002; Xue et al., 2006] que apresentam soluções específicas para prover justiça no nível de fluxos através de alterações nos protocolos de transporte. Entretanto, este tipo de abordagem está fora do escopo deste trabalho.

O mesmo processo de avaliação foi utilizado para as simulações com conexões TCP. A Figura 5.21 apresenta a vazão agregada média, enquanto a Figura 5.22 apresenta a vazão média por fluxo e o índice de justiça para cada algoritmo.

A vazão agregada média atingida pelo SampleRate chama a atenção à primeira vista. O ganho muito superior aos demais algoritmos para todas as quantidades de clientes, chegando a atingir 58% em relação ao algoritmo de REFERÊNCIA na topologia com apenas dois clientes, é justificado pelos baixos índices de justiça alcançados por este mecanismo. A principal causa deste fenômeno é a escolha indevida da taxa de transmissão, que pode resultar na perda de um pacote que será interpretado pela conexão TCP como congestionamento na rede. Isso irá provocar a diminuição do tamanho da janela de congestionamento, reduzindo a vazão final.

Esse fenômeno é mais visível nas estações clientes distantes do AP, porque para estas estações existem maiores chances da taxa errada resultar na perda do pacote. Quando as estações distantes têm seu fluxo reduzido pela conexão TCP, as estações próximas conseguem transmitir mais dados, o que provoca injustiça no compartilhamento dos recursos, levando aos resultados apresentados. O índice médio de justiça obtido pelo SampleRate nas três topologias é de 58%, muito aquém do esperado para um algoritmo que prevê em seu projeto a adaptação independente por enlace sem fio.

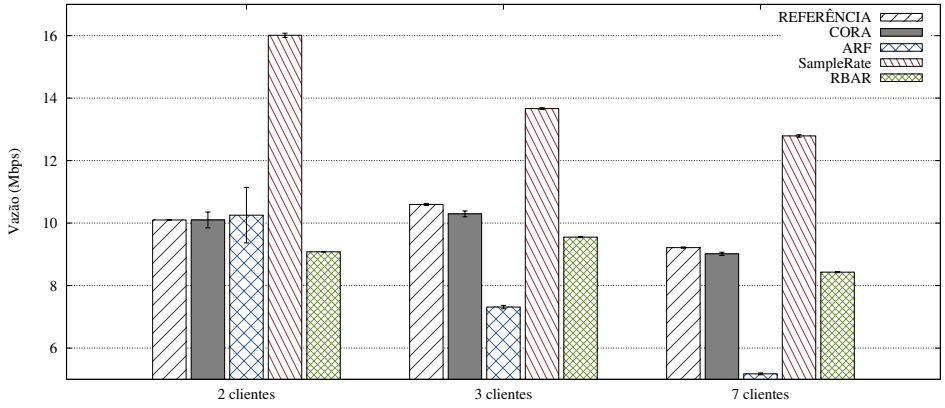


Figura 5.21: Vazão agregada média para conexões TCP no cenário infraestruturado.

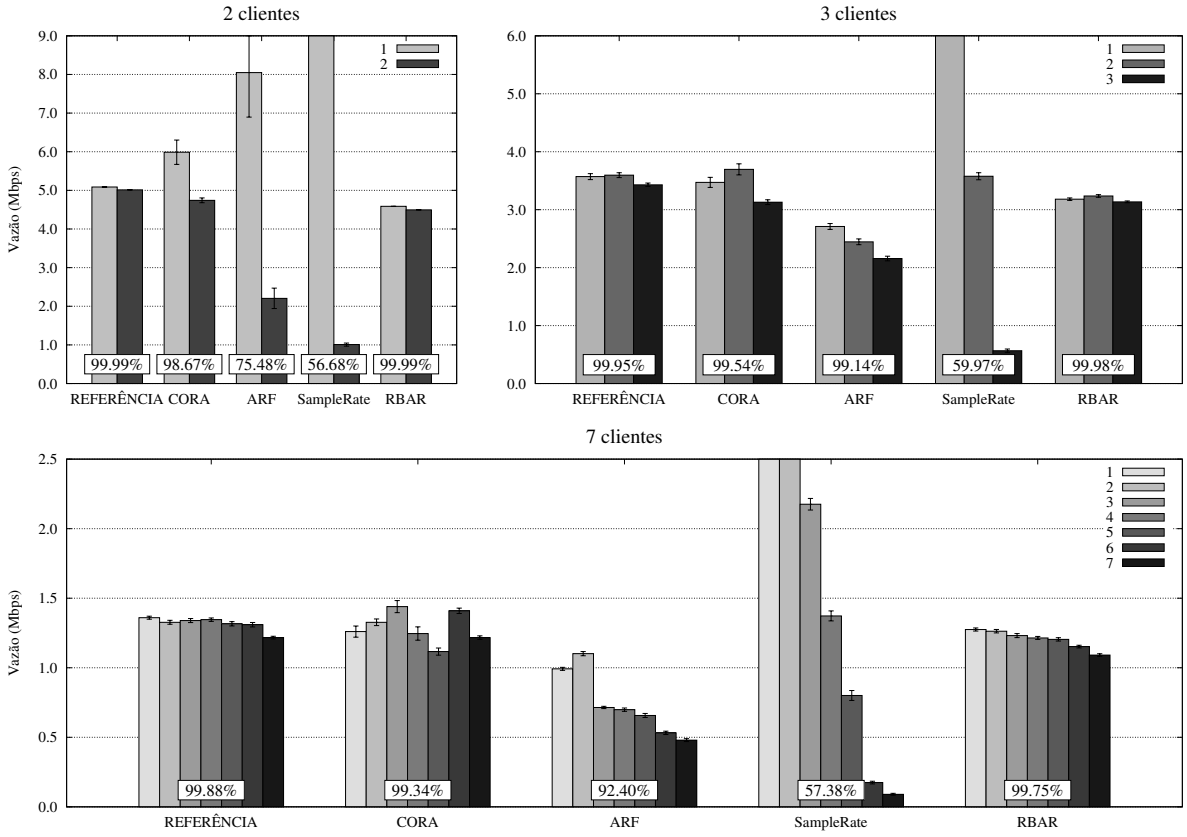


Figura 5.22: Vazão média por fluxo para conexões TCP no cenário infraestruturado.

O mecanismo ARF também é atingido por este fenômeno, porém em escalas menores. Enquanto o SampleRate calcula o ExTT utilizando a mesma taxa em todas as tentativas de retransmissão do quadro, o ARF opera com um nível de granularidade maior, e por isso é capaz de corrigir a escolha indevida da taxa entre as retransmissões do mesmo quadro, diminuindo as chances de perda. Mesmo assim, alguns quadros são perdidos, e o desempenho final é reduzido.

Assim como o mecanismo de REFERÊNCIA, o RBAR mantém o nível de justiça alto, com uma pequena redução na vazão agregada média por conta do custo dos quadros de RTS/CTS. Já a vazão agregada média obtida pelo CORA nestas simulações é muito próxima da obtida pelo algoritmo de REFERÊNCIA, não sendo inferior a 97% no pior caso. Além do bom desempenho na vazão, o CORA conseguiu manter os níveis de justiça elevados, com o menor valor de 98.67%. A capacidade de adaptar a taxa de maneira independente por enlace sem fio, bem como a abordagem utilizada para medir a vazão de dados no ambiente compartilhado, evitam que as estações distantes sejam prejudicadas com a perda de seu quadros, melhorando o desempenho global da rede.

5.4.2 Diferentes métricas de otimização

Outra importante característica do mecanismo proposto é o suporte a diferentes métricas de otimização. O projeto original define a vazão de dados na camada de enlace como métrica padrão para o CORA. Entretanto, de acordo com o tipo de tráfego da rede, pode ser interessante utilizar alguma outra métrica de qualidade, a fim de alcançar resultados específicos para o tráfego em questão.

Para demonstrar estes benefícios, foi realizado um estudo de caso utilizando aplicações e métricas de otimização distintas. Além da métrica de vazão já existente, foi implementado no simulador uma nova métrica de qualidade, cujo objetivo é diminuir o *Frame Error Rate* (FER) na camada de enlace. O cenário com a rede infraestruturada foi utilizado durante as simulações. As posições iniciais e a movimentação das estações clientes foram definidas aleatoriamente, sob a área de cobertura do AP.

Para avaliar as métricas descritas, foram utilizados dois tipos de aplicações com requisitos de QoS distintos [Networks, 2003]. O primeiro deles é a aplicação de Voz sobre IP (VoIP), que requer pouca largura de banda e tolera a perda de alguns pacotes. Aplicações deste tipo criam tráfegos utilizando o protocolo UDP, e necessitam de atraso médio e *jitter* pequenos para o bom funcionamento. O segundo tipo de aplicação utilizada é a transferência de arquivos através do protocolo *File Transfer Protocol* (FTP). Estas aplicações utilizam conexões TCP e beneficiam-se da alta largura de banda mas são sensíveis a perdas de pacotes. Entretanto, o atraso médio e o *jitter* pouco interferem em seu funcionamento.

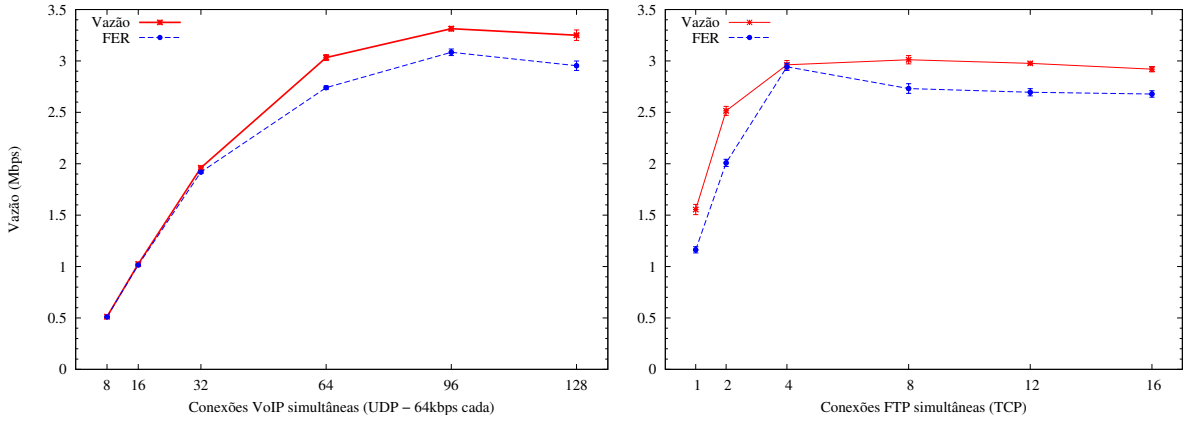


Figura 5.23: Vazão agregada média para aplicações VoIP e FTP utilizando a vazão e o FER como métricas de otimização para o CORA.

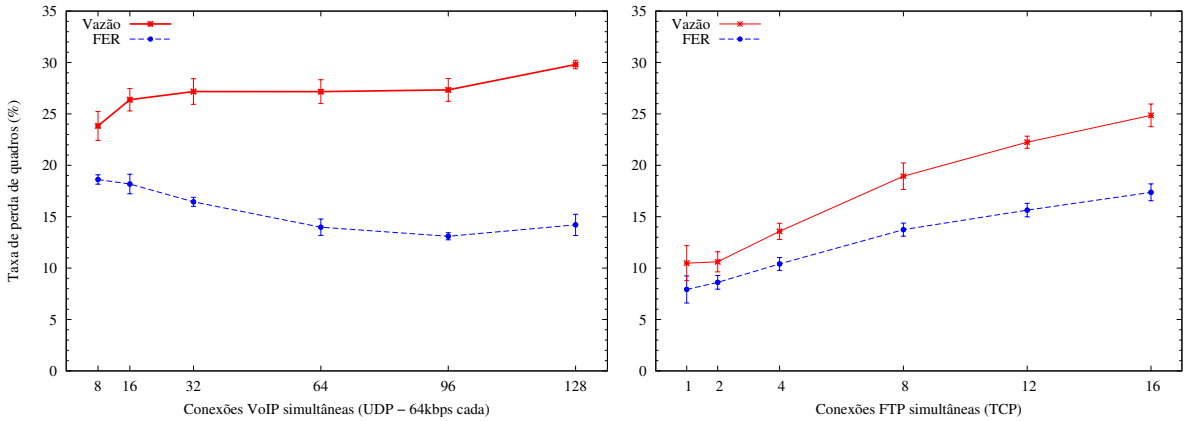
As simulações deste cenário foram realizadas de maneira independente para cada tipo de aplicação. A quantidade de fluxos VoIP e FTP criados para as simulações é diferente, já que as vazões de dados geradas por estas aplicações são distintas. O objetivo foi aumentar gradualmente a quantidade de fluxos até saturar a rede, podendo verificar também o comportamento do CORA quando a rede encontra-se em sua capacidade máxima.

A Figura 5.23 apresenta a vazão agregada média obtida pelas duas aplicações com diferentes níveis de carga, utilizando cada uma das métricas de qualidade em questão, identificadas na legenda por Vazão e FER.

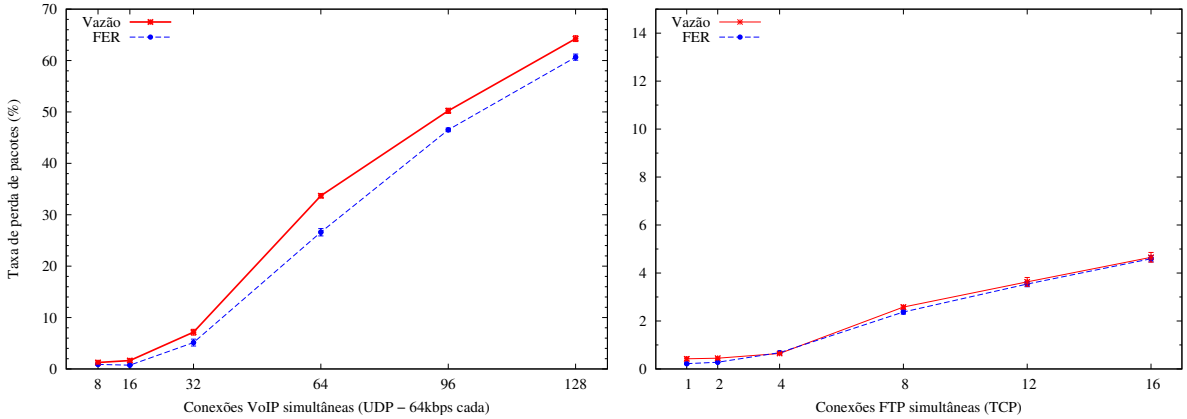
Como esperado, o uso da vazão como métrica de qualidade melhora a vazão agregada média obtida por ambas as aplicações. Para as conexões de VoIP, somente quando a rede começa a saturar (a partir de 32 conexões simultâneas), é possível ver a diferença na vazão agregada média. Já para conexões de dados, essa diferença é visível em todos os momentos. Isso acontece porque as aplicações FTP fazem uso do máximo de largura de banda disponível em todos os momentos, independente do número de conexões.

Utilizar a métrica de qualidade FER diminuiu a vazão, mas também reduz a taxa de perda de quadros para as duas aplicações, como mostra a Figura 5.24(a). Por consequência, a taxa de perda de pacotes (PER) também é reduzida (Figura 5.24(b)). Essa diferença é bastante nítida para as comunicações UDP, utilizada pelas aplicações de VoIP. No caso das aplicações de FTP, onde a perda de pacotes pode influenciar no desempenho, o uso da vazão como métrica de qualidade não é tão prejudicial, graças aos mecanismos de controle de fluxo e congestionamento previstos pelo protocolo TCP.

Em relação ao atraso médio, podemos observar resultados diferentes para a mesma métrica de qualidade. A Figura 5.25(a) mostra que otimizar o FER faz com que o atraso médio seja menor nas aplicações de VoIP, já que menos quadros são perdidos, reduzindo



(a) *Frame Error Rate* (FER)

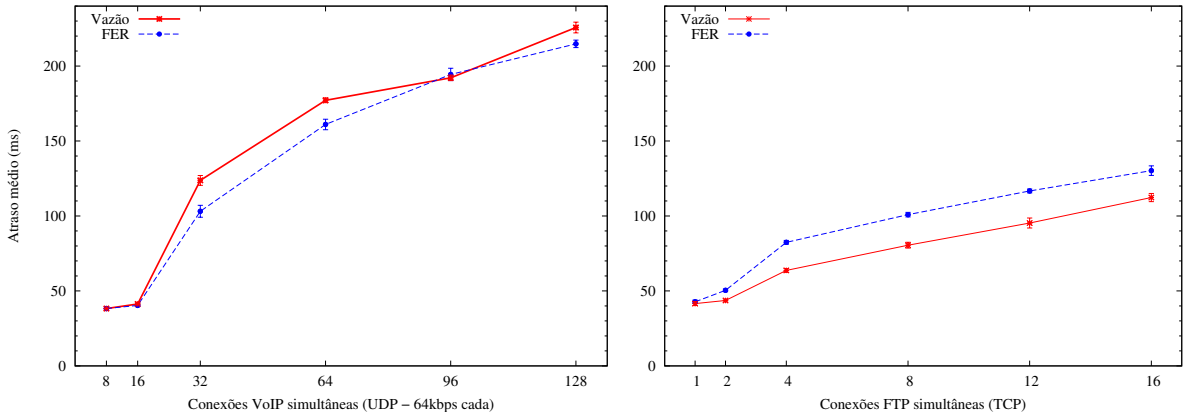


(b) *Packet Error Rate* (PER)

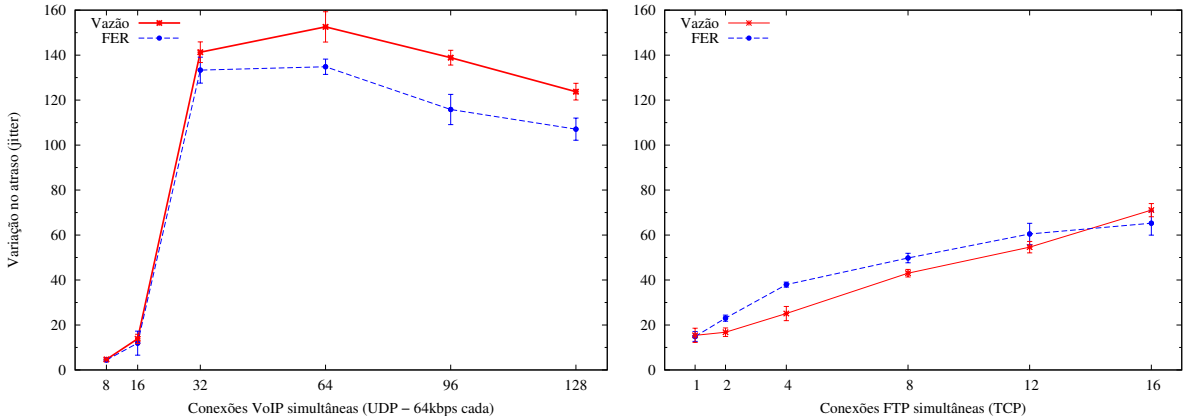
Figura 5.24: Taxa de erro de pacotes e quadros para aplicações VoIP e FTP utilizando a vazão e o FER como métricas de otimização para o CORA.

as retransmissões e fazendo com que os quadros permaneçam menos tempo nas filas. Além disso, esse comportamento também ajuda a diminuir o *jitter*, como mostra a Figura 5.25(b). Já para as conexões TCP, reduzir a FER não melhora os resultados, ao passo que o atraso e o *jitter* aumentam. Nestas condições, utilizar a vazão como métrica de qualidade passa a ser a melhor opção.

Após a análise dos resultados obtidos neste estudo de caso, pode-se concluir que utilizar a vazão como métrica de qualidade para aplicações FTP é vantajoso, pois aumenta a vazão agregada média e mantém baixas as taxas de erro dos quadros e pacotes. Esse ganho é obtido ao custo de um atraso médio e *jitter* um pouco maior, mas que não são suficientemente grandes para afetarem o desempenho da aplicação. Já para as aplicações de VoIP, utilizar o FER como métrica de otimização reduz a vazão total obtida mas atende



(a) Atraso médio



(b) *Jitter*

Figura 5.25: Atraso médio e variação do atraso (*jitter*) para aplicações VoIP e FTP utilizando a vazão e o FER como métricas de otimização para o CORA.

aos principais requisitos de QoS desta aplicação, mantendo o atraso e o *jitter* reduzidos.

Através deste estudo de caso é possível verificar que o uso de diferentes métricas de otimização pode ser proveitoso, principalmente nas redes de propósito específico, como as utilizadas nesta subseção.

5.5 Cenário 3: rede em malha sem fio

Para concluir a avaliação de desempenho dos mecanismos de adaptação da taxa de transmissão, foi planejado um cenário representando uma rede em malha sem fio. A topologia escolhida consiste em uma área de 600 m × 600 m com quatro roteadores de malha sem fio estrategicamente dispostos próximos do centro, servindo como infraestrutura

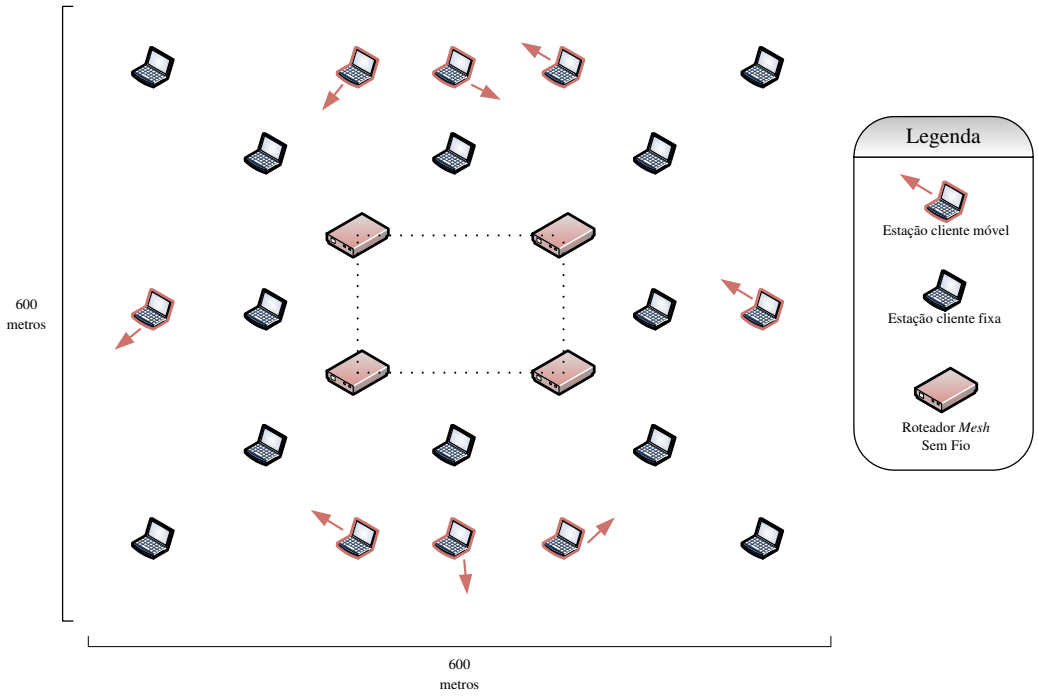


Figura 5.26: Cenário 3: topologia da rede em malha sem fio.

para 24 estações clientes. Dentre as estações clientes, apenas algumas não são fixas, movimentando-se de maneira aleatória pelo cenário com velocidade constante de 0.5 m/s. A Figura 5.26 representa a topologia em questão.

Nesta topologia, foi utilizado o protocolo de roteamento DSDV, que permite o reencaminhamento de pacotes através de múltiplos saltos. Como a área de disposição das estações é grande, em alguns casos esse reencaminhamento torna-se obrigatório. Foram realizadas simulações com quantidades crescentes de fluxos de dados utilizando os protocolos TCP e UDP, tanto em simulações separadas quanto em conjunto. Os fluxos de dados foram criados escolhendo-se aleatoriamente um entre os quatro roteadores de malha e uma entre as 24 estações clientes. Cada fluxo gera tráfego de 512 Kbps, sendo as simulações com fluxos de *download* realizadas separadamente das simulações com fluxos de *upload*.

Assim como nos cenários anteriores, foram realizadas simulações para verificar a vazão agregada média alcançada pelo CORA em função das diferentes combinações dos parâmetros I e α. A Tabela 5.4 apresenta a vazão para as simulações com 16 fluxos de *upload* utilizando o protocolo TCP, enquanto a Tabela 5.5 apresenta a vazão para as simulações com 24 fluxos de *download* utilizando o protocolo UDP. Estas tabelas foram escolhidas aleatoriamente dentre as várias combinações de quantidade de fluxos, direção do tráfego e protocolos de transporte utilizados neste cenário.

As linhas que representam a combinação de parâmetros utilizada neste trabalho estão

Tabela 5.4: Vazão agregada média para 16 fluxos TCP de *upload* com diferentes combinações dos parâmetros I e α.

Posição	Parâmetros		Vazão de dados	Intervalo de Confiança
	I	α		
1	0.5	0.3	7.127	0.149
2	0.3	0.3	7.120	0.129
3	0.5	0.5	7.089	0.134
4	0.3	0.5	7.028	0.098
5	0.5	0.7	6.990	0.107
6	0.5	0.9	6.978	0.081
7	0.3	0.7	6.964	0.115
8	**0.1**	**0.9**	**6.903**	**0.111**
9	0.3	0.9	6.896	0.115
10	0.1	0.7	6.736	0.136
11	0.1	0.5	6.712	0.098
12	0.05	0.9	6.607	0.104
13	0.1	0.3	6.551	0.096
14	0.05	0.7	6.507	0.078
15	0.05	0.5	6.447	0.085
16	0.05	0.3	6.369	0.093

destacadas em ambas as tabelas. Novamente, o par de valores escolhido não representa a melhor combinação alcançada para o cenário, mas os resultados obtidos estão próximos da primeira posição, indicando que esta combinação de parâmetros é uma opção razoável. Ela também serve como ponto de partida para um ajuste mais preciso do mecanismo, caso o mesmo seja implantado em alguma rede de propósito específico.

Já em relação aos resultados comparativos, a Figura 5.27 na página 87 apresenta a vazão agregada média obtida para todas as simulações deste cenário. A análise destes resultados pode ser dividida em dois grupos, de acordo com o sentido do fluxo: *download* e *upload*.

No cenário com fluxos de *download*, somente os quatro roteadores de malha sem fio geram tráfego, e alguns quadros podem ser retransmitidos por algumas estações quando o destino está longe. Por conta disso, o nível de concorrência pelo acesso ao meio pode ser considerado pequeno. Neste caso, a abordagem do RBAR em utilizar quadros de RTS/CTS não é vantajosa, gerando resultados inferiores principalmente para poucos fluxos de dados. O ARF e o SampleRate apresentam um comportamento satisfatório para poucos fluxos (até 12 fluxos simultâneos), mas o desempenho é muito reduzido quando a

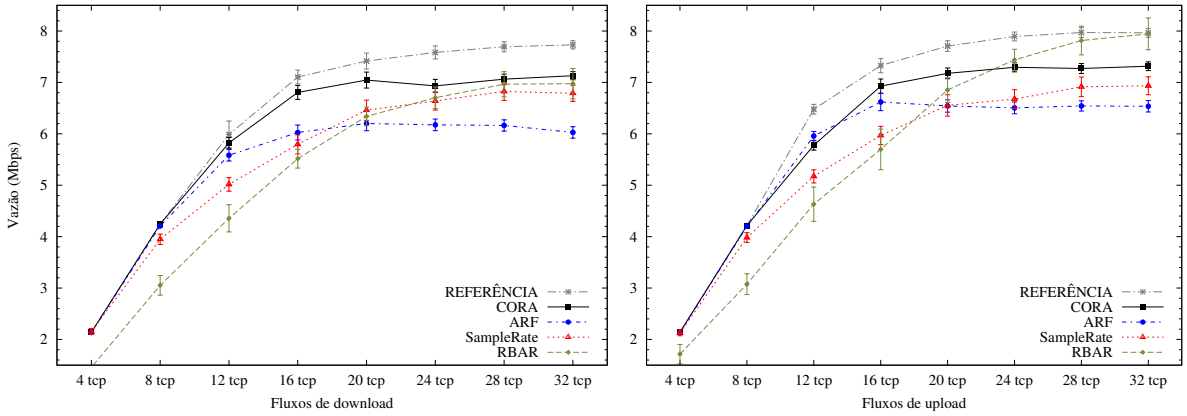
Tabela 5.5: Vazão agregada média para 24 fluxos UDP de *download* com diferentes combinações dos parâmetros I e α.

Posição	Parâmetros		Vazão de dados	Intervalo de Confiança
	I	α		
1	0.5	0.3	7.798	0.435
2	0.3	0.3	7.789	0.403
3	0.5	0.5	7.716	0.433
4	**0.1**	**0.9**	**7.621**	**0.193**
5	0.3	0.5	7.593	0.245
6	0.5	0.7	7.482	0.377
7	0.1	0.7	7.389	0.214
8	0.1	0.3	7.230	0.266
9	0.5	0.9	7.103	0.380
10	0.1	0.5	7.001	0.267
11	0.05	0.9	6.991	0.144
12	0.05	0.7	6.820	0.178
13	0.3	0.9	6.769	0.307
14	0.3	0.7	6.593	0.242
15	0.05	0.3	6.477	0.206
16	0.05	0.5	6.304	0.163

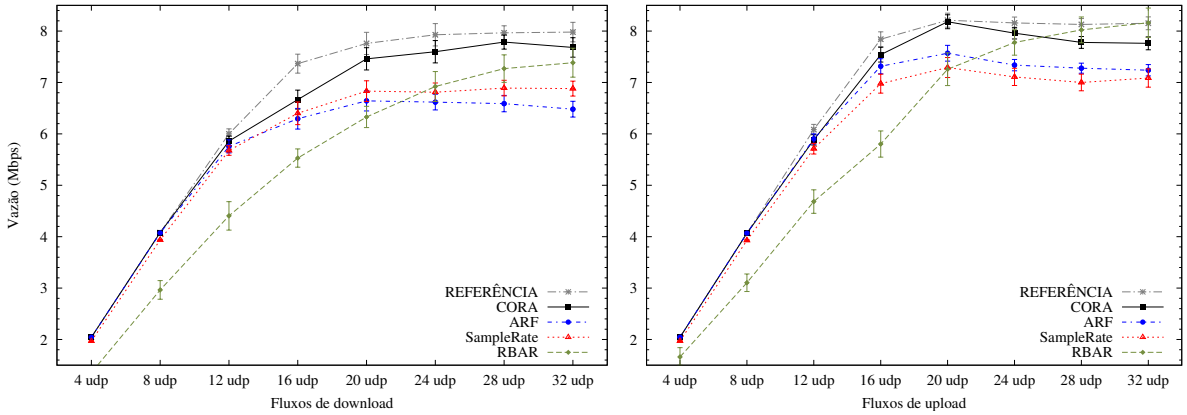
quantidade de fluxos aumenta, sendo inferior até mesmo ao RBAR para mais de 24 fluxos simultâneos. O baixo desempenho destes dois algoritmos em ambientes congestionados já havia sido identificado na Subseção 5.3.2, e torna-se novamente evidente neste cenário.

O CORA apresenta os melhores resultados, com ganhos expressivos principalmente quando a concorrência pelo uso do ambiente aumenta mas a rede ainda não se encontra saturada (normalmente entre 16 e 24 fluxos simultâneos). Neste intervalo, o ganho médio do CORA para todas as simulações de *download* em relação ao demais algoritmos (SampleRate, ARF e RBAR) é de 11.9%, mantendo a vazão agregada sempre próxima da vazão obtida pelo algoritmo de REFERÊNCIA.

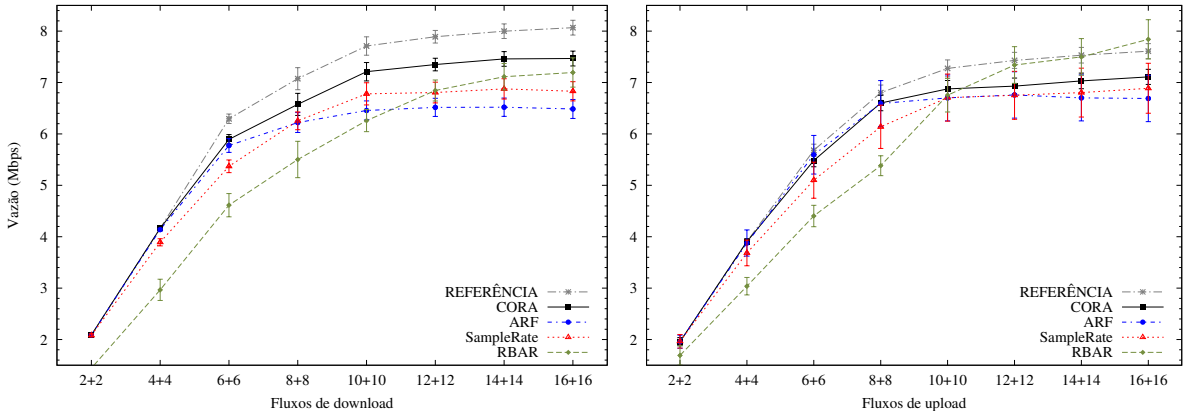
Já para fluxos de *upload*, onde as estações clientes enviam quadros para os roteadores de malha sem fio, o nível de concorrência pelo ambiente aumenta, e o comportamento dos algoritmos passa a ser diferente. O uso dos quadros de RTS/CTS somente é vantajoso quando existem muitos fluxos (mais de 24 simultâneos). Nestas condições, o RBAR produz os melhores resultados, igualando à vazão obtida pelo algoritmo de REFERÊNCIA. Como pode ser visto na Figura 5.27(c), existe uma tendência da vazão obtida pelo RBAR ultrapassar a vazão do algoritmo de REFERÊNCIA em cenários muito congestionados,



(a) Somente fluxos com protocolo TCP



(b) Somente fluxos com protocolo UDP



(c) Fluxos com protocolos TCP e UDP

Figura 5.27: Vazão agregada média para diferentes combinações entre tráfegos *download* e *upload*, e protocolos de transporte TCP e UDP.

não por conta da melhor escolha da taxa mas sim graças aos quadros de RTS/CTS. Nas demais situações, o CORA mantém os resultados acima dos outros algoritmos. Os melhores ganhos obtidos pelo mecanismo proposto estão nas simulações com comunicação UDP, gerando ganho médio de 11.6% entre 16 e 24 fluxos simultâneos.

5.6 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado o processo de implementação do mecanismo CORA, bem como os vários experimentos realizados utilizando o simulador de redes *NS2*, a fim de avaliar o comportamento dos algoritmos de adaptação da taxa de transmissão em funcionamento nos diferentes cenários e arquiteturas de redes de computadores sem fio. Foram avaliados os mecanismos ARF, SampleRate, REFERÊNCIA, RBAR e CORA. Os dois primeiros são soluções utilizadas em dispositivos comerciais, enquanto o terceiro é um mecanismo não implementável na prática pois faz uso de informações disponíveis apenas no simulador de redes utilizado. O RBAR é uma proposta diferente das demais, pois modifica o padrão para considerar a SINR na escolha da taxa, dificultando sua utilização em ambientes reais. Por último, o CORA é o mecanismo proposto neste trabalho, que visa aumentar o desempenho das redes melhorando a vazão de dados, mantendo a compatibilidade com o padrão e levando em consideração as restrições existentes nos equipamentos comerciais.

A implementação e incorporação dos mecanismos CORA e SampleRate no simulador de redes demandaram esforços significativos. Todo o código construído foi projetado para adequar-se à estrutura da biblioteca `dei80211mr`, utilizada durante as simulações.

Os resultados obtidos confirmam o bom desempenho do mecanismo proposto em relação aos demais algoritmos avaliados. Em cenários simples, os ganhos chegaram próximos dos 16%, sempre mantendo-se próximo dos valores alcançados pelo mecanismo de REFERÊNCIA. Para cenários mais complexos, os ganhos são mais discretos, chegando a atingir 10%. Em algumas topologias avaliadas, o CORA obteve resultados semelhantes aos demais algoritmos (considerando os intervalos de confiança), mas manteve a superioridade do índice de justiça que reflete o compartilhamento dos recursos.

Para manter a vazão de dados elevada durante períodos de estabilidade, e permitir a rápida convergência nos demais casos, o uso da função auxiliar de AAA se mostrou eficiente, melhorando a vazão em até 8% nos experimentos realizados. O CORA também foi submetido a simulações em cenários onde o nível de concorrência pelo acesso ao canal é considerado elevado. Nesta condições, o uso da função auxiliar de DTP foi capaz de auxiliar o mecanismo na escolha das taxas, mantendo o mesmo ciente do nível de contenção no ambiente. Pretende-se ainda desenvolver uma extensão afim de equipá-lo com a capacidade de adaptação dinâmica do uso de quadros RTS/CTS em ambientes este.

Capítulo 6

Conclusão

O foco deste trabalho foi o desenvolvimento de um mecanismo cognitivo para adaptação automática da taxa de transmissão nas redes especificadas pelo padrão IEEE 802.11 e seus suplementos .11a, .11b e .11g.

Inicialmente, abordaram-se os conceitos básicos para dar o embasamento necessário para a compreensão deste trabalho. Foi apresentado o padrão IEEE 802.11, descrevendo os tipos das redes sem fio e detalhando o funcionamento tanto da subcamada de acesso ao meio (MAC) quanto da camada física. Além disso, foi abordada a arquitetura de redes em malha sem fio, que tem se mostrado uma solução promissora na construção de redes de acesso sem fio em larga escala e com altas taxas de transmissão; bem como o paradigma de redes cognitivas, cujo objetivo é permitir que as estações das redes sejam capazes de observar as condições do ambiente para depois planejar e agir em função destas condições.

Na sequência, foi descrito o problema da adaptação automática da taxa de transmissão, seguido de uma revisão bibliográfica do assunto. Os principais conceitos envolvidos foram apresentados, comentando os trabalhos mais relevantes na literatura. As soluções existentes foram categorizadas de acordo com seu princípio de funcionamento, e as vantagens e limitações de cada categoria também foram discutidas. As conclusões obtidas serviram para a construção de uma tabela resumo e de um roteiro com considerações que foram observadas durante o projeto e o desenvolvimento do mecanismo proposto nesta dissertação.

Com o conhecimento adquirido, foi projetado o mecanismo cognitivo de adaptação automática da taxa de transmissão denominado *COgnitive Rate Adaptation* (CORA). Este mecanismo foi construído tendo o arcabouço cognitivo CogProt como base, e seu principal objetivo é equipar as estações da rede com as funcionalidades de autoconfiguração e auto-otimização da taxa de transmissão. Dentre as características relevantes do projeto, pode-se destacar:

- Escalabilidade, por ser uma solução descentralizada que não demanda troca de informações entre as entidades cognitivas da rede para seu funcionamento;

- Interoperabilidade, pois não modifica o padrão já estabelecido, permitindo que o algoritmo opere nos diferentes tipos de rede, juntamente com estações que executam outro (ou nenhum) algoritmo de adaptação da taxa;

- Computacionalmente simples, exigindo poucos recursos de processamento e armazenamento, o que permite que o algoritmo seja implementado e utilizado nos dispositivos comerciais existentes;

- Realiza a adaptação de maneira independente em cada enlace sem fio, garantindo a convergência da taxa para a melhor opção e contribuindo com a justiça no compartilhamento dos recursos da rede;

- É um mecanismo baseado no histórico que não utiliza as informações sobre perdas de quadros para guiar a escolha da taxa, eliminando a necessidade de identificar explicitamente o motivo dessas perdas na rede;

- Não depende de indicadores de qualidade de sinal como o SNR ou SINR, cujo processo de medição e mapeamento para as respectivas taxas é considerado complexo nos ambientes reais;

- Oferece suporte a diferentes métricas de otimização, que podem ser utilizadas individualmente ou de acordo com o tipo de tráfego/aplicação na rede, visando atender aos requisitos de QoS estabelecidos. O uso de diferentes métricas de otimização pode ser vantajoso em ambientes como:

  - nas redes em malha sem fio, onde as estações possuem funções e objetivos distintos, como acontece entre os roteadores e os clientes de malha;
  - nas redes especificadas pelo padrão IEEE 802.11e, permitindo o uso de métricas de otimização específicas para cada uma das classes de tráfego existentes.

O mecanismo proposto também possui duas funções auxiliares voltadas para melhorar o desempenho em situações específicas. A primeira delas é o Ajuste Automático da Agressividade (AAA), que visa ajustar o processo de convergência do algoritmo, permitindo que o mesmo seja rápido ao identificar e reagir a uma mudança na qualidade do canal, mas caminhe para a estabilidade nos demais casos. A segunda função, denominada Diff-Time Proporcional (DTP), tem como objetivo avaliar o nível de contenção da rede para auxiliar o mecanismo na escolha das taxas a serem testadas.

Além do algoritmo principal e das funções auxiliares, foram comentados também os principais parâmetros configuráveis do algoritmo, incluindo uma análise a respeito de efeito destes parâmetros no comportamento do mecanismo.

Desempenho do mecanismo proposto

Com o objetivo de avaliar o CORA, ele foi implementado no simulador de redes *Network Simulator* (*NS2*), mais especificamente dentro da biblioteca `dei80211mr`, utilizada para simulações de redes sem fio com múltiplas taxas de transmissão. Outro algoritmo, denominado SampleRate, também foi implementado neste módulo. Estes dois, juntamente com o ARF, RBAR e o algoritmo de REFERÊNCIA (já existentes na biblioteca), foram utilizados para comparações durante o processo de avaliação.

Foram realizados experimentos a fim de avaliar o comportamento dos algoritmos de adaptação da taxa de transmissão em três cenários diferentes: pares de comunicação *ad hoc*, rede infraestruturada e rede em malha sem fio. Os resultados obtidos confirmam o bom desempenho do mecanismo proposto em relação aos demais algoritmos avaliados.

No cenário com um único par de estações *ad hoc*, os ganhos chegaram na casa dos 16%, mantendo-se próximo dos valores alcançados pelo mecanismo de REFERÊNCIA, não implementável na prática mas que escolhe sempre as melhores taxas para o envio dos quadros. Nos cenários mais complexos, que incluem mais pares de estações *ad hoc*, os ganhos são mais discretos chegando a atingir 10% no melhor caso.

Na rede infraestruturada, o CORA obteve resultados semelhantes aos demais algoritmos (considerando os intervalos de confiança), mas manteve a superioridade do índice de justiça que reflete o compartilhamento dos recursos entre as estações. Este cenário também foi utilizado para um estudo de caso com o objetivo de demonstrar os benefícios do uso de diferentes métricas de otimização. Foram avaliados dois tipos de aplicações com duas métricas de otimização distintas, e foi possível verificar que a escolha apropriada da métrica permite atender aos requisitos específicos de QoS de cada aplicação.

Para as redes em malha sem fio, o CORA apresentou resultados satisfatórios, principalmente quando a concorrência pelo ambiente pode ser considerada elevada mas a rede ainda não se encontra saturada. Nesta situação, o mecanismo proposto gerou um ganho médio de 11.75%, mantendo a vazão agregada média sempre próxima da vazão obtida pelo mecanismo de REFERÊNCIA.

Para manter a vazão de dados elevada durante os períodos de estabilidade, e permitir a rápida convergência nos demais casos, o uso da função auxiliar de AAA se mostrou eficaz, melhorando a vazão em até 8% nos experimentos realizados. O CORA também foi submetido a simulações em cenários onde o nível de concorrência pelo acesso ao canal é considerado elevado. Nesta condições, o uso da função auxiliar de DTP foi capaz de ajudar o mecanismo na escolha das taxas, mantendo o mesmo ciente do nível de contenção no ambiente.

Desta forma, as principais contribuições deste trabalho foram: o detalhamento do estado da arte em algoritmos de adaptação automática da taxa de transmissão, incluindo uma revisão bibliográfica acerca do assunto e apresentando os princípios básicos para o projeto de novos mecanismos; a proposta do CORA, desenvolvido a partir do CogProt; a implementação deste mecanismo no simulador de redes *NS2*; e a avaliação de desempenho, considerando este e outros mecanismos existentes na literatura.

Perspectivas para trabalhos futuros

Um trabalho já em andamento é a implementação do mecanismo CORA em um equipamento comercial sem fio. Para isso, foram adquiridos quatro roteadores Linksys modelo [WRT150N, 2007], que são capazes de executar o [OpenWRT, 2010], um *firmware* de código livre e aberto baseado no GNU/Linux e voltado para dispositivos embarcados como estes roteadores residenciais. Este *firmware* já possui implementado o algoritmo Minstrel para adaptação da taxa de transmissão. O objetivo deste trabalho é modificar o OpenWRT a fim de equipá-lo também com as funcionalidades do CORA e dos algoritmos ARF e SampleRate. Dessa forma, espera-se ser possível reproduzir as simulações da avaliação de desempenho através de experimentos em ambiente real, com o intuito de validar os resultados obtidos nesta dissertação.

Além deste, outros importantes trabalhos futuros incluem:

- Avaliar o comportamento do CORA com a utilização de outras funções de densidade de probabilidade de características não simétricas (como é o caso da distribuição normal), com o objetivo de aumentar ou diminuir a chance de testar as maiores taxas disponíveis ao longo do tempo;

- Estudar detalhadamente a inter-relação entre os parâmetros do CORA, com o objetivo de ajustá-los dinamicamente assim como foi feito para o desvio padrão σ na função de Ajuste Automático da Agressividade;

- Integração entre o mecanismo CORA e as redes IEEE 802.11e, com o objetivo de escolher dinamicamente a métrica de otimização utilizada pelo algoritmo em função das diferentes classes de tráfego existentes no padrão;

- Estudar o processo de integração do mecanismo proposto com o padrão IEEE 802.11n, que possui um conjunto maior de taxas disponíveis para uso, bem como prevê a troca de informações no cabeçalho dos quadros entre o transmissor e o receptor;

- Considerar o ajuste da potência de transmissão em conjunto com a adaptação da taxa, já que estes parâmetros estão intimamente relacionados e uma solução conjunta para o ajuste de ambos pode ser vantajosa [Ramachandran et al., 2008];
- Adaptar o mecanismo CORA para que este tenha a capacidade de ajustar dinamicamente o uso dos quadros de RTS/CTS em ambientes congestionados, utilizando a métrica *diff-time proporcional* como indicador para tal ajuste.

Referências Bibliográficas

802.11 (2007). IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.

802.11a (1999). Supplement to IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band.

802.11b (1999). Supplement to IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems- Local and Metropolitan Area Networks- Specific Requirements- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band.

802.11e (2005). IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements.

802.11g (2003). ISO/IEC Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band.

802.11n (2009). IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems–Local and metropolitan area networks–Specific

requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput.

Akyildiz, I. F. e Wang, X. (2009). *Wireless Mesh Networks*. John Wiley & Sons Ltda, 1ª edição.

Akyildiz, I. F., Wang, X., e Wang, W. (2005). Wireless mesh networks: a survey. *Computer Networks*, 47(4):445–487.

Ancillotti, E., Bruno, R., e Conti, M. (2008). Experimentation and performance evaluation of rate adaptation algorithms in wireless mesh networks. Em *PE-WASUN: Proc. of the ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks*, páginas 7–14.

Awerbuch, B., Holmer, D., e Rubens, H. (2006). The medium time metric: High throughput route selection in multi-rate ad hoc wireless networks. *Mobile Networks and Applications*, 11(2):253–266.

Biaz, S. e Wu, S. (2008). Rate adaptation algorithms for IEEE 802.11 networks: A survey and comparison. Em *ISCC: Proc. of the IEEE Symposium on Computers and Communications*, páginas 130–136.

Bicket, J. C. (2005). Bit-rate selection in wireless networks. Dissertação de mestrado, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Department of Electrical Engineering and Computer Science.

Bononi, L., Conti, M., e Gregori, E. (2004). Runtime optimization of IEEE 802.11 wireless LANs performance. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 15(1):66–80.

Boyd, J. R. (1995). The essence of wining & losing. Online. Disponível em `http://www.chetrichards.com/modern_business_strategy/boyd/essence/eowl_frameset.htm`. Último acesso em 02/03/2010.

Bruno, R., Conti, M., e Gregori, E. (2005). Mesh networks: Commodity multihop ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine*, 43(3):123–131.

Cardoso, K. V. e Rezende, J. F. (2008). Adaptação automática de taxa em redes 802.11 densas. Em *SBRC: Anais do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, páginas 467–480.

Chaves, L., Malheiros, N., Madeira, E., Garcia, I., e Kliazovich, D. (2009). A cognitive mechanism for rate adaptation in wireless networks. Em *MACE: Proc. of the IEEE*

International Workshop on Modelling Autonomic Communication Environments, volume 5844 da *Lecture Notes in Computer Science*, páginas 58–71. Springer.

Conti, M., Maselli, G., Turi, G., e Giordano, S. (2004). Cross-layering in mobile ad hoc network design. *Computer*, 37(2):48–51.

Ferreira, D. M. (2007). Minimização do efeito da anomalia em redes IEEE 802.11 usando SNR para controlar o CW. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação.

Fietkau, F. (2008). Linux changelog 2.6.28 - commit cccf129f820e431d84690729254a32f-1709328fb. Online. Disponível em `http://www.kernel.org/pub/linux/kernel/v2.6/ChangeLog-2.6.28`. Último acesso em 10/03/2010.

Fortuna, C. e Mohorcic, M. (2009). Trends in the development of communication networks: Cognitive networks. *Computer Networks*, 53(9):1354–1376.

Ghosh, S., Basu, K., e Das, S. K. (2005). An architecture for next-generation radio access networks. *IEEE Network*, 19(5):35–42.

Gummalla, A. C. V. e Limb, J. O. (2000). Wireless medium access control protocols. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 3(2):2–15.

Haratcherev, I., Langendoen, K., Lagendijk, R., e Sips, H. (2004). Hybrid rate control for IEEE 802.11. Em *MobiWac: Proc. of the ACM International Workshop on Mobility Management and Wireless Access Protocols*, páginas 10–18.

He, W., Liu, X., e Nahrstedt, K. (2005). A feedback control scheme for resource allocation in wireless multi-hop ad hoc networks. Em *MobiQuitous: Proc. of the IEEE International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services*, páginas 432–439.

Heusse, M., Rousseau, F., Berger-Sabbatel, G., e Duda, A. (2003). Performance anomaly of 802.11b. Em *INFOCOM: Proc. of the IEEE International Conference on Computer Communications*, volume 2, páginas 836–843.

Holland, G., Vaidya, N., e Bahl, P. (2001). A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks. Em *MobiCom: Proc. of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, páginas 236–251.

Hou, J. C., Park, K. J., Kim, T. S., e Kung, L. C. (2008). Medium access control and routing protocols for wireless mesh networks. Em *Wireless Mesh Networks: Architectures and Protocols*, capítulo 4, páginas 77–111. Springer.

Jain, R. K., Chiu, D.-M. W., e Hawe, W. R. (1984). A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems. Relatório técnico 301, Digital Equipment Corporation. Disponível em `http://arxiv.org/abs/cs.NI/9809099`. Úlitmo acesso em 05/05/2010.

Jakubczak, S., Lau, A., Li, L., e Ward, P. (2008). A simple rate-control fairness algorithm for wireless mesh networks. Online. Disponível em `http://softbase.uwaterloo.ca/~atklau/wmn_project.pdf`. Último acesso em 20/12/2009.

Joshi, T., Ahuja, D., Singh, D., e Agrawal, D. P. (2008). SARA: Stochastic automata rate adaptation for IEEE 802.11 networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 19(11):1579–1590.

Kamerman, A. e Monteban, L. (1997). Wavelan-II: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band. *Bell Labs Technical Journal*, 2(3):118–133.

Khan, S., Mahmud, S., Loo, K., e Al-Raweshidy, H. (2008). A cross layer rate adaptation solution for IEEE 802.11 networks. *Computer Communications*, 31(8):1638–1652.

Kim, H., Yun, S., Kang, I., e Bahk, S. (2005a). Resolving 802.11 performance anomalies through QoS differentiation. *IEEE Communications Letters*, 9(7):655–657.

Kim, J., Kim, S., Choi, S., e Qiao, D. (2006a). CARA: Collision-aware rate adaptation for IEEE 802.11 WLANs. Em *INFOCOM: Proc. of the IEEE International Conference on Computer Communications*, páginas 1–11.

Kim, J.-O., Tode, H., e Murakami, K. (2005b). Service-based rate adaptation architecture for IEEE 802.11e QoS networks. Em *GLOBECOM: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conference*, volume 6, páginas 3341–3345.

Kim, S., Lee, S.-J., e Choi, S. (2006b). The impact of IEEE 802.11 MAC strategies on multi-hop wireless mesh networks. Em *WiMesh: Proc. of the IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks*, páginas 38–47.

Kim, T.-S., Lim, H., e Hou, J. C. (2006c). Improving spatial reuse through tuning transmit power, carrier sense threshold, and data rate in multihop wireless networks. Em *MobiCom: Proc. of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, páginas 366–377.

Kliazovich, D., Malheiros, N., Fonseca, N., Granelli, F., e Madeira, E. (2010). CogProt: A framework for cognitive configuration and optimization of communication protocols. Em *MobiLight: Proc. of the ICST International Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems*, Lecture Notes of ICST. Springer. Aceito para publicação.

Kurose, J. e Ross, K. (2005). *Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet*. Pearson Addison Wesley, 3ª edição.

Lacage, M., Manshaei, M. H., e Turletti, T. (2004). IEEE 802.11 rate adaptation: A practical approach. Em *MSWiM: Proc. of the ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, páginas 126–134.

Loiacono, M., Rosca, J., e Trappe, W. (2007). The snowball effect: Detailing performance anomalies of 802.11 rate adaptation. Em *GLOBECOM: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conference*, páginas 5117–5122.

MadWiFi (2010). The MadWiFi Project. Online. Disponível em `http://madwifi-project.org`. Último acesso em 18/01/2010.

Mahmoud, Q., editor (2007). *Cognitive Networks: Towards Self-Aware Networks*. John Wiley & Sons, 1ª edição.

Mccann, S. (2010). Official IEEE 802.11 working group project timelines. Online. Disponível em `http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/802.11_Timelines.htm`. Último acesso em 06/03/2010.

Mitola, J. (2001). Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications. *Mobile Networks and Applications*, 6(5):435–441.

Networks, N. (2003). Introduction to Quality of Servive (QoS). Online (White Paper). Disponível em `http://www.nortel.com/products/02/bstk/switches/bps/collateral/56058.25_022403.pdf`. Último acesso em 11/10/2009.

NS2 (2009). The Network Simulator *NS2*. Online. Disponível em `http://www.isi.edu/nsnam/ns`. Último acesso em 17/10/2009.

OpenWRT (2010). The OpenWRT Project. Online. Disponível em `http://openwrt.org/`. Último acesso em 06/04/2010.

Qiao, D. e Shin, K. (2002). Achieving efficient channel utilization and weighted fairness for data communications in IEEE 802.11 WLAN under the DCF. Em *IWQoS: Proc. of the IEEE International Workshop on Quality of Service*, páginas 227–236.

Ramachandran, K., Kokku, R., Zhang, H., e Gruteser†, M. (2008). Symphony: Synchronous two-phase rate and power control in 802.11 WLANs. Em *MobiSys: Proc. of the ACM International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, páginas 132–145.

Ramachandran, K., Kremo, H., Gruteser, M., Spasojevic, P., e Seskar, I. (2007). Scalability analysis of rate adaptation techniques in congested IEEE 802.11 networks: An ORBIT testbed comparative study. Em *WoWMoM: Proc. of the IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, páginas 1–12.

Sadeghi, B., Kanodia, V., Sabharwal, A., e Knightly, E. (2002). Opportunistic media access for multirate ad hoc networks. Em *MobiCom: Proc. of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, páginas 24–35.

SIGNET (2008). dei80211mr: A new 802.11 implementation for *NS2*. Online. Disponível em `http://www.dei.unipd.it/wdyn/?IDsezione=5090`. Último acesso em 18/01/2010.

Smithies, D. (2005). Minstrel rate control algorithm. Online. Disponível em `http://linuxwireless.org/en/developers/Documentation/mac80211/RateControl/minstrel`. Último acesso em 16/11/2009.

Srivastava, V. e Motani, M. (2005). Cross-layer design: a survey and the road ahead. *IEEE Communications Magazine*, 43(12):112–119.

Tavanti, L., Garroppo, R. G., e Giordano, S. (2007). Preventing the performance anomaly of IEEE 802.11 networks with a distributed channel-aware scheduler. Em *WoWMoM: Proc. of the IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, páginas 1–8.

Thomas, R. W. (2007). *Cognitive Networks*. Tese de doutorado, Virginia Polytechnic Institute and State University (VirginiaTech).

Thomas, R. W., Friend, D. H., Dasilva, L. A., e Mackenzie, A. B. (2006). Cognitive networks: adaptation and learning to achieve end-to-end performance objectives. *IEEE Communications Magazine*, 44(12):51–57.

Wang, B. e Mutka, M. (2008). QoS-aware fair rate allocation in wireless mesh networks. *Computer Communications*, 31(7):1276–1289.

Wong, S. H. Y., Yang, H., Lu, S., , e Bharghavan, V. (2006). Robust rate adaptation for 802.11 wireless networks. Em *MobiCom: Proc. of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, páginas 146–157.

WRT150N (2007). WRT150N: Wireless-N Home Router. Online. Disponível em `http://homedownloads.cisco.com/downloads/WRT150N_ds.pdf`. Último acesso em 06/04/2010.

Wu, C.-M. e Hou, T.-C. (2005). The impact of RTS/CTS on performance of wireless multihop ad hoc networks using IEEE 802.11 protocol. Em *SMC: Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, páginas 41–45.

Xia, Q. e Hamdi, M. (2008). Smart sender: A practical rate adaptation algorithm for multirate IEEE 802.11 WLANs. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(5):1764–1775.

Xiao, Y. e Li, H. (2005). QoS enhancement for the IEEE 802.11e distributed wireless LANs. Em *Resource Management in Wireless Networking*, capítulo 10, páginas 223–252. Elsevier.

Xiuchao, W. (2004). Simulate 802.11b channel within ns2. Online. Disponível em `Simulate802.11bChannelwithinNS2`. Último acesso em 19/02/2010.

Xue, Y., Li, B., e Nahrstedt, K. (2006). Optimal resource allocation in wireless ad hoc networks: A price-based approach. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5(4):347–364.

Apêndice A

Comandos para Configuração do Simulador *NS2*

```
1  #===================================================================
2  # TCL script for ns-2.33 using dei80211mr
3  # Author: Luciano Jerez Chaves
4  #===================================================================
5
6  # Overriding Link-Layer configuration
7  #===================================================================
8  LL set delay_      25us              ;# Link Layer transmission delay
9  #-------------------------------------------------------------------
10
11 # Overriding MAC802.11 configuration
12 #===================================================================
13 Mac/802_11 set RTSThreshold_ 10000 ;# Threshold to enable RTS. HERE DISABLE!!!
14 Mac/802_11 set ShortRetryLimit_  7 ;# Retry limit to a packet < RTSThreshold_
15 Mac/802_11 set LongRetryLimit_   5 ;# Retry limit to a packet >= RTSThreshold_
16 Mac/802_11 set CWMin_            31 ;# Min congestion window size
17 Mac/802_11 set CWMax_          1023 ;# Max congestion window size
18 Mac/802_11 set SlotTime_       9e-6 ;# aSlotTime for 802.11g
19 Mac/802_11/Multirate set gSyncInterval_ 9e-6 ;# Sync interval in 802.11g
20 #-------------------------------------------------------------------
21
22 # Overriding Wireless configuration
23 #===================================================================
24 # Used to compute interference among nodes
25 Channel/WirelessChannel/PowerAware set distInterference_ 100000;
26
27 set noisePower 7e-11                    ;# Noise Power used by the FER model
28 set sensingTreshdB -2.7                 ;# Setting Sensing threshold in dB
29 set CSThresh [expr $noisePower * pow(10, $sensingTreshdB/10.0)]
30 set AffectThresh [expr $noisePower]
31
32 Phy/WirelessPhy set CSThresh_ $CSThresh ;# Carrier Sense Threshold
33 Phy/WirelessPhy set Pt_            0.04 ;# Transmission Power
34 Phy/WirelessPhy set freq_         2437e6 ;# Transmission Frequency
35 Phy/WirelessPhy set L_              1.0 ;# System Loss Channel Model
36 Phy/WirelessPhy set bandwidth_        0 ;# Channel Bandwidth NOT USED HERE!!!
37 #-------------------------------------------------------------------
```

```
38 # Node Configuration
39 # ======================================================================
40 set antenna      Antenna/OmniAntenna                    ;# Antenna model
41 set linkLayer    LL                                     ;# PHY Layer
42 set mac          Mac/802_11/Multirate                   ;# MAC Layer
43 set queue        Queue/DropTail/PriQueue                ;# Queue Interface
44 set queueLen     50                                     ;# Queue length
45 set netIf        Phy/WirelessPhy/PowerAware             ;# Network Interface
46 set propag       Propagation/FreeSpace/PowerAware       ;# Propagation Model
47 set channel      Channel/WirelessChannel/PowerAware     ;# Channel type
48 set channel_1    [new $channel]
49
50 $ns node-config -llType $linkLayer  \
51                 -macType $mac       \
52                 -ifqType $queue     \
53                 -ifqLen $queueLen   \
54                 -antType $antenna   \
55                 -propType $propag   \
56                 -phyType $netIf     \
57 #----------------------------------------------------------------------
```