

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**UM ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO
TRÁFEGO EM REDES SEM FIO E SEU
IMPACTO NA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO**

TIAGO FLOR BENTO

**ORIENTADORA: PRISCILA AMÉRICA SOLIS MENDEZ
BARRETO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM - 435/2011

BRASÍLIA/DF: MARÇO - 2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

UM ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO
TRÁFEGO EM REDES SEM FIO E SEU
IMPACTO NA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

TIAGO FLOR BENTO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

APROVADA POR:

PRISCILA AMÉRICA SOLIS MENDEZ BARRETO, Dra., ENE/UnB
(ORIENTADORA)

PAULO HENRIQUE PORTELA DE CARVALHO, Dr., ENE/UnB
(EXEMINADOR INTERNO)

JACIR LUIZ BORDIM, Dr., CIC/UnB
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA, 18 DE MARÇO DE 2011

FICHA CATALOGRÁFICA

BENTO, TIAGO FLOR

Um estudo das propriedades do tráfego em redes sem fio e seu impacto na avaliação de desempenho. [Distrito Federal] 2011. xvii, 108p., 210 x 297 mm

(ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2011).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Redes sem fio

2. Qualidade de serviço

3. Protocolo de acesso ao meio

4. Autossimilaridade estatística

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BENTO, T. F. (2011). Um estudo das propriedades do tráfego em redes sem fio e seu impacto na avaliação de desempenho. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM - 435/11, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 108p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Tiago Flor Bento.

TÍTULO: Um estudo das propriedades do tráfego em redes sem fio e seu impacto na avaliação de desempenho.

GRAU: Mestre

ANO: 2011

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Tiago Flor Bento

QNJ 25 Casa 32, Taguatinga Norte

72140-250. Brasília - Distrito Federal - Brasil.

Dedicatória

Eu dedico esta dissertação à minha família e a todos que me são queridos.

TIAGO FLOR BENTO

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por abençoar todos os meus passos e me dar força nos momentos de dificuldade da minha vida.

Agradeço de coração aos meus pais, Lareine e Nelita, que me deram valores e ensinamentos que guardarei por toda a vida. À minha irmã Tainá por sua lealdade e seu exemplo de caráter.

Muito obrigado a minha linda namorada, Karen, que sempre teve muita paciência e compreensão em meus momentos de dedicação a este trabalho e sempre me incentivou a seguir em frente.

Agradeço a toda minha família, em especial meus avós André, Martinha, Benvindo e Sebastiana, por sempre me darem amor, carinho, conselhos e apoio. Poderia citar o nome de todos meus familiares, mas corro o risco de ser injusto e esquecer alguém. Muito obrigado mesmo, a todos!

Aos meus amigos por estarem sempre presentes e me encorajarem. Agradecimentos especiais aos meus amigos Robson, Tiago Silva e Tiago de Sousa (Gabuh) por me incentivarem a ter sonhos grandes e me mostrarem que é possível alcançá-los.

Obrigado aos amigos da UnB, do Laboratório de Projetos, do Lemom e do Andes pelos momentos de convivência e pela amizade. Gostaria de agradecer especialmente ao mestre e amigo Marcio de Deus sua sabedoria e seu carisma ao compartilhar seu conhecimento.

Finalmente, um sincero e especial agradecimento à minha orientadora, professora Priscila Solis. Agradeço por sua dedicação, envolvimento, incentivo, cobrança, vibração, atenção e carinho durante todo o processo de elaboração deste trabalho. Seu conhecimento e sua experiência foram fundamentais no meu aprendizado, tanto na área acadêmica quanto para toda a vida.

Resumo

Este trabalho apresenta a análise das propriedades do tráfego em redes sem fio IEEE 802.11 e examina a eficiência do protocolo da camada de enlace, tendo em vista o desempenho de diversas aplicações. Inicialmente, é apresentado um estudo taxonômico do tráfego de rede sem fio nas camadas de enlace, rede e transporte. O estudo identifica a composição do tráfego nas diferentes camadas, o classifica e o modela como um processo autossimilar. Com esse resultado, é feita uma análise crítica do desempenho de aplicações reproduzidas em simulações com o objetivo de verificar duas hipóteses: 1) Determinar a influência do fenômeno de autossimilaridade no desempenho de aplicações. 2) Avaliar o ganho de desempenho o tráfego que pode ser caracterizado como desnecessário. Os resultados comprovam que a propriedade autossimilar do tráfego provoca um efeito negativo no desempenho da rede, e se torna ainda mais grave em situações de uso mais intenso. Também é mostrado que, para melhorar o desempenho de aplicações de tempo real em uma rede sem fio, um ponto inicial de partida é a diminuição dos componentes de tráfego que não são estritamente necessários.

Palavras chave: Redes sem fio, IEEE 802.11, caracterização de tráfego, modelo autossimilar, avaliação de desempenho

Abstract

This work presents the analysis of properties of traffic on IEEE 802.11 wireless networks and examines the effectiveness of the link layer protocol for the performance of various applications. Initially, a taxonomic study of wireless network traffic in the network link layer, and transport. The study identifies the composition of traffic on different layers, classifies and models as a self-similar process. With this result, is made a critical analysis of the performance of applications reproduced in simulations to verify two hypotheses: 1) to determine the influence of the phenomenon of self-similarity in the performance of applications. 2) Evaluate the performance gain removing the traffic that can be characterized as unnecessary. The results show that the self-similar traffic causes a negative effect on network performance, and becomes even more acute in situations of intense use. It is also shown that, to improve the performance of real-time applications in a wireless network, an initial point of departure is the reduction of traffic that are not strictly necessary.

Key words: Wireless networks, IEEE 802.11, traffic characterization, self-similar model, performance evaluation

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Definição do problema	3
1.2	Objetivos do trabalho	3
1.3	Estrutura do trabalho	4
2	TECNOLOGIAS DE REDES SEM FIO	5
2.1	Introdução a comunicações sem fio	5
2.2	Redes celulares	8
2.3	Redes Locais Sem Fio	10
2.3.1	Características de redes locais sem fio (WLAN)	11
2.4	Tecnologias IEEE 802.11	13
2.4.1	Arquitetura 802.11	16
2.4.2	Controle de acesso ao meio (MAC)	18
2.4.2.1	Função de Coordenação Distribuída (DCF)	18
2.4.2.2	Função Coordenada Pontual (PCF)	19
2.4.3	Os processos de associação e <i>handoff</i>	19
2.4.4	Métodos para garantia de entrega de quadros	20
2.4.5	Tipos de quadros do IEEE 802.11	21
2.4.5.1	Quadros de dados	23
2.4.5.2	Quadros de controle	23
2.4.5.3	Quadros de gerenciamento	24
2.5	Desafios da pesquisa em redes sem fio	25
2.6	Resumo do Capítulo	28
3	ANÁLISE DE TRÁFEGO EM REDES SEM FIO	29
3.1	Tráfego em redes sem fio	29
3.1.1	Qualidade de Serviço	30
3.1.2	Engenharia de Tráfego em redes multimídia	32
3.2	Análise de tráfego	33
3.2.1	Autossimilaridade	34
3.2.2	Cálculo do Hurst	37
3.2.2.1	Kettani-Gubner	37
3.2.2.2	Variance Time Plot	38
3.2.2.3	Periodograma	40
3.2.2.4	Whittle	40

3.2.2.5	Análise R/S	41
3.3	Modelo de autossimilaridade baseado nos quadros componentes do tráfego	42
3.3.1	Coleta do tráfego em redes sem fio	44
3.4	Pesquisas sobre o tráfego em redes sem fio	46
3.4.1	O tráfego indesejável em redes sem fio	47
3.5	Resumo do Capítulo	49
4	TAXONOMIA DO TRÁFEGO EM UMA REDE SEM FIO.....	50
4.1	Sobre o tráfego coletado	50
4.1.1	Outros trabalhos	52
4.2	Camada MAC (WLAN)	52
4.3	Camada de Rede (IP)	55
4.4	Camada de Transporte (TCP)	56
4.5	Autossimilaridade	58
4.6	Comentários sobre os resultados da análise do tráfego	61
4.7	Resumo do Capítulo	63
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	64
5.1	Análise Experimental do Desempenho de Aplicações	65
5.1.1	Topologias das simulações	66
5.1.2	Os Tipos de Tráfego e a Carga na Rede	67
5.1.3	Aplicações	69
5.2	Experimentos nas topologias de redes	70
5.2.1	Rede 1	71
5.2.1.1	Tráfego Leve	71
5.2.1.2	Tráfego Pesado	75
5.2.2	Rede 2	80
5.2.2.1	Tráfego Leve	80
5.2.2.2	Tráfego Pesado	83
5.2.3	Rede 3	88
5.2.3.1	Tráfego Leve	88
5.2.3.2	Tráfego Pesado	91
5.3	Avaliação do grau de autossimilaridade resultante nos cenários de simulação	95
5.4	Análise dos resultados	98
5.5	Resumo do Capítulo	100
6	CONCLUSÕES	101
6.1	Trabalhos futuros	103

Lista de Tabelas

2.1	Evolução da tecnologia celular (HALEPOVIC; WILLIAMSON; GHADERI, 2009, modificada)	9
2.2	Evolução da rede WiFi (HALEPOVIC; WILLIAMSON; GHADERI, 2009, modificada)	14
2.3	Função dos tipos e subtipos de quadros	23
4.1	Estatísticas da camada WLAN	52
4.2	Distribuição de quadros por taxa de transmissão	53
4.3	Distribuição de tipos de quadros por taxa de transmissão	53
4.4	Distribuição de tipos e subtipos de quadros	54
4.5	Estatísticas da camada IP	55
4.6	Sentido do fluxo dos datagramas IP	56
4.7	Protocolos da camada de transporte	56
4.8	Distribuição das portas da camada de transporte	57
4.9	Distribuição das portas conhecidas da camada de transporte	58
4.10	Valores do parâmetro de Hurst para diferentes escalas e protocolos	61
4.11	Valores do parâmetro de Hurst do tráfego real usando diferentes modelos. Escala = 0.05	61
5.1	Resumo do valor médio das estatísticas: R1 TL	74
5.2	Composição do tráfego: R1 TL $H = 0,5$	74
5.3	Composição do tráfego: R1 TL $H = 0,9$	75
5.4	Resumo do valor médio das estatísticas: R1 TP	78
5.5	Composição do tráfego: R1 TP $H = 0,5$	79
5.6	Composição do tráfego: R1 TP $H = 0,9$	79
5.7	Resumo do valor médio das estatísticas: R2 TL	83
5.8	Composição do tráfego: R2 TL $H = 0,5$	83
5.9	Composição do tráfego: R2 TL $H = 0,9$	84
5.10	Resumo do valor médio das estatísticas: R2 TP	86
5.11	Composição do tráfego: R2 TP $H = 0,5$	87
5.12	Composição do tráfego: R2 TP $H = 0,9$	87
5.13	Resumo do valor médio das estatísticas: R3 TL	90
5.14	Composição do tráfego: R3 TL $H = 0,5$	91
5.15	Composição do tráfego: R3 TL $H = 0,9$	91
5.16	Resumo do valor médio das estatísticas: R3 TP	93
5.17	Composição do tráfego: R3 TP $H = 0,5$	94

5.18	Composição do tráfego: R3 TP $H = 0,9$	95
5.19	Hurst para diferentes escalas - R2 TL $H = 0,5$ CG	96
5.20	Valores de H para escala 0,05 - R1 TL	96
5.21	Valores de H para escala 0,05 - R1 TP	96
5.22	Valores de H para escala 0,05 - R2 TL	96
5.23	Valores de H para escala 0,05 - R2 TP	97
5.24	Valores de H para escala 0,05 - R3 TL	97
5.25	Valores de H para escala 0,05 - R3 TP	97
5.26	Hurst calculado pelo modelo - R1 TL $H = 0,5$ CG	97
5.27	Hurst calculado pelo modelo - R2 TP $H = 0,9$ CG	97
5.28	Hurst calculado pelo modelo - R3 TP $H = 0,9$ CG	98
5.29	Hurst calculado pelo modelo - R3 TP $H = 0,9$ SG	98

Lista de Figuras

2.1	Evolucao das redes sem fio (STALLINGS, 2002, modificada)	5
2.2	Organização de uma rede celular e reuso de frequências	8
2.3	Rede local sem fio estruturada	11
2.4	Exemplo de rede ad hoc	12
2.5	Gráficos com características de redes de dados (STALLINGS, 2002, modificada)	13
2.6	Arquitetura 802	16
2.7	Encapsulamento na arquitetura 802.11	17
2.8	Intervalos de tempo IFS	19
2.9	Notificação de recebimento de transmissão de dados	21
2.10	Problema de nó oculto em redes sem fio	21
2.11	Procedimento RTS/CTS	22
3.1	Comparação de um processo autossimilar (à esquerda) com um processo poissoniano (à direita), (KRAMER, 2004, modificada)	34
3.2	Exemplo de estimativa do parâmetro de Hurst usando VTP	39
3.3	Exemplo de estimativa do parâmetro de Hurst usando análise R/S	42
3.4	Coleta do tráfego	45
4.1	Layout do 62º encontro IETF (JARDOSH et al., 2005a, modificada)	51
4.2	Tráfego da camada de enlace agregado em diferentes escalas de tempo	59
4.3	Tráfego IP agregado em diferentes escalas de tempo	59
4.4	Tráfego TCP agregado em diferentes escalas de tempo	60
5.1	Modelo de nó do OPNET para escuta de quadros no meio aéreo	66
5.2	Topologia de rede pequena	67
5.3	Topologia de rede média	67
5.4	Topologia de rede complexa	68
5.5	Estatísticas WLAN - R1 TL	71
5.6	Estatísticas Voz - R1 TL	72
5.7	Estatísticas Web - R1 TL	73
5.8	Estatísticas WLAN - R1 TP	76
5.9	Estatísticas Voz - R1 TP	77
5.10	Estatísticas Web - R1 TP	78
5.11	Estatísticas WLAN - R2 TL	80
5.12	Estatísticas Voz - R2 TL	81
5.13	Estatísticas Web - R2 TL	82
5.14	Estatísticas WLAN - R2 TP	84

5.15	Estatísticas Voz - R2 TP	85
5.16	Estatísticas Web - R2 TP	86
5.17	Estatísticas WLAN - R3 TL	88
5.18	Estatísticas Voz - R3 TL	89
5.19	Estatísticas Web - R3 TL	90
5.20	Estatísticas WLAN - R3 TP	92
5.21	Estatísticas Voz - R3 TP	93
5.22	Estatísticas Web - R3 TP	94

Nomenclatura

α	Fator de escala do tráfego auto-similar
H	Parâmetro de Hurst
W	Watt
1G	Primeira geração de comunicação móvel sem fio
2G	Segunda geração de comunicação móvel sem fio
3G	Terceira geração de comunicação móvel sem fio
4G	Quarta geração de comunicação móvel sem fio
ACK	<i>Acknowledgement</i>
AIM	<i>AOL Instant Messenger</i>
AP	<i>Access Point</i>
ARP	<i>Association Response</i>
ARQ	<i>Association Request</i>
AUTH	<i>Authentication</i>
BCN	<i>Beacon frame</i>
CCK	<i>Complementary Code Keying</i>
CDMA	<i>Code-Division Multiple Access</i>
CG	Simulações com tráfego de gerenciamento
CSMA	<i>Carrier sense multiple access</i>
CTS	<i>Clear to Send</i>
DASS	<i>Disassociation</i>
DCCP	<i>Datagram Congestion Control Protocol</i>
DCF	<i>Distributed coordination function</i>
DEAUTH	<i>Deauthentication</i>
DIFS	<i>Distributed coordination function interframe space</i>
DSSS	<i>Direct sequence spread spectrum</i>

email	<i>Electronic mail</i> ou correio eletrônico
ESP	<i>Encapsulating Security Payload</i>
FHSS	<i>Frequency-hopping spread spectrum</i>
GPS	<i>Global Positioning Systems</i>
GRE	<i>Generic Routing Encapsulation</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GSM FR	<i>GSM - Full Rate</i>
HD	<i>High Definition</i>
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>
HTTPS	<i>Hypertext Transfer Protocol Secure</i>
ICA	<i>Independent Computing Architecture</i>
ICMP	<i>Internet Control Message Protocol</i>
ICQ	Programa de comunicação instantânea pela Internet
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IFS	<i>Interframe space</i>
IGMP	<i>Internet Group Management Protocol</i>
IMAP	<i>Internet Message Access Protocol</i>
IMAPS	<i>Internet Message Application Protocol</i>
IMS	<i>Internet Multimedia Subsystem</i>
Internet	Rede mundial de computadores que usa o protocolo IP
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPTV	<i>Internet Protocol television</i>
IPv6	Versão seis do protocolo IP
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LCC	<i>Logical link control</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>

MAC	<i>Medium access control</i>
MIMO	<i>Multiple-input multiple-output</i>
MPDU	<i>MAC layer protocol data units</i>
MSNP	<i>Microsoft Notification Protocol</i>
NetBIOS	Interface comunicação entre máquinas
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
P2P	Conexão ponto a ponto (<i>peer-to-peer</i>), em que os terminais tem função tanto de servidor quanto cliente
PC	<i>Point coordinator</i>
PCF	<i>Point coordination function</i>
PDU	<i>Protocol data unit</i>
PHY	Camada física
PIFS	<i>Point coordination function interframe space</i>
PLCP	<i>Physical layer convergence procedure</i>
PMD	<i>Physical medium dependent sublayer</i>
POP3	<i>Post Office Protocol v3</i>
POP3S	<i>Post Office Protocol 3 over TLS/SSL</i>
PRP	<i>Probe Response</i>
PRQ	<i>Probe Request</i>
PS Poll	<i>Power Save Poll</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
R/S	<i>Rescaled adjusted range statistics $R(d)/S(d)$</i>
R1	Topologia de Rede 1
R2	Topologia de Rede 2
R3	Topologia de Rede 3
RRP	<i>Reassociation Response</i>
RRQ	<i>Reassociation Request</i>

RTS	<i>Request to Send</i>
SG	Simulações sem tráfego de gerenciamento
SIFS	<i>Short interframe space</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SNMP	<i>Simple Network Management Protocol</i>
SSH	<i>Secure Shell</i>
TCP	Transmission Control Protocol
TL	Carga de tráfego leve
TP	Carga de tráfego pesado
UDP	User Datagram Protocol
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
VTP	<i>Variance Time Plot</i>
Web	Aplicação de transferência de documentos em hipermídia (vídeos, sons, hipertextos e figuras) que são interligados e executados na Internet.
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
XMPP	<i>Extensible Messaging and Presence Protocol</i>

1 INTRODUÇÃO

A última década testemunhou uma grande popularização das redes sem fio. É cada vez mais comum o uso de dispositivos móveis, sejam eles aparelhos celulares, computadores portáteis, dentre outros. Essas redes oferecem aos seus usuários a possibilidade de se mover com liberdade ao longo de sua região de cobertura e enquanto se mantém o acesso a diversas aplicações.

Com o incremento do número de usuários, surgem novas necessidades de produtos e os mercados se expandem. A atração nos produtos se baseia no suporte a diversas aplicações. Quanto maior a quantidade de aplicações e usuários, é gerado mais volume e tipos de tráfego que podem apresentar novos desafios às tecnologias atuais.

Existe uma forte tendência de que a Internet venha a ser vista como uma rede única que integra de forma transparente diferentes tecnologias e aplicações. Nesse contexto, o usuário terá o domínio do uso de seu ambiente de aplicação. Tecnologias novas surgem dessas tendências, entre as quais pode-se mencionar a Internet das coisas (SIORPAES et al., 2004) e Internet do futuro (PAUL et al., 2008). A visão é que a mobilidade e ubiquidade (ou seja, presença em todos os lugares) sejam elementos intrínsecos a essas tecnologias.

A expectativa é que as redes locais sem fio e de telefonia celular misturem tráfegos de fontes heterogêneas. Nessas tecnologias de redes, espera-se que nos próximos anos o volume de tráfego continue a aumentar, ao seguir o mesmo padrão observado na última década (HALEPOVIC; WILLIAMSON; GHADERI, 2009). Isso fará com que muitas novas aplicações exijam maiores larguras de banda para oferecer aos usuários recursos multimídia, altos graus de interatividade e tráfego em tempo real. Dessa forma, podem-se apresentar novos desafios em analisar esse tipo de tráfego para planejar e gerenciar melhor essas redes (KARPINSKI; BELDING-ROYER; ALMEROOTH, 2007).

A natureza das redes sem fio requer um planejamento diferenciado ao das redes cabeadas. Primeiramente, os dados são transmitidos no meio aéreo, por meio de sinais eletromagnéticos. Esse meio é compartilhado pelas estações próximas, o que provoca a necessidade de uma forma de controlar o seu acesso. Além disso, as comunicações estão sujeitas a interferências e ruídos, diminuindo a probabilidade da entrega correta das informações. E, principalmente, o espectro de frequências é um recurso bastante limitado, e é necessário que se faça seu uso da maneira mais eficiente possível.

Este trabalho aborda as redes locais sem fio, baseada na família de protocolos IEEE 802.11 (GAST, 2005), que é atualmente uma das tecnologias com maior utilização. A sua principal utilização é como rede de acesso, ou seja, permitem a conexão à rede principal. Os

protocolos especificam a camada física e de enlace do modelo OSI, e inclui o protocolo de acesso ao meio. Esse protocolo assume um papel importante nas redes sem fio, pois define como e quando cada estação pode acessar o meio e está intimamente ligado ao desempenho. Além disso, as redes 802.11 especificam três tipos de quadros (dados, gerenciamento e controle) que assumem funções distintas no funcionamento da rede. Apesar de ter passado por vários níveis de evolução desde a sua primeira implementação, as redes sem fio ainda possuem um vasto campo para estudos e pesquisas.

Os recentes trabalhos de pesquisa na tecnologia 802.11 procuram identificar várias possibilidades de aprimoramento. Uma das abordagens mais relevantes é o estudo das dinâmicas dos protocolos das diversas camadas da arquitetura de rede com objetivo de atender os requisitos de qualidade de serviço (SALES et al., 2008). Alguns elementos identificados nesses estudos são a necessidade de justiça para a vazão de dados entre estações e de correção de problemas em situações de congestão e perdas dos protocolos da camada de transporte (HSU; HOU; WU, 2010; LI et al., 2009). Surgem então propostas de alterações nos protocolos e espera-se atender às garantias mínimas de aplicações, principalmente as de tempo real.

Outras propostas objetivam melhorar o desempenho dos protocolos de acesso ao meio para garantir melhores serviços para as camadas superiores (BHATIA; KUMAR, 2010; MAO et al., 2009; YANG; FU, 2009). Uma observação nestes trabalhos é que, embora vários dos protocolos precisem atender às necessidades da rede durante todo o tempo, observa-se que as condições da rede não se mantêm constantes e isso poderia introduzir novos conceitos no funcionamento desses protocolos. Surgem então modelos de protocolos que se adaptam dinamicamente às condições da rede. Eles coletam informações da rede e alteram seu comportamento baseado em um ou mais critérios, buscando otimizar a utilização dos recursos disponíveis.

Alguns outros focos de pesquisa se centram na avaliação da eficiência dos protocolos de redes sem fio (RAGHAVENDRA et al., 2010; JARDOSH et al., 2005b). Quadros de controle e gerenciamento das redes 802.11 são gerados para manter o funcionamento da porção sem fio da rede e têm sua principal função na camada de enlace. Esses quadros podem ser considerados como *overhead* pois consomem recursos mas não têm como função principal o transporte de dados das camadas superiores. Dessa forma, o ideal é que esses quadros sejam reduzidos ao mínimo necessário para que se promova uma melhor vazão de informação útil. No entanto, em situação de maior congestionamento da rede, esses quadros são gerados com a mesma dinâmica e em algumas situações podem caracterizar um tráfego desnecessário na camada de enlace. Essa situação pode ser causada pela reação do algoritmo do protocolo em determinadas ocasiões em que se ocorre uma falha na interpretação das condições da rede e tenta-se contorná-la de forma inadequada. Assim, existe um tráfego que não é estritamente necessário nas redes sem fio, e é essencial que se faça uma avaliação do seu impacto no desempenho.

A caracterização do tráfego é um aspecto crucial para o planejamento da rede. Um modelo que exprima suas características com fidelidade permite prever o comportamento da rede e seus efeitos nos parâmetros de desempenho de interesse. Leland (LELAND et al., 1994) mostrou que o modelo de *Poisson* não é adequado para caracterizar o tráfego de rede Ethernet, e que este se aproxima mais de um processo autossimilar. Desde então, vários estudos buscam identificar as características de autossimilaridade em diferentes tipos de tráfego e seu efeito no desempenho. Em relação às redes sem fio, ainda há discussões sobre a natureza estatística do tráfego. Estudos feitos em (TICKOO; SIKDAR, 2003) afirmam que o tráfego agregado não é autossimilar e é melhor descrito por outro modelo. Já outros estudos mais recentes (YU; PETROPULU, 2006; WANG; YU; MAO, 2009) revelam que esse tráfego possui autossimilaridade estatística em diversas escalas, e a agregação de diversas fontes autossimilares aumentam esse efeito. Nesta linha, espera-se que o desempenho das aplicações venha a sofrer uma forte influência deste tipo de tráfego e esse resultado não é necessariamente capturado pelos modelos atuais de desempenho em redes 802.11 (VIEIRA; BARRETO; BORDIM, 2009; BIANCHI et al., 2000).

Portanto, pode-se perceber que as pesquisas sobre as características do tráfego de redes sem fio ainda não são conclusivas e meditam um maior aprofundamento.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Este trabalho tem como objetivo estudar a caracterização do tráfego em redes sem fio e estabelecer uma relação com a eficiência do protocolo da camada de enlace em face ao desempenho de diversas aplicações.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

- Fazer um estudo exaustivo de uma série de tráfego real de rede sem fio para estabelecer um padrão estatístico que caracterize esse tráfego.
- Identificar nos padrões do tráfego elementos de possível otimização que possam ser considerados na especificação dos protocolos da camada de enlace.
- A partir da análise do tráfego e da identificação dos elementos de possível otimização nos protocolos, verificar duas hipóteses:
 1. Confirmar que o fenômeno da autossimilaridade tem um impacto nos parâmetros de qualidade de serviço em uma rede sem fio.
 2. Verificar que existe um ganho no desempenho ao se remover da rede o tráfego gerado por quadros que caracterizam um tráfego desnecessário na camada de enlace.

A metodologia utilizada neste trabalho partiu de um estudo bibliográfico para fazer um levantamento do estado da arte nos objetivos anteriormente mencionados. A partir disso, foram desenvolvidas análises minuciosas em séries de tráfego e simulações com diferentes cenários de topologias de rede e aplicações para a verificação das hipóteses levantadas.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido da seguinte forma. No capítulo 2 são mostrados os principais conceitos de redes de comunicação sem fio. São apresentadas as características das redes IEEE 802.11 e as áreas de pesquisa envolvendo essas redes.

No capítulo 3 são abordados conceitos de engenharia de tráfego, aplicando-se a redes sem fio. São discutidos os modelos de caracterização de tráfego que apresentam autossimilaridade e dependência de longa duração.

No capítulo 4 é feito o estudo taxonômico do tráfego coletado em rede real de grande porte. O estudo compreende o levantamento da composição e das características do tráfego e a caracterização como um processo autossimilar.

O capítulo 5 apresenta a parte experimental desse trabalho. São especificados, justificados e detalhados os diferentes ambientes de simulação que permitirão a verificação das hipóteses levantadas.

No capítulo 6 são realizadas as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

2 TECNOLOGIAS DE REDES SEM FIO

Este capítulo tem como objetivo introduzir conceitos relacionados a redes de comunicação sem fio, mostrando as principais características destas tecnologias e as principais áreas de estudos. Serão abordados conceitos de redes telefonia celular e redes locais IEEE 802.11 que constituem parte da base teórica deste trabalho.

2.1 INTRODUÇÃO A COMUNICAÇÕES SEM FIO

Sem fio é uma expressão usada para descrever a forma de comunicação em que ondas eletromagnéticas (no lugar de qualquer tipo de cabeamento) transportam o sinal através de parte ou de todo o caminho da comunicação no espaço aberto. Ao longo das últimas décadas, os avanços nas tecnologias sem fio levaram a sistemas como o rádio, a televisão, a telefonia celular, comunicações via satélite, etc. Recentemente, a maior parte das pesquisas tem se dado nas comunicações via satélite, nas redes sem fio de dados e na tecnologia celular (STALLINGS, 2002).

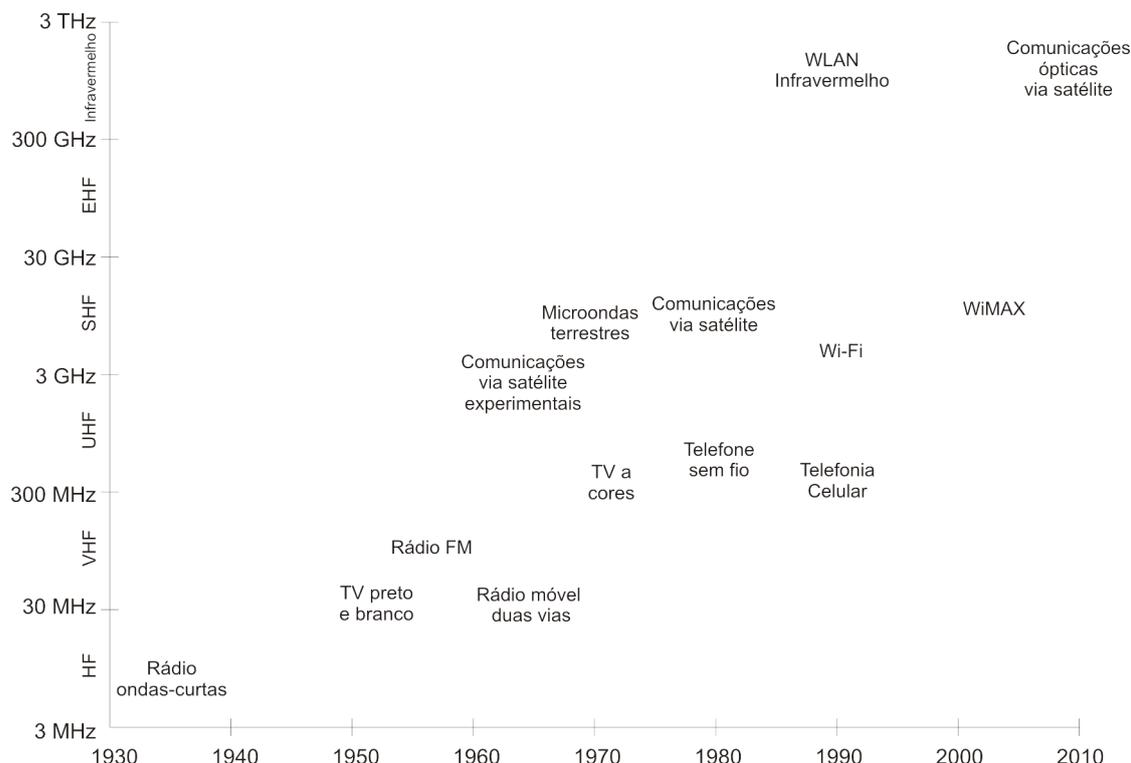


Figura 2.1: Evolucao das redes sem fio (STALLINGS, 2002, modificada)

A figura 2.1 mostra alguns dos marcos chave no desenvolvimento das comunicação sem fio. As tecnologias migraram gradualmente para frequências mais altas, que permitem suporte a

maiores taxas de transmissão e vazão.

A vantagem direta obtida com uma rede sem fio é a mobilidade. Os usuários podem se conectar a essas redes e se mover livremente dentro de sua área de cobertura. Além disso, possuem um alto grau de flexibilidade, pois permite a adição de novos usuários com pouco impacto na infra-estrutura existente (GAST, 2005).

Os sistemas sem fio fazem uso do espectro eletromagnético para transmitir informações através de canais de rádio. O espectro eletromagnético é um recurso renovável que, teoricamente, pode ser usado indefinidamente, mas na prática, esse recurso é limitado. A manipulação caótica das frequências de rádio levará, pelo menos, ao seu uso ineficiente, impedindo a instauração de novos serviços e o crescimento daqueles já estabelecidos. Por esse motivo, organismos internacionais, como a União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunication Union, ITU*), buscam estabelecer padrões e acordos para uma regulação do uso do espectro de rádio, alocando frequências para serviços específicos em termos de potência irradiada e interferência.

Devido às limitações impostas pela restrição de banda eletromagnética, foram desenvolvidas tecnologias para contornar ou minimizar essa situação, sendo um dos exemplos mais significativos a tecnologia celular. Em um sistema celular a área de serviço é dividida em regiões (células), cada uma contendo um subconjunto do número total de canais disponíveis. Os canais usados em determinada célula pode ser reusada em outra célula suficientemente distante para que a interferência seja minimizada. As células podem ser estabelecidas de uma forma modular e, teoricamente, o sistema pode crescer indefinidamente.

Os sistemas celulares têm como vantagem a possibilidade da inclusão de um grande número de usuários e possuir uma ampla área de cobertura, sendo a sua principal aplicação a comunicação de voz (telefonia). Porém, os conceitos de mobilidade, flexibilidade e grandes áreas de cobertura são interessantes também para outras modalidades de comunicação, por exemplo o tráfego de dados. Com a evolução da tecnologia dos sistemas sem fio, esses conceitos continuaram sendo aplicados para o desenvolvimento de redes com capacidades de tráfego de informação cada vez maiores, tais como redes locais IEEE 802.11 e redes celulares 3G e 4G, relatadas posteriormente neste capítulo.

O aumento da capacidade de tráfego de informação em redes sem fio se dá graças a inovações dos diversos segmentos da área de telecomunicações. Sistemas móveis são complexos pois envolvem técnicas de modulação, esquemas de codificação de canal, *hardware* e *software* de equipamentos, etc. Devido a isso, existem vários temas de interesse na área de redes sem fio que podem ser divididos da seguinte forma, de acordo com (YACOUB, 1993):

- **Projeto e propagação de sistemas de rádio:** um dos objetivos dessa área é estudar detalhadamente a topografia do terreno, fornecendo informações para o planejamento de cobertura de rádio;

- **Planejamento e regulação da frequência:** devido ao fato de que apenas uma parte limitada do espectro está disponível, o plano de alocação de frequência deve ser feito cuidadosamente para que as interferências sejam minimizadas e a demanda de tráfego seja satisfeita;
- **Modulação:** nesse campo de estudos, várias tecnologias de modulação digital são analisadas tendo em vista diversos aspectos, tais como as características do canal, largura de banda disponível, interferências, taxa de transmissão e etc.;
- **Antena:** os sistemas mais antigos usavam apenas antenas omnidirecionais, mas o aumento da demanda de tráfego exigiu que as células fossem divididas em setores e por isso, antenas direcionais foram necessárias. A cada dia, os sistemas móveis demandam antenas mais complexas e isso demanda por conseguinte novos estudos e pesquisas;
- **Planejamento de transmissão e transição:** vários aspectos podem ser considerados aqui, tais como as estruturas dos canais usados para sinalização e voz/dados, as características das mensagens transmitidas, e o desempenho dos componentes dos sistemas de transmissão (capacidade de energia, ruído, largura de banda, estabilidade, etc.). Também pode ser incluído o projeto dos transmissores e receptores que deve considerar a robustez e a portabilidade, assim como a integração com outros sistemas;
- **Engenharia de tráfego:** Uma das maneiras de verificar o desempenho do sistema é estimar, por exemplo, a probabilidade de bloqueio. Consequentemente, os conceitos de engenharia de tráfego para garantia de qualidade de serviço (*Quality of Service*, QoS) são necessários. Uma das possibilidades é estabelecer estratégias de roteamento para promover um aumento do desempenho do tráfego e métricas de QoS.
- **Desenvolvimento de *software*:** *Softwares* para dispositivos móveis, estações base, portabilidade e gerência de suporte a decisões em sistemas móveis.
- **Estratégias de economia de energia:** a limitação de capacidade de energia dos dispositivos móveis exige o desenvolvimento de equipamentos de baixo consumo energético, baterias menores e de maior capacidade e protocolos planejados para evitar o desperdício de energia.

Outros aspectos, tais como fatores humanos e sociais, econômicos, políticos, tecnológicos também influenciam fortemente o planejamento de sistemas móveis.

No próximo tópico serão abordadas conceitos e a evolução das principais tecnologias de redes celulares.

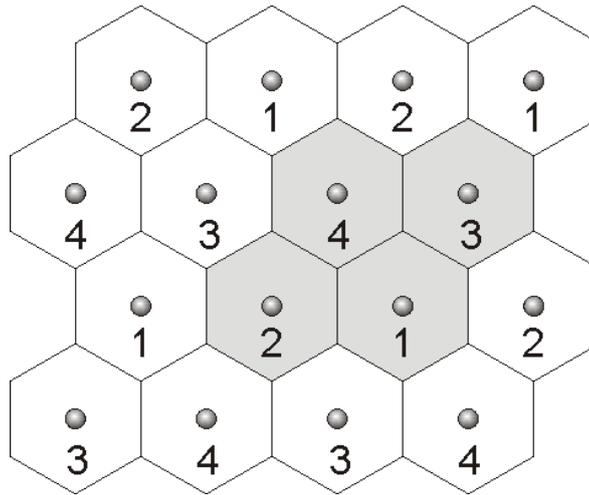


Figura 2.2: Organização de uma rede celular e reuso de frequências

2.2 REDES CELULARES

O princípio básico de uma rede celular é o uso de múltiplos transmissores de baixa potência, fazendo com que seu alcance seja pequeno. Dessa forma, uma área é dividida em células, cada uma servida por sua própria antena. Cada célula possui uma banda de frequências e é servida por uma estação base, que consiste no transmissor, receptor e unidade de controle. Células adjacentes operam em faixas diferentes de frequência para evitar interferência, mas células suficientemente distantes podem usar a mesma faixa. A figura 2.2 mostra um esquema simples de sistema celular, com células em formato hexagonal, que permite uma boa abrangência de cobertura, e um exemplo da distribuição de faixas de frequência. Nesse modelo forma-se grupos de quatro células em que todos os canais disponíveis são distribuídos entre essas células. Por exemplo, supondo que se tenha disponíveis os canais 1, 2, 3 e 4, cada um é distribuído para uma célula desse grupo. Esses mesmos canais podem ser distribuídos entre outros grupos, e a configuração da rede garante que células que operem no mesmo canal estejam suficientemente distantes para minimizar a interferência, conforme pode ser visto na figura.

Um ponto importante característico de redes celulares é que os usuários não percebem as transições entre células enquanto se movimentam ao longo da área de cobertura. Se uma unidade móvel transita para fora do alcance de uma célula em direção a outra durante uma conexão, o tráfego deve mudar para a estação base da nova célula, em um processo chamado *handover*.

Todos esses aspectos compõem alguns dos conceitos chave dos sistemas celulares. A sua implantação real pode ser dividida em gerações conforme o avanço da tecnologia cujas características estão sintetizadas na tabela 2.1.

A primeira geração de telefonia celular, chamada por alguns autores de 1G, foi introduzida

Tabela 2.1: Evolução da tecnologia celular (HALEPOVIC; WILLIAMSON; GHADERI, 2009, modificada)

Ano	Geração	Suporte a tráfego	Taxa de pico
Pré 1990	1G	Voz analógica	-
1991	2G (GSM, IS-95)	Voz digital, SMS, Dados por circuito	9,6-14,4 kbps
1999	2.5G (GPRS, cdmaOne)	Voz melhorada, Dados por pacotes e circuito	115 kbps
2002	3G (WCDMA, EDGE, CDMA2000 1xRTT)	Voz melhorada, Dados por pacotes, Multimídia	384 kbps-2 Mbps
2003	3.5G (UMTS, EV-DO)	Voz sobre IP, Dados por pacotes, MMS, multimídia	2-3 Mbps
2010 (est.)	4G (HSDPA, HSUPA, EV-DO Rev. B, LTE)	<i>All-IP, Internet Multimedia Subsystem (IMS)</i>	10-100 Mbps

na década de 1980 e tinha como principal característica o fato de ser uma rede analógica. Embora a sinalização com as torres de rádio fossem digitais, a comunicação de voz propriamente dita era feita de forma analógica, onde o sinal apenas era modulado para uma frequência mais alta. Essa rede não previa a possibilidade de comunicação de dados, e enfrentava diversas limitações, tais como problemas de segurança e privacidade e o uso ineficiente do espectro eletromagnético, o que limitava o número de usuários. Esses problemas foram resolvidos com a chegada da segunda geração de tecnologia celular.

Ao longo dos anos 90, os padrões 2G substituíram as redes analógicas com tecnologia de voz digital tornando-se bem estabelecida em todo o mundo, principalmente através das redes *Global System for Mobile Communications (GSM)* e *Code-Division Multiple Access (CDMA)*. Essas tecnologias, que são incompatíveis entre si, diferem das tecnologias predecessoras por usar canais digitais tanto na sinalização quanto para a voz. Além disso, o sistema permite a transmissão de dados a uma velocidade de até 9,6 kbit/s (GSM) ou 14,4 kbit/s (CDMA) e o envio de SMS (*Short Message Service*). A transmissão de dados é feita por comutação de circuito, onde certa parte da banda entre dois pontos é reservada durante a vida da conexão, da mesma forma que as chamadas telefônicas tradicionais alocam um canal de áudio entre dois telefones durante a chamada.

Com o passar do tempo, as redes sofreram evoluções e passaram a ter maior taxa de transmissão de dados, comutação por pacotes além de melhoria nas chamadas de voz. Novos padrões de modulação e codificação surgiram e deram origem à terceira geração de telefonia celular, ou 3G. Sua taxa de transmissão de 2 a 3 Mbit/s permite melhor desempenho para tráfego de dados multimídia e a possibilidade de comunicação de voz sobre IP. Assim, essa nova tecnologia tornou-se atrativa não apenas para aparelhos de telefone celular, mas também a diversos dispositivos que combinam mobilidade com grande fluxo de informação.

A integração de redes celulares com a *Internet* é o principal objetivo das tecnologias 4G, baseado no *Internet Multimedia Subsystem (IMS)*. Cotado por muitos como o próximo passo da tecnologia celular, o *Long Term Evolution (LTE)* busca transformar a tecnologia

celular em uma plataforma totalmente IP, oferecendo comunicação de voz sobre IP, excelente suporte a dados multimídia e taxas de transmissão teórica de até 200 Mbit/s. Com isso, a comutação por circuitos seria suprimida, tendo em vista que todo tráfego passaria a ser encaminhado por pacotes.

Apesar de as redes celulares terem evoluído para alcançar taxas cada vez maiores de tráfego de informação, o objetivo deste tipo de rede não é trazer para os ambientes móveis os usuários de redes cabeadas. Redes celulares caracterizam-se por oferecer suporte a grande mobilidade e disponibilidade, sendo que suas aplicações geralmente demandam menores taxas se comparadas às aplicações de computadores fixos. Com o surgimento e popularização de computadores portáteis (*notebooks*) criou-se um novo perfil de usuários móveis. Esses usuários têm necessidade de maior taxa de transmissão/recepção mas possuem uma baixa mobilidade, geralmente restritos a pequenos espaços geográficos como ambientes empresariais, escolas, faculdades e residências. Nesse contexto, foram estabelecidas as chamadas redes locais sem fio, que, em comparação às redes celulares, têm como principais características maiores taxas de transmissão, menor área de cobertura, número reduzido de usuários e uso de faixas de frequência não licenciadas. A seção seguinte apresenta uma visão geral sobre redes locais e redes locais sem fio e suas aplicações.

2.3 REDES LOCAIS SEM FIO

Uma rede local (*local area network*, LAN) é definida como uma rede onde equipamentos (*hardware* e *software*) estabelecem comunicação entre si trocando e compartilhando informações e recursos, cobrindo uma área pequena e limitada. Da mesma forma, rede local sem fio (*wireless LAN*, ou WLAN) faz uso do meio de transmissão sem fio para comunicação de equipamentos. WLANs estão se tornando cada vez mais populares pois oferecem altas taxas de dados, baixo custo, sistemas de segurança da comunicação e utilização de bandas não licenciadas.

Em (PAHLAVAN; PROBERT; CHASE, 2002) são listadas quatro aplicações para WLANs: extensão de LAN; interconexão entre edifícios; acesso nômade e redes *ad hoc*.

- **Extensão de LAN:** serve como substituição das redes cabeadas tradicionais, diminuindo o custo de instalação de cabos e facilita a tarefa de realocação e outras modificações na estrutura da rede. É particularmente útil em áreas onde não se é possível ou viável a instalação de uma LAN cabeada como edificações históricas, prédios com grandes áreas abertas, escritórios onde a instalação de uma infraestrutura cabeada não é praticável economicamente e residências. Na maioria dos casos a rede possuirá uma parte cabeada para suportar servidores e algumas estações físicas.

A figura 2.3 mostra uma configuração comum de uma WLAN composta por mais de

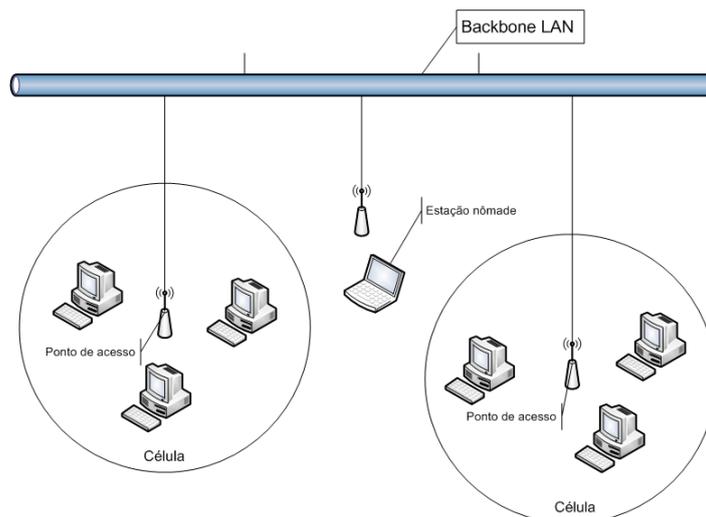


Figura 2.3: Rede local sem fio estruturada

uma célula. Cada célula é determinada por um ponto de acesso (*Access Point*, AP) que suporta um número determinado de terminais móveis dentro de sua área de cobertura. Esses pontos de acesso são interligados através da rede cabeada.

- **Interconexão entre edifícios:** as WLANs podem ser usadas para conectar redes de prédios vizinhos. Neste caso, um enlace sem fio ponto-a-ponto é usado entre os dois edifícios. Apesar de não ser uma LAN propriamente dita, este tipo de enlace também se enquadra nas aplicações WLAN.
- **Acesso nômade:** nesse tipo de acesso a conexão entre pontos de acessos e um terminal móvel equipado com uma antena, como *notebook* ou *notepad*. Os usuários podem mover-se com seu computador móvel e acessar recursos da rede a partir de diversas localizações. A figura 2.3 mostra uma estação nômade que pode se mover de uma célula a outra.
- **Redes *ad hoc*:** trata-se de uma rede ponto-a-ponto (sem servidor centralizado) estabelecida temporariamente para atender alguma necessidade imediata. Por exemplo, um grupo de funcionários, cada um com seu dispositivo móvel, estabelecem uma rede *ad hoc* para compartilhar informações durante uma reunião. A figura 2.4 ilustra uma rede não estruturada formada por um conjunto de dispositivos móveis interligados dinamicamente.

2.3.1 Características de redes locais sem fio (WLAN)

Um rede local sem fio (WLAN) precisa atender diversos requisitos igualmente a qualquer rede local, incluindo alta capacidade, conectividade entre os nós e suporte a *broadcast*. Adicionalmente, (STALLINGS, 2002) define um conjunto de requisitos específicos de WLANs, sendo as mais importantes:

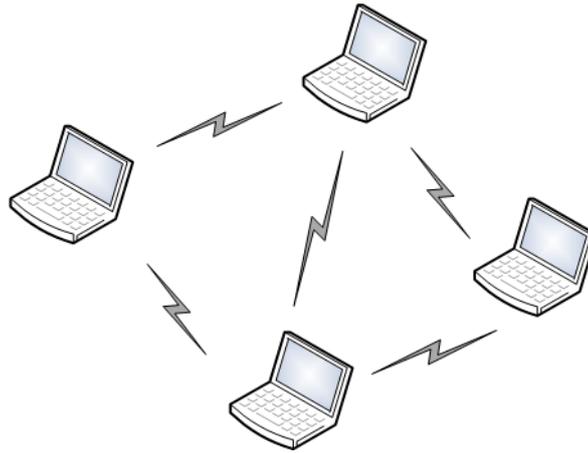


Figura 2.4: Exemplo de rede ad hoc

- **Taxa de transmissão:** o protocolo de controle do acesso ao meio deve fazer o uso deste da forma mais eficiente possível para maximizar a capacidade.
- **Número de nós:** WLANs devem suportar centenas de nós ao longo de múltiplas células.
- **Conexão ao backbone LAN:** na maioria dos casos, é necessária alguma forma de conexão das estações ao *backbone* da rede LAN. Geralmente os pontos de acesso são interligados à parte cabeada da rede.
- **Área de serviço:** envolve a delimitação da área de cobertura de uma WLAN, que geralmente apresenta diâmetro de 100 a 300 metros.
- **Consumo de energia da bateria:** estações móveis geralmente utilizam-se de baterias como fonte de energia. Devido a esse recurso ser limitado, implementações típicas de WLANs precisa ter funções que reduzam o consumo de energia das comunicações.
- **Robustez e segurança da transmissão:** as WLANs estão sujeitas a problemas de interferência e ao vazamento de informação. O projeto desse tipo de rede deve permitir a confiabilidade da transmissão mesmo em ambientes ruidosos e oferecer segurança contra sistemas que escutam o ambiente indevidamente.
- **Operação em faixas não licenciadas:** é aconselhável a utilização de equipamentos que operem em faixas de frequência não licenciadas devido a problemas burocráticos e em relação aos custos de implantação.
- **Migração:** os protocolos de acesso ao meio sem fio devem permitir que as estações móveis se desloquem de uma célula a outra.
- **Configuração dinâmica:** o gerenciamento das WLANs devem permitir a dinâmica e automatizada adição, remoção e realocação dos sistemas sem interrupção dos outros usuários.

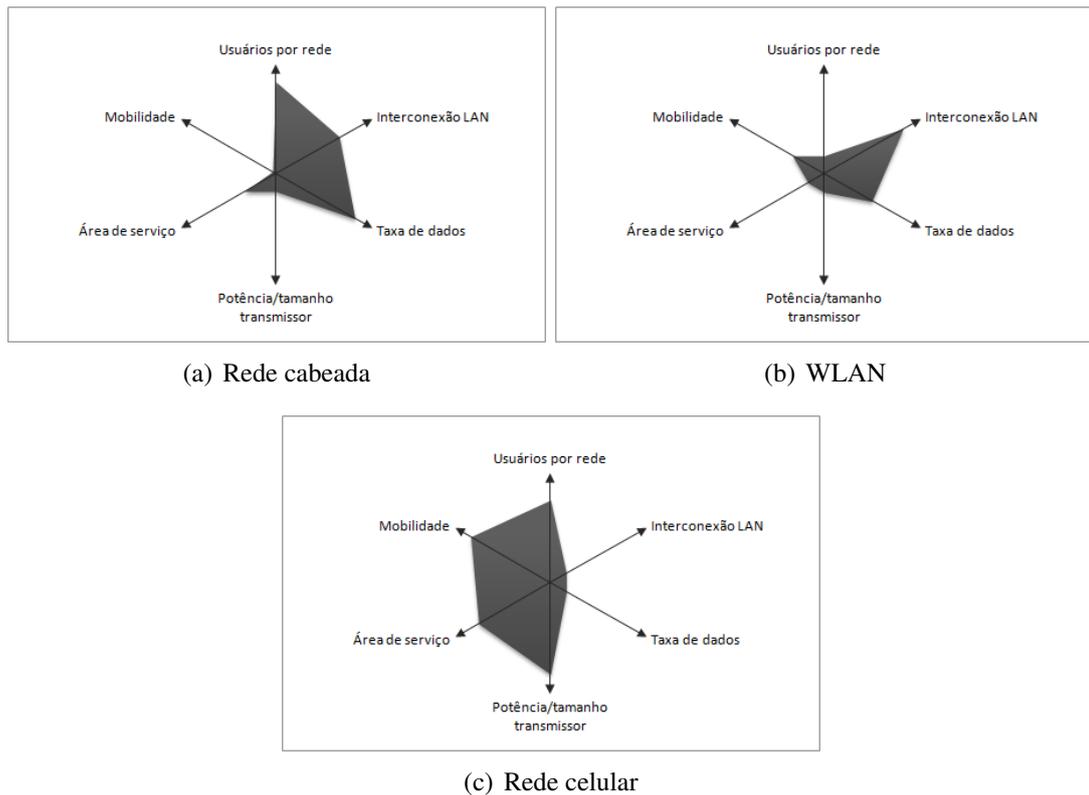


Figura 2.5: Gráficos com características de redes de dados (STALLINGS, 2002, modificada)

A figura 2.5 faz uma comparação ilustrativa entre as redes locais cabeadas e sem fio com redes celulares. Pode-se observar que as redes cabeadas possuem como pontos fortes altas taxas de transmissão, alta interconexão entre redes e grande número de usuários, mas pecam pela mobilidade e área de cobertura. As redes locais sem fio por sua vez oferecem uma mobilidade um pouco maior, ainda com taxas de transmissão relativamente altas, mas com poucos usuários. No caso das redes celulares, é possível a inclusão de muitos usuários, com alta mobilidade e grande área de cobertura. No entanto, estas possuem baixa conectividade com outras redes e as taxas de transferência são muito menores.

A próxima sessão discorre sobre as redes locais sem fio baseadas nos protocolos IEEE 802.11, que consiste na família de padrões com maior implantação e por isso é o objeto de estudo deste trabalho.

2.4 TECNOLOGIAS IEEE 802.11

Atualmente as redes locais sem fio definidas pela família de padrões IEEE 802.11 têm uma ampla utilização principalmente como redes de acesso. O IEEE 802.11 define a camada física e a camada de controle de acesso ao meio tanto no modo de infraestrutura (com pelo menos um ponto central de acesso conectado a uma rede cabeada) quanto no modo *ad hoc* (em que um conjunto de estações sem fio comunicam-se diretamente umas com as outras sem

Tabela 2.2: Evolução da rede WiFi (HALEPOVIC; WILLIAMSON; GHADERI, 2009, modificada)

Protocolo WiFi	Ano da ratificação	Freq. (GHz)	Taxa máx (Mbps)	Alcance máx (m)
802.11	1997	2,4	1-2	≈ 100
802.11a	1999	5	54	≈ 100
802.11b	1999	2,4	11	≈ 130
802.11g	2003	2,4	54	≈ 130
802.11n	2009	2,4 e 5	248 a 600	≈ 250

necessidade de um ponto central ou conexão à rede fixa). A tecnologia original passou por diversas evoluções sendo que as versões mais importantes são as 802.11a, b, g e n, conforme tabela 2.2.

O padrão original 802.11, ainda baseado em produtos experimentais, permitia uma taxa máxima de 2 Mbit/s. Seu rádio opera na faixa de frequência não licenciada de 2,4 GHz. A potência máxima de transmissão isotrópica permitida para essa banda é de $1W$, mas os dispositivos geralmente estão limitados a $100mW$.

A camada física do 802.11 padronizada originalmente especifica três técnicas de transmissão sem fio: infravermelho; espalhamento espectral por saltos em frequência (*frequency-hopping spread spectrum*, FHSS); e espalhamento espectral por sequência direta (*direct sequence spread spectrum*, DSSS).

- **Infravermelho:** uma célula individual é limitada à área em que os equipamentos possam visada direta. O seu uso não foi bem aceito pelo público.
- **Espalhamento espectral por saltos em frequência (FHSS):** este foi o primeiro passo para a evolução ao DSSS e técnicas de transmissão mais complexas. A ideia é transmitir em uma dada frequência por um breve espaço de tempo e alternar para outra frequência de acordo com um padrão pré definido. Toda a banda 2,4GHz é dividida em canais espaçados por 1MHz e o transmissor deve alternar entre os canais pelo menos 2,5 vezes por segundo. Isso permite lidar melhor com interferências em banda estreita assim como interferência mútua de duas estações próximas.

O FHSS é bastante estável a interferências, possui baixo custo e é uma técnica de transmissão de dados simples. Não é muito utilizada em WLANs atuais devido às crescentes necessidades de taxas de transmissão mais altas.

- **Espalhamento espectral por sequência direta (DSSS):** é uma das mais bem-sucedidas técnicas de transmissão, utilizada também em redes celulares (CDMA) e nos Sistemas de Posicionamento Global (*Global Positioning Systems*, GPS). O princípio básico é combinar o dado a ser transmitido com uma sequência de bits pseudo-aleatória a uma alta taxa. O sinal transmitido possui grande robustez em relação a interferência e pode ser decodificado pelo receptor utilizando-se a mesma sequência de bits utilizada pelo transmissor. O DSSS 802.11 separa a banda do canal 2,4GHz em 11 canais

com sobreposição espaçados em 5MHz. O transmissor envia símbolos a um taxa de 11Mbps, que requer uma banda de 22MHz. O 802.11 não usa dos benefícios de múltiplas seqüências de código, assim apenas três canais não sobrepostos podem operar simultaneamente sem interferência.

O padrão original foi o primeiro passo do estabelecimento das redes 802.11, mas a tecnologia apenas se popularizou através do revolucionário padrão IEEE 802.11b. Essa nova versão do padrão, que ganhou o nome comercial Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), passou a oferecer uma taxa máxima de 11 Mbps, graças a adoção do *Complementary Code Keying* (CCK), além de ter um alcance levemente maior em ambientes internos (*indoor*). O seu baixo custo de implementação, interoperabilidade e facilidade de configuração levaram a uma massiva adoção mundial. Porém, o padrão opera na banda de frequência não licenciada de 2,4GHz e sofre interferência de outros dispositivos que trabalham na mesma frequência.

O 802.11a é baseado no padrão original e foi ratificado concorrentemente com o 802.11b no ano de 1999. Ele introduziu às WLANs uma nova técnica de modulação chamada *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), permitindo maior transmissão de dados em menores bandas de frequência. O 802.11a não é compatível com os equipamentos 802.11b pois opera na banda de frequência de 5GHz. Apesar de ter uma maior taxa de transmissão, chegando a até 54Mbps, o seu alto custo e área de cobertura relativamente menor impediram sua ampla implantação.

Lançado em 2003, o 802.11g combinou as melhores características de seus predecessores, oferecendo taxas de até 54 Mbps (também utilizando OFDM) com boa área de cobertura e baixo custo. Também é compatível com o 802.11b sendo que, para se comunicar com equipamentos deste tipo, a taxa é limitada a 11 Mbps.

Embora já existissem equipamentos baseados na versão “*draft*”, a versão oficial do 802.11n (próximo passo da evolução do 802.11) foi oficializada apenas em 2009. Com expectativa de substituir as tecnologias b e g, o 802.11n traz a técnica múltiplas-entradas e múltiplas-saídas (*multiple-input multiple-output*, MIMO) para fornecer altas taxas de transferência de dados. O MIMO combina a transmissão em canais separados para trazer às redes WiFi taxas de até 250Mbps, muito embora haja a expectativa de que possa atingir até 600Mbps. Também foram feitas revisões no *overhead* gerado na rede pelos protocolos para que as transmissões fossem feitas de forma mais eficiente, proporcionando um melhor aproveitamento na interface aérea e reduzindo o consumo de energia.

A evolução do WiFi se deu tendo em foco as aplicações que gerem tráfego de natureza em rajadas, ou seja, orientadas ao *throughput*, tais como transferência de arquivos, *email* e navegação Web que são aplicações que não exigem comunicação em tempo real. O aumento das taxas de dados acaba atraindo também o *streaming* de dados multimídia, mas os canais sem fio não são amigáveis ao tráfego em tempo real devido a perdas aleatórias, maiores

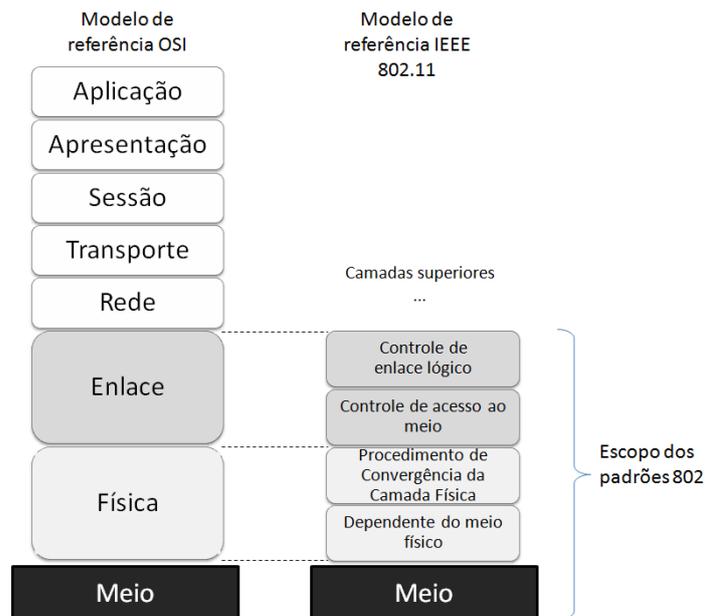


Figura 2.6: Arquitetura 802

atrasos e acesso baseado em contenção. A tecnologia WiFi se desenvolveu significativamente em relação à taxa de transmissão, mas ainda existem desafios em relação à área de cobertura, mobilidade e suporte a tráfego em tempo real.

2.4.1 Arquitetura 802.11

A figura 2.6 mostra a equivalência dos protocolos LAN com a arquitetura OSI. Visualizando de baixo para cima, a camada mais baixa do modelo corresponde à camada física do modelo OSI e diversas funções, tais como:

- Codificação e decodificação dos sinais (ex. PSK, QAM, etc.);
- Geração e remoção de preâmbulo (para sincronização);
- Transmissão e recepção de bits.

No 802.11, a camada física é dividida em duas subcamadas:

- **Procedimento de convergência da camada física (*Physical layer convergence procedure, PLCP*):** Define o método de mapeamento dos *MAC layer protocol data units* (MPDUs) em um formato de quadro adequado para o envio e recebimento dos dados e gerenciamento de informações entre duas ou mais estações usando a subcamada PMD associada;
- **Dependente do meio físico (*Physical medium dependent sublayer, PMD*):** Define as características e o método de transmissão e recebimento de dados através do meio sem fio entre duas ou mais estações.

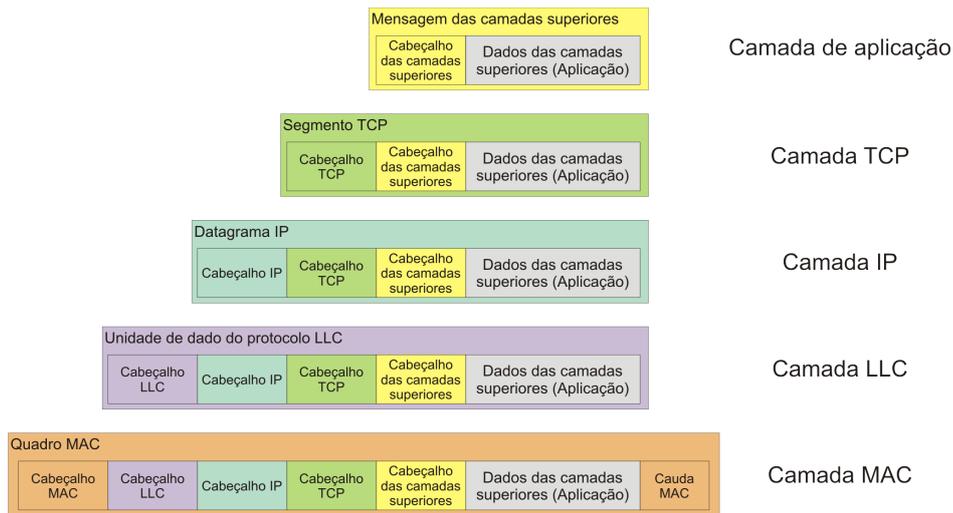


Figura 2.7: Encapsulamento na arquitetura 802.11

Acima da camada física estão funções associadas com o fornecimento de serviço para os usuários da LAN, que são funções tipicamente associadas com a camada de enlace do modelo OSI. Nesse modelo, existem duas subcamadas:

- **Controle de acesso ao meio (*Medium access control, MAC*):** Na transmissão, monta os dados no quadro com endereço e campos para correção de erros; na recepção, desmonta o quadro e faz o reconhecimento de endereço e detecção de erro; gerencia o acesso ao meio de transmissão;
- **Controle de enlace lógico (*Logical link control, LCC*):** Provê uma interface com as camadas superiores e atua no controle de fluxo e erro.

A figura 2.7 mostra o encapsulamento dos dados relacionando com os níveis da arquitetura. O bloco de dados de alto nível (formado pelos dados da aplicação encapsulados pelas camadas TCP e IP) são passados para o LCC, que adiciona um cabeçalho com informações de controle, criando um *LCC protocol data unit (PDU)*. Essa informação de controle é usada na operação do protocolo LCC. O bloco formado por todo PDU é então passado para a camada MAC, que adiciona informações de controle tanto na frente quanto no final do pacote, formando um quadro MAC. Da mesma forma, as informações de controle no quadro são necessárias para operação do protocolo MAC.

Dentre os elementos especificados pelo IEEE 802.11, o controle de acesso ao meio (MAC) possui suma importância pois define a forma e período de utilização do canal por cada estação de forma a evitar colisões. Para que isso aconteça, uma série de mecanismos são utilizados para promover o controle do trânsito de informações. A seguir estão as principais características do funcionamento do MAC em redes sem fio 802.11.

2.4.2 Controle de acesso ao meio (MAC)

O grupo de trabalho do 802.11 considerou dois tipos de propostas para o algoritmo MAC: protocolos de acesso distribuído, em que a decisão de transmitir é compartilhada entre todos os nós usando um mecanismo de escuta ao meio; e protocolos de acesso centralizado, em que a regulação da transmissão é feita por um tomador de decisões central. A primeira proposta trata-se da função de coordenação distribuída (*distributed coordination function*, DCF). A DCF usa um algoritmo de contenção para prover acesso a todo tráfego. Tráfego assíncrono ordinário usa a DCF diretamente. A outra proposta define a função coordenada central ou pontual (*point coordination function*, PCF), que é um algoritmo MAC centralizado usado para prover um serviço livre de contenção. A PCF é prioritário em relação à DCF de forma a garantir o acesso de seus usuários.

2.4.2.1 Função de Coordenação Distribuída (DCF)

A DCF faz uso de um simples algoritmo CSMA (*carrier sense multiple access*), que funciona da seguinte maneira. Se uma estação possui um quadro MAC para ser transmitido, ela irá escutar o meio. Se o meio está ocioso, a estação poderá transmitir; caso contrário a estação deverá esperar até que a transmissão atual se complete antes que possa transmitir.

Para garantir o funcionamento adequado do algoritmo, o DCF inclui um conjunto de intervalos de tempo para atraso que retoma a um esquema de prioridades. Para facilitar o entendimento, considera-se a princípio apenas um atraso conhecido como *interframe space* (IFS). Usando o IFS, o funcionamento do CSMA se dá da seguinte forma:

1. A estação com um quadro a ser transmitido sonda o meio. Se este estiver ocioso, a estação espera para ver se o meio ainda permanece livre por um tempo igual a IFS. Se estiver, a estação começa a transmitir.
2. Se o meio estiver ocupado, a estação adia a transmissão e continua a monitorar o meio até que a atual transmissão acabe.
3. Uma vez que a atual transmissão esteja terminada, a estação atrasa novamente por IFS. Se o meio ainda estiver livre neste período, a estação espera por um intervalo tempo aleatório de *backoff* e volta a sondar o meio. Caso ainda esteja ocioso, a estação pode transmitir. Se durante o tempo de *backoff* o meio for ocupado, este tempo é pausado e retomado quando o meio estiver livre.
4. Se a transmissão não for bem-sucedida, então é assumido que ocorreu uma colisão. A verificação do sucesso da transmissão é feita através de quadros de confirmação (*acknowledgment*), explicados mais a frente.

O esquema anterior é refinado para a DCF para prover acesso baseado em prioridade pelo

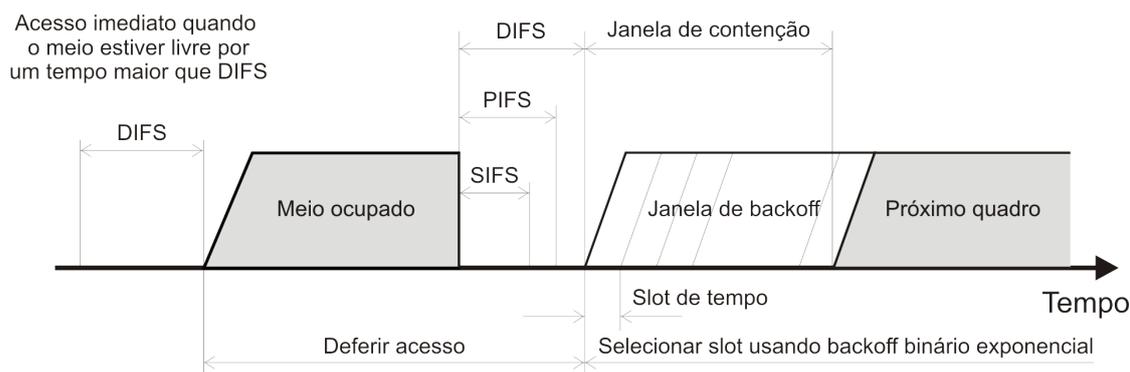


Figura 2.8: Intervalos de tempo IFS

simples emprego de três valores de IFS:

- **SIFS (*short IFS*):** O menor IFS, usado para todas as respostas imediatas a ações, assunto que será tratado posteriormente neste capítulo.
- **PIFS (*point coordination function IFS*):** Um IFS intermediário, usado pelo controlador centralizado no esquema PCF.
- **DIFS (*distributed coordination function IFS*):** O maior IFS, usado como o atraso mínimo para o acesso de quadros assíncronos.

A figura 2.8 ilustra o uso desses valores de tempo, sendo que os tempos mais curtos possuem prioridade em relação aos mais longos. Nesse caso, o SIFS, por ser menor e mais prioritário, é utilizado quando há necessidade de resposta imediata, como quadros de confirmação ou respostas à solicitação de oportunidade de transmissão.

2.4.2.2 Função Coordenada Pontual (PCF)

Na PCF, existe um elemento centralizador que coordena o acesso das demais estações. A operação consiste em um questionamento (*pooling*) por um *pooling master* centralizado (*point coordinator*, PC). O PC faz uso do PIFS quando questiona as estações. Como PIFS é menor que DIFS, o PC pode se apropriar do meio e bloquear todas as transmissões assíncronas enquanto questiona as estações e recebe respostas. Este modo de funcionamento permite um controle centralizado do canal e possibilita oferecer garantias de acesso às estações e ao tráfego mais sensível.

2.4.3 Os processos de associação e *handoff*

O processo de associação se dá da seguinte forma. O cliente que deseja participar da rede começa se autenticando no ponto de acesso (AP). Depois da autenticação, o cliente envia uma requisição de associação incluindo as capacidades de rádio, como as taxas suportadas.

O AP aloca recursos para o cliente e envia suas próprias informações. Uma vez que o cliente esteja associado, pode se comunicar com outros clientes através do AP assim como outros sistemas no lado de distribuição do AP.

Um processo de *handoff* se inicia quando um cliente se move e perde conectividade com o AP. Ele então começa a buscar informações dos outros AP's da vizinhança enviando mensagens de sonda em *broadcast*. O cliente recebe respostas de potencialmente múltiplos AP's, e baseado em alguma política, envia requisições de reassociação para um dos AP's. No caso de aceitação, o cliente está associado ao novo AP.

Um *handoff* como descrito pode ser dividido em quatro fases: i) *triggering*; ii) descoberta; iii) seleção do AP e; iv) estabelecimento (MHATRE; PAPAGIANNAKI, 2006). Na fase de *triggering*, um *handoff* é iniciado quando um cliente identifica a necessidade de associação com outro AP. Quando a condição é atingida, o cliente coleta informações sobre os AP's na vizinhança na fase de descoberta. Na fase de seleção, o cliente identifica um AP que satisfaz algum critério específico (dependente do fabricante), normalmente a potência do sinal. Finalmente, na fase de estabelecimento, o cliente desassocia do AP atual e reassocia com o novo AP.

2.4.4 Métodos para garantia de entrega de quadros

Nos meios cabeados é razoável se pensar que, quando um dado é transmitido pelo canal, ele é recebido pelo destinatário. Em redes sem fio, no entanto, há menos certeza de que os quadros irão atingir o seu destino, pois o meio de transmissão está sujeito a ruído e interferência. Dessa forma, é necessário que o protocolo ofereça algum método que garanta que um quadro transmitido tenha sido recebido pelo outro nó. Para que isso ocorra, as especificações IEEE 802.11 incorporam confirmações positivas (*acknowledgment*, ACK), onde todos os quadros transmitidos devem ser confirmados com um aviso de recebimento, como mostra a figura 2.9. A sequência transmissão/confirmação é uma operação atômica e, se qualquer parte da transferência falha, a transmissão é considerada perdida. A utilização do intervalo de tempo SIFS para a confirmação garante que o processo não seja interrompido por outra estação que queira fazer uso do meio.

A estação emissora é responsável pela detecção dos erros de transmissão. Em alguns casos, o emissor pode inferir uma perda pela falta do quadro de confirmação do receptor. Se isso ocorrer, o quadro será retransmitido e, a cada retransmissão, um contador é incrementado. Se o limite de tentativas é atingido, o quadro é descartado e sua perda é reportada aos protocolos das camadas superiores.

Outra dificuldade característica de redes sem fio que não ocorre em redes cabeadas é o problema do nó oculto. Como as redes sem fio não possuem fronteiras bem definidas, nem sempre um nó pode se comunicar com cada nó na rede, como na figura 2.10. Na figura, o

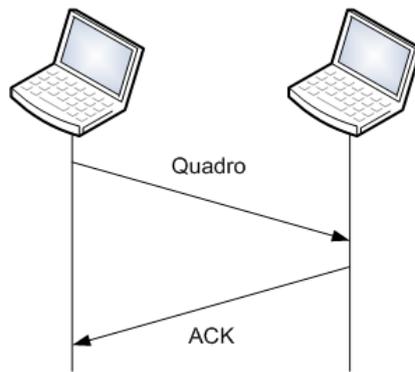


Figura 2.9: Notificação de recebimento de transmissão de dados

nó 2 está dentro do raio de alcance dos nós 1 e 3, porém estes últimos não se enxergam. Da perspectiva do nó 1, o nó 3 é um nó oculto e vice-versa. Assim, é possível que tanto o nó 1 quanto o nó 3 transmitam simultaneamente para o nó 2 causando uma colisão.

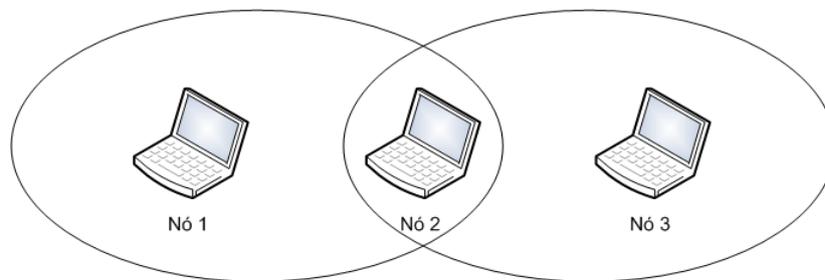


Figura 2.10: Problema de nó oculto em redes sem fio

Para prevenir as colisões devido ao problema de nós ocultos, o 802.11 possui um modo de operação que permite a uma estação solicitar permissão para transmissão (*Request to Send*, RTS) e o receptor autorizar a transmissão (*Clear to Send*, CTS). A figura 2.11 ilustra o processo, que consiste em uma operação atômica e previne que outras estações vizinhas, tanto do emissor quanto do receptor, transmitam quadros durante esse intervalo. Em contrapartida, o procedimento RTS/CTS consome uma parte da capacidade do canal, especialmente pela latência adicional antes de se transmitir os dados. Portanto esse processo deve ser utilizado em ambientes de grande capacidade com grande contenção de transmissão. Em ambientes de baixa capacidade, isso não é necessário (GAST, 2005).

2.4.5 Tipos de quadros do IEEE 802.11

A seção anterior apresentou mecanismos para contornar alguns dos problemas característicos do meio sem fio. De fato, as redes sem fio requerem um apurado conjunto de procedimentos de forma a atender aos requisitos de conectividade, confiabilidade, segurança e qualidade de serviço. Por exemplo, a adição de um novo usuário em uma rede cabeada começa pela conexão da estação a um elemento de rede (como um *switch*) por meio de um cabo.

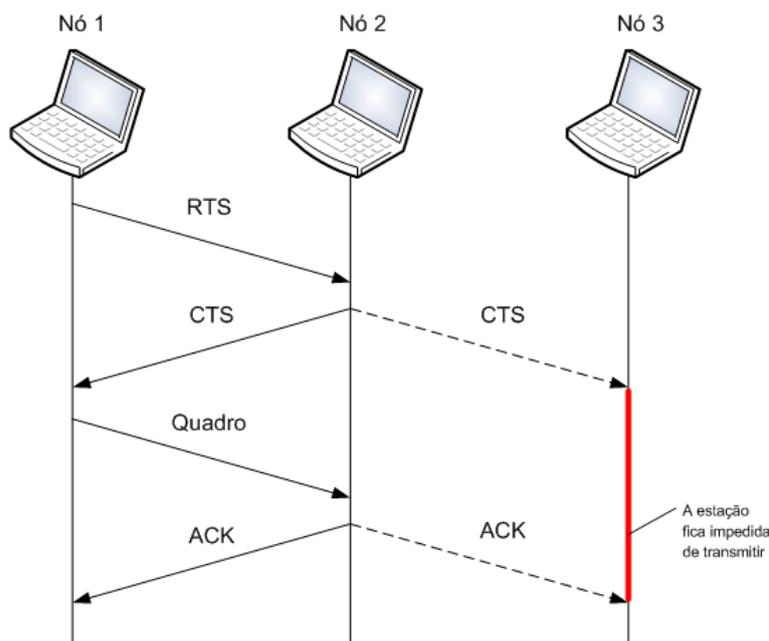


Figura 2.11: Procedimento RTS/CTS

Já para redes móveis, o procedimento se torna um pouco mais complexo, pois é preciso escutar o meio, identificar os possíveis AP's para conexão, verificar seus requisitos de taxa de transmissão, banda de operação, etc. e solicitar uma associação. Outro exemplo de um cenário não visto em redes cabeadas é a questão do gerenciamento de mobilidade. Em redes sem fio as estações podem se locomover ao longo da área de cobertura do serviço, exigindo que mecanismos de gerenciamento garanta a conexão em todos locais.

A família de protocolos 802.11 define vários tipos de quadros que as estações (AP's e usuários) usam para comunicação, assim como gerenciamento e controle do enlace sem fio. Esses quadros são agrupados em três tipos: gerenciamento, controle e dados. Os **quadros de gerenciamento** permitem que as estações estabeleçam e mantenham conexões (RAGHAVENDRA et al., 2010). **Quadros de controle** ajudam a garantir a entrega dos quadros de forma correta. Os **quadros de dados** carregam dados das camadas superiores. Um quadro de dados pode, por exemplo, carregar o código HTML de uma página Web (incluindo os cabeçalhos TCP/IP) que um usuário esteja visualizando.

Cada tipo de quadro possui diversos subtipos, cada um usado para um propósito específico na operação do protocolo. A tabela 2.3 sintetiza os principais tipos e subtipos de quadros e seus papéis na rede. A seguir, será apresentado um resumo sobre a função de cada um dos tipos e alguns dos principais subtipos de quadros.

Tabela 2.3: Função dos tipos e subtipos de quadros

Tipo / Subtipo	Descrição
Controle	Garante a entrega de dados da forma correta
ACK - <i>Acknowledgement</i>	Resposta para uma transmissão bem sucedida
RTS - <i>Request to Send</i>	Solicitação de permissão para transmitir dados
CTS - <i>Clear to Send</i>	Confirmação positiva da solicitação para transmissão
PS Poll - <i>Power Save Poll</i>	Relacionado ao consumo de energia
Gerenciamento	Permite o estabelecimento e manutenção da conexão
BCN - <i>Beacon frame</i>	AP's o enviam periodicamente para anunciar sua presença
PRQ - <i>Probe Request</i>	Enviado por clientes para obter informações de AP's da vizinhança
PRP - <i>Probe Response</i>	Enviado pelo AP em resposta ao PRQ
AUTH - <i>Authentication</i>	Usado pelas estações para troca de credenciais
DEAUTH - <i>Deauthentication</i>	Enviado pelo AP quando se deseja terminar conexão segura
ARQ - <i>Association Request</i>	Enviado pelo cliente que deseja estabelecer conexão com um AP
ARP - <i>Association Response</i>	O AP responde à solicitação do cliente aceitando ou rejeitando
RRQ - <i>Reassociation Request</i>	O cliente envia a um novo AP quando perde a conexão com um AP
RRP - <i>Reassociation Response</i>	Resposta do AP para a reassociação
DASS - <i>Disassociation</i>	O cliente ou o AP usa para terminar uma associação
Dados	Carrega dados das aplicações e cabeçalhos
Dados (simples)	Quadros que carregam dados simplesmente
<i>Null Data</i>	Usado para funções diversas
<i>QoS Data</i>	Versão QoS dos quadros de dados
<i>QoS Null</i>	Versão QoS dos quadros <i>Null Data</i>

2.4.5.1 Quadros de dados

Quadros de dados carregam em seu corpo os dados dos protocolos das camadas superiores. O 802.11 pode utilizar diferentes subtipos de quadros de dados, dependendo do tipo de serviço que oferece. Estes são alguns dos diferentes subtipos comumente usados:

- **Dados (*Data*):** São quadros simples com único objetivo de transportar o conteúdo de seu corpo de uma estação a outra;
- **Nulo (*Null*):** Não carregam dados. São usados pelas estações móveis para diversos fins como avisar ao ponto de acesso sobre mudança no estado de conservação de energia ou mensagens de *keepalive*, informando que a conexão ainda está ativa.

2.4.5.2 Quadros de controle

Os quadros de controle prestam assistência na entrega de quadros de dados. Eles ajudam a administrar o acesso ao meio sem fio (mas não controla o meio em si) e provê confiabilidade à camada MAC. Fazem parte dos quadros de controle:

- ***Request to Send (RTS)*:** são usados para ganhar o controle do meio para a transmissão *unicast* de quadros. Solicita ao receptor uma confirmação de que ele está livre para efetuar a comunicação;

- **Clear to Send (CTS):** é a resposta aos quadros RTS;
- **Acknowledgment (ACK):** é usado para enviar confirmações positivas requeridas pelo MAC e são utilizados em qualquer transmissão de dados, incluindo as transmissões diretas ou precedidas pela operação RTS/CTS;
- **Power-Save Poll (PS-Poll):** Usado pelas estações para informar ao ponto de acesso a saída do estado de latência (economia de energia).

2.4.5.3 Quadros de gerenciamento

Gerenciamento é um grande componente da especificação 802.11. Diversos tipos de quadros de gerenciamento são usados para prover serviços necessários à rede. Dentre esses serviços, estão aqueles voltado à segurança, autenticidade, disponibilidade, dentre outros. Existem vários tipos de quadros de gerenciamento utilizados para diversas funções de manutenção na camada de enlace, tais como:

- **Beacon (BCN):** anunciam a existência da rede e são uma parte importante de muitas tarefas de manutenção. São transmitidos em intervalos regulares e permitem às estações encontrar e identificar uma rede, assim como adaptar-se aos requisitos necessários para seu ingresso;
- **Probe Request (PRQ):** as estações móveis usam quadros PRQ para sondar a área em busca de redes 802.11;
- **Probe Response (PRP):** se um quadro PRQ encontra uma rede com parâmetros compatíveis, a rede envia um quadro PRP;
- **Authentication (AUTH):** para efetuar a autenticação, a estação móvel e o ponto de acesso trocam quadros AUTH;
- **Association Request (ARQ):** uma vez que uma estação identifica uma rede compatível e se autentica, deve tentar ingressar na rede enviando um quadro ARQ;
- **Reassociation Request (RRQ):** usado pelas estações para se conectar a novos pontos de acesso enquanto se movimentam por uma rede ou se deixa a área de cobertura de um ponto de acesso temporariamente e tenta retornar;
- **Association Response (ARP) e Reassociation Response (RRP):** usados como resposta aos quadros de ARQ e RRQ;
- **Disassociation (DASS) e Deauthentication (DEAUTH):** são utilizados para terminar uma relação de associação e autenticação, respectivamente.

2.5 DESAFIOS DA PESQUISA EM REDES SEM FIO

Nos últimos anos, vários trabalhos de pesquisa têm como foco o aprimoramento das tecnologias de redes sem fio. Diversos estudos se concentram em analisar os aspectos relacionados a essas redes, tais como as dinâmicas dos protocolos das diversas camadas da pilha, parâmetros de desempenho e qualidade de serviço e possíveis falhas no seu funcionamento. A partir desses estudos, surgem modelos que expressam melhor as características das redes sem fio e também propostas de possíveis melhorias.

Especificamente nos últimos três anos, publicações relacionadas às redes sem fio abordam questões relevantes sobre os protocolos da camada de transporte e de acesso ao meio, sobre o desempenho de aplicações e modelos que expressem o comportamento dessas redes. A seguir, serão discutidos alguns trabalhos relacionados à pesquisa em tecnologias de redes sem fio que tem relação com os tópicos abordados neste trabalho.

Em relação a protocolos, alguns trabalhos propõem novos protocolos ou mudanças substanciais nos atuais. Por exemplo, em (LI et al., 2009) é proposto o projeto de um novo protocolo da camada de transporte para redes sem fio a partir do fato de que o protocolo TCP apresenta problemas nas redes sem fio com múltiplos saltos, tais como a queda de desempenho em ambientes sujeitos a perdas (que depende da separação dos nós, característica do canal, interferências externas e carga de tráfego). O protocolo proposto no trabalho propõe eliminar muitas fontes de *overhead*, assim como evitar o controle de taxa fim-a-fim ruidoso e promover a robustez a partições e mudanças de rotas por causa do controle salto a salto. Através de experimentos em redes em malha com múltiplos saltos, é mostrado que o o protocolo proposto atinge significantes ganhos em termos de vazão, justiça e atraso, o que viria a contribuir na implementação de garantias de qualidade de serviço nessas redes.

Outro trabalho relacionado (HSU; HOU; WU, 2010) considera o problema de justiça para nós em redes sem fio em malha com múltiplos saltos. O estudo identifica os parâmetros TCP que influenciam na justiça da vazão de dados e propõe o ajuste desses parâmetros para reduzir a colisão de quadros e promover uma utilização mais justa. Assim, é proposto um mecanismo adaptativo de ACK atrasado (*adaptive delayed ACK mechanism*), que faz o uso apropriado do ACK e da janela anunciada para adiar o tempo de transmissão do pacote e assim prover uma vazão justa a cada fluxo TCP. O método proposto é simples e fácil de implementar e evita modificações no protocolo MAC 802.11 ou nas operações de filas nos nós.

Outro estudo sobre protocolos da camada de transporte em redes sem fio, realizado por (SALES et al., 2008), tem como foco o estudo do comportamento de fluxos DCCP (*Datagram Congestion Control Protocol*, que é um protocolo da camada de transporte que implementa conexões bidirecionais *unicast* e controle de congestionamento não-confiável de datagramas) com aplicações multimídia em tempo real. A abordagem utilizada é usar fluxos DCCP para analisar o comportamento de cada protocolo (TCP e UDP), principalmente sobre seus

algoritmos de controle de congestão. Os resultados apresentados mostram que os protocolos DCCP e TCP podem compartilhar a banda disponível na rede sem afetar um ao outro. Apesar dos fluxos UDP atingirem altas taxas de vazão, eles perdem quantidades consideráveis de dados ao se levar em conta a banda limitada das redes 802.11g.

Todos os trabalhos anteriores têm como objetivo propor novas dinâmicas de protocolos para solucionar o problema de garantia de qualidade de serviço nas redes sem fio, principalmente para as aplicações de tempo real.

Diversos outros trabalhos abordam as possibilidades de aprimoramento da camada de acesso ao meio de redes sem fio. Muitas propostas se baseiam em esquemas que se adaptam dinamicamente às condições da rede, visando a contornar suas falhas e melhorar o desempenho. Em (MAO et al., 2009) é proposto um esquema de MAC adaptativo para maximizar a vazão do sistema enquanto mantém justo o tempo de utilização do meio aéreo. O novo esquema, denominado *Time Fairness Transmission Control* (TFTC), é inspirado pelas constatações de que, em uma rede IEEE 802.11 com múltiplas taxas, a vazão agregada do sistema é desfavoravelmente dominada por estações com as mais baixas taxas. Assim, fazendo uso das informações fornecidas a cada estação pelos mecanismos de sensoriamento de portadora, o TFTC ajusta dinamicamente as probabilidades de transmissão para estações que utilizam cada taxa de dados. Os testes de desempenho mostram que o esquema é efetivo em alcançar uma vazão próxima ao máximo teórico e prover tempo justo de alocação de canal entre estações com diferentes taxas de transmissão.

Nessa mesma linha, em (BHATIA; KUMAR, 2010) é proposto um algoritmo adaptativo para os limites de retransmissão para o MAC 802.11 para reduzir as falsas falhas de conexão e previsão de mobilidade do nó. Esse algoritmo é baseado na interação entre camadas, onde coleta as estatísticas da camada física utilizando, na camada MAC, para determinar se um nó está na área de alcance ou não. O MAC adaptativo dinamicamente seleciona o número de tentativas de retransmissão na tentativa de se estabelecer a comunicação. Através de simulações, é mostrado que o método proposto pode melhorar consideravelmente o desempenho em redes sem fio *ad-hoc*. Ele reduz as falhas de enlace que causa menos falhas em rotas e diminui o *overhead* de roteamento na rede.

O trabalho (YANG; FU, 2009) também faz a proposta de um protocolo adaptativo baseado na média móvel de *backoff* efetivo (*Moving Average of Effective Backoff*, MAEB). Este protocolo resolve os problemas em redes móveis *ad-hoc* dinâmicas. Com MAEB, um nó pode obter informações sobre o meio e escolher um melhor algoritmo de *backoff*. Além disso, pode se adaptar a mudanças de topologia na rede, o que é bastante favorável em ambientes onde os nós se movimentam com frequência. Os resultados apresentados indicam que o esquema proposto traz melhorias para o atraso WLAN, vazão e possui uma reação estável aos movimentos dos nós.

Os trabalhos anteriores tem como objetivo melhorar o desempenho na camada MAC para prover um melhor serviço nas camadas superiores. Além dos trabalhos que propõem protocolos diferenciados para atender às mais diversas necessidades, tem-se feito pesquisas para se compreender modelos para o desempenho em redes sem fio. Devido à complicada natureza das operações MAC 802.11, aproximações devem ser feitas para se chegar a modelos tratáveis matematicamente.

Vários trabalhos abordam os modelos de desempenho em redes sem fio que servem como base para o aprimoramento dos parâmetros de desempenho de aplicações de tempo real. O trabalho (WEN et al., 2009) considera o fato de que, apesar da taxa nominal especificada pelo 802.11a ser de 54Mbps, na prática a taxa que os usuários podem atingir é muito menor. Assim, é feita uma análise da eficiência do padrão em condições de não-saturamento sob duas perspectivas: eficiência de quadros e eficiência do modo DCF. É proposto um novo modelo de cadeia de Markov bidimensional do procedimento de *backoff*. Com isso, é derivada uma fórmula analítica da vazão do protocolo.

Em (TICKOO; SIKDAR, 2008) é apresentado um modelo analítico para avaliar os atrasos em filas e tempos de acesso ao canal nos nós de redes sem fio. A distribuição do tempo de serviço das filas é derivado a partir de uma série de fatores, incluindo o atraso de acesso ao canal devido ao compartilhamento do meio, impacto da colisão de pacotes, *backoffs* resultantes e a distribuição do tamanho dos pacotes. Os resultados analíticos foram validados por meio de uma série de simulações. Esse modelo pode ser usado tanto para prover garantias de qualidade de serviço probabilística e determinar o número de nós que podem ser acomodados enquanto se satisfaz alguma restrição de atraso.

No trabalho publicado em (VIJAYASANKAR; TAUFIQUE, 2010) é proposto um modelo analítico que captura de forma mais precisa parâmetros de desempenho em redes 802.11 com níveis de carga desde valores baixos até valores próximo à saturação. Uma das vantagens do modelo analítico apresentado é sua habilidade de estimar a latência do protocolo e a taxa de entrega na presença de classes de qualidade de serviço, cada um sendo definido por um contador de retransmissão máximo específico. Tais classes podem ser adotadas para suportar aplicações de tempo real em que tanto a latência quanto a taxa de entrega deva ser observada atenciosamente para uma operação satisfatória. Os parâmetros obtidos pelo modelo analítico podem ser úteis para uma política de controle de admissão ou para se entender o momento onde é aconselhável que se inicie um processo adaptativo.

Todos esses estudos demonstram que a análise das dinâmicas dos protocolos de redes sem fio ainda é um campo rico e vasto para pesquisas.

2.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou as bases teóricas sobre tecnologias de redes sem fio utilizadas como parte dos fundamentos para desenvolver este trabalho. Foi abordada a tecnologia celular, apresentando suas principais características e a sua importância no cenário geral das comunicações sem fio. Foi apresentado o conceito de rede local sem fio e os principais requisitos deste tipo de rede. Foram descritos os padrões da família 802.11, mostrando a evolução da tecnologia e características técnicas. Finalmente, foram discutidos os desafios de pesquisa em redes sem fio nos tópicos de análise de tráfego e protocolos de enlace e transporte.

Nó próximo capítulo serão abordadas as técnicas de análise de tráfego que complementam a análise a ser realizada neste trabalho para se propor uma melhoria nos protocolos da camada de enlace.

3 ANÁLISE DE TRÁFEGO EM REDES SEM FIO

Este capítulo discute sobre os principais desafios da análise de tráfego para o planejamento de redes sem fio. Serão discutidas as principais necessidades de qualidade de serviços em redes multimídia e como a engenharia de tráfego pode ajudar no projeto de rede. Serão abordados os conceitos de análise, caracterização e coleta de tráfego em redes sem fio.

3.1 TRÁFEGO EM REDES SEM FIO

A popularização das redes sem fio e a evolução da sua taxa de transmissão trouxe a expectativa de que é possível de se fazer neste tipo de rede tudo que a rede cabeada permite. Mas, de fato, o desempenho de uma rede sem fio ainda não consegue acompanhar o desempenho das redes cabeadas (HALEPOVIC; WILLIAMSON; GHADERI, 2009). As características das aplicações mudaram ao longo dos anos. Inicialmente, a maioria do tráfego a que as redes sem fio estavam sujeitas era oriunda de aplicações Web. Nessa época, ainda era caracterizado predominantemente por simples documentos estruturais e pequenos objetos. Em segundo plano estavam a transferência de arquivos, acesso remoto e *email*. No entanto, o tráfego Web evoluiu trazendo objetos maiores e mais complexos, como exemplo o compartilhamento de fotos e vídeos. Além disso, a introdução e amadurecimento de novas tecnologias trouxeram impacto significativo sobre o tipo de tráfego que circula pela rede. A exemplo disso temos as redes *peer-to-peer* para o compartilhamento de arquivo entre usuários, que contribuiu imensamente para a mudança da variedade do tráfego e alteração em seu volume.

Outro elemento a se considerar é o aumento da população de usuários, o que implica também no aumento do volume de tráfego e numa distribuição não uniforme da carga de tráfego ao longo da área de cobertura, devido à diversidade de usuários. Esse desequilíbrio produzido dentro da área de cobertura da rede, associado com o padrão de mobilidade dos usuários, requer um planejamento cuidadoso da infraestrutura.

A evolução da tecnologia sem fio proporcionou o enriquecimento da diversidade de tráfego, fazendo com que aplicações e serviços multimídia se tornassem mais populares, e também abriu caminho para as novas aplicações emergentes, tais como voz sobre IP (VoIP) e IPTV. Esta última deve abranger qualquer tipo de distribuição de vídeo sobre redes IP, incluindo vídeo-clips, canais de TV e transmissão de vídeo ao vivo. Ainda mais, com a tendência da indústria de migrar para vídeos de alta definição (*High Definition*, HD) a demanda por altas

taxas de transmissão e canais mais robustos irá crescer significativamente.

O suporte a tráfego multimídia nas redes de comunicação exige planejamento criterioso. Diferentes tipos de aplicações requerem diferentes tipos de tratamento pelos elementos da rede. A exemplo disso, está o tráfego de tempo real, como VoIP e vídeos sobre demanda, que são mais sensíveis a determinados parâmetros de desempenho (como atraso) que outras aplicações que não são de tempo real. A diferenciação do tráfego da rede visando a atender requisitos demandados por eles é o princípio de qualidade de serviço (QoS), discutido na próxima seção.

3.1.1 Qualidade de Serviço

O termo qualidade de serviço (QoS) em redes comutadas por pacotes se refere à utilização adequada dos recursos oferecendo garantias mínimas exigidas pelas aplicações que elas suportam. Em outras palavras, qualidade de serviço é a habilidade de prover diferentes níveis de prioridade para diferentes aplicações, usuários ou fluxo de dados, ou para garantir certo nível de desempenho para um fluxo de dados. De fato, o termo desempenho em redes pode representar diversos aspectos que sejam objeto de interesse. Por exemplo, pode representar requisitos de taxa de transmissão, atraso, *jitter*, probabilidade de perda de pacote, taxa de erro de bit, etc.

Para aplicações de tempo real, parâmetros que não apresentam desempenho satisfatório podem comprometer a comunicação ou oferecer uma experiência ruim ao usuário. Por exemplo, algumas aplicações de tempo real são sensíveis a perdas, pois não é possível que haja retransmissão de pacotes. Quando há uma perda, aquela informação não pode (ou não faz mais sentido) ser recuperada. Da mesma forma o atraso e o *jitter* (variação estatística do atraso) podem prejudicar outros tipos de aplicação. Uma comunicação simultânea em dois sentidos (como aplicações de voz sobre IP) necessita de fluidez e um alto atraso pode torná-la impraticável. Também, se a aplicação necessita de determinada regularidade no recebimento de pacotes, o *jitter* pode ser extremamente prejudicial.

Devido ao fato do meio ser compartilhado e estar sujeito a ruídos e interferência, as redes sem fio são ainda mais suscetíveis a atrasos e perdas que redes cabeadas. Como as estações concorrem para a utilização do meio, seus pacotes devem aguardar oportunidades para serem transmitidos, o que aumenta o atraso. E, quando transmitidos, os pacotes podem ser perdidos no caminho e precisam ser retransmitidos. Sucessivas retransmissões mal sucedidas levam ao descarte definitivo do pacote. Portanto, a natureza das redes sem fio adiciona um fator a ser considerado ao se promover garantias de QoS.

O planejamento de uma rede e o dimensionamento de suporte a QoS é um processo que envolve a identificação dos seguintes aspectos de forma interrelacionada (KOUCHERYAVY et al., 2009):

- identificação da localização dos nós da rede;
- definição da topologia de enlaces;
- definição da estratégia de roteamento considerando a entrada de tráfego externo;
- alocação de capacidades dos enlaces para que suportem os requisitos de QoS.

O projeto de uma rede otimizada é um processo bastante complexo, pois os aspectos devem ser trabalhados de forma conjunta. Por exemplo, a alocação de capacidade dos enlaces depende das cargas de tráfego nos enlaces e do roteamento. Por outro lado, o roteamento pode ser adaptado para contornar gargalos e fazer que os enlaces possam ser melhor dimensionados.

Existe uma forte tendência das redes de telecomunicações integrarem os mais diversos tipos de serviços (voz, dados, etc.) sob a mesma infraestrutura de rede. Uma arquitetura padronizada e aberta está sendo proposta para integrar todos os serviços baseados em tecnologia IP, também chamada arquitetura “*all IP*” (PATEL; DENNETT, 2000).

“*All IP*” traz diferentes desafios e requer diferentes soluções para os problemas de planejamento e dimensionamento das redes. Prover garantias de QoS em redes IP é uma tarefa complexa, porque o paradigma de comunicação adotado para Internet não foi originalmente concebida para o contexto de QoS multiserviços, principalmente aqueles serviços provenientes de redes orientadas a circuitos. Redes multiserviços requerem um enorme esforço de planejamento estratégico para suportar o crescimento. Os estudos para o desenvolvimento de técnicas de projeto e planejamento de redes IP multiserviços ainda enfrentam muitos desafios causados principalmente devido à diversidade das aplicações e fluxos de tráfego, e também à incerteza sobre as métricas de QoS que devem ser adotadas para fins de planejamento e na dificuldade na caracterização das fontes de tráfego em termos probabilísticos.

A comunidade científica tem voltado seu interesse em direção a uma maneira unificada de se observar os sistemas, levando em consideração o projeto, otimização e garantias de qualidade de serviço que satisfaçam as necessidades das próximas gerações de redes IP sem fio (KOUCHERYAVY et al., 2009). A implementação de redes móveis “*all IP*” implica que novos mecanismos e arquiteturas de QoS devem ser desenvolvidos, porque os mecanismos atuais baseados em “melhor esforço” (“*best-effort*”) não são capazes de satisfazer as necessidades das aplicações.

Os desafios associados ao provimento de garantias de serviço em qualquer rede são numerosos, mas as redes sem fio possuem muitos outros problemas comparados com redes cabeadas. Entre esses desafios pode-se citar a alta taxa de perda, atraso de propagação, controle de congestão no meio compartilhado. Outra questão importante é a identificação de metodologias para implementação de redes sem fio *ad hoc* de forma a alcançar

aspectos importantes, como conectividade, reconfigurabilidade, segurança e suporte ao tráfego integrado. Neste contexto, não há planejamento devido à sua natureza dinâmica e espontânea, mas existem propostas de fornecer QoS para tais redes, por exemplo, através de métodos de roteamento (MUNARETTO et al., 2002) e protocolos MAC com diferenciação de serviços (YEH; YOU, 2003). A integração de redes sem fio multimídia em ambientes de redes *all-IP* considera problemas intra e inter-domínios para o planejamento de capacidade e otimização de serviços multimídia móveis.

Para que se ofereça qualidade de serviço satisfatória em ambientes sem fio é preciso que sejam envolvidos mecanismos, algoritmos e esquemas nas diversas camadas dos modelos de protocolos. Os principais alvos são as camadas física, MAC, IP e de transporte. A ideia básica é que o suporte a QoS envolva a colaboração conjunta entre todas essas camadas.

A interação dos usuários e o comportamento das aplicações com as camadas inferiores da pilha de rede são caracterizadas por onde, quando, quanto e para quem os dados são transmitidos. O padrão de geração de tráfego conjuntamente com a mobilidade através do tempo e espaço determinam os efeitos do uso da rede sem fio sobre as camadas mais baixas. É preciso que se faça o estudo de forma abrangente de modo a satisfazer os parâmetros de QoS nos diferentes níveis e verificar como estão inter-relacionados.

3.1.2 Engenharia de Tráfego em redes multimídia

A engenharia de tráfego integra os princípios científicos e a tecnologia para medição, modelagem, caracterização e controle dos diferentes tipos de classes de tráfego multimídia. O conhecimento obtido é então aplicado nos sistemas com finalidade de atingir objetivos de desempenho específicos e promover o planejamento da rede submetida a determinada garantia de QoS resultando em uma transferência de informação confiável e eficiente.

Um problema crucial para engenharia de tráfego é a necessidade de alocação e balanceamento de recursos dentre diferentes classes de tráfego para promover o melhor uso dos recursos da rede, considerando ainda aspectos de QoS. Por meio da engenharia de tráfego, os operadores de redes podem adquirir melhores ferramentas e técnicas para obter um melhor desempenho da rede atingindo objetivos específicos, tais como minimizar a congestão, minimizar perdas ou atraso de pacotes e diminuir a probabilidade de bloqueio. O seu objetivo é aumentar o desempenho da rede oferecendo garantias de QoS através da otimização do uso dos seus recursos, ou seja, minimizando a sobrecarga de certas partes da rede enquanto outros recursos disponíveis são subutilizados. O gerenciamento e o controle da rede requerem metodologias robustas para obter desempenho satisfatório. O desenvolvimento de técnicas de controle e gerenciamento eficientes e eficazes deve envolver a gestão de recursos, controle de congestionamento, controle de conexão e admissão e gerenciamento ativo de filas.

A necessidade de redes sem fio multiserviços está fortemente ligada ao intenso crescimento

no uso de aplicações e serviços, novos e existentes, inclusive para os usuários de sistemas móveis. A tendência é que muitas dessas novas aplicações exigirão uma grande largura de banda para oferecer aos usuários com recursos multimídia, um alto grau de interatividade e tráfego em tempo real, assim como os oferecidos pelas atuais redes banda-larga cabeadas.

A implementação de novos serviços multimídia remetem a novos problemas relacionados ao faturamento dos serviços, perfil e privacidade do usuário, introdução de arquiteturas intermediárias para adaptação de QoS do serviço (dependendo das preferências do usuário, características de acesso, histórico de interações), segurança, interatividade, interoperabilidade de redes (fixas, móveis, satélites, etc.), engenharia de tráfego e outros. Cada serviço possui requisitos específicos que influenciam tanto o projeto da rede como um todo quanto a informação detalhada carregada pelos protocolos. Desta maneira, para um projeto apropriado da rede e dos protocolos, é necessário entender os serviços que serão suportados. Os aspectos de tempo-real de um serviço podem ser descritos tanto em termos da camada de transporte (como atraso da transmissão ou *jitter* de pacotes) quanto no nível de seção (como o tempo para estabelecer a sessão). Tudo isso deve ser planejado ao se fazer um balanço entre oferta de serviço, disponibilidade e rentabilidade.

Pelos motivos anteriores, observa-se que a caracterização do tráfego é um elemento crucial para o planejamento de uma rede de comunicação, por permitir que se tenha o conhecimento sobre seu comportamento e seus efeitos nos parâmetros de desempenho desejados. Com base nisso, o projetista da rede pode tomar decisões mais adequadas ao alocar os recursos disponíveis.

3.2 ANÁLISE DE TRÁFEGO

Ao se planejar qualquer tipo de rede de comunicação, o tipo de aplicação e suas necessidades de desempenho são fatores fundamentais a serem considerados. É essencial que seja implantada qualidade de serviço (QoS) para as aplicações suportadas pela rede, e a caracterização do tráfego é um ponto fundamental do projeto (BARRETO, 2007). Modelos de tráfego inadequados e aproximações analíticas divergentes podem resultar em parâmetros de redes subestimados (KARPINSKI; BELDING-ROYER; ALMEROOTH, 2007). Modelos analíticos e simulações podem ser usados como ferramentas para a definição de técnicas corretas para o projeto e planejamento de redes IP multiserviços.

Um problema particular em redes multiserviços considerado pela engenharia de tráfego é a natureza do tráfego agregado e seu impacto no desempenho. Os padrões de tráfego gerados por serviços multimídia IP são diferentes dos modelos tradicionais de *Poisson* usados para modelar o tráfego de voz comutado por circuito. Segundo (LELAND et al., 1994), um tráfego de rede com multiplexação estatística apresenta características que não são encontradas nos modelos de *Poisson*, como a dependência de longa duração e a autossimilaridade estatística.

A figura 3.1 mostra a comparação entre um processo com características autossimilares e um processo de *Poisson* em diferentes escalas de tempo (a parte sombreada equivale a uma porção do sinal anterior). Pode-se perceber que o processo *Poisson* perde a variabilidade com o aumento das escalas, podendo-se perceber uma suavização da envoltória. No entanto, esse efeito não ocorre com o processo autossimilar. Este tende a comportar-se de uma forma parecida com o aumento da escala, mantendo a variabilidade em todas elas. A seguir será mostrada uma breve introdução ao fenômeno autossimilar e suas principais características.

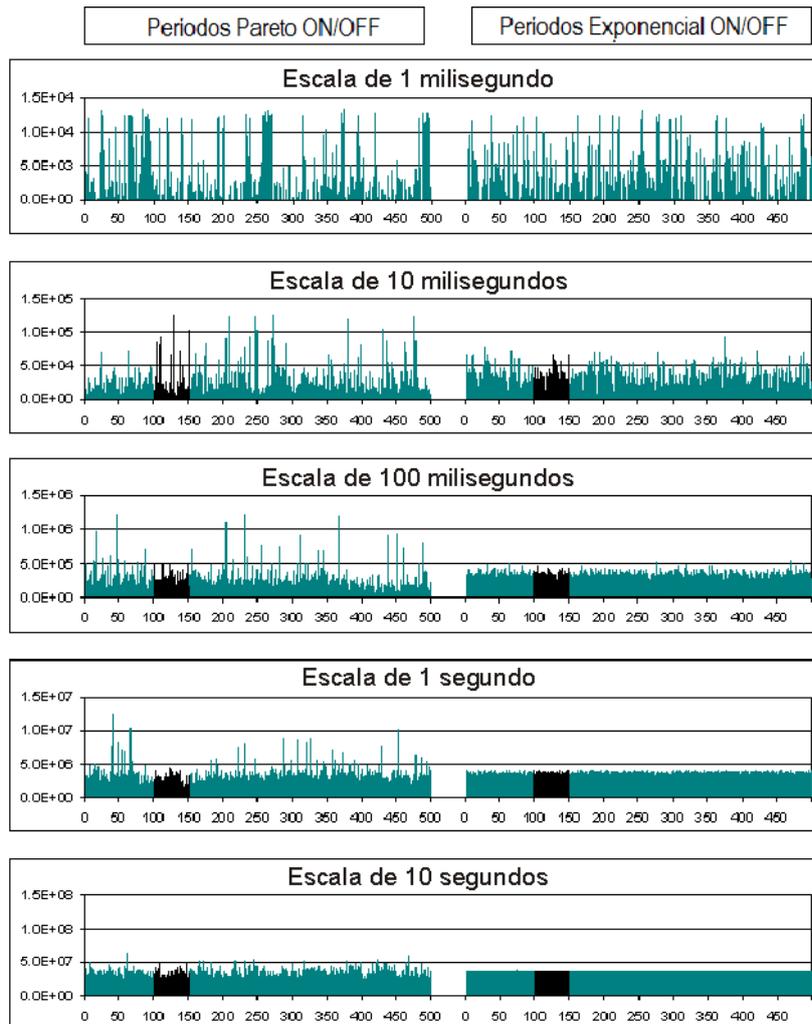


Figura 3.1: Comparação de um processo autossimilar (à esquerda) com um processo poissoniano (à direita), (KRAMER, 2004, modificada)

3.2.1 Autossimilaridade

O fenômeno da autossimilaridade, exibido por um processo estocástico, implica que o comportamento estatístico do processo é semelhante quando visto sob diferentes graus de ampliação ou em diferentes escalas em uma dimensão (como tempo ou espaço). Estudos mostram que o tráfego de redes de comunicação é um exemplo de processo que pode

apresentar esse fenômeno (LELAND et al., 1994). As principais propriedades de um processo autossimilar incluem (GOSPODINOV; GOSPODINOVA, 2005):

- **Variância de decaimento lento:** a variância de uma amostra decai lentamente comparado com a recíproca do tamanho da amostra;
- **Dependência de longa duração:** um processo estacionário com dependência de longa duração possui uma função de autocorrelação não somável. A velocidade de decaimento da autocorrelação é mais hiperbólica que exponencial;
- **Efeito de Hurst:** parâmetro que expressa o grau de autossimilaridade, simbolizado por H . Em outras palavras, o parâmetro de Hurst é o parâmetro que caracteriza a intensidade do efeito de autossimilaridade de um processo.

Como dito anteriormente, um processo mantém características estatísticas quando observado sob diversas escalas. Por exemplo, o efeito de rajadas estão presentes em pequenas escalas e se mantêm nas escalas mais altas. Para o planejador da rede, esse é um fato preocupante, principalmente para a alocação de recursos. Se ele não considera esse efeito, pode haver momentos de sobrecarga em que há, por exemplo, estouro da capacidade da fila ou excesso de processamento.

A definição matemática de autossimilaridade para um processo estocástico em tempo contínuo é dada pela equação 3.1, considerando-se assim como exatamente autossimilar ou $H - ss$.

$$Y(t) \stackrel{d}{=} \alpha^{-H} Y(\alpha t), \alpha > 0 \quad (3.1)$$

A igualdade da equação 3.1 possui sentido probabilístico. Assim, as propriedades das funções de amostra $Y(t)$ e da sua versão escalada $\alpha^{-H} Y(\alpha t)$ (dada pela compressão no tempo pelo fator α e do eixo das amplitudes pelo fator α^H) são iguais estatisticamente. Em outras palavras, os momentos de ordem n de $Y(t)$ são iguais aos momentos de ordem n de $Y(\alpha t)$ escalonados por α^{-Hn} .

A imposição de igualdade estatística para todos os momentos de ordem n é muito restritiva, por isso são consideradas as propriedades de até segunda ordem. Nesse caso, um processo que apresenta características de autossimilaridade para as estatísticas de segunda ordem é chamado de “exatamente autossimilar de segunda ordem”. Seus momentos de primeira e segunda ordens são dados pelas equações 3.2, 3.3 e 3.4 para a média, variância e correlação, respectivamente.

$$E(Y(t)) = \frac{E(Y(\alpha t))}{\alpha^H} \quad (3.2)$$

$$\text{Var}(Y(t)) = \frac{\text{Var}(Y(\alpha t))}{\alpha^{2H}} \quad (3.3)$$

$$R(t_1, t_2) = \frac{R(\alpha t_1, \alpha t_2)}{\alpha^{2H}} \quad (3.4)$$

Um processo de incrementos $X(t)$, definido na equação 3.5, é chamado de processo com incrementos estacionários se, para cada incremento $\delta > 0$, o processo de incrementos é um processo estacionário em t . No caso em que o processo $Y(t)$ é $H - ss$ e possui incrementos estacionários é chamado $H - sssi$.

$$X(t) = Y(t + \delta) - Y(t) \quad (3.5)$$

Considerando um processo $Y(t)$ $H - sssi$, seu parâmetro de *Hurst* está sempre contido no intervalo $0 < H < 1$. A função de autocorrelação é dada pela equação 3.6, demonstrada em (DEUS, 2007), e a função de autocorrelação do processo de incrementos $X(t)$ é dada pela equação 3.7.

$$Ry(t_1, t_2) = \frac{E|Y(1)|^2}{2} \{ |t_1|^{2H} + |t_2|^{2H} - |t_2 - t_1|^{2H} \} \quad (3.6)$$

$$R_X(\tau) = \frac{E|Y(1)|^2}{2} \{ |\tau + \delta|^{2H} + |\tau - \delta|^{2H} - 2|\tau|^{2H} \} \quad (3.7)$$

A autossimilaridade para processos estocásticos em tempos discretos pode ser definida por um processo de incrementos $X(k)$ para um valor fixo de incremento δ , onde a notação X_k , para $k = 1, 2, 3, \dots$ é definida pela equação 3.8 .

$$X = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (3.8)$$

em que N representa o número de amostras. A partir da série X_k define-se a série agregada por um fator m como uma nova série de tempo obtida fazendo-se a média de X através de blocos não sobrepostos de tamanho m , denotada por $X^{(m)}$ conforme a equação 3.9.

$$X_k^{(m)} = (1/m)(X_{km-m+1} + \dots + X_{km}) \quad (3.9)$$

O processo X é chamado *estritamente autossimilar* com parâmetro de autossimilaridade (ou parâmetro de Hurst) H se $mX^{(m)}$ possui a mesma distribuição dimensional finita que $m^H X$ para todo $m \geq 1$. O processo X é exatamente autossimilar de segunda ordem se, para $(k \geq 0)$, seguir a equação 3.10 e assintoticamente autossimilar de segunda ordem se a

função de autocorrelação seguir a equação 3.11 para $k, m \rightarrow \infty$.

$$r^{(m)}(k) = r(k) \quad (3.10)$$

$$r^{(m)}(k) \rightarrow r(k) \quad (3.11)$$

Como dito anteriormente, a intensidade do efeito de autossimilaridade pode ser definido pelo parâmetro $H \in (0, 1)$, o que acaba sendo um ponto positivo do modelo. Nesse caso, grandes valores de H implicam que o efeito de autossimilaridade é maior, e conseqüentemente faz com que o processo agregado pareça mais similar ao processo original.

3.2.2 Cálculo do Hurst

O parâmetro de Hurst é perfeitamente bem definido matematicamente mas seu cálculo não é tarefa trivial na análise de séries de tempo. Os métodos estimadores são dependentes do número de amostra, ou seja, alguns métodos precisam de mais amostra que outros para oferecer melhores estimativas. Além disso, os estimadores são vulneráveis a tendência, periodicidade e outras formas de corrupção dos dados (CLEGG, 2006). Devido à dificuldade na estimação do parâmetro de Hurst não é aconselhável confiar em apenas um método de cálculo. Alguns métodos disponíveis que são utilizados por este trabalho são:

- Kettani-Gubner
- Variance Time Plot (VTP)
- Periodograma
- Whittle
- Análise R/S

Os métodos VTP, Periodograma, Whittle e análise R/S são descritos em (BERAN, 1994), e o método Kettani-Gubner em (KETTANI; GUBNER, 2002). Na sequência, serão apresentados as principais características dos métodos de cálculo do parâmetro de Hurst.

3.2.2.1 Kettani-Gubner

O método de estimativa do valor de Hurst Kettani-Gubner se baseia no coeficiente de autocorrelação de um processo autossimilar. Um processo é exatamente autossimilar de segunda ordem quando seu coeficiente de auto correlação é descrito da seguinte forma:

$$r(k) = \frac{1}{2} \left[|k+1|^{2H} + |k-1|^{2H} - 2|k|^{2H} \right] \quad (3.12)$$

Para $k = 1$ temos a eq. 3.13

$$r(1) = 2^{2H-1} - 1 \quad (3.13)$$

Assim, o estimador para o parâmetro de Hurst pode ser definido conforme a eq. 3.14.

$$\hat{H} = \frac{1}{2} [1 + \log(1 + \hat{r}(1))] \quad (3.14)$$

Em que $\hat{r}(k)$ é o coeficiente de autocorrelação amostral dado pelas equações 3.15 e 3.16.

$$\hat{r}(k) = \frac{\hat{C}(k)}{\hat{C}(0)} \quad (3.15)$$

$$\hat{C}(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-k} (X_j - \bar{X})(X_{j+k} - \bar{X}) \quad (3.16)$$

Para este trabalho, o método Kettani-Gubner será utilizado como referência principal para o cálculo do parâmetro de *Hurst*, apesar de que cálculos com outros métodos também serão utilizados. Segundo (KETTANI; GUBNER, 2002), este método, apresentado em 2002, tem como vantagens a eficiência em termos computacionais e a capacidade de se chegar a resultados precisos mesmo com um menor número de amostras. Trabalhos posteriores (BARRETO, 2007; DEUS, 2007; PAIVA; FRAGA, 2007; QUEIROZ; CARNEIRO, 2006; SILVA, 2005) utilizaram este método com resultados satisfatórios.

3.2.2.2 Variance Time Plot

A análise *Variance Time Plot* (VTP) é baseada na propriedade de decaimento lento do processo autossimilar submetido a agregação. A variância do $X^{(m)}$ agregado é definida pela equação 3.17.

$$Var [X^{(m)}] = 1/(N/m) \sum_{j=1}^{N/m} (X_j^{(m)} - \bar{X})^2 \quad (3.17)$$

As variâncias dos processos agregados $X^{(m)}$ ($m = 1, 2, 3, \dots$) decresce linearmente (para grandes m), conforme a relação da equação 3.18.

$$Var [X^{(m)}] = Var [X] / m^\beta \quad (3.18)$$

Em que $H = 1 - \beta/2$.

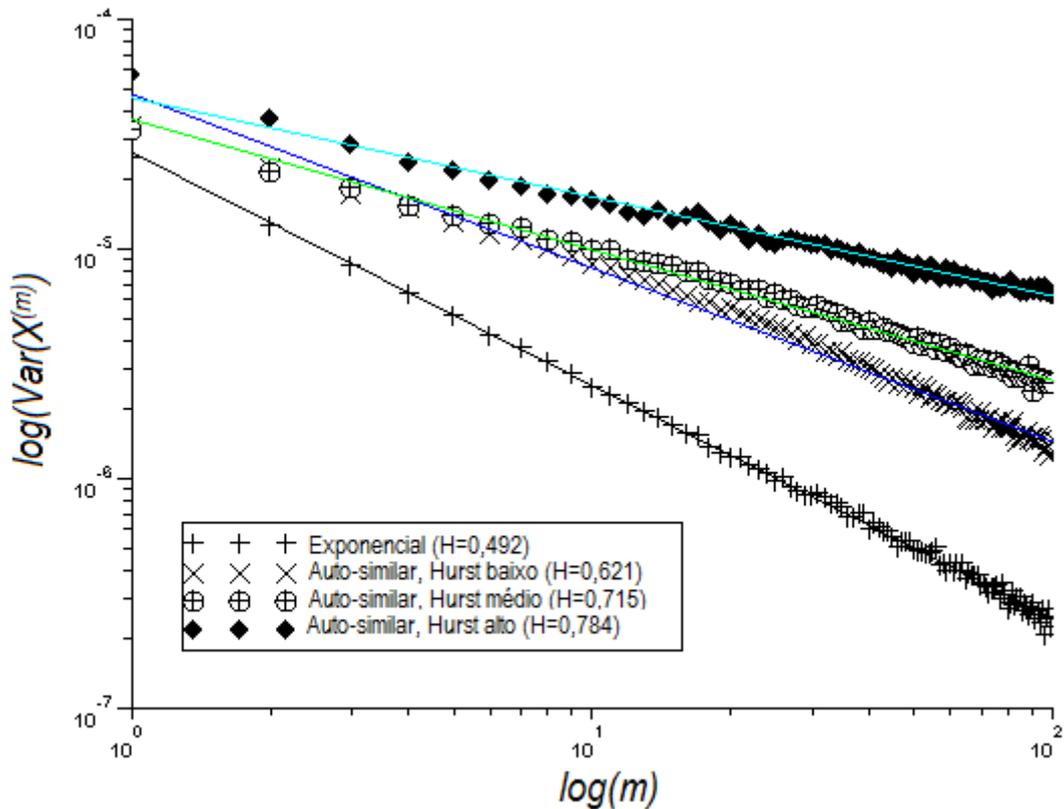


Figura 3.2: Exemplo de estimativa do parâmetro de Hurst usando VTP

A VTP é obtida ao se traçar o gráfico $\log(\text{Var}(X^{(m)}))$ contra $\log(m)$ e se fazendo o ajuste da amostra por uma linha através dos quadrados mínimos pelos pontos obtidos, ignorando-se os valores pequenos de m . O valor de β é calculado por meio da inclinação da reta obtida. Um valor de β entre -1 e 0 sugere autossimilaridade e a estimativa do parâmetro de Hurst é dado por $H = 1 - \beta/2$.

A figura 3.2 mostra um exemplo de um gráfico obtido para estimativa do parâmetro de Hurst usando o método VTP. Foram gerados quatro tráfegos sintéticos, sendo que o primeiro com distribuição exponencial, e os três seguintes com distribuição autossimilar com variados valores para o parâmetro de Hurst. Como pode ser visto na figura, uma distribuição exponencial tem parâmetro de Hurst em torno de 0,5. Uma distribuição autossimilar com parâmetro de Hurst baixo tem H mais próximo de 0,5 e um valor alto se aproxima de 1,0.

Este é um método bastante utilizado para se estimar o parâmetro Hurst devido a sua simplicidade, fácil implementação e de sua confiabilidade. Por outro lado, o custo computacional de sua utilização é relativamente alto. Este trabalho utilizará o método VTP como segundo critério para avaliação do parâmetro de Hurst, logo após o método Kettani-Gubner.

3.2.2.3 Periodograma

O método do Periodograma estima o valor do parâmetro de Hurst com base na densidade espectral de potência do processo. Um processo com dependência de longa duração geralmente possui função de autocorrelação com decaimento lento, seguindo uma função hiperbólica descrita pela eq. 3.19

$$r_X(k) \approx c_1 |k|^{\gamma-1}, k \rightarrow \infty, \gamma \in (0, 1) \quad (3.19)$$

A densidade espectral de potência de um processo que segue essa função de autocorrelação é dada pela eq. 3.20

$$f_X(\lambda) \approx c_2 |\lambda|^{-\gamma}, \lambda \rightarrow 0, \gamma \in (0, 1) \quad (3.20)$$

Trazendo pra a forma logarítmica, obtém-se a equação 3.21.

$$\log(f_X(\lambda)) \approx \log(c_2) - \gamma \log(\lambda) \quad (3.21)$$

De acordo com (QUEIROZ; CARNEIRO, 2006), para que o processo seja pelo menos assintoticamente autossimilar de segunda ordem, é necessário que $\gamma = 2H - 1$. Assim, o parâmetro de Hurst pode ser estimado a partir do gráfico do periodograma, plotando o logaritmo da densidade espectral de potência da série de tempo contra o logaritmo das frequências. A partir da inclinação da reta de melhor ajuste encontra-se o valor aproximado de γ . Então o parâmetro de Hurst é estimado por:

$$\hat{H} = \frac{\gamma + 1}{2} \quad (3.22)$$

O método do periodograma pode ser um bom estimador para o valor de H , desde que se tenha um número elevado de amostras. No caso de poucas amostras, os resultados podem ser incoerentes, podendo até calcular valores de H maiores que 1. Por isso, será utilizado como uma informação adicional aos resultados deste trabalho.

3.2.2.4 Whittle

Este método é baseado na minimização da função de probabilidade, que é aplicada ao periodograma da série de tempo. Fornece uma estimativa do parâmetro de Hurst e produz um intervalo de confiança.

Considerando um processo autossimilar X com função de amostra x_t deve-se determinar a densidade espectral de potência $f(\lambda, H)$ do processo X normalizado para ter variância 1, e o

periodograma $I(\lambda)$ da função amostra x_t . A densidade espectral de potência de um processo autossimilar pode ser escrita em função do parâmetro de Hurst. Nesse caso, o parâmetro de Hurst é calculado ao se encontrar o valor de \hat{H} que minimiza a seguinte integral:

$$g(\hat{H}) = \int \frac{I(\lambda)}{f(\lambda; \hat{H})} \quad (3.23)$$

Da mesma forma que o método do periodograma, este método é utilizado neste trabalho como resultado complementar. O método de *Whittle* apresenta resultados discrepantes quando usado para números reduzidos de amostras e possui o custo computacional mais elevado de todos os métodos listados.

3.2.2.5 Análise R/S

Outro método gráfico de se estimar o parâmetro de Hurst de uma série aleatória, denominado “Análise R/S”, é baseado no *rescaled adjusted range statistics* $R(d)/S(d)$ (GOSPODINOV; GOSPODINOVA, 2005) em que $S^2(d)$ é a variância da amostra. Para um número de valores d tem-se a expressão da eq. 3.24.

$$R(d) = \max \{0, W_1, W_2, \dots, W_d\} - \min \{0, W_1, W_2, \dots, W_d\} \quad (3.24)$$

Em que W_k é dado pela expressão da equação 3.25.

$$W_k = (X_1, X_2, \dots, X_k) - k\bar{X}(d) \quad (3.25)$$

Em que $\bar{X}(d)$ é a média. Após o cálculo destas amostras R/S para valores de d logaritmicamente espaçados traça-se o gráfico $\log(R(d)/S(d))$ por $\log(d)$. Em seguida, por meio dos quadrados mínimos, calcula-se a reta de melhor ajuste ignorando os menores e maiores valores. A inclinação do resultado dessa regressão linear é uma estimativa para o parâmetro H .

A figura 3.3 mostra um exemplo de estimações do parâmetro de Hurst pelo método R/S. O cálculo do H foi feito sobre tráfegos gerados com diferentes características. Pode-se ver que o parâmetro de Hurst de um tráfego exponencial (figura 3.3(a)) possui H mais baixo, em torno de $h = 0,5$. Os tráfegos gerados com fontes autossimilares (figura 3.3(b), (c) e (d)) possui distintos valores para H .

Apesar de ser considerado como um bom estimador, o método R/S não será utilizado nos capítulos de análises por não apresentar vantagens em relação aos outros métodos e não foi implementado nas ferramentas utilizadas na presente pesquisa.

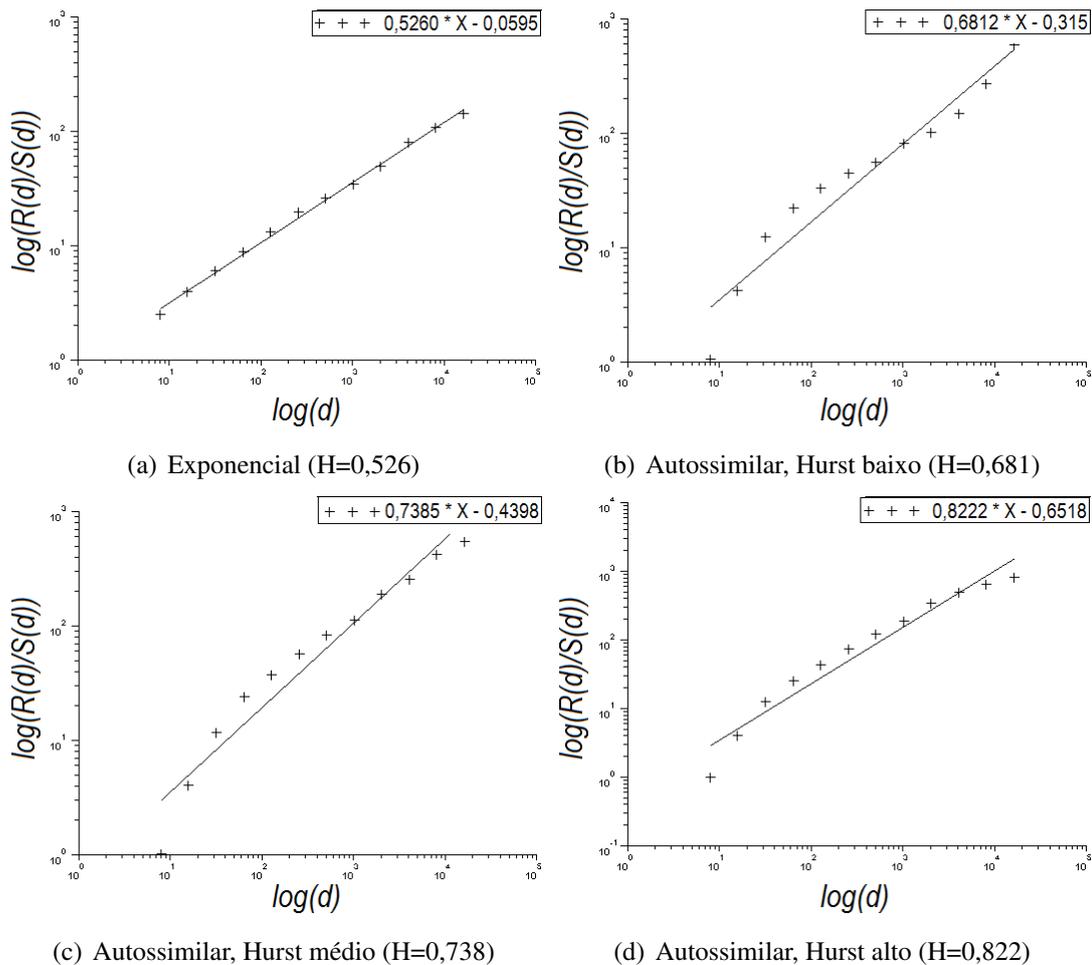


Figura 3.3: Exemplo de estimativa do parâmetro de Hurst usando análise R/S

3.3 MODELO DE AUTOSSIMILARIDADE BASEADO NOS QUADROS COMPONENTES DO TRÁFEGO

O foco deste trabalho é entender o tráfego em redes sem fio, fornecendo novas abordagens de como essas redes podem ser melhoradas. Como dito anteriormente, o tráfego em redes sem fio é formado basicamente por três tipos de quadros: gerenciamento, controle e dados. Os quadros de dados são gerados pelas camadas superiores da pilha de protocolo, enquanto que os quadros de gerenciamento e controle estão apenas na camada de enlace e são inseridos pelos mecanismos do protocolo 802.11 para que haja um correto funcionamento da rede. Assim, torna-se interessante conhecer o comportamento desses quadros e saber a sua influência no tráfego agregado.

Existem diversas pesquisas que buscam compreender como os diferentes tipos de quadros se relacionam na rede, inclusive ao se observar o aspecto da autossimilaridade. O trabalho publicado em (XIANG et al., 2009) propõe a relação de autossimilaridade entre os três tipos de quadro de redes sem fio (controle, dados e gerenciamento) e o tráfego de quadros agregado. Este modelo de relacionamento é baseado no tamanho médio de quadro e a proporção de

quadros, que leva a diferentes efeitos individuais no tráfego total. Como o tráfego agregado é a soma dos tráfegos de quadros de controle, dados e gerenciamento, foi considerado que o modelo de relacionamento seria linear. Isso quer dizer que, o valor do Hurst do tráfego agregado é uma combinação linear dos valores de Hurst destes três tipos de quadro.

Os valores de Hurst do tráfego de quadros agregado ($H_{agregado}$) e do tráfego restante ao se excluir determinados tipos de quadro satisfaz o modelo de combinação linear apresentado na equação 3.26.

$$H_{agregado} = \alpha_g H_g + \alpha_c H_c + \alpha_d H_d \quad (3.26)$$

em que, H_g é o valor de Hurst do tráfego de quadros com quadros de gerenciamento removidos, H_c é o valor de Hurst do tráfego de quadros com quadros de controle removidos e H_d é o valor de Hurst do tráfego de quadros com quadros de dados removidos. O coeficiente de combinação normalizado $\alpha(\alpha_g, \alpha_c, \alpha_d)$ é uma função do tamanho médio de quadro l e da proporção de quadros p . E α é expresso pela equação 3.27.

$$\alpha_i = \frac{\sum_i \beta_i - \beta_i}{2 \sum_i \beta_i}, i = g, c, d; \quad (3.27)$$

$$\beta_i = \left| p_i - \frac{1}{3} \right| + \frac{|l_i - l_{ag}|}{l_{ag}} \quad (3.28)$$

em que g , c e d representam quadros de gerenciamento, controle e dados respectivamente; p_i e l_i são a proporção e tamanho médio de quadro para cada tipo de quadro e l_{ag} é o tamanho médio de quadro do tráfego de quadros agregado.

Como o tráfego agregado de quadros é a soma dos três tipos de tráfegos de quadros, a forma básica do modelo proposto é fundado na forma de uma combinação linear. Além disso, o impacto causado pelo coeficiente de combinação normalizado $\alpha(\alpha_g, \alpha_c, \alpha_d)$ relaciona o tamanho médio e da proporção dos tipos específicos de quadros.

Na equação, $\left| p_i - \frac{1}{3} \right|$ mede a diferença absoluta entre a proporção de um tráfego de quadros específico e a proporção média dos três tipos de tráfego. De maneira similar, $|l_i - l_{ag}| / l_{ag}$ mede a diferença do tamanho médio de quadro entre o tráfego de quadros específico e o tráfego de quadros agregado relativo à média do tamanho do tráfego agregado. Assim, β_i mede a diferença entre o tráfego de quadros específico e o tráfego agregado.

Observando-se o modelo proposto observa-se que, como α é um fator normalizador, quanto menor o fator β maior o fator α e maior a contribuição daquele Hurst específico para o Hurst agregado. Além disso, quanto mais próximo da média (proporção e tamanho agregado), menor o β . Assim, por exemplo, se a proporção do tráfego de gerenciamento for mais

discrepante do que seria a proporção média (1/3), o fator β é maior e o fator α é menor. Conseqüentemente, aquele tráfego que não possui os quadros de gerenciamento tem uma contribuição menor para o Hurst total. Da mesma forma, se o tamanho médio do tráfego de gerenciamento for discrepante do tamanho médio agregado, o fator β é maior e o fator α é menor. Logo, aquele tráfego que não possui os quadro de gerenciamento tem uma contribuição menor para o Hurst total.

O modelo definido pela equação 3.26 será verificado nas análises de tráfego real do capítulo 4 e espera-se que seja válido para o estudo das propriedades de autossimilaridade em redes sem fio.

3.3.1 Coleta do tráfego em redes sem fio

Para o planejamento e projeto adequado de uma rede de comunicação é preciso que se conheça a natureza do tráfego que irá suportar. Uma forma de se promover novas percepções ao planejador da rede é a análise de tráfego real proveniente de uma rede similar e a comparação desses dados com séries de tráfego sintéticos que viriam a simular possíveis aplicações na rede. Através dessa análise é possível se fazer previsões mais realistas e dar maior consistência aos estudos realizados.

A captura de tráfego de redes reais pode oferecer valiosos insumos quando se trata de engenharia de tráfego, mas é fundamental que a coleta tenha as informações relevantes ao objeto em estudo. Por exemplo, o ponto onde será feita a captura poderá ser mais próximo do acesso dos usuários fornecendo informações mais personalizadas ou voltado ao núcleo da rede, dando informações mais agregadas. A coleta também pode ser feita nos mais diferentes níveis de referência do modelo OSI. Caso se deseje buscar as camadas superiores (como Aplicação e Transporte), suprime as informações das camadas inferiores (Acesso ao meio e Física). Além disso, as coletas podem trazer informações sumarizadas onde se define uma escala de tempo para agregação do volume de informação (por exemplo em pacotes ou bytes) ou ainda fornecer informações bem detalhadas de cada quadro, datagrama ou pacote, incluindo o cabeçalho. Também é importante considerar a privacidade dos usuários de modo que não seja possível associar alguma informação a um usuário em particular ou obter os dados que ele envie ou receba.

O estudo do tráfego em redes sem fio apresenta novos desafios também na questão da coleta de tráfego real. Essas novas dificuldades incluem a propriedade das redes e o método de captura. O principal problema relacionado à propriedade da rede é que apenas os operadores da rede tem acesso para monitorá-la. Mesmo quando os operadores desejam prover os resultados de suas capturas, nem sempre estas incluem todas as informações para uma análise completa, porque são coletados pelo operador para diferentes propósitos (HALEPOVIC; WILLIAMSON; GHADERI, 2009).

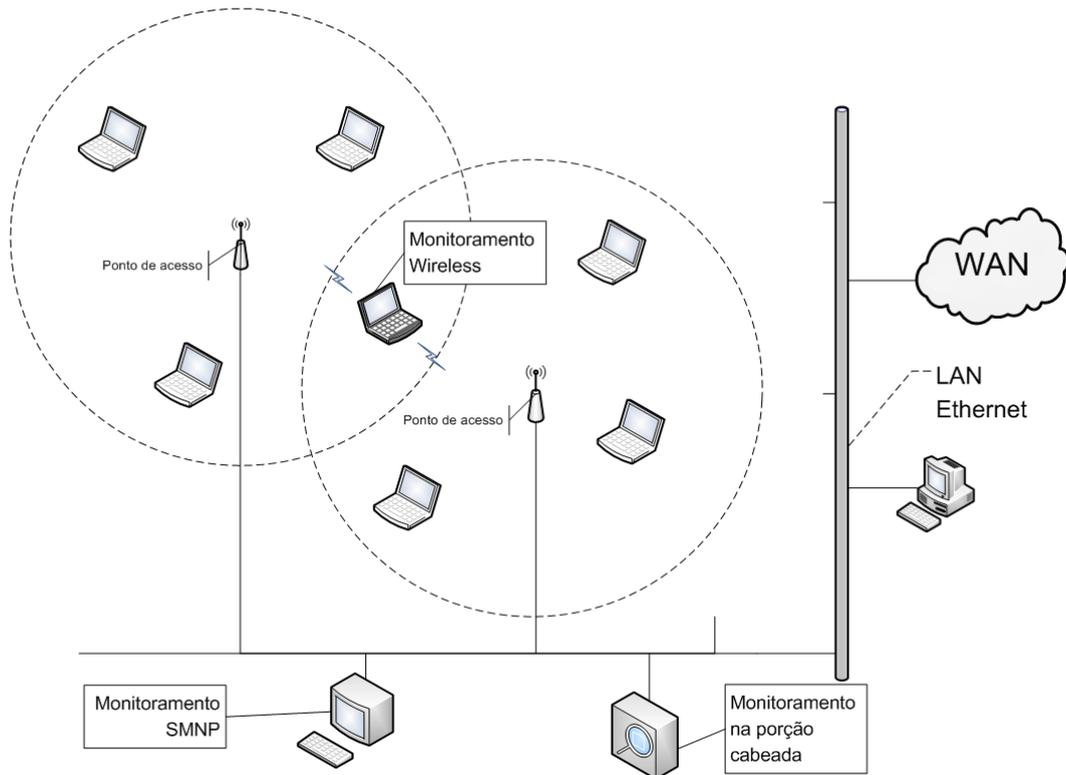


Figura 3.4: Coleta do tráfego

As dificuldades relacionadas ao método de captura do tráfego em redes sem fio emergiram à medida que foram crescendo a população de usuários, área de cobertura e o volume de dados. Inicialmente, o monitoramento dessas redes eram feitos na parte cabeada da rede e/ou combinadas com logs SNMP (HALEPOVIC; WILLIAMSON; GHADERI, 2009; YEO; YOUSSEF; AGRAWALA, 2004). As medidas obtidas neste lado cabeado da rede podem fornecer estatísticas de tráfego precisas observáveis nessa porção da rede. Entretanto, praticamente elas não expõe efetivamente as características instantâneas do meio sem fio, tais como informações da camada física (PHY) e de acesso ao meio (MAC) do IEEE 802.11. A razão é que o SNMP traz informações sumarizadas obtidas periodicamente (tipicamente a cada 1 - 5 minutos) e o monitoramento na porção cabeada apenas contém informações limitadas. Um estudo no comportamento dos protocolos MAC, por exemplo, requer a obtenção das informações da parte sem fio da rede.

Para a captura de informações detalhadas das camadas PHY/MAC, técnicas de monitoramento sem fio podem ser usadas (YEO; YOUSSEF; AGRAWALA, 2004; MAHANTI; WILLIAMSON; ARLITT, 2007). Essas técnicas, também conhecidas como *vicinity sniffing* (GE et al., 2010; HALEPOVIC; WILLIAMSON; GHADERI, 2009; JARDOSH et al., 2005a; PHIL et al., 2009), consistem em um conjunto de dispositivos chamados *sniffers* que observam o meio e capturam os sinais das redes sem fio. O monitoramento sem fio é muito útil para o entendimento das características do tráfego ou para detecção de anomalias.

O principal ponto do monitoramento na porção sem fio da rede é expor os atributos desse meio permitindo que sejam feitas inferências das características das camadas PHY/MAC. Assim, esta técnica permite examinar as informações de cabeçalho da camada física, tais como a força do sinal, nível de ruído e a taxa de transmissão de cada quadro. De forma similar, também permite que se examine cabeçalhos da camada de enlace do protocolo.

Ao se analisar os dados da camada MAC do 802.11, pode-se caracterizar o tráfego de acordo com diferentes tipos de quadros (dados, controle e gerenciamento). Os dados coletados, combinados com *timestamps*, podem ser usados para caracterizações precisas das operações em nível de enlace do protocolo.

Apesar das numerosas vantagens do monitoramento sem fio, a técnica possui alguns pontos negativos que devem ser considerados:

- Limitações de capacidade dos equipamentos: cada *sniffer* possui limitações, tais como alcance de recepção do sinal, espaço de armazenamento, poder de processamento e etc.;
- Posicionamento dos equipamentos: os equipamentos devem ser posicionados de forma que seja possível receber a maior do tráfego com potência de sinal adequada;
- Sincronização: é complexa a tarefa de coletar, sincronizar e remover redundâncias em um grande volume de dados obtidos por múltiplos *sniffers*;
- Pacotes não capturados: os *sniffers* não são capazes de armazenar todos os quadros em redes de grande escala, seja por suas limitações ou por estar fora do alcance do sinal. Se o número de quadros não capturados for muito alto, a análise da rede pode se tornar imprecisa.

O método *vicinity sniffing* será utilizado nas simulações e poderá se fazer uma avaliação dos resultados apresentados no capítulo 5.

3.4 PESQUISAS SOBRE O TRÁFEGO EM REDES SEM FIO

Vários trabalhos avaliam os fenômenos estatísticos do tráfego em redes sem fio para melhor compreensão das suas propriedades. Por exemplo, em (WANG; YU; MAO, 2009), três métodos estatísticos de estimativa do parâmetro de Hurst (R/S, VTP e Periodograma) são utilizados para se medir a autossimilaridade em redes sem fio. As simulações demonstram que o tráfego apresenta autossimilaridade em diversas escalas de tempo e que o tráfego agregado de diversas fontes autossimilares conserva essa característica. Também foi verificado que a agregação de fontes autossimilares aumentam, em vez de amenizar as rajadas.

Em (YU; PETROPULU, 2006), é feito um estudo analítico sobre como as características do tráfego proveniente de redes cabeadas se propagam para as redes sem fio ao se passar pelo

gateway. Os resultados mostram que, na maioria dos casos, o tráfego autossimilar originado nas redes cabeadas produz como resposta um tráfego também autossimilar na rede sem fio.

Outro trabalho relacionado (TICKOO; SIKDAR, 2003) desenvolve um modelo analítico para caracterizar a distribuição do tempo entre chegadas no tráfego de redes sem fio. As simulações mostram um resultado divergente dos trabalhos citados anteriormente. Foi encontrado que, embora os padrões de tráfego em fontes individuais apresentem dependência de longa duração e autossimilaridade, o tráfego agregado não é autossimilar. O tráfego agregado seria melhor classificado como um processo multifractal.

Os estudos mostrados em (XIANG et al., 2009; GE et al., 2010) analisam o impacto dos diferentes tipos de quadros (dados, controle e gerenciamento) no comportamento autossimilar do tráfego agregado de quadros, mostrando que está relacionado com o tamanho médio dos quadros e a proporção dos quadros específicos no tráfego total.

Os resultados e contribuições dos trabalhos anteriores ainda não permitem identificar um modelo de desempenho amplamente aceito para as redes sem fio e mostram, por sua vez, a complexidade das variáveis envolvidas e que a natureza estatística do tráfego nessas redes é um fator determinante.

O presente trabalho se configura como instrumento de avanço nas pesquisas de redes sem fio por apresentar os estudos sob uma perspectiva distinta das pesquisas citadas anteriormente. Primeiramente, buscou-se elucidar a questão da autossimilaridade em redes sem fio ao se analisar o tráfego proveniente em redes reais e também o tráfego em simulações de redes. Além de identificar a existência do fenômeno autossimilar, verificou-se também o seu impacto nos parâmetros de qualidade de serviço. Também foi analisado nos padrões de tráfego da camada de enlace elementos de possível otimização. Algumas dessas possibilidades foram avaliadas em simulações de redes sem fio, onde se conclui que há a necessidade de verificação da eficiência dos protocolos da camada de enlace.

3.4.1 O tráfego indesejável em redes sem fio

A diferenciação dos tipos de tráfego nas redes sem fio tem uma importância relevante quando se analisa a camada de enlace. Muitas vezes, alguns componentes do tráfego não são estritamente necessários e acabam por prejudicar o desempenho da rede de modo geral. Um foco de estudo na otimização das redes sem fio é avaliar a verdadeira necessidade de se utilizar estes tipos de quadros em todas as situações de comunicação nessas redes. No trabalho publicado em (RAGHAVENDRA et al., 2010), através da análise do tráfego coletado em uma rede de grande porte, estuda-se a questão de que uma parte significativa do tráfego da camada de enlace, que compõe os mecanismos que iniciam, mantêm e alteram as conexões entre o cliente e o ponto de acesso, provoca efeitos adversos na rede em determinados momentos e poderia ser evitada. Essa abordagem proposta se apresenta interessante pois

potencialmente permitiria que, a partir da análise do tráfego, se promova um mecanismo de aumento da eficiência no protocolo de acesso ao meio das redes 802.11 ao se considerar o impacto do tráfego que poderia ser chamado de “desnecessário” para certos cenários de uso de redes sem fio.

O tráfego indesejável é particularmente prejudicial a grandes redes, quando existe um elevado índice de congestionamento, pois leva a perdas de oportunidades de transmissão e utilização ineficiente do meio. Como resultado, as estações concluem erroneamente que perderam a conexão com seus AP's e iniciam o processo de *handoff*. À medida que a congestão aumenta, a taxa de *handoffs* aumenta, mesmo na ausência de mobilidade. Muitos desses *handoffs* são desnecessários e impactam negativamente a vazão da rede.

O trabalho citado se concentra em avaliar os quadros do tipo gerenciamento e dados. Quanto ao tráfego de controle, foi observado no tráfego analisado que era composto principalmente por quadros ACK, RTS e CTS. Os quadros ACK são necessários para a confirmação do recebimento dos quadros de dados e o mecanismo RTS/CTS foi pouco utilizado, causando um aumento insignificante no *overhead*. Nesse caso, em redes sem fio, os quadros de gerenciamento e dados oferecem maiores possibilidades de análise e possíveis propostas de melhoria.

Foram identificados dois mecanismos que contribuem para o tráfego indesejado em redes sem fio: Mensagens de *keepalive* e mecanismos de sondagem. Mensagens de *keepalive* são usadas para manter a conexão entre cliente e AP na ausência de tráfego de dados. Um grande número de quadros de dados sem informação (*Null Data*) são transmitidos periodicamente pelos clientes e então são confirmados (*ACK*) pelo AP. Esse processo impede que um AP interrompa a conexão de um cliente que passa muito tempo inativo. Os mecanismos de sondagem são usados pelos clientes que frequentemente coletam informações da vizinhança. Clientes enviam por *broadcast* quadros de sonda (*PRQ*) buscando por AP's na vizinhança. Estes, por sua vez, enviam respostas *unicast* às sondas (*PRP*) com informações necessárias para associação. Essa sondagem agressiva permite *handoffs* muito rápidos e é ideal quando os clientes possuem grande mobilidade. No entanto este comportamento em uma rede estática e congestionada impõe um *overhead* desnecessário e leva a uma utilização ineficiente do meio.

Esse tipo de estudo pode ser útil para o projeto de sistemas e protocolos que sejam mais adaptativos às condições da rede. É possível que melhorias do protocolo e melhores implementações permitam a redes em grande escala ter a capacidade de suportar melhor a sua carga. Pela natureza deste trabalho, a abordagem proposta por (RAGHAVENDRA et al., 2010) se apresenta interessante pois potencialmente permitiria que a partir da análise do tráfego se aumente a eficiência do protocolo de acesso ao meio das redes 802.11.

3.5 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os conceitos de engenharia de tráfego, aplicando-se seus princípios às redes sem fio. Foram abordadas algumas definições de qualidade de serviço esperadas em ambientes sem fio e de tráfego multimídia. Também foram apresentadas metodologias de caracterização do tráfego através de características de autossimilaridade e dependência de longa duração. Por fim foram mostrados modelos de coleta e análise de tráfego de redes sem fio. A questão relativa ao tráfego indesejado se mostrou tecnicamente viável e atual para ser aplicada no desenvolvimento posterior deste trabalho.

O próximo capítulo mostra algumas análises sobre tráfego real aplicando as metodologias descritas nos capítulos anteriores.

4 TAXONOMIA DO TRÁFEGO EM UMA REDE SEM FIO

Este capítulo apresenta algumas análises sobre tráfegos de redes reais com objetivo de aprofundar os modelos apresentados nos capítulos anteriores. Os resultados são analisados e discutidos para se entender melhor a natureza do tráfego nas redes sem fio.

Uma das formas de melhor compreender o tráfego de uma rede, e conseqüentemente obter maior conhecimento sobre seu funcionamento, é se fazer uma análise abrangente sobre uma série de tráfego proveniente de uma rede real. Um estudo desse tipo fornece informações importantes para o pesquisador, tais como: quais os tipos de quadros ou pacotes presentes na rede e suas propriedades estatísticas; quais protocolos estão atuando; como os recursos da rede estão sendo consumidos; como se dá a interação entre as camadas da pilha de protocolos; e outros. Neste trabalho, esse tipo de estudo será chamado de análise taxonômica do tráfego, por colocar em evidência a composição do tráfego e suas características nas diferentes camadas.

Alguns trabalhos de pesquisa apresentam esse tipo de análise para tráfegos coletados em redes sem fio. Em (YAMKHIN; WON, 2009) é feita uma análise sobre o tráfego coletado na parte cabeada de uma rede sem fio existente em um campus universitário. São apresentadas diversas estatísticas relacionadas ao tráfego quando observado sob diferentes pontos de vista, como quando classificado por tipo de protocolo ou sentido do fluxo dos pacotes. Embora os resultados apresentados sejam interessantes, por ter sido coletado na parte cabeada, o tráfego não apresenta as informações contidas na parte sem fio da rede.

Para estender a compreensão dos conceitos discutidos anteriormente, será feita a análise de uma série de tráfego real coletado de uma rede sem fio operacional. A análise consiste primeiramente no estudo taxonômico dos componentes do tráfego e suas características, nas camadas de enlace, de rede e transporte. Em seguida, será discutida a caracterização do tráfego como um modelo autossimilar.

4.1 SOBRE O TRÁFEGO COLETADO

A coleta foi feita na camada de enlace de uma rede de larga escala e bastante utilizada estabelecida no 62º encontro *Internet Engineering Task Force* (IETF) (JARDOSH et al., 2005) conforme trabalho desenvolvido por (JARDOSH et al., 2005a). O encontro ocorreu em Minneapolis, Minnesota nos dias 6 a 11 de março de 2005, e contou com a presença de 1138 participantes. A maioria dos participantes usava *laptops* ou outros dispositivos sem

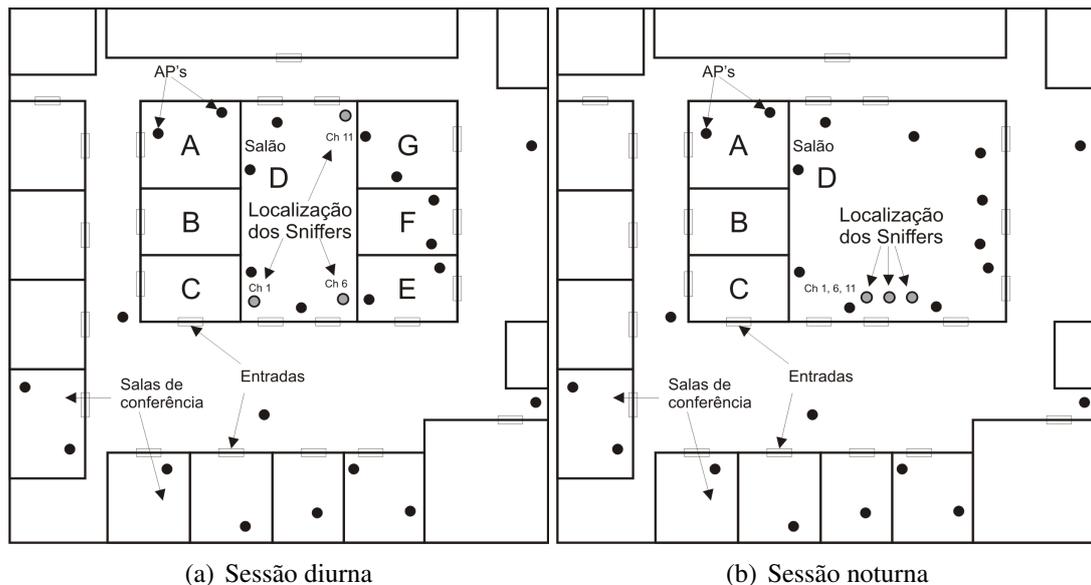


Figura 4.1: Layout do 62º encontro IETF (JARDOSH et al., 2005a, modificada)

foi. A captura de dados durante dois dias do encontro contabilizou cerca de 57 milhões de quadros e aproximadamente 45 gigabytes de dados. O tráfego da rede sem fio estava distribuído igualmente nos três canais ortogonais 1, 6 e 11. Também, observou-se que os pontos de acesso trocavam de canal dinamicamente para equilibrar o número de usuários e o volume de tráfego nos três canais.

A rede foi composta por 38 pontos de acesso (AP) utilizando o protocolo **802.11b** distribuídos em três pavimentos. Cada AP físico suporta quatro AP's virtuais ou lógicos, totalizando assim 152 AP's disponíveis. A coleta do tráfego foi feita no pavimento em que estavam sendo realizadas as conferências, onde estavam localizados 23 AP's físicos. Os demais 15 AP's físicos estavam localizados nos dois pavimentos adjacentes. A figura 4.1 exibe a localização dos AP's e dos *sniffers* no pavimento de conferência durante as sessões diárias e noturnas, sendo que nesta, algumas paredes temporárias foram removidas para a formação de um grande salão.

O método *vicinity sniffing* foi utilizado para a coleta dos dados na camada MAC da rede. A estrutura utilizada era composta por três *sniffers* configurados para capturar tanto quadros de dados quanto quadros de gerenciamento e controle. Como os pontos de acesso estavam configurados para operar nos canais 1, 6 e 11, cada *sniffer* foi programado para realizar a captura em um dos três diferentes canais em cada sessão.

Neste trabalho, foi analisado um período de aproximadamente 50 minutos (3004,25 segundos), iniciado às 11:00:55 do dia 09 de março de 2005, do tráfego do canal 6.

4.1.1 Outros trabalhos

Diversos trabalhos na literatura utilizaram a mesma série de tráfego descrita na seção anterior como base para pesquisa sobre redes sem fio. Em (JARDOSH et al., 2005a) foram usadas as informações da camada de enlace do referido tráfego para o estudo da congestão em redes sem fio. Dentre os resultados conseguidos, mostra-se que o uso de adaptação de taxa de transmissão como resposta a congestão é prejudicial para o desempenho da rede. Já em (XIANG et al., 2009; GE et al., 2010), é feita uma análise dos tipos de quadros dividindo-se por períodos. O tráfego é utilizado para ilustrar o modelo de cálculo do parâmetro de Hurst descrito na seção 3.3, porém os resultados são expressos apenas qualitativamente. O trabalho (JARDOSH et al., 2006) analisa o desempenho degradado e a situação de colapso da rede, propondo uma nova forma de gerenciamento de associação dos usuários para prover oportunidades justas de acesso às redes sem fio.

As próximas seções apresentam a análise das informações contidas no tráfego sob outros aspectos, visando a complementar os estudos existentes.

4.2 CAMADA MAC (WLAN)

O tráfego da camada MAC do trecho de tráfego analisado corresponde a 1.885.258 quadros, com um volume total de 552,27 MB ($5,791 \times 10^8$ bytes). A tabela 4.1 exibe um resumo das estatísticas gerais relacionadas ao tamanho e intervalo entre quadros. O tamanho médio dos quadros capturados é de aproximadamente 307,16 bytes, com uma variância de 215802,5. O intervalo de tempo médio entre chegadas foi de 0,0015935 segundos com variância de 0,0000062.

Tabela 4.1: Estatísticas da camada WLAN

Número de quadros	1.885.258 quadros
Tamanho total	$5,791 \times 10^8$ bytes
Tamanho médio	307,15516 bytes
Variância do tamanho	215802,5
Tempo médio entre chegadas	0,0015935 segundos
Variância do tempo entre chegadas	0,0000062

As especificações do protocolo 802.11b definem quatro taxas de transmissão suportadas pela rede: 1 Mbps, 2 Mbps, 5,5 Mbps e 11 Mbps. A tabela 4.2 mostra a quantidade de quadros que foram transmitidos em cada uma dessas taxas. A maioria dos quadros foi transmitida à taxa de 1 Mbps, correspondendo a cerca de 47,42%. Em seguida, 31,09% dos quadros foram transmitidos a 11 Mbps, 13,13% a 5,5 Mbps e 8,339% a 2 Mbps. A tabela também mostra que a maior quantidade de bytes ($2,489 \times 10^8$ bytes) foi transmitida a 11 Mbps, o que corresponde a 181,0364 segundos. Os 155.290.255 bytes transmitidos

a 1 Mbps levaram 1242,3220 segundos. Observando os dados exibidos na tabela pode-se constatar que enquanto a maioria dos quadros são transmitidos à menor taxa definida pelo protocolo (1 Mbps), o maior volume em bytes é transmitido pela maior taxa (11 Mbps). Os quadros transmitidos à taxa de 1 Mbps ocuparam o canal por um tempo bastante superior aos transmitidos pelas demais taxas.

Tabela 4.2: Distribuição de quadros por taxa de transmissão

Tipo / Taxa	Número de quadros	Percentual	Soma dos quadros (bytes)	Duração (s)
1 Mbps	894.100	47,42	155.290.255	1242,3220
11 Mbps	586.274	31,09	248.925.178	181,0364
5,5 Mbps	247.667	13,13	113.278.448	164,7686
2 Mbps	157.217	8,339	61.572.834	246,2913

Tabela 4.3: Distribuição de tipos de quadros por taxa de transmissão

Tipo / Taxa	Número de quadros	Percentual	Soma dos quadros (bytes)	Duração (s)
Controle	649.839	34,46	134.843.158	374,74
11 Mbps	307.780	47,36	62.982.323	45,80
5,5 Mbps	137.596	21,17	28.766.103	41,84
1 Mbps	137.166	21,10	28.682.131	229,45
2 Mbps	67.297	10,35	14.412.601	57,65
Gerenciamento	633.025	33,57	88.320.703	702,16
1 Mbps	623.757	98,53	87.300.964	698,40
2 Mbps	8.388	1,325	922.211	3,68
11 Mbps	845	0,133	94.202	0,07
5,5 Mbps	35	0,005	3.326	0,005
Dados	602.394	31,95	355.902.854	757,48
11 Mbps	277.649	46,09	185.848.653	135,16
1 Mbps	133.177	22,10	39.307.160	314,45
5,5 Mbps	110.036	18,26	84.509.019	122,92
2 Mbps	81.532	13,53	46.238.022	184,95

A tabela 4.3 separa a quantidade de quadros transmitidos pelas diferentes taxas agrupados para cada tipo de quadro (controle, gerenciamento e dados). Cerca de 47,36% dos quadros de controle são transmitidos a 11 Mbps. Em relação aos quadros de gerenciamento, 98,53% são transmitidos a 1 Mbps, enquanto a maior parte dos quadros de dados (46,09%) são transmitidos a 11 Mbps. A tabela evidencia que a grande maioria dos quadros de gerenciamento são transmitidos à taxa de 1 Mbps. A maior parte dos quadros de controle e dados são transmitidos à taxa de 11 Mbps, mas existem quantidades significativas sendo transmitidas através das demais taxas. A tabela 4.3 também mostra o tempo ocupado pelo canal por cada tipo de quadro. Os quadros de controle ocupam o canal por 374,74 segundos,

os de gerenciamento por 702,16 e os de dados por 754,48. Portanto, os quadros de dados ocupam o canal por uma quantidade maior de tempo, mas os quadros de gerenciamento possuem um tempo muito próximo a esse.

Para entender o funcionamento da rede e como o meio sem fio é ocupado é preciso observar como os quadros estão distribuídos dentro de cada tipo. A tabela 4.4 mostra a distribuição de quadros para cada tipo e subtipo. Olhando primeiro para o tipo, 34,46% dos quadros são de controle, 33,57% de gerenciamento e 31,95% de dados. Logo, cada tipo de quadro corresponde a cerca de um terço da quantidade total de quadros, com uma leve desvantagem para os quadros de dados. Sendo assim, a maioria dos quadros (gerenciamento + controle) servem apenas para manter o funcionamento da camada de enlace da rede sem fio e são transparentes para as camadas superiores.

Tabela 4.4: Distribuição de tipos e subtipos de quadros

Tipo / Subtipo	Número de quadros	Percentual	Soma dos quadros (bytes)
Controle	649.839	34,46	134.843.158
ACK	633.549	97,49	131.316.449
RTS	9.122	1,403	2.015.113
CTS	4.901	0,754	1.032.660
PS Poll	2.267	0,348	478.936
Gerenciamento	633.025	33,57	88.320.703
Beacon frame	332.116	52,46	53.678.210
Probe Response	105.739	16,70	15.714.336
Deauthentication	99.317	15,68	8.938.614
Probe Request	59.288	9,365	6.420.613
Authentication	22.520	3,557	2.122.610
Association Response	4.836	0,763	483.652
Association Request	4.736	0,748	503.936
Reassociation Response	2.023	0,319	202.300
Reassociation Request	1.527	0,241	173.362
Disassociation	923	0,145	83.070
Dados	602.394	31,95	355.902.854
Dados (simples)	512.058	85,00	344.133.748
Null function	83.013	13,78	7.305.144
QoS Data	7.263	1,205	4.458.562
QoS Null	60	0,009	5.400

Para cada tipo de quadro existe um subtipo, que é definido pela função que desempenha na rede. De acordo com a tabela 4.4, a grande maioria dos quadros de controle são de *Acknowledgement* (97,49%). A função RTS/CTS teve uma participação muito pequena nesta rede mostrando que esta função é pouco utilizada na prática. Além disso, há uma quantidade bastante pequena de quadros *Power Save Pool*. Em relação aos quadros de gerenciamento,

52,46% são quadros de *Beacon* e correspondem à maioria deste tipo de quadro. Em seguida, as porções mais significativas são *Probe Response* (16,70%), *Deauthentication* (15,68%), *Probe Request* (9,365%) e *Authentication* (3,557%). Quanto aos quadros de dados, 85% correspondem aos dados simples e 13,78% aos dados *Null function*. Também há parcelas menos significativas de *QoS Data* e *QoS Null*.

Uma visão geral sobre os dados levantados da camada MAC aponta possíveis deficiências ou pontos onde há potencialidade de melhorias do protocolo 802.11. Como dito anteriormente, a maior parte do número de quadros que trafegam na camada de enlace da rede sem fio são de gerenciamento ou controle, ou seja, só fazem sentido nessa camada. Isso ocupa significativamente a banda disponível que poderia estar sendo utilizada para transmissão de dados propriamente dito. Além disso, apesar da taxa máxima de transmissão da rede ser de 11 Mbps, um volume muito grande de bytes é transmitido a 1 Mbps, sobretudo para os quadros de gerenciamento, e isso contabiliza o maior tempo de ocupação da rede. Sendo assim, novos estudos, como este trabalho, poderão explorar tais pontos em potencial para uma utilização mais eficiente dos recursos da rede.

4.3 CAMADA DE REDE (IP)

Para o estudo do tráfego na camada de rede (IP), aplicou-se um filtro selecionando apenas os quadros que encapsulavam datagramas IP. No período analisado foram encontrados 422.538 datagramas IP, com um total de $2,182 \times 10^8$ bytes. Outras estatísticas primitivas são exibidas na tabela 4.5. Dentre elas pode-se destacar o tamanho médio, cerca de 516,43 bytes, e o intervalo de tempo médio entre chegadas, aproximadamente 0,0071 segundos.

Tabela 4.5: Estatísticas da camada IP

Número de datagramas	422.538 datagramas
Tamanho total	$2,182 \times 10^8$ bytes
Tamanho médio	516,42808 bytes
Variância do tamanho	373979,31
Tempo médio entre chegadas	0,00711 segundos
Variância do tempo entre chegadas	0,0002355

Com base nos endereços IP de origem e destino, também foi feita uma análise do sentido do fluxo dos datagramas, ou seja, o tráfego de *upstream* (datagramas que saem da rede analisada para a Internet) e *downstream* (datagramas que tem origem em terminais na Internet com destino à rede em questão). Os resultados, que são exibidos na tabela 4.6, mostram que a maior parte, ou 54,65%, são em sentido *downstream*, enquanto 38,6% é em sentido *upstream*. Do total de datagramas analisados, 6,75% não puderam ser definidos como *downstream* ou *upstream*.

A tabela 4.7 classifica os datagramas analisados de acordo com a camada superior encapsulada.

Tabela 4.6: Sentido do fluxo dos datagramas IP

Sentido	Número de pacotes	Percentual	Soma dos datagramas (bytes)
<i>upstream</i>	163.125	38,60	65.853.521
<i>downstream</i>	230.935	54,65	148.992.835
indefinido	28.478	6,75	3.364.130

sulada pelo protocolo IP. O protocolo TCP é o mais utilizado, responsável por 73,56% dos datagramas, seguido pelo protocolo UDP, referente a 19,23%. Isso evidencia o fato de que a maioria da comunicação é feita utilizando os protocolos da camada de transporte TCP ou UDP. A tabela ainda mostra parcelas menos significativas de outros protocolos, como ESP, ICMP, GRE, encapsulamento do IPv6 e IGMP.

Tabela 4.7: Protocolos da camada de transporte

Protocolo	Número de pacotes	Percentual	Soma dos datagramas (bytes)
TCP	310.836	73,56	180.910.327
UDP	81.267	19,23	31.647.320
ESP	11.188	2,647	2.892.604
ICMP	9.872	2,336	609.203
GRE	7.641	1,808	1.447.434
IPv6 (encap)	1.327	0,314	689.130
IGMP	407	0,096	14.468

Uma análise geral dos datagramas da camada de rede o que foi dito na seção anterior: do total de quadros da camada de enlace, 1.885.258 quadros, apenas 422.538 são datagramas IP, mostrando o *overhead* do protocolo 802.11. O intervalo de tempo médio entre chegadas também é maior se comparado ao tempo da camada de enlace. Embora esses resultados sejam esperados, demonstra o potencial para que sejam propostas melhorias para melhor fluidez da comunicação na rede.

4.4 CAMADA DE TRANSPORTE (TCP)

Para entender o comportamento da camada de transporte e superiores (camada de aplicação), foi feito um estudo sobre o protocolo TCP no tráfego. O TCP foi escolhido por ser a porção mais representativa dos datagramas IP e por conter informações da porta de origem e destino. Para esta análise foi aplicado um novo filtro sobre os datagramas IP para selecionar apenas aqueles que sejam pacotes TCP, o que resultou em 310.836 pacotes.

A tabela 4.8 classifica o número de pacotes de acordo com a porta. A análise por portas do protocolo TCP é muito importante por mostrar quais as aplicações mais utilizadas na rede estudada. Uma porta é contabilizada tanto no caso de ser origem ou destino, assim

o somatório percentual total é de 200%. Pela tabela, observa-se que a porta com maior utilização é a porta 6881, com 25,88%. Esta porta não figura na lista de portas e aplicações bem definidas, porém esta é uma porta padrão de alguns programas de compartilhamento de arquivo *peer-to-peer* (P2P) conhecido como *Bittorrent*. Da mesma forma, as portas em quarto e quinto lugar, 19255 (11,03%) e 33250 (10,17%), além de outras mostrada na tabela, possuem grande probabilidade de fazerem parte de comunicação P2P. Portanto, existe uma forte tendência de que a rede analisada possua uma grande atividade de comunicações P2P. A tabela 4.9 mostra os mesmos dados mas apenas para as aplicações bem conhecidas. Nesse caso, o maior fluxo de dados ocorre em aplicações SSH, em 24,09% do total de pacotes. Os protocolos HTTP e HTTPS correspondem a 21,05% e 3,98% respectivamente, mostrando a grande utilização de aplicações Web. O restante da tabela exibe outras aplicações conhecidas e o volume de dados em cada uma delas.

Tabela 4.8: Distribuição das portas da camada de transporte

Porta	Número de pacotes	Percentual	Soma dos pacotes (bytes)
6881	80.466	25,88	48.638.999
22	74.892	24,09	50.697.688
80	65.457	21,05	33.052.560
19255	34.291	11,03	20.671.630
33250	31.613	10,17	29.959.718
1111	30.524	9,819	20.193.458
64132	25.122	8,082	15.375.960
993	19.145	6,159	10.040.125
443	12.359	3,976	4.885.302
1412	11.803	3,797	7.499.393
64171	10.888	3,502	6.522.310
3952	8.271	2,660	4.930.434
16905	6.513	2,095	4.125.502
64173	6.512	2,094	4.125.502
3010	6.078	1,955	4.251.551
1863	5.088	1,636	848.850
1603	4.636	1,491	2.733.327
143	3.957	1,273	1.076.550
110	3.839	1,235	1.055.770
1276	3.721	1,197	1.696.255
63308	3.487	1,121	1.000.558
49166	3.487	1,121	1.000.558
5190	2.505	0,805	145.329
995	2.016	0,648	706.630
60530	1.982	0,637	823.342
5222	1.888	0,607	308.781
139	1.848	0,594	47.965

Por meio da tabela, é possível observar a tendência de que haja um grande tráfego P2P na rede, mostrando que essa aplicação é cada vez mais utilizada pelos usuários da rede.

Tabela 4.9: Distribuição das portas conhecidas da camada de transporte

Porta	Número de pacotes	Percentual	Soma dos pacotes (bytes)
SSH	74.892	24,09	50.697.688
HTTP	65.457	21,05	33.052.560
IMAPS	19.145	6,159	10.040.125
HTTPS	12.359	3,976	4.885.302
MSNP	5.088	1,636	848.850
IMAP	3.957	1,273	1.076.550
POP3	3.839	1,235	1.055.770
ICQ/AIM	2.505	0,805	145.329
POP3S	2.016	0,648	706.630
XMPP	1.888	0,607	308.781
NetBIOS	1.848	0,594	47.965
ICA	1.808	0,581	261.887
HTTP (Alt)	1.543	0,496	792.849

Outra aplicação bastante utilizada foi através do SSH, que permite a conexão com outro computador na rede, de forma a executar comandos de uma unidade remota, e possivelmente a criação de túneis virtuais. Os protocolos de navegação HTTP e HTTPS, como esperado, também configuram uma parcela significativa do tráfego da rede.

4.5 AUTOSSIMILARIDADE

Existem diversos estudos que buscam verificar se as características de autossimilaridade, presentes em outros tipos de redes, são encontradas também em redes sem fio, como mostrado na seção 3.4. Por exemplo, em (GE; YANG, 2008) são feitas análises sobre uma série de tráfego real e, ao se estimar os valores de Hurst para o tráfego de quadros em diferentes escalas de tempo, foi encontrado que a série tem característica de autossimilaridade de segunda ordem. Em (WANG; YU; MAO, 2009) foram realizados estudos sobre simulações de redes sem fio e os resultados demonstram que o tráfego exibe autossimilaridade em diversas escalas de tempo e o tráfego agregado de várias fontes autossimilares se mantém autossimilar. Por outro lado, em (TICKOO; SIKDAR, 2003) o resultado de simulações de redes mostram que, enquanto os padrões de tráfego em fontes individuais são mais consistentes com dependência de longa duração e autossimilaridade, em contraste com redes com fios, o tráfego agregado não é autossimilar.

Para se verificar a questão da autossimilaridade do tráfego de redes sem fio, foi feita uma análise do tráfego em estudo observando não somente diferentes escalas de tempo, mas também classificando de acordo com os níveis da pilha de protocolos. Um exame visual do tráfego em diferentes escalas de tempo parte de traçar os gráficos do volume em bytes para as escalas 0,05, 0,1, 1 e 10 segundos para as camadas de enlace (WLAN), de rede (IP) e de transporte (TCP). Os gráficos são exibidos nas figuras 4.2, 4.3 e 4.4. Como pode ser

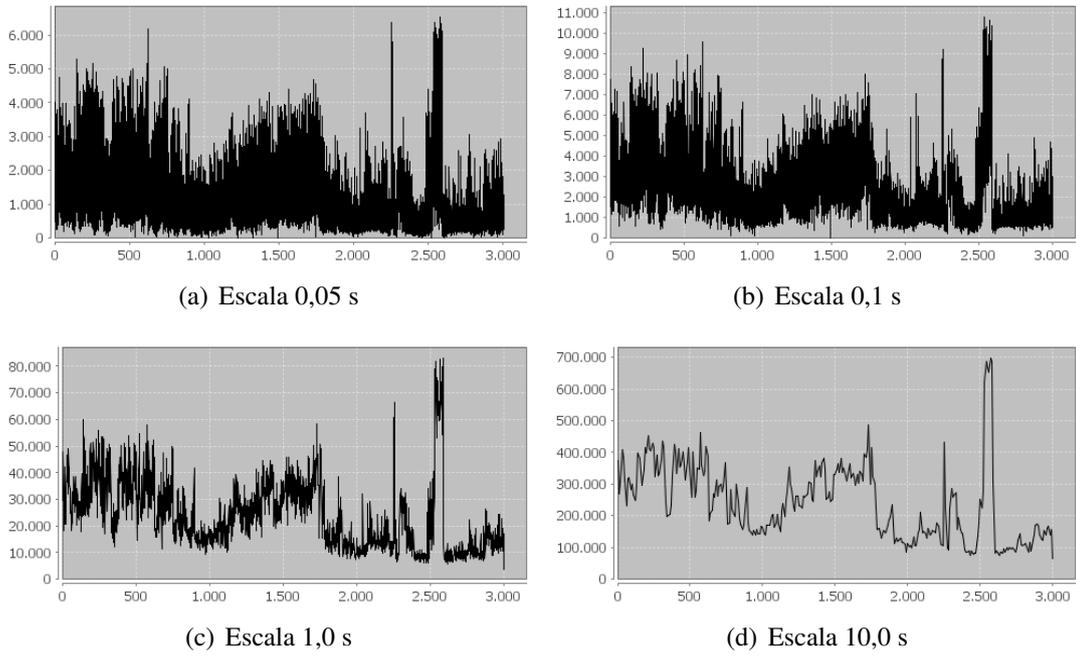


Figura 4.2: Tráfego da camada de enlace agregado em diferentes escalas de tempo

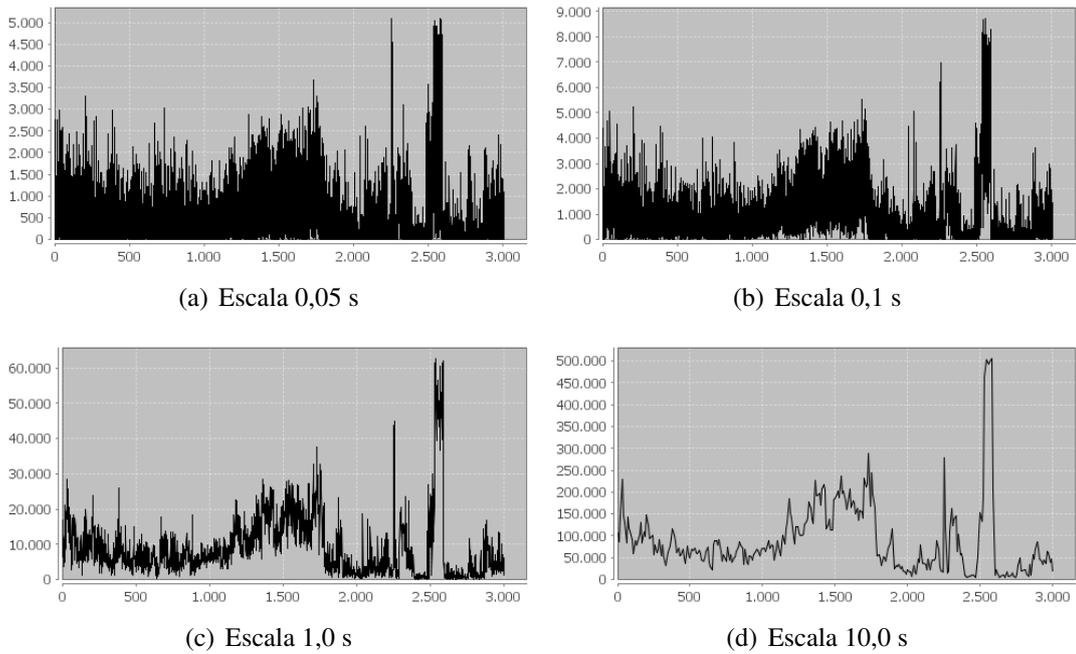


Figura 4.3: Tráfego IP agregado em diferentes escalas de tempo

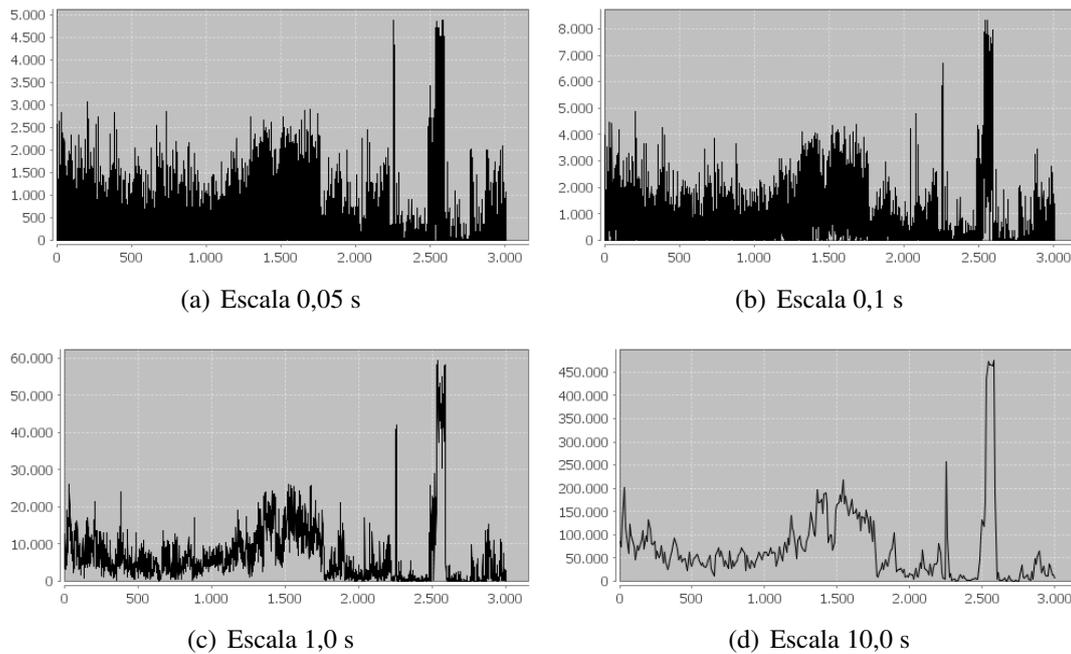


Figura 4.4: Tráfego TCP agregado em diferentes escalas de tempo

visto, não há um efeito notável de suavização da curva, mesmo com o aumento da escala em ordens de magnitude. Também é observável a semelhança do contorno das curvas para as diferentes camadas.

A tabela 4.10 mostra o parâmetro de Hurst calculado por quatro métodos para as diferentes escalas de tempo e dentre as diferentes camadas do protocolo. O primeiro fato constatado é que o parâmetro de Hurst é maior que 0,5 ($H > 0,5$) em todos os resultados, variando no intervalo de 0,7 a 1,0, dependendo do método utilizado e da escala. Sendo assim, o tráfego exibe características autossimilares em todas as camadas. Vale ressaltar que os resultados maiores que 1,0 ou muito próximos a 1,0 ocorrem por falhas dos métodos de *Whittle* e *Periodograma* ao lidar com um número pequeno de amostras. Por esse motivo, o método *Kettani-Gubner* pode ser considerado como o mais representativo, seguido do *VTP*, por apresentar resultados precisos mesmo com pequenos volumes de amostras. Outro resultado bastante notável é que os valores de H se mantêm muito próximos ao longo das diferentes camadas de protocolos. Isso comprova que o comportamento do tráfego nas camadas superiores se reflete nas camadas inferiores em diferentes escalas de tempo.

A tabela 4.11 mostra os valores do parâmetro de Hurst obtidos pelo modelo baseado nos componentes do tráfego, apresentado na seção 3.3. As colunas marcadas com (*) mostram os H 's parciais dos componentes do tráfego. Como descrito anteriormente, significa o valor de H quando determinado componente não está presente. Por exemplo, a coluna *Dados** mostra o valor do parâmetro de Hurst de todo o tráfego exceto os quadros de dados, e assim por diante. A coluna “*Total*” mostra o valor de H calculado pela forma tradicional, ou seja, aplicando-se os métodos de cálculo sobre o tráfego agregado. Já na coluna “*Modelo*”

Tabela 4.10: Valores do parâmetro de Hurst para diferentes escalas e protocolos

(a) Escala: 0,05				(b) Escala: 0,1			
Estimador	Enlace	IP	TCP	Estimador	Enlace	IP	TCP
Kettani-Gubner	0,850	0,851	0,848	Kettani-Gubner	0,898	0,904	0,900
VTP	0,905	0,910	0,907	VTP	0,937	0,942	0,938
Whittle	0,728	0,720	0,722	Whittle	0,760	0,761	0,758
Periodograma	0,741	0,738	0,733	Periodograma	0,826	0,797	0,790

(c) Escala: 1,0				(d) Escala: 10,0			
Estimador	Enlace	IP	TCP	Estimador	Enlace	IP	TCP
Kettani-Gubner	0,967	0,967	0,966	Kettani-Gubner	0,947	0,949	0,950
VTP	0,964	0,964	0,963	VTP	0,937	0,924	0,923
Whittle	0,999	0,960	0,930	Whittle	0,999	0,999	0,999
Periodograma	1,075	0,994	0,981	Periodograma	1,011	0,918	0,967

estão os valores de H obtidos pelo modelo da seção 3.3, devidamente normalizados com os coeficiente de combinação α . A última coluna, “Diferença”, mostra o valor absoluto da diferença entre as duas formas de cálculo.

Tabela 4.11: Valores do parâmetro de Hurst do tráfego real usando diferentes modelos. Escala = 0.05

Estimador	Dados*	Controle*	Gerenciamento*	Total	Modelo	Diferença
Kettani-Gubner	0,686	0,842	0,856	0,850	0,801	0,048
VTP	0,755	0,901	0,910	0,905	0,862	0,043
Whittle	0,674	0,722	0,721	0,728	0,708	0,020
Periodograma	0,697	0,748	0,739	0,741	0,730	0,011

Com base na tabela 4.11 nota-se que a diferença entre os valores obtidos pelas duas formas de cálculo são próximos, com diferenças baixas. Assim, para o caso em estudo, o modelo proposto em (XIANG et al., 2009) pode ser usado para caracterizar o tráfego.

Com base nos resultados observados, chega-se à conclusão que o tráfego sob estudo, proveniente de rede sem fio real e com alto nível de agregação, pode ser classificado como autossimilar e está de acordo com (GE; YANG, 2008; WANG; YU; MAO, 2009).

4.6 COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS DA ANÁLISE DO TRÁFEGO

A análise feita sobre a série de tráfego coletada de uma rede real permitiu uma melhor compreensão sobre o funcionamento de uma rede sem fio. O tráfego estudado possui duas características que o tornam de grande valor para as atividades de pesquisa. Primeiro, ele foi obtido de uma rede sem fio funcional, de grande porte e com uma massiva utilização. Isso possibilitou a extração de um grande volume de dados, que pode ser considerado

representativo quando se tem o objetivo de analisar uma rede sem fio com alto índice de agregação. E segundo, o tráfego é rico em informações. Isso porque a coleta foi realizada na parte sem fio da rede, utilizando o método *vicinity sniffing*, e traz informações completas dos cabeçalhos das camadas física, de enlace, de rede, de transporte e informações sobre a camada de aplicação. Com isso, torna-se possível uma grande variedade de análises, como as que foram realizadas neste trabalho.

O estudo taxonômico realizado sobre o tráfego revelou sua composição nas diversas camadas da pilha de protocolos. Em relação à camada de acesso ao meio foi mostrado que uma parte significativa do tráfego é transmitida na taxa mais baixa especificada pelo 802.11b (1 Mbps). Isso pode ter ocorrido por diversas razões. Uma delas é a necessidade de que os quadros de gerenciamento, correspondente à maioria dos quadros transmitidos a essa taxa, sejam reconhecidos por todas as estações que participam da rede. Essas estações são compatíveis, pelo menos, com a taxa de 1 Mbps e por isso os quadros de gerenciamento utilizam essa taxa. Outra razão é que as estações que transmitem dados a 1 Mbps, na presença de um canal muito ruidoso, precisa utilizar taxas mais baixas para promover maior robustez na comunicação.

Outra constatação significativa da camada WLAN é que, nesse caso, há uma equivalência em relação ao número de quadros dos três tipos. É esperado que o número de quadros de controle seja próximo da quantidade de quadros de dados. Isso ocorre porque, para cada quadro de dados enviado, é recebido um quadro de notificação de recebimento (ACK). Como a maior parte dos quadros de controle correspondem aos quadros ACK (97,49% do tráfego de controle estudado) é evidente que haja uma relação entre os quadros de controle e dados. Por outro lado, o elevado número de quadros de gerenciamento (33,57%) se dá por outros motivos. A rede é composta por um considerável número de pontos de acesso e possui um elevado número de clientes, o que implica em uma maior necessidade de gerenciamento devido às dinâmicas de associação, autenticação, mobilidade e etc. Nesse contexto, abre-se a possibilidade de um mecanismo que se reduza a quantidade de quadros de gerenciamento em uma rede de grande porte quando esta apresenta uma situação de desempenho bastante degradado, que não atenda às necessidades das aplicações presentes.

Também há resultados interessantes sobre as camadas de rede (IP) e de transporte (TCP). Esses protocolos são escolhidos por serem predominantes no tráfego. O estudo dessas camadas revela alguns dos comportamentos dos usuários. Por exemplo, foi verificado que a taxa de *downstream* é maior que a de *upstream*, mostrando que, em média, os clientes baixam um maior volume de dados que o contrário, o que é coerente com o senso comum sobre a utilização das redes. Curiosamente, o tráfego da porta 80, correspondente a aplicações HTTP, se encontra na terceira colocação em utilização do protocolo TCP, atrás do tráfego das portas 6881 (provável aplicação de *bittorrent*) e 22 (correspondente a aplicações SSH). Esse resultado vai de encontro ao apresentado em (YAMKHIN; WON, 2009), que mostra que o tráfego HTTP é predominante na rede estudada. Isso demonstra a tendência de variação que

existe nas aplicações utilizadas pelos usuários de redes.

O estudo sobre autossimilaridade no tráfego, em diversas escalas de tempo, mostrou que é autossimilar, com elevados valores de H . Esse fenômeno, presente nas camadas superiores, é refletido até as camadas inferiores. Esse resultado é importante para o planejamento dos recursos da rede, pois, uma vez que se sabe que o tráfego proveniente das camadas superiores é autossimilar, o reflexo desse comportamento é também um objeto de interesse nas camadas inferiores.

Todos esses resultados obtidos pelo estudo taxonômico do tráfego real contribuem para a formulação das hipóteses do capítulo 5. As informações obtidas são utilizadas como parâmetros para o conjunto de simulações, de tal forma que os resultados sejam verossímeis.

4.7 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram feitas análises sobre o tráfego coletado de uma rede sem fio operacional. A rede em questão foi estabelecida no 62º encontro (IETF) e contava com um grande número de usuários, gerando um grande volume de dados. Foram feitas análises nas camadas de enlace, rede e transporte da pilha de protocolos, assim como o cálculo do parâmetro de Hurst nas diferentes camadas utilizando diversas metodologias. Dentre os resultados obtidos, constatou-se que boa parte do tráfego da camada de enlace é composta por quadros de gerenciamento e controle, ou seja, são transparentes às camadas superiores. Além disso, o cálculo do parâmetro de Hurst mostrou que existe características de autossimilaridade no tráfego estudado, e que essa característica se apresenta nas diferentes camadas.

O capítulo seguinte apresenta os resultados experimentais de simulações de redes sem fio em diversos cenários para avaliar as hipóteses de como as características de autossimilaridade e a interação dos três tipos de quadros das redes sem fio influenciam no desempenho das aplicações e da rede.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A partir dos cenários de simulação, é possível mostrar a influência dos diferentes tipos de tráfego no desempenho de aplicações. Esse exercício permite identificar possíveis modificações na dinâmica dos protocolos da camada de enlace. Os diversos cenários de simulações de redes sem fio apresentam o comportamento de diferentes topologias submetidas a tráfegos com características diferentes e faz uma análise dos aspectos de qualidade de serviço para algumas aplicações presentes na rede.

As simulações apresentadas neste capítulo têm como fundamentos teóricos os estudos realizados nos capítulos anteriores. Os capítulos 2 e 3, ao introduzir os conceitos de redes sem fio (com foco em redes IEEE 802.11) e suas principais características, mostraram que essas redes possuem diversas restrições que devem ser contornadas e, por isso, um elaborado conjunto de procedimento são especificados para se garantir o funcionamento adequado. Como o tráfego da camada de enlace de uma rede sem fio é composto pelos três tipos de quadros mencionados, é plausível se considerar que o valor do parâmetro de Hurst, que mede o grau de autossimilaridade, seja uma função dos três tráfegos, como no modelo proposto por (XIANG et al., 2009).

A taxonomia do tráfego de uma rede sem fio real, apresentada no capítulo 4, confirma as características de autossimilaridade em várias escalas. Foi verificado que existem quantidades equivalentes dos três tipos de quadros, ou seja, aproximadamente um terço do tráfego é composto por quadros de dados enquanto que os outros dois terços é composto pelos quadros de gerenciamento e controle. Pode-se perceber então que uma grande parte dos quadros não são para o transporte de dados, e poderiam ser considerados como *overhead*.

O conjunto de simulações realizadas objetivou a verificação das seguintes hipóteses:

1. Verificar o nível de interferência do fenômeno da autossimilaridade nos parâmetros de desempenho em uma rede sem fio. Nesse sentido, as redes simuladas são submetidas a tráfegos sintéticos gerados com diferentes valores de Hurst. Espera-se que, assim como acontece em redes cabeadas, o desempenho da rede seja prejudicado em situações em que esteja sujeita a tráfegos com maiores valores de H . Também é utilizado o modelo de cálculo de H baseado nos quadros componentes do tráfego, com objetivo de individualizar o impacto causado por cada um dos três tipos de quadros.
2. Examinar o desempenho da rede na presença e ausência de quadros de gerenciamento na camada de enlace. O estudo será feito na linha do trabalho (RAGHAVENDRA et al., 2010), que discorre sobre o tráfego indesejado nas redes sem fio, e que parte desse tráfego de gerenciamento pode ser desnecessário por causar efeitos negativos

no desempenho da rede (mas não no seu funcionamento). Para esse fim, são realizadas simulações de redes sem fio no caso extremo em que não há a emissão de quadros de gerenciamento, e espera-se que haja um favorecimento significativo do desempenho.

As simulações foram realizadas em diferentes topologias de redes sem fio IEEE 802.11b buscando-se abranger algumas situações possíveis de utilização. A versão do protocolo 802.11b foi escolhida com base nos estudos da rede do capítulo anterior, que apresentam dados confiáveis sobre uma rede desse tipo. Em cada caso descrito, as redes são submetidas diferentes volumes de tráfego, com o nível de utilização do meio variando entre 21% e 28% da capacidade nominal da rede 802.11b (ou seja, 11 Mbps). Com a verificação das hipóteses, pretende-se oferecer recursos para a elaboração de um protocolo adaptativo que, ao perceber que a rede se aproxima de uma situação de difícil tratabilidade, possa mudar seu comportamento ao diminuir o fluxo de quadros de tráfego indesejado.

As topologias de redes e cargas de tráfego apresentadas neste trabalho foram estabelecida através da evolução de diversas simulações preliminares. Inicialmente foram criados protótipos simples, com pequenas cargas de tráfego para se compreender as dinâmicas da rede. Em seguida, foi aumentada a complexidade das redes com objetivo de estender os casos para algumas possibilidades de uso das redes sem fio. As cargas de tráfego também foram definidas experimentalmente. A carga de tráfego pesada foi definida como um ponto em que ocorre um grande prejuízo ao desempenho da rede, como elevados índices de perdas e atraso, enquanto a carga de tráfego leve corresponde a 75% da carga pesada.

5.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE APLICAÇÕES

A análise experimental foi feita através de simulação de redes através do simulador OPNET Modeler (OPNET, 2010). Além dos componentes oferecidos pelo programa, também foi desenvolvido um componente que captura informações dos pacotes que trafegam no meio sem fio. Este componente, denominado *sniffer*, mostrado na figura 5.1, foi implementado por meio das ferramentas disponíveis no OPNET e segue o princípio de captura *vicinity sniffing* mostrado na seção 3.3.1, ou seja faz observações na parte sem fio sem interferir na rede.

Para a análise do desempenho de aplicações será avaliado o caso em que todos os dispositivos sem fio operam no mesmo canal, ou seja, na mesma faixa de frequência, de tal forma que todos disputam o meio para a transmissão de quadros. Embora operem na mesma frequência, para fins de simplificação, cada ponto de acesso (*Access Point*, AP) é denominado como “célula”, e todos os usuários que se encontram dentro dela são clientes do AP correspondente. Além disso, todos os AP’s são interligados por meio de um *backbone*, que por sua vez está conectado à Internet. O modo de operação PCF foi suprimido, assim a rede opera primordialmente em modo DCF. Nas redes operacionais, o modo DCF é o mais

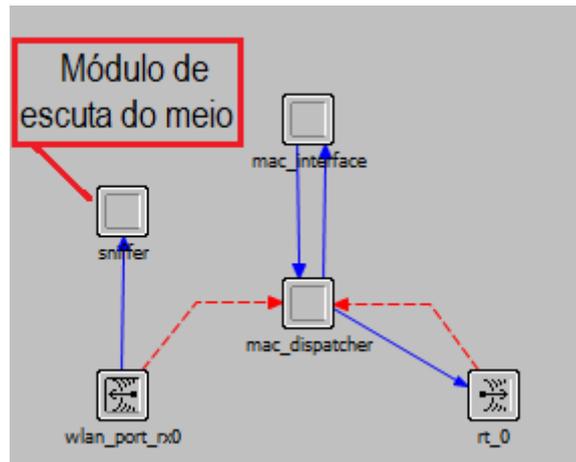


Figura 5.1: Modelo de nó do OPNET para escuta de quadros no meio aéreo

utilizado (como o caso da rede estudada no capítulo 4) e por isso é o caso de interesse para este estudo. O tempo simulado em cada cenário é de 30 minutos.

5.1.1 Topologias das simulações

Para a análise experimental deste trabalho, foram criadas três topologias de redes sem fio 802.11b, buscando observar o comportamento da rede em cenários distintos:

- **Rede 1:** A primeira rede foi formada por um único AP, ligado ao *backbone* da rede, e 30 usuários móveis conectados a ele, como pode ser visto na figura 5.2. Esse cenário é muito comum em locais onde existe apenas um dispositivo para acesso (AP) e todos os usuários devem se conectar a ele.
- **Rede 2:** Esta rede possuía 4 AP's operando no mesmo canal e 4 usuários móveis conectados a cada AP, totalizando 16 usuários móveis, conforme ilustrado pela figura 5.3. Esse cenário simulou uma rede com pequeno número de AP's com uma baixa densidade de usuários.
- **Rede 3:** O terceira rede foi composta por 8 AP's e um total de 90 usuários móveis distribuídos da seguinte forma: 2 AP's possuíam 25 nós cada (maior densidade); 2 AP's com 10 nós (densidade média) e; 4 AP's com 5 nós (menor densidade). Esse é um cenário de uma rede maior, mais complexa e com um grande número de usuários, como na figura 5.4.

Além da quantidade de usuários mencionadas, cada rede possuía adicionalmente 2 usuários de aplicações: um usuário de aplicações de voz e um usuário de aplicações Web, que serão explicados posteriormente. Um *sniffer* esteve presente em cada uma das redes em um local que permite a captura de quadros do meio aéreo. Nas topologias apresentadas, todos os AP's operam no mesmo canal, implicando em um maior grau de competição pelo meio.

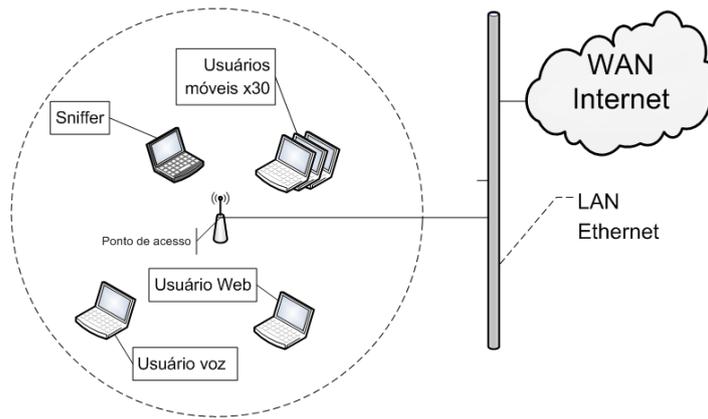


Figura 5.2: Topologia de rede pequena

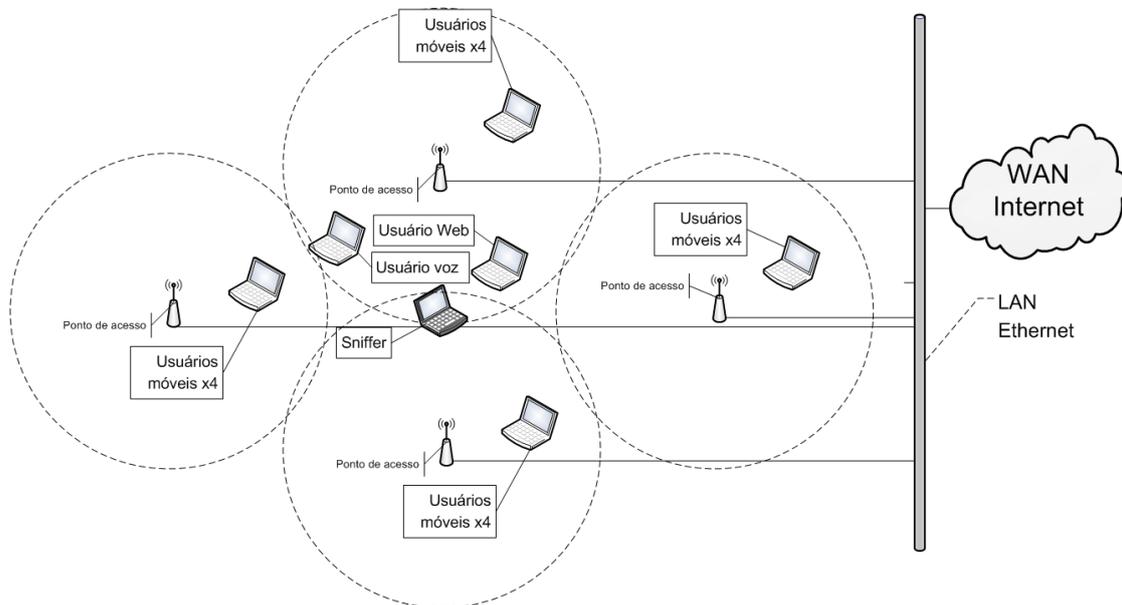


Figura 5.3: Topologia de rede média

5.1.2 Os Tipos de Tráfego e a Carga na Rede

As simulações foram realizadas submetendo-se à rede cargas de tráfego sintético obtidas por gerador externo ao simulador OPNET. O gerador utilizado, o GTAR (Gerador de Tráfego e Analisador de QoS na Rede), é um *software* de código aberto multiplataforma que oferece a funcionalidade de gerar séries de tráfego autossimilares (CARVALHO et al., 2005; QUEIROZ; CARNEIRO, 2006). O método de geração utilizado no simulador se baseia no espectro de potência dos processos de ruído gaussiano fracionário (fGn) apresentado por Vern Paxson (PAXSON, 1997). O tráfego sintético simulou os tempos de chegada (ou saída) de cada pacote e seu tamanho, pois se tratam de processos aleatórios. Os parâmetros usados para a geração do tráfego foram especificados com base na análise do tráfego de rede real da seção 4.3.

O tráfego gerado foi convertido em fluxos da camada IP entre nós da rede e a Internet, tanto para *upload* quanto para *download*. A proporção entre tráfego de *upload* e *download* também

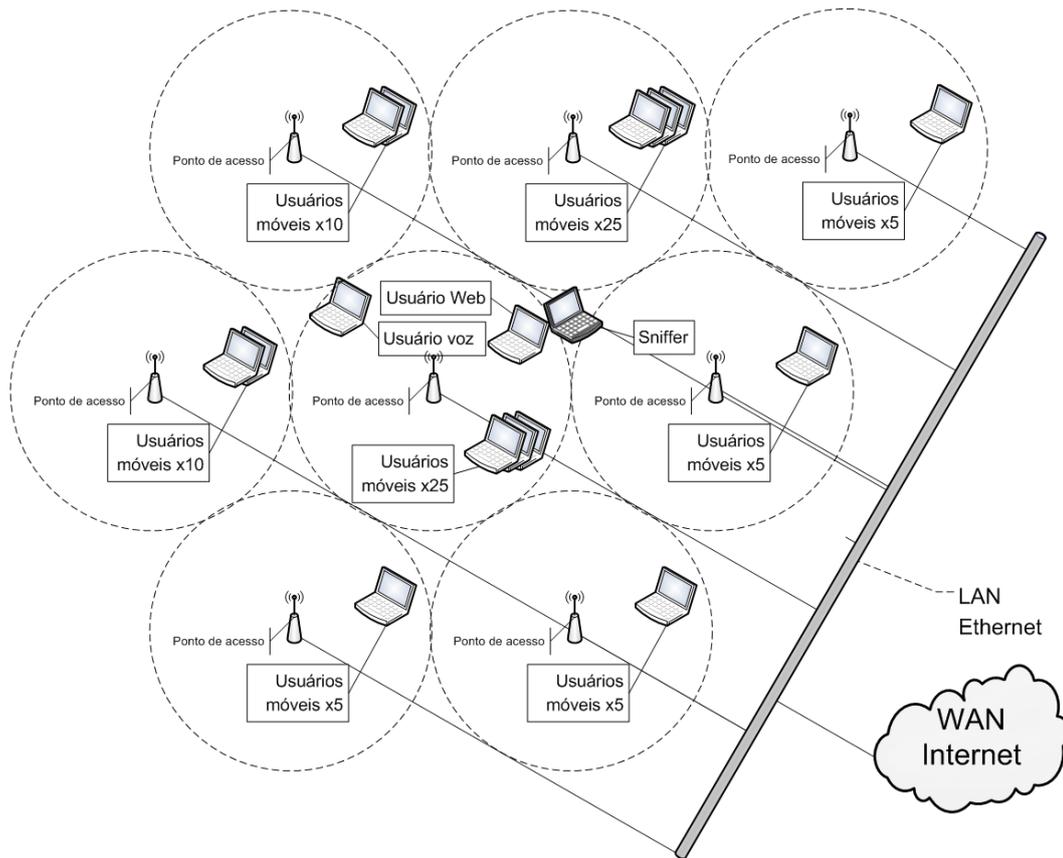


Figura 5.4: Topologia de rede complexa

foi baseada na análise do tráfego real. Em cada uma das redes foram inseridos tráfegos com diferentes características para avaliar as condições da rede e o desempenho das aplicações em cada situação. O tráfego foi inserido como tráfego da camada IP dos usuários móveis em cada rede (exceto usuários de Voz e Web).

Foram definidas duas situações de uso da rede: a) a primeira com cargas que caracterizam um uso pesado da rede, denominada de situação (**Tráfego Pesado**) e b) cargas que caracterizam um uso leve da rede foi em tráfego leve, denominada de situação (**Tráfego Leve**). O **Tráfego Pesado** oferece uma sobrecarga maior à rede, equivalente a 28% da capacidade nominal da rede enquanto que **Tráfego Leve** corresponde a 75% da carga de (a). Para cada uma dessas situações foram gerados dois tráfegos com diferentes parâmetros de Hurst: um com $H = 0,5$ e outro com $H = 0,9$, totalizando assim quatro situações de simulação. É importante observar que um tráfego com $H = 0,9$ caracteriza alto grau de autossimilaridade e é compatível com os valores de H calculados na série de tráfego real, conforme mostrado na tabela 4.10.

Nas simulações, todas as conexões entre usuários e pontos de acesso já estão estabelecidas no instante de início. Isso seria equivalente a dizer que toda dinâmica de gerenciamento para associação e autenticação dos usuários ocorre em um momento anterior ao tempo zero da simulação. A partir do instante inicial, não ocorre mobilidade, estabelecimento ou

finalização de conexões ou outros eventos que exijam quadros de gerenciamento da rede. Então, quadros de gerenciamento que transitam na rede nessas situações pode configurar um tráfego desnecessário. Dessa forma, para verificar a relação entre o desempenho da rede e o volume do tráfego de quadros de gerenciamento, os cenários descritos anteriormente foram simulados em duas situações: na primeira, estava presente na rede um tráfego de gerenciamento composto por quadros de *beacon* enviados pelos AP's e na segunda, todo o tráfego de gerenciamento foi removido. Essa situação onde não há quadros de gerenciamento representa um caso extremo, possibilitado pelo fato de que a simulação permite um cenário totalmente controlado.

5.1.3 Aplicações

Nas simulações, alguns parâmetros de desempenho de redes sem fio foram monitorados. Em relação à camada de enlace, foram observados o atraso e as perdas da porção sem fio. Além dessas estatísticas, há interesse também em se medir o desempenho de aplicações que utilizam a rede. Nesse estudo, procurou-se visualizar o comportamento de uma aplicação de tempo real e uma aplicação caracterizada como “melhor esforço”.

Como dito anteriormente, cada rede possui dois usuários de aplicações que serão monitoradas na rede: um usuário de aplicações de voz e um usuário de aplicações Web. O usuário de voz realiza uma comunicação de voz sobre IP (VoIP) com um servidor localizado na Internet, utilizando o esquema de codificação GSM FR (RECOMMENDATION, 1992). Esse usuário representa uma aplicação sensível a determinados parâmetros de QoS, como atraso e variação do atraso. Já o usuário Web realiza navegação HTTP em um servidor também na Internet. Nesse caso, outros parâmetros de QoS são observados, como tempo de resposta de página ou de objeto.

Em todas as simulações foram monitoradas as seguintes estatísticas:

Na camada de enlace (WLAN):

- **Dados descartados por Estouro de Buffer:** Tamanho total dos pacotes de dados das camadas superiores (em bits/seg) descartados pelo MAC de todos dispositivos devido ao enchimento do *buffer*. Foi utilizado o tamanho de *buffer* padrão do Opnet, que é de 256.000 bits. Em dispositivos reais, existe a possibilidade de *buffers* de maior capacidade, porém, como o intuito deste trabalho é verificar a influência das diferentes configurações sobre os parâmetros de desempenho e comparar as diversas situações apresentadas, o valor padrão definido foi considerado adequado.
- **Atraso:** Representa o atraso fim a fim de todos pacotes recebidos pelo MAC de todos dispositivos da rede e encaminhados para as camadas superiores.

Nas aplicações:

Voz

- **Atraso fim a fim:** Atraso medido pela diferença de tempo entre o instante em que o pacote foi criado até o instante em que é recebido.
- **Variação de atraso de pacotes:** Variação entre os atrasos fim a fim dos pacotes de voz.

Web

- **Tempo de resposta de objeto:** Especifica o tempo de resposta de cada objeto contido na página HTML.
- **Tempo de resposta de página:** Especifica o tempo de resposta da página completa com todos seus objetos.

5.2 EXPERIMENTOS NAS TOPOLOGIAS DE REDES

Nas seções anteriores foram descritos os casos simulados nos experimentos. A combinação de situações (3 redes \times 2 cargas de tráfego \times 2 valores de H \times presença/ausência de tráfego de gerenciamento) resulta em um total de 24 simulações, com 144 estatísticas monitoradas. Para facilitar a diferenciação das situações, onde for necessário, serão usadas as seguintes simplificações:

- As topologias de rede “Rede 1”, “Rede 2” e “Rede 3” equivalem a **R1**, **R2** e **R3** respectivamente;
- Em relação às cargas de tráfego, **TL** representa a situação de **Tráfego Leve** e **TP**, **Tráfego Pesado**;
- Quando o tráfego inserido na camada IP possuir maior grau de autossimilaridade, será usado $H = 0,9$, enquanto que o tráfego com menor grau de autossimilaridade será $H = 0,5$;
- As situações em que a rede é simulada com tráfego de gerenciamento serão chamadas de **CG** e situações sem quadros de gerenciamento serão **SG**.

Assim, por exemplo, a especificação **R1 TL $H = 0,9$ SG** representa o caso da simulação da Rede 1, submetida a uma carga de tráfego leve com alto grau de autossimilaridade e sem quadros de gerenciamento.

A seguir serão mostrados os resultados por topologia simulada.

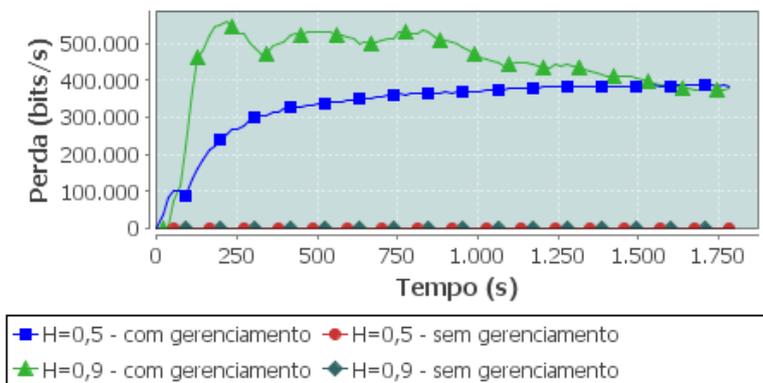
5.2.1 Rede 1

Os gráficos resultantes das simulações da rede 1 são mostrados nas figuras 5.5 a 5.10 e os resultados nas tabelas 5.1 a 5.6. Esses gráficos, assim como os gráficos das demais topologias, representam a média ao longo do tempo de cada estatística observada, enquanto as tabelas mostram os valores médios totais.

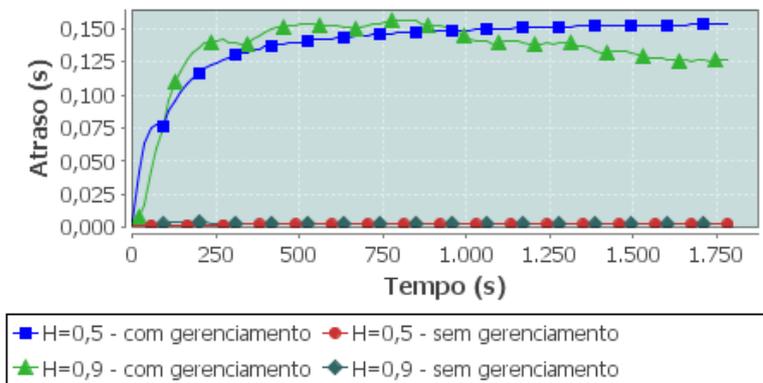
Para uma melhor apresentação dos resultados, primeiramente serão discutidos os resultados dos cenários submetidos ao tráfego leve e posteriormente os cenários com tráfego pesado.

5.2.1.1 Tráfego Leve

WLAN



(a) Perda média de pacotes por estouro de buffer (bits/seg)



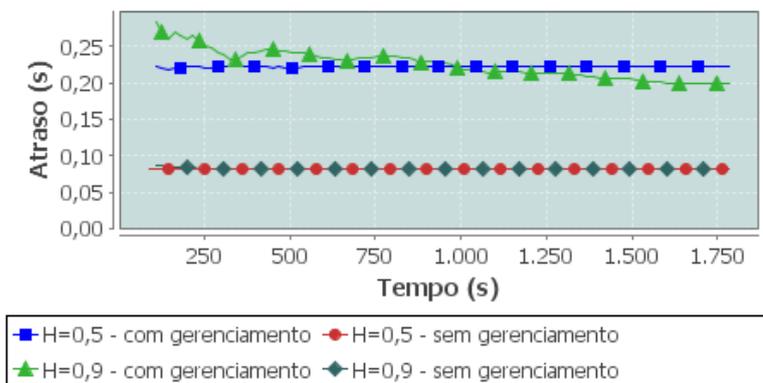
(b) Atraso médio de pacotes da camada de enlace (seg)

Figura 5.5: Estatísticas WLAN - R1 TL

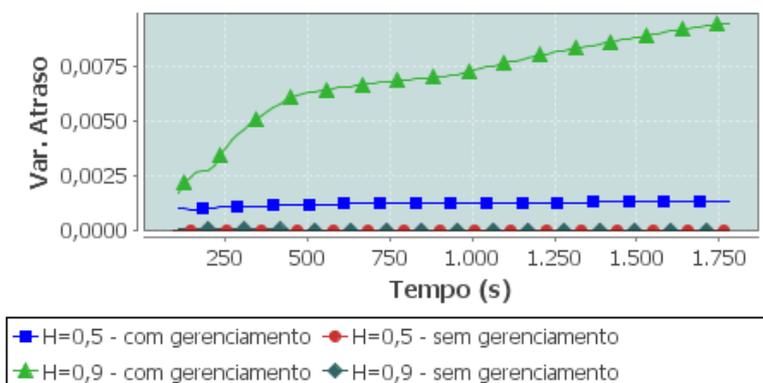
Começando a análise pela camada WLAN, observa-se pela figura 5.5(a) que nos casos de tráfego leve, o cenário $H = 0,9$ com gerenciamento apresenta as mais altas taxas de perda na maior parte do tempo. O caso $H = 0,5$ com gerenciamento também apresenta elevadas taxas de perdas. Por outro lado, quando não há quadros de gerenciamento, tanto para $H = 0,5$ quanto $H = 0,9$, as taxas de perdas são mínimas se comparadas com os outros casos. A figura 5.5(b) mostra o atraso sofrido pelos quadros na camada WLAN. Observa-se que os

atrasos dos cenários com gerenciamento são relativamente próximos, sendo que inicialmente o cenário $H = 0,9$ possui maiores atrasos, mas próximo ao segundo 1000 o cenário $H = 0,5$ passa a ter atraso maior. Esse evento ocorreu de forma inesperada e uma possível justificativa está relacionada com a topologia da rede. Todas as estações competem pelo mesmo ponto de acesso e, ao observar o meio ocupado, devem estabelecer um tempo aleatório de *backoff*. Com o tráfego com menos variação quando $H = 0,5$, é possível que haja mais choques por tempos de *backoff* muito próximos que no caso $H = 0,9$, ocasionando novo adiamento da transmissão. Assim, há um desfavorecimento do desempenho, mesmo tendo um valor de H menor. Pela tabela 5.1 pode-se averiguar que os valores de atraso médio são próximos para os dois casos, mas com $H = 0,5$ o atraso é um pouco maior. Os atrasos dos cenários sem tráfego de gerenciamento são bastantes inferiores aos demais casos. A partir desses resultados pode-se observar que a retirada dos quadros de gerenciamento causou melhores desempenhos nas redes simuladas, e está de acordo com as expectativas. Em relação à análise do desempenho com os tráfegos com diferentes graus de autossimilaridade, pode-se perceber que, embora o valor médio indique que o cenário $H = 0,5$, CG tem pior desempenho, seu valor está bastante próximo ao caso $H = 0,9$ CG, com variações ao longo do tempo.

Voz



(a) Atraso fim-a-fim médio de pacotes de voz (seg)

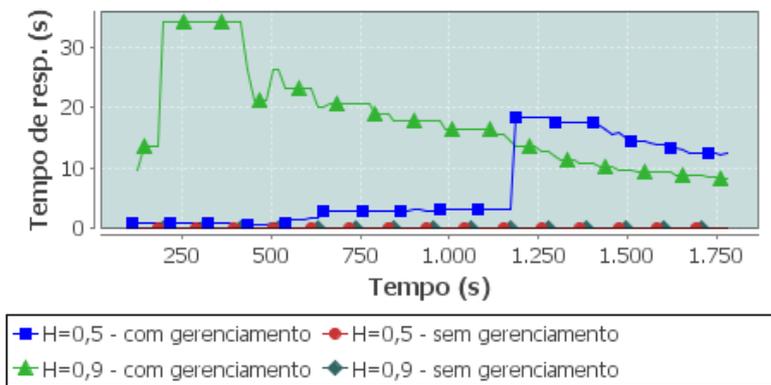


(b) Média da variação do atraso de pacotes de voz

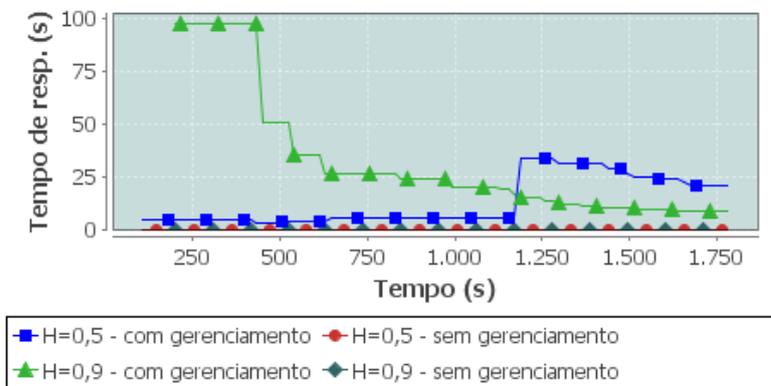
Figura 5.6: Estatísticas Voz - R1 TL

A figura 5.6 mostra os gráficos dos parâmetros de voz monitorados para a rede 1, tráfego leve. O atraso fim-a-fim, visto na figura 5.6(a), dos cenários com tráfego de gerenciamento são próximos para os casos $H = 0,5$ e $H = 0,9$, e ambos atrasos são superiores aos casos sem gerenciamento. Nesse caso também o atraso médio é maior para o caso $H = 0,5$, de acordo com a tabela 5.1. As variações do atraso para as redes com $H = 0,9$ se mostraram maiores que os respectivos casos de $H = 0,5$ (figura 5.6(b)), mostrando que o efeito da autossimilaridade nessa situação provoca uma variação muito maior no atraso dos pacotes de voz.

Web



(a) Tempo médio de resposta de objeto (seg)



(b) Tempo médio de resposta de página (seg)

Figura 5.7: Estatísticas Web - R1 TL

As estatísticas do tráfego Web são mostradas nos gráficos da figura 5.7. Os dois parâmetros observados, tempo de resposta de objeto (5.7(a)) e tempo de resposta de página (5.7(b)), apresentaram comportamentos similares. Inicialmente o caso $H = 0,9$, com gerenciamento apresenta tempos de resposta mais elevados, mas se reduz ao longo do tempo, enquanto que $H = 0,5$, com gerenciamento sofre um aumento. Isso pode ser um reflexo do mesmo fenômeno que ocorre para as estatísticas WLAN, e pode também estar relacionada à topologia da rede. Onde não há tráfego de gerenciamento, os tempos de resposta foram significativamente menores. Esses resultados podem ser vistos numericamente na tabela 5.1.

Síntese dos resultados

A tabela 5.1 apresenta a média de cada uma das estatísticas do cenário avaliado. Comparando-se com os gráficos, os valores da tabela representam o ponto mais à direita de cada curva, ou seja, a média no final do tempo de simulação. Como pode ser visto, o desempenho dos cenários que possuem tráfego de gerenciamento é inferior em todos os parâmetros, mesmo o tráfego sendo leve. Os casos sem gerenciamento possui perdas desprezíveis e atrasos pequenos.

Tabela 5.1: Resumo do valor médio das estatísticas: R1 TL

	WLAN		Voz		Web	
	Perdas (bits/s)	Atraso (s)	Atraso (s)	Var. Atraso	Resp. Obj. (s)	Resp. Pág. (s)
H=0,5 - CG	$3,85 \times 10^5$	0,153	0,223	$1,31 \times 10^{-3}$	12,33	20,83
H=0,5 - SG	0	0,002	0,081	$5,50 \times 10^{-6}$	0,022	0,052
H=0,9 - CG	$3,79 \times 10^5$	0,126	0,199	$9,48 \times 10^{-3}$	8,296	8,863
H=0,9 - SG	11,6	0,002	0,082	$2,23 \times 10^{-5}$	0,022	0,046

Composição do tráfego R1 TL

As tabelas 5.2 e 5.3 mostram outros dados obtidos através da análise do tráfego coletado pelo *sniffer*. As colunas “Quantidade de quadros” mostram o número de quadros capturados de cada tipo e o total de quadros. Já as colunas “Total de bits” mostram a soma total de bits capturados de cada tipo e o total. As colunas “SG (proporção)” e “CG (proporção)” mostram os casos sem e com tráfego de gerenciamento respectivamente, e a proporção do dado tipo de quadro entre parênteses, quando aplicável. Em “SG → CG (variação)” mostra a variação do número de quadros ou do volume de bits quando se compara o caso sem gerenciamento com o caso com gerenciamento, com o percentual de variação entre parênteses.

Tabela 5.2: Composição do tráfego: R1 TL $H = 0,5$

	Quantidade de quadros			Total de bits		
	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)
Dados	$1,10 \times 10^6$ (50,23%)	$1,01 \times 10^6$ (33,08%)	$-8,54 \times 10^4$ (-7,75%)	$6,34 \times 10^9$ (95,03%)	$5,51 \times 10^9$ (84,72%)	$-8,3 \times 10^8$ (-13,1%)
Controle	$1,09 \times 10^6$ (49,76%)	$9,85 \times 10^5$ (32,06%)	$-1,06 \times 10^5$ (-9,73%)	$3,31 \times 10^8$ (4,966%)	$2,99 \times 10^8$ (4,603%)	$-3,2 \times 10^7$ (-9,73%)
Gerenciamento	-	$1,07 \times 10^6$ (34,85%)	-	-	$6,93 \times 10^8$ (10,66%)	-
Total	$2,19 \times 10^6$	$3,07 \times 10^6$	$8,79 \times 10^5$ (+40,0%)	$6,67 \times 10^9$	$6,50 \times 10^9$	$-1,7 \times 10^8$ (-2,62%)

O primeiro fator observado nas tabelas é que a proporção em número de quadros de cada um dos três tipos, para o caso em que há gerenciamento, é aproximadamente igual às observações feitas no tráfego real do capítulo anterior. Se não há tráfego de gerenciamento, o

Tabela 5.3: Composição do tráfego: R1 TL $H = 0,9$

	Quantidade de quadros			Total de bits		
	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)
Dados	$1,06 \times 10^6$ (50,23%)	$9,78 \times 10^5$ (32,62%)	$-8,84 \times 10^4$ (-8,28%)	$6,12 \times 10^9$ (95,01%)	$5,29 \times 10^9$ (84,35%)	$-8,2 \times 10^8$ (-13,4%)
Controle	$1,05 \times 10^6$ (49,76%)	$9,49 \times 10^5$ (31,66%)	$-1,07 \times 10^5$ (-10,1%)	$3,21 \times 10^8$ (4,986%)	$2,88 \times 10^8$ (4,595%)	$-3,2 \times 10^7$ (-10,1%)
Gerenciamento	-	$1,07 \times 10^6$ (35,70%)	-	-	$6,93 \times 10^8$ (11,04%)	-
Total	$2,12 \times 10^6$	$2,99 \times 10^6$	$8,74 \times 10^5$ (+41,1%)	$6,44 \times 10^9$	$6,28 \times 10^9$	$-1,6 \times 10^8$ (-2,52%)

tráfego fica dividido em partes aproximadamente iguais para os quadros de dados e controle. Em termos de volume, a predominância é dos quadros de dados.

É observado um fato interessante nas tabelas 5.2 e 5.3: há um aumento considerável no número de quadros trafegados na rede quando há tráfego de gerenciamento, porém, o volume trafegado é diminuído. Isso ocorre porque os quadros de gerenciamento possuem tamanhos menores que quadros de dados, mas gera os mesmos *overheads* ao ocupar o meio. Além disso, esses quadros são transmitidos à menor taxa disponível (1Mbps), de forma a atender mais estações vizinhas. Dessa forma, o tempo de meio aéreo disponível é reduzido. Naturalmente, também é reduzida a vazão de quadros de dados e controle, o que explica o aumento da taxa de perdas e do atraso.

Os próximos casos se referem à rede 1 submetida ao tráfego pesado.

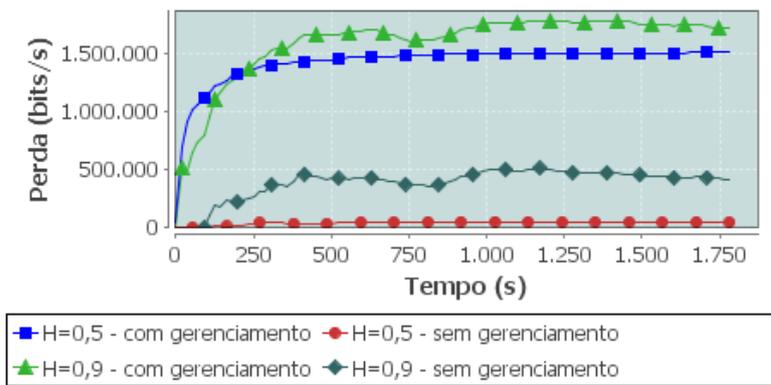
5.2.1.2 Tráfego Pesado

WLAN

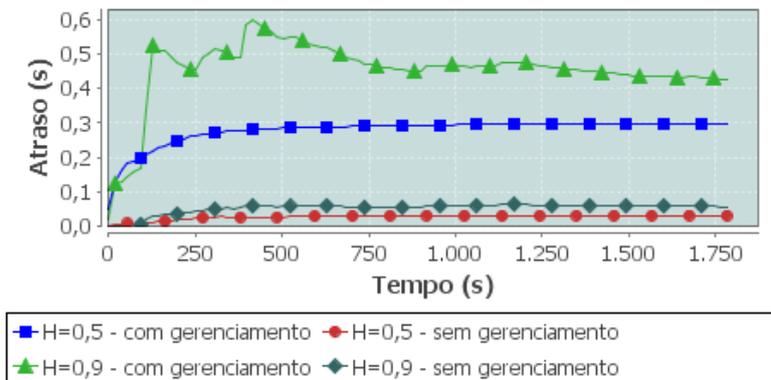
De acordo com a tabela 5.4, que mostra o resumo das estatísticas para este caso, observa-se uma situação mais complexa. Em relação às perdas por estouro de *buffer*, visto na figura 5.8(a), nota-se que as taxas mais elevadas estão relacionadas aos casos em que há tráfego de gerenciamento, sendo que, quando $H = 0,9$, as perdas são maiores que em $H = 0,5$. Mas, ao contrário do que acontece com o tráfego leve, há um certo nível de perdas para o caso sem gerenciamento e $H = 0,9$. O mesmo comportamento pode ser observado no atraso (figura 5.8(b)). Os maiores atrasos ocorrem na presença de tráfego de gerenciamento, principalmente para $H = 0,9$, mas os casos sem gerenciamento começam a apresentar certo aumento nos atrasos.

Voz

Os resultados para o tráfego de voz podem ser vistos na figura 5.9. O atraso fim-a-fim de



(a) Perda média de pacotes por estouro de buffer (bits/seg)



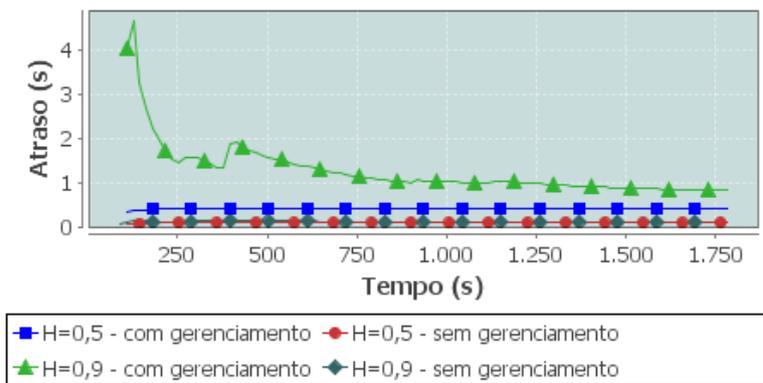
(b) Atraso médio de pacotes da camada de enlace (seg)

Figura 5.8: Estatísticas WLAN - R1 TP

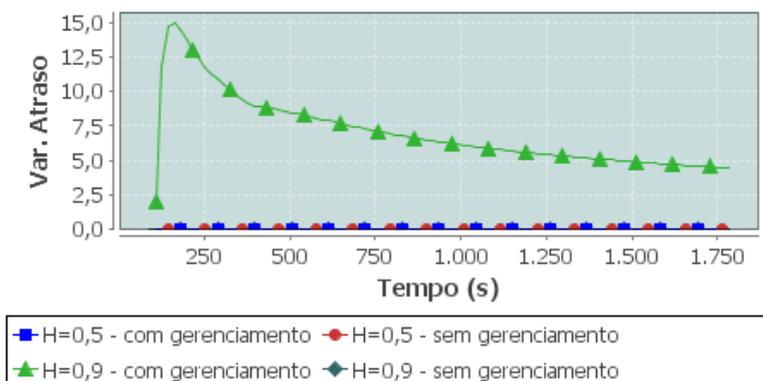
pacotes de voz, mostrado na figura 5.9(a), é maior para o caso com gerenciamento, $H = 0,9$, seguido pelo respectivo tráfego $H = 0,5$. Na ausência de quadros de gerenciamento, o atraso se mostra inferior. A variação do atraso do cenário com gerenciamento, $H = 0,9$ se mostra bastante superior aos demais casos, mostrando que o efeito de variação gerado pela autossimilaridade também ocorre na presença de maior carga na rede.

Web

A figura 5.10 apresenta os gráficos relativos ao tráfego Web. Primeiramente, observa-se que parte das curvas não estão presentes em alguns casos. Esse fenômeno ocorreu pelo fato de que grande parte dos pacotes de navegação Web foram perdidos ou sofreram grandes atrasos devido a congestão. O usuário, ao perceber a demora de resposta, cancela aquela transação (por exemplo, solicitando para recarregar a página). Assim os pacotes perdidos não puderam ser computados nas estatísticas, levando à falta de parte das curvas. Isso foi observado em particular no caso $H = 0,5$, com gerenciamento, que possui apenas parte da curva no tempo de resposta de objeto (5.10(a)) e não está presente no tempo de resposta da página (5.10(b)). Ainda assim, pode-se constatar que os cenários com tráfego de gerenciamento apresentam os piores desempenhos em relação aos demais.



(a) Atraso fim-a-fim médio de pacotes de voz (seg)



(b) Média da variação do atraso de pacotes de voz

Figura 5.9: Estatísticas Voz - R1 TP

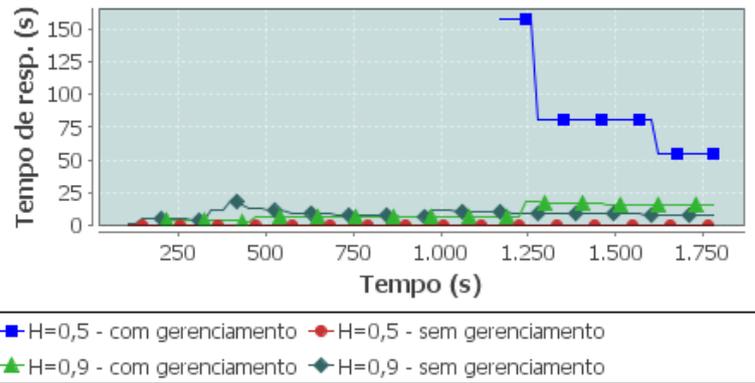
Síntese dos resultados

O resumo dos resultados é apresentado na tabela 5.4. Nota-se que a falta dos resultados nos gráficos referente às estatísticas Web se repetem na tabela. Percebe-se que a diferença de desempenho entre os casos com e sem tráfego de gerenciamento se torna mais evidente. Isso é mostrado em todos os parâmetros. Por outro lado, a maior carga de tráfego prejudicou mesmo os cenários onde não há quadros de gerenciamento, mostrando a situação de congestão na rede. Nesse caso, o alto grau de autossimilaridade do tráfego provocou resultados piores que seus respectivos casos com baixa autossimilaridade.

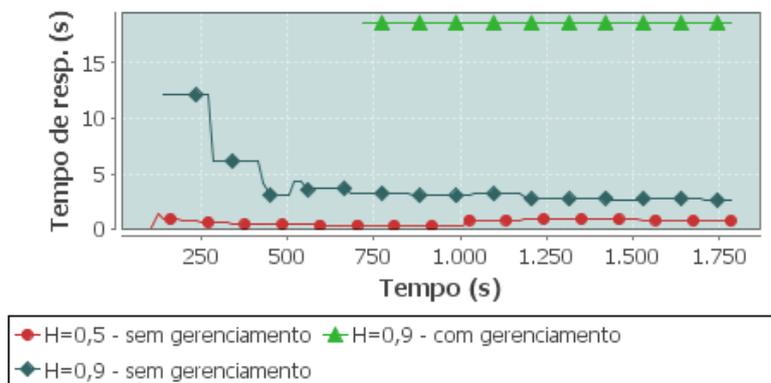
Ao se comparar os resultados com os casos da tabela 5.1, percebe-se que os tempos relacionados a quadros de voz aumentam de 2 a 4 vezes. Já os tempos de resposta de objetos Web apresentam aumentos consideravelmente maiores. Isso mostra que os pacotes de aplicações Web são fortemente desfavorecidos em cenários com maior nível de congestão.

Composição do tráfego R1 TP

Informações sobre a composição do tráfego são apresentados nas tabelas 5.5 e 5.6. As proporções se conservam semelhantes àquelas observadas no tráfego leve, e também coerentes com as análises do capítulo anterior. Os quadros de gerenciamento, que possuem



(a) Tempo médio de resposta de objeto (seg)



(b) Tempo médio de resposta de página (seg)

Figura 5.10: Estatísticas Web - R1 TP

Tabela 5.4: Resumo do valor médio das estatísticas: R1 TP

	WLAN		Voz		Web	
	Perdas (bits/s)	Atraso (s)	Atraso (s)	Var. Atraso	Resp. Obj. (s)	Resp. Pág. (s)
H=0,5 - CG	$1,50 \times 10^6$	0,298	0,426	0,011	55,2	-
H=0,5 - SG	$4,81 \times 10^4$	0,032	0,108	$1,01 \times 10^{-3}$	0,264	0,780
H=0,9 - CG	$1,71 \times 10^6$	0,425	0,837	4,44	15,9	18,6
H=0,9 - SG	$4,15 \times 10^5$	0,057	0,131	$3,37 \times 10^{-3}$	8,14	2,633

tamanho pequeno e são transmitidos a taxas mais baixas, induzem a uma menor vazão de bits no meio, mesmo que seja aumentado o número total de quadros.

Análise

Algumas observações podem ser feitas sobre os resultados desta topologia. Primeiramente, percebe-se que a remoção dos quadros de gerenciamento realmente faz com que os parâmetros analisados tenham melhor desempenho. Na camada de enlace, houve menos perdas e atrasos menores na entrega de quadros. Já nas aplicações, o tráfego de voz (mais sensível aos parâmetros de QoS) sofre menores atrasos e o tráfego Web apresenta melhor tempo de resposta. Esses resultados são encontrados tanto nos casos de tráfego leve quanto de tráfego pesado.

Tabela 5.5: Composição do tráfego: R1 TP $H = 0,5$

	Quantidade de quadros			Total de bits		
	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)
Dados	$1,57 \times 10^6$ (50,58%)	$1,09 \times 10^6$ (34,24%)	$-4,81 \times 10^5$ (-30,5%)	$9,30 \times 10^9$ (95,20%)	$5,57 \times 10^9$ (84,69%)	$-3,7 \times 10^9$ (-40,1%)
Controle	$1,54 \times 10^6$ (49,41%)	$1,03 \times 10^6$ (32,40%)	$-5,03 \times 10^5$ (-32,6%)	$4,68 \times 10^8$ (4,793%)	$3,15 \times 10^8$ (4,792%)	$-1,5 \times 10^8$ (-32,6%)
Gerenciamento	-	$1,06 \times 10^6$ (33,35%)	-	-	$6,91 \times 10^8$ (10,51%)	-
Total	$3,11 \times 10^6$	$3,20 \times 10^6$	$82,78 \times 10^4$ (+2,65%)	$9,77 \times 10^9$	$6,57 \times 10^9$	$-3,1 \times 10^9$ (-32,6%)

Tabela 5.6: Composição do tráfego: R1 TP $H = 0,9$

	Quantidade de quadros			Total de bits		
	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)
Dados	$1,56 \times 10^6$ (50,61%)	$1,09 \times 10^6$ (34,42%)	$-4,74 \times 10^5$ (-30,2%)	$8,99 \times 10^9$ (95,07%)	$5,65 \times 10^9$ (84,95%)	$-3,3 \times 10^9$ (-37,1%)
Controle	$1,53 \times 10^6$ (49,38%)	$1,01 \times 10^6$ (32,00%)	$-5,13 \times 10^5$ (-33,5%)	$4,65 \times 10^8$ (4,920%)	$3,09 \times 10^8$ (4,650%)	$-1,5 \times 10^8$ (-33,5%)
Gerenciamento	-	$1,06 \times 10^6$ (33,56%)	-	-	$6,91 \times 10^8$ (10,39%)	-
Total	$3,10 \times 10^6$	$3,18 \times 10^6$	$79,86 \times 10^4$ (+2,57%)	$9,46 \times 10^9$	$6,65 \times 10^9$	$-2,8 \times 10^9$ (-29,6%)

A melhoria de desempenho causada pela remoção de quadros de gerenciamento é esperada pois ocupa o tempo de utilização do canal que poderia estar sendo usado para transmitir dados. Mas pela verificação da composição do tráfego, foi descoberto que o prejuízo é ainda maior. Poderia se pensar que a inclusão de quadros de gerenciamento, além do tráfego de dados e controle já existentes, aumentaria o volume de bits trafegando no meio aéreo, o que de fato não aconteceu. Nos cenários com quadros de gerenciamento transmite-se mais quadros no meio, mas a vazão em bits é menor. Isso é causado porque a média de tamanho de um quadro de gerenciamento é menor que a de um quadro de dados, mas qualquer quadro que é transmitido na rede provoca o adiamento da transmissão de quadros de outras estações. Outro motivo é o fato de que esses quadros são transmitidos a menores taxas, ocupando o meio por mais tempo.

Em relação à autossimilaridade do tráfego, é esperado que um tráfego com maior parâmetro de Hurst provoque um pior desempenho. No entanto, na situação de tráfego leve, há pouca diferenciação entre os tráfegos com diferentes H , e até mesmo em alguns casos o tráfego $H = 0,5$ possui desempenho pior. Já para as situações de tráfego pesado, nota-se que o tráfego $H = 0,9$ apresenta desempenho menos satisfatório. A partir desses resultados pode-

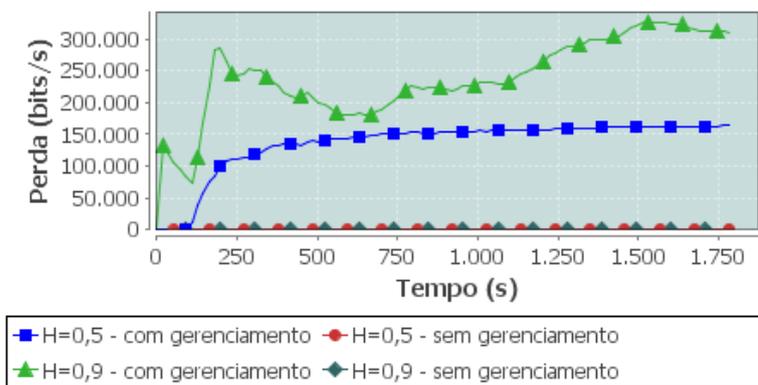
se inferir que a interferência do efeito autossimilar é agravada nos casos de maior congestão da rede, onde há uma maior carga de tráfego.

5.2.2 Rede 2

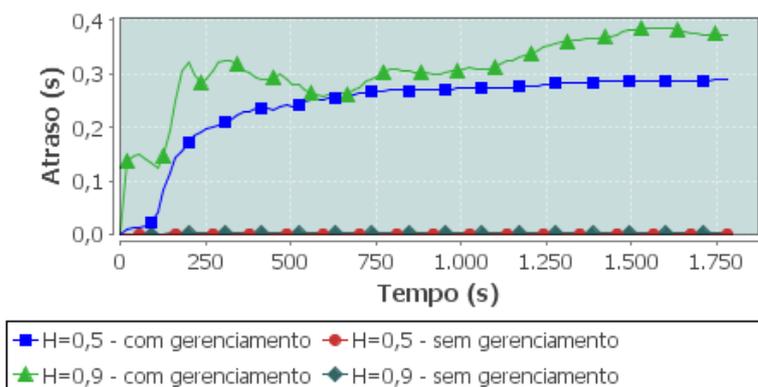
Os gráficos da segunda topologia de rede estudada (rede 2) são mostrados nas figuras 5.11 a 5.16 e o resumo das estatísticas nas tabelas 5.7 e 5.10. Novamente, primeiro serão analisados os casos em que a rede é submetida ao tráfego leve e, em seguida, a análise da rede sob tráfego pesado.

5.2.2.1 Tráfego Leve

WLAN



(a) Perda média de pacotes por estouro de buffer (bits/seg)



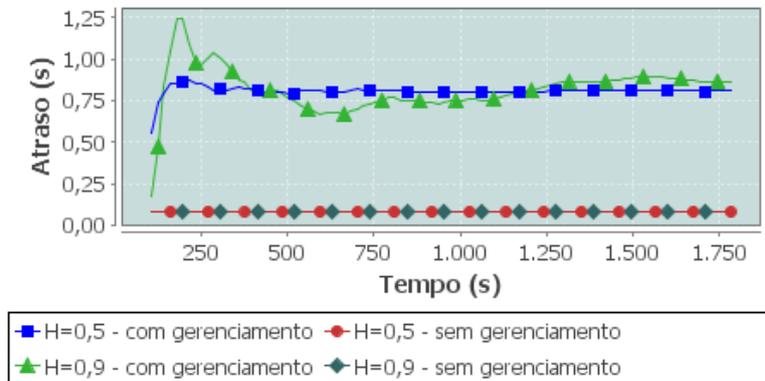
(b) Atraso médio de pacotes da camada de enlace (seg)

Figura 5.11: Estatísticas WLAN - R2 TL

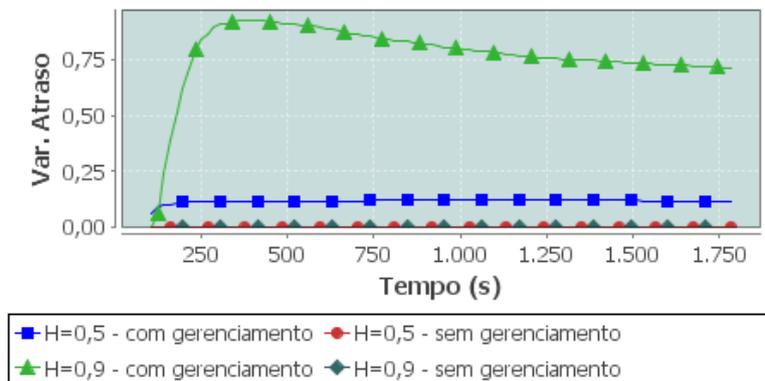
A taxa de perdas na camada WLAN, exibida na figura 5.11(a) com resultados na tabela 5.7, revela que a perda é maior para a rede com tráfego de gerenciamento e $H = 0,9$. Em seguida, com gerenciamento, $H = 0,5$ também apresenta elevada taxa de perdas. Os dois cenários de tráfego sem gerenciamento não apresentam perdas. Os atrasos na camada WLAN (figura 5.11(b)) também mostram que o cenário com gerenciamento, $H = 0,9$ também é o

que apresenta pior desempenho. A curva para o tráfego com gerenciamento, $H = 0,5$ demonstra que esse caso também apresenta elevados atrasos. Somente os casos sem tráfego de gerenciamento apresentam baixos atrasos.

Voz



(a) Atraso fim-a-fim médio de pacotes de voz (seg)



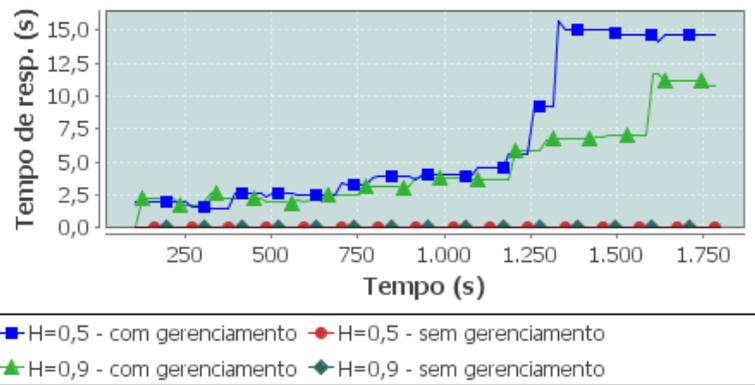
(b) Média da variação do atraso de pacotes de voz

Figura 5.12: Estatísticas Voz - R2 TL

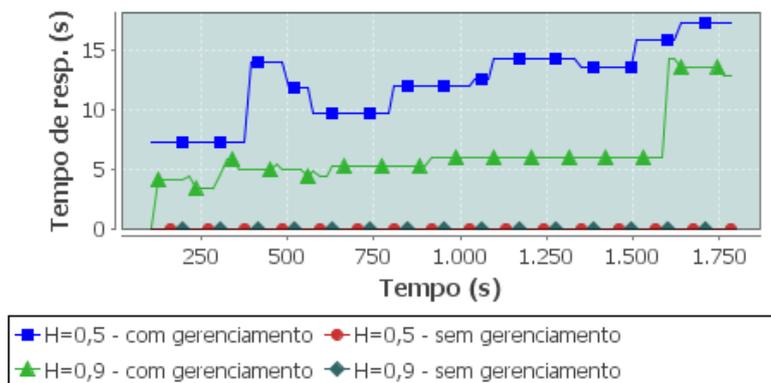
A figura 5.12 exibe os gráficos de estatísticas das aplicações de voz na rede 2 (tráfego leve). Em relação ao atraso fim-a-fim de pacotes de voz, figura 5.12(a), pode-se observar que, na maior parte do tempo, os atrasos para os tráfegos com gerenciamento, $H = 0,5$ e $H = 0,9$, são aproximados, e com valores elevados. A variação do atraso de pacotes de voz, mostrada na figura 5.12(b), evidencia que o caso do tráfego com gerenciamento, $H = 0,9$ possui atraso bastante superior aos demais casos.

Web

Para as estatísticas do tráfego Web ocorre uma situação diferenciada (figura 5.13). O tempo de resposta de objeto para os cenários com gerenciamento (figura 5.13(a)) são aproximados até pouco mais da metade do tempo. A partir de certo ponto, o caso $H = 0,5$ passa a apresentar um tempo mais elevado que em $H = 0,9$. Quanto ao tempo de resposta de página (figura 5.13(b)), o desempenho do cenário com gerenciamento, $H = 0,5$ se mostra pior (maior tempo de resposta) que os outros casos durante todo o tempo. Esse



(a) Tempo médio de resposta de objeto (seg)



(b) Tempo médio de resposta de página (seg)

Figura 5.13: Estatísticas Web - R2 TL

fato foge dos esperado pois, nas demais estatísticas, os resultados para $H = 0,9$ são piores ou aproximadamente iguais aos casos $H = 0,5$. No entanto, as altas perdas mostrada na figura 5.11 incluem também pacotes Web. Mesmo que o atraso tenha sido menor para o caso $H = 0,5$, muitos pacotes em $H = 0,9$ não puderam ser entregues e conseqüentemente não computados para as estatísticas. Dessa forma, a experiência do usuário acaba sendo ruim para os dois casos. Os tempos de resposta dos casos onde não há tráfego de gerenciamento é inferior em todos os casos.

Síntese dos resultados

Os resultados dos cenários anteriores são sintetizados na tabela 5.7. Notavelmente, os piores desempenhos são atribuídos às redes que possuem tráfego de gerenciamento. Por exemplo, as perdas na camada WLAN são relativamente altas nesses cenários, enquanto que os casos sem gerenciamento não apresentam perdas. Um comportamento similar se reflete para as outras estatísticas. Observa-se também que o desempenho em $H = 0,9$ com gerenciamento é visivelmente pior que os demais casos.

Composição do tráfego R2 TL

As tabelas 5.8 e 5.9 mostram informações sobre a composição dos quadros desses cenários.

Tabela 5.7: Resumo do valor médio das estatísticas: R2 TL

	WLAN		Voz		Web	
	Perdas (bits/s)	Atraso (s)	Atraso (s)	Var. Atraso	Resp. Obj. (s)	Resp. Pág. (s)
H=0,5 - CG	$1,63 \times 10^5$	0,288	0,809	0,119	14,5	17,3
H=0,5 - SG	0	0,002	0,081	$5,34 \times 10^{-6}$	0,028	0,060
H=0,9 - CG	$3,10 \times 10^5$	0,373	0,864	0,713	10,8	12,9
H=0,9 - SG	0	0,002	0,082	$1,72 \times 10^{-5}$	0,029	0,065

Para este caso, houve um pequeno aumento no número de bits na rede. Para esta situação de tráfego leve, isso mostra que as oportunidades para a utilização do canal do cenário sem gerenciamento foram utilizadas para se transmitir mais quadros no cenário com gerenciamento. A diminuição do volume de quadros de dados foi baixa, se comparado com os casos anteriores.

Comparando-se com o caso da Rede 1, observa-se um aumento no volume de bits trafegados na rede. Apesar da carga de tráfego se manter semelhantes entre os cenários equivalentes de cada topologia, a dinâmica da rede é alterada devido a interação dos diferentes nós. Nesse caso, há mais pontos de acesso, mas o número de usuários que competem pelo meio é reduzido, e isso é refletido na vazão total de bits.

Tabela 5.8: Composição do tráfego: R2 TL $H = 0,5$

	Quantidade de quadros			Total de bits		
	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)
Dados	$1,15 \times 10^6$ (50,30%)	$1,17 \times 10^6$ (36,41%)	$12,56 \times 10^4$ (+1,08%)	$6,69 \times 10^9$ (95,06%)	$6,50 \times 10^9$ (87,24%)	$-1,8 \times 10^8$ (-2,82%)
Controle	$1,14 \times 10^6$ (49,69%)	$1,08 \times 10^6$ (33,74%)	$-5,92 \times 10^4$ (-5,18%)	$3,47 \times 10^8$ (4,935%)	$3,29 \times 10^8$ (4,419%)	$-1,8 \times 10^7$ (-5,18%)
Gerenciamento	-	$9,59 \times 10^5$ (29,84%)	-	-	$6,21 \times 10^8$ (8,332%)	-
Total	$2,30 \times 10^6$	$3,21 \times 10^6$	$9,12 \times 10^5$ (+39,6%)	$7,04 \times 10^9$	$7,46 \times 10^9$	$4,14 \times 10^8$ (+5,88%)

Os próximos resultados apresentados se referem ao tráfego pesado na rede 2.

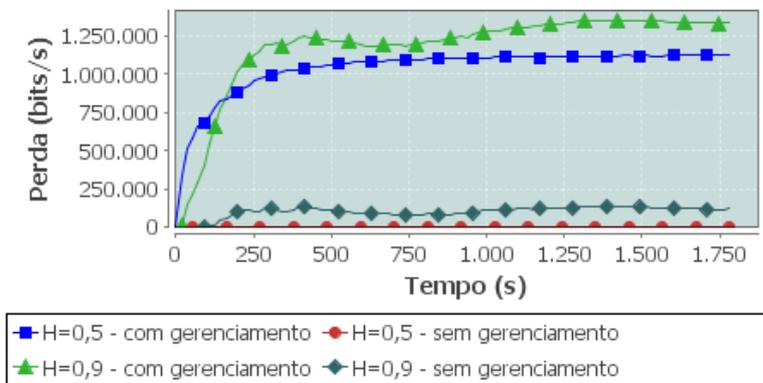
5.2.2.2 Tráfego Pesado

WLAN

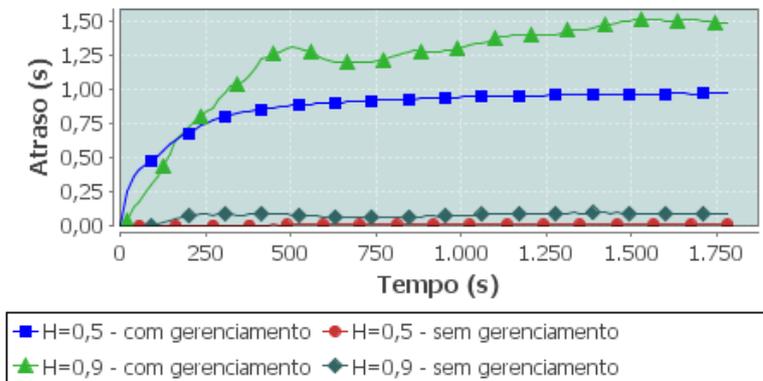
Para as estatísticas da camada WLAN, mostradas na figura 5.14, nota-se que a taxa de perdas são bastante elevadas para os casos com gerenciamento (figura 5.14(a)) e, nesse caso, as perdas são maiores para o tráfego $H = 0,9$. Pode-se observar também que as perdas para o tráfego sem gerenciamento, $H = 0,9$ passam a ser consideráveis, diferentemente do ocorrido com o tráfego leve. O atraso na camada WLAN segue um comportamento semelhante, vide

Tabela 5.9: Composição do tráfego: R2 TL $H = 0,9$

	Quantidade de quadros			Total de bits		
	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)
Dados	$1,21 \times 10^6$ (50,39%)	$1,17 \times 10^6$ (36,42%)	$-3,86 \times 10^4$ (-3,19%)	$7,00 \times 10^9$ (95,08%)	$6,44 \times 10^9$ (87,12%)	$-5,5 \times 10^8$ (-7,98%)
Controle	$1,19 \times 10^6$ (49,60%)	$1,08 \times 10^6$ (33,69%)	$-1,07 \times 10^5$ (-9,02%)	$3,62 \times 10^8$ (4,916%)	$3,29 \times 10^8$ (4,454%)	$-3,2 \times 10^7$ (-9,02%)
Gerenciamento	-	$9,61 \times 10^5$ (29,88%)	-	-	$6,23 \times 10^8$ (8,422%)	-
Total	$2,40 \times 10^6$	$3,21 \times 10^6$	$8,15 \times 10^5$ (+33,9%)	$7,36 \times 10^9$	$7,39 \times 10^9$	$3,11 \times 10^7$ (+0,42%)



(a) Perda média de pacotes por estouro de buffer (bits/seg)



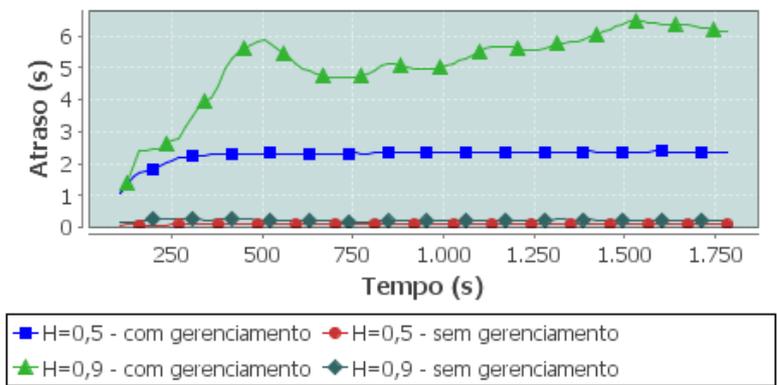
(b) Atraso médio de pacotes da camada de enlace (seg)

Figura 5.14: Estatísticas WLAN - R2 TP

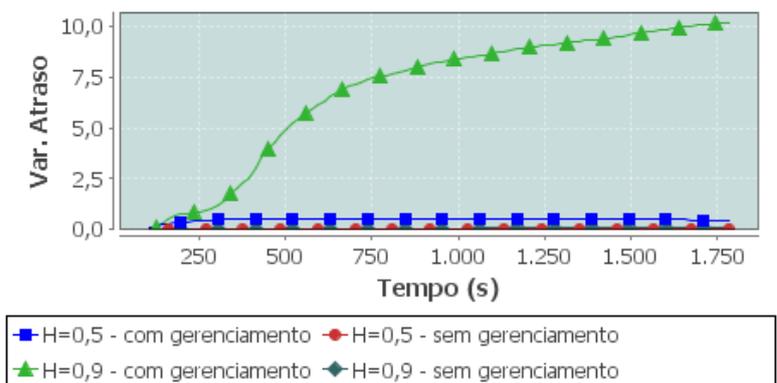
figura 5.14(b). O cenário com gerenciamento, $H = 0,9$ possui maiores atrasos, seguido pelo equivalente com $H = 0,5$. Em relação ao tráfego sem gerenciamento, o cenário $H = 0,9$ mostra atrasos maiores que em $H = 0,5$.

Voz

Os resultados obtidos para o tráfego de voz são mostrados na figura 5.15. O atraso fim-a-fim da figura 5.15(a) mostra que os cenários com tráfego de gerenciamento possuem atrasos



(a) Atraso fim-a-fim médio de pacotes de voz (seg)



(b) Média da variação do atraso de pacotes de voz

Figura 5.15: Estatísticas Voz - R2 TP

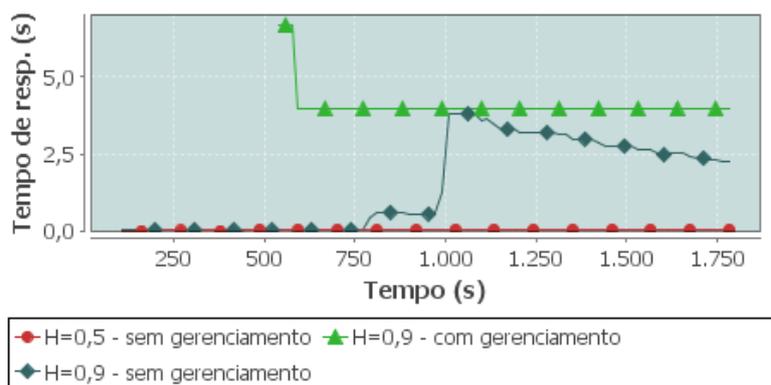
muito altos, sendo que para $H = 0,9$ chega a ser o dobro de $H = 0,5$ em alguns períodos. Para quando não há quadros de gerenciamento, os atrasos são menores. A variação do atraso do caso com gerenciamento, $H = 0,9$ são muito superiores aos demais casos, como mostrado na figura 5.15(b).

Web

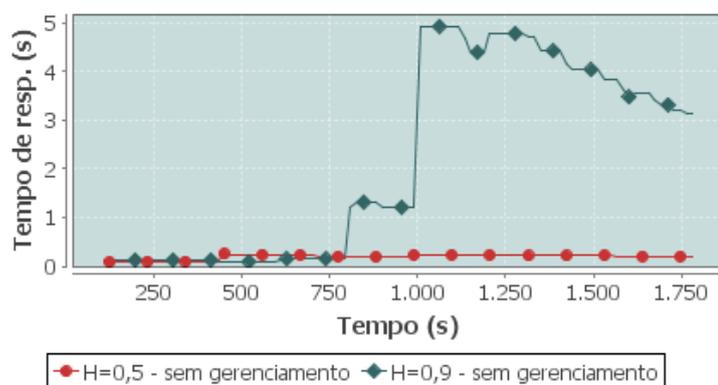
O tráfego Web da rede 2 com tráfego pesado apresenta o mesmo fenômeno que o equivalente da rede 1. Parte das estatísticas está em falta pois não foi computadas devido aos cancelamentos dos usuários. Assim, o tempo de resposta de página (figura 5.16(a)) e o tempo de resposta de objeto (figura 5.16(b)) não mostram o caso com gerenciamento, $H = 0,5$ mostrando a dificuldade do estabelecimento da comunicação. Para os casos sem gerenciamento, o tempo de resposta é maior se $H = 0,9$.

Síntese dos resultados

A tabela 5.10 resume os resultados para esses casos. Pelos mesmos motivos que não há curvas para algumas estatísticas Web (figura 5.16), alguns resultados na tabela também não são exibidos. Nesse caso, o tempo de resposta de objeto para o caso com gerenciamento e $H = 0,9$ se mostra menor que se comparado com a tabela 5.7. No entanto, esse



(a) Tempo médio de resposta de objeto (seg)



(b) Tempo médio de resposta de página (seg)

Figura 5.16: Estatísticas Web - R2 TP

resultado não pode ser considerado conclusivo, pois parte da curva relativa a este caso não está presente, o que deturpa o cálculo do atraso médio. Em relação aos outros parâmetros, pode ser observada a mesma tendência dos casos anteriores. As situações com tráfego de gerenciamento possuem desempenho ruins se comparado com as situações sem esse tráfego. Da mesma forma, o maior grau de autossimilaridade provoca queda no desempenho.

Tabela 5.10: Resumo do valor médio das estatísticas: R2 TP

	WLAN		Voz		Web	
	Perdas (bits/s)	Atraso (s)	Atraso (s)	Var. Atraso	Resp. Obj. (s)	Resp. Pág. (s)
H=0,5 - CG	$1,12 \times 10^6$	0,968	2,36	0,468	-	-
H=0,5 - SG	25,8	0,008	0,090	$6,81 \times 10^{-4}$	0,075	0,210
H=0,9 - CG	$1,33 \times 10^6$	1,48	6,16	10,2	3,96	-
H=0,9 - SG	$1,20 \times 10^5$	0,088	0,232	0,061	2,24	3,15

Composição do tráfego R2 TP

As tabelas 5.11 e 5.12 mostram os dados do tráfego coletado da rede 2, tráfego pesado. Como esperado, o número de quadros de gerenciamento causa interferência no desempenho, ou seja, um maior número de gerenciamento contribuiu para maiores perdas e atrasos. Há um aumento no número total de quadros enviados, mas com diminuição no volume de bits. Nota-

se que o aumento no número de quadros é menos significativo que os outros casos, mostrando que na situação de tráfego pesado ocorre uma maior saturação da rede. O volume de quadros de dados e controle cai significativamente nos cenários com tráfego de gerenciamento.

Tabela 5.11: Composição do tráfego: R2 TP $H = 0,5$

	Quantidade de quadros			Total de bits		
	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)
Dados	$1,57 \times 10^6$ (51,01%)	$1,23 \times 10^6$ (37,36%)	$-3,46 \times 10^5$ (-21,9%)	$9,22 \times 10^9$ (95,24%)	$6,45 \times 10^9$ (87,05%)	$-2,7 \times 10^9$ (-30,1%)
Controle	$1,51 \times 10^6$ (48,98%)	$1,10 \times 10^6$ (33,46%)	$-4,11 \times 10^5$ (-27,1%)	$4,60 \times 10^8$ (4,755%)	$3,35 \times 10^8$ (4,528%)	$-1,2 \times 10^8$ (-27,1%)
Gerenciamento	-	$9,62 \times 10^5$ (29,17%)	-	-	$6,23 \times 10^8$ (8,416%)	-
Total	$3,09 \times 10^6$	$3,29 \times 10^6$	$2,04 \times 10^5$ (+6,60%)	$9,69 \times 10^9$	$7,41 \times 10^9$	$-2,2 \times 10^9$ (-23,5%)

Tabela 5.12: Composição do tráfego: R2 TP $H = 0,9$

	Quantidade de quadros			Total de bits		
	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)
Dados	$1,67 \times 10^6$ (51,58%)	$1,23 \times 10^6$ (37,49%)	$-4,47 \times 10^5$ (-26,6%)	$9,71 \times 10^9$ (95,29%)	$6,48 \times 10^9$ (87,16%)	$-3,2 \times 10^9$ (-33,2%)
Controle	$1,57 \times 10^6$ (48,41%)	$1,09 \times 10^6$ (33,25%)	$-4,83 \times 10^5$ (-30,6%)	$4,79 \times 10^8$ (4,701%)	$3,32 \times 10^8$ (4,463%)	$-1,4 \times 10^8$ (-30,6%)
Gerenciamento	-	$9,60 \times 10^5$ (29,25%)	-	-	$6,22 \times 10^8$ (8,369%)	-
Total	$3,25 \times 10^6$	$3,28 \times 10^6$	$29,84 \times 10^4$ (+0,91%)	$1,01 \times 10^{10}$	$7,44 \times 10^9$	$-2,7 \times 10^9$ (-26,9%)

Análise

Os resultados observados na rede 2 se assemelham aos da rede 1 no que se refere ao tráfego de gerenciamento, ou seja, os cenários em que há quadros de gerenciamento apresenta pior desempenho. Esse fato é observado tanto nos casos de tráfego leve quanto os de tráfego pesado.

Em situações de tráfego leve, considerando as situações com quadros de gerenciamento, percebe-se que o desempenho na camada WLAN é pior para o tráfego $H = 0,9$, tanto para perdas quanto para atraso. Por outro lado, os tempos de aplicações Web são melhores para este tráfego, e há um equilíbrio para o atraso de quadros de voz. Os efeitos de autossimilaridade se tornam mais críticos, da mesma forma se acentuam as diferenças entre os casos com e sem tráfego de gerenciamento. Nesse cenário de maiores cargas, fica mais visível o efeito negativo causado pela autossimilaridade associada a uma alta carga de tráfego na rede, conforme hipóteses levantadas anteriormente.

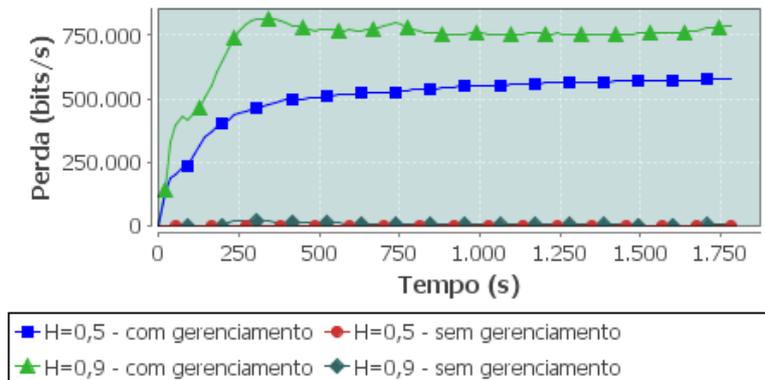
A partir desses resultados pode-se observar que, para esta configuração, mesmo com a carga de tráfego mais leve, as estatísticas da camada WLAN e de aplicação de voz, há prejuízos para os tráfegos com $H = 0,9$. Também, é evidente que os resultados dos casos sem tráfego de gerenciamento são melhores que quando estão presentes. Esses resultados demonstram coerência com as hipóteses propostas.

5.2.3 Rede 3

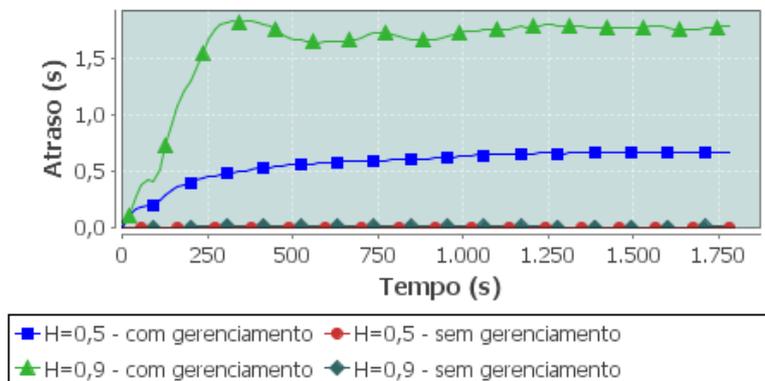
A rede 3 representa a topologia de maior complexidade das simulações. Os resultados obtidos com tais simulações são mostrados nas figuras 5.17 a 5.22 e nas tabelas 5.13 e 5.16. Da mesma forma que as redes anteriores, será feita primeiro a análise das simulações com tráfego leve e logo depois a análise das simulações com tráfego pesado.

5.2.3.1 Tráfego Leve

WLAN



(a) Perda média de pacotes por estouro de buffer (bits/seg)



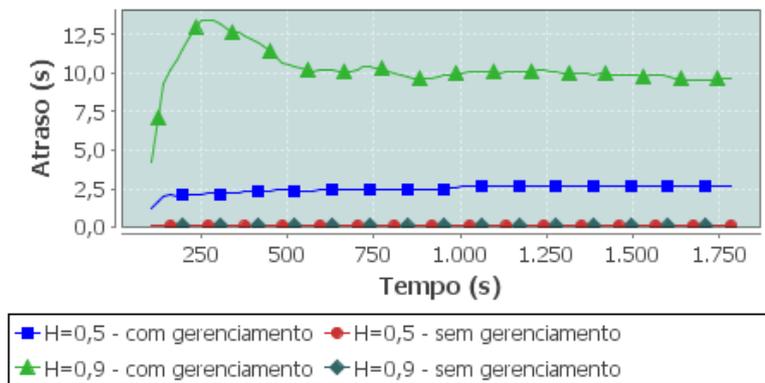
(b) Atraso médio de pacotes da camada de enlace (seg)

Figura 5.17: Estatísticas WLAN - R3 TL

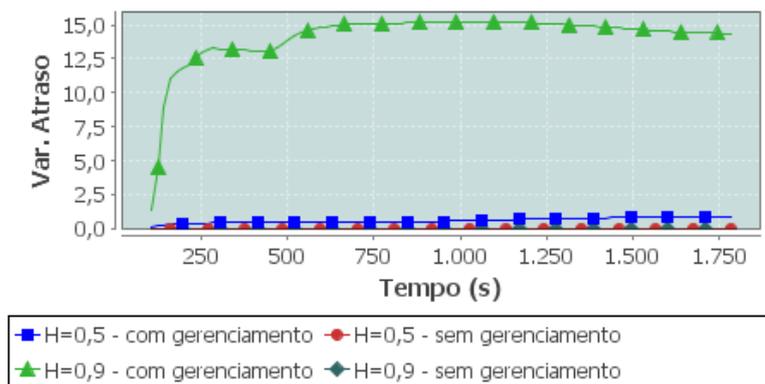
A figura 5.17 mostra as estatísticas da camada WLAN. As maiores taxas de perdas foram observadas no cenário com gerenciamento, $H = 0,9$, conforme figura 5.17(a). As perdas

também foram altas para o caso com gerenciamento, $H = 0,5$. Quanto às redes sem tráfego de gerenciamento, as perdas se mostraram bastante inferiores. Em relação ao atraso nessa camada, mostrado na figura 5.17, novamente verifica-se que o pior desempenho está relacionado ao caso com gerenciamento, $H = 0,9$ por possuir maiores atrasos, seguido pelo cenário $H = 0,5$. Os cenários sem gerenciamento apresentam atrasos mínimos.

Voz



(a) Atraso fim-a-fim médio de pacotes de voz (seg)



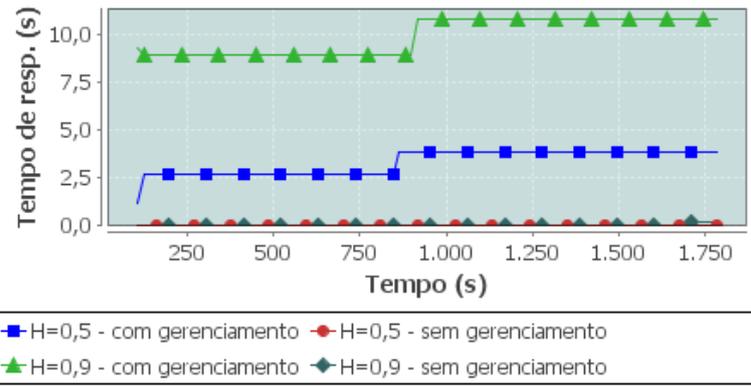
(b) Média da variação do atraso de pacotes de voz

Figura 5.18: Estatísticas Voz - R3 TL

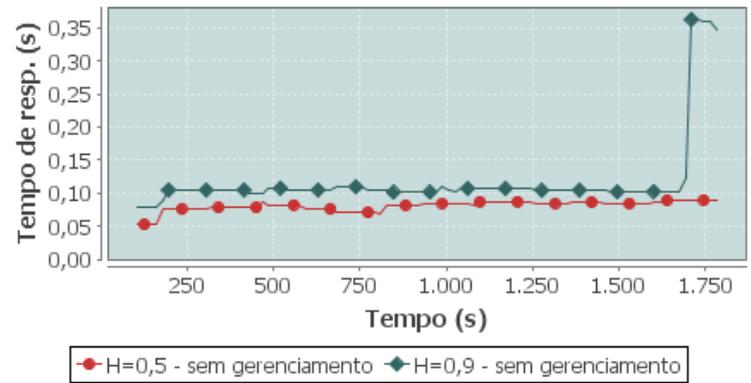
As estatísticas para o tráfego de voz são mostradas na figura 5.18. O atraso fim-a-fim dos pacotes, mostrado na figura 5.18(a), é maior para os casos da rede com gerenciamento, sendo que o caso $H = 0,9$ se sobressai ao $H = 0,5$. A retirada do tráfego de gerenciamento fez com que os atrasos se tornassem menores. O efeito de autossimilaridade do caso com gerenciamento, $H = 0,9$ fez com que a variação de atraso seja mais elevado que os demais casos, conforme figura 5.18(b).

Web

Para o tráfego Web, verifica-se pela figura 5.19(a) que o tempo de resposta de objeto do cenário com gerenciamento, $H = 0,9$ é o mais elevado. Embora a rede tenha sido submetida ao tráfego leve, o tempo de resposta de página (figura 5.19(b)) para os casos com gerenciamento não puderam ser computados, pelos mesmos motivos de congestão das redes



(a) Tempo médio de resposta de objeto (seg)



(b) Tempo médio de resposta de página (seg)

Figura 5.19: Estatísticas Web - R3 TL

anteriores. Para os cenários sem gerenciamento, os tempos se mantiveram próximos durante a maior parte do tempo.

Síntese dos resultados

O resumo das estatísticas apresentadas está na tabela 5.13. Novamente, os cenários com tráfego de gerenciamento possuem piores resultados. Por exemplo, no caso de perdas da camada WLAN para $H = 0,5$ mostra que sai de um caso onde não há perdas quando não há tráfego de gerenciamento para uma situação de elevadas perdas pela inclusão desse tipo de quadro. Além disso, pode-se notar que a alta autossimilaridade acarreta em prejuízo para o desempenho.

Tabela 5.13: Resumo do valor médio das estatísticas: R3 TL

	WLAN		Voz		Web	
	Perdas (bits/s)	Atraso (s)	Atraso (s)	Var. Atraso	Resp. Obj. (s)	Resp. Pág. (s)
H=0,5 - CG	$5,78 \times 10^5$	0,673	2,66	0,912	3,81	-
H=0,5 - SG	0	0,003	0,083	$3,49 \times 10^{-5}$	0,038	0,090
H=0,9 - CG	$7,86 \times 10^5$	1,78	9,70	14,34	10,8	-
H=0,9 - SG	$4,88 \times 10^3$	0,010	0,098	0,010	0,181	0,348

Composição do tráfego R3 TL

As informações sobre os componentes do tráfego são exibidos nas tabelas 5.14 e 5.15. A proporção de quadros de gerenciamento, nesse caso, é menor (cerca de 25% do total). A variação no número total de quadros e no volume em bits entre os cenários sem e com tráfego de gerenciamento mostra um comportamento semelhante aos casos anteriores. Ocorre um aumento no número de quadros, mas o volume total é diminuído. Há também degradação do volume de dados trafegados. Mesmo com tráfego leve, a rede já se encontra em um estado próximo à saturação.

Tabela 5.14: Composição do tráfego: R3 TL $H = 0,5$

	Quantidade de quadros			Total de bits		
	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)
Dados	$1,47 \times 10^6$ (50,62%)	$1,36 \times 10^6$ (39,50%)	$-1,09 \times 10^5$ (-7,40%)	$7,55 \times 10^9$ (94,52%)	$6,34 \times 10^9$ (87,06%)	$-1,2 \times 10^9$ (-16,0%)
Controle	$1,44 \times 10^6$ (49,37%)	$1,20 \times 10^6$ (34,75%)	$-2,37 \times 10^5$ (-16,4%)	$4,37 \times 10^8$ (5,475%)	$3,65 \times 10^8$ (5,014%)	$-7,2 \times 10^7$ (-16,4%)
Gerenciamento	-	$8,90 \times 10^5$ (25,73%)	-	-	$5,77 \times 10^8$ (7,915%)	-
Total	$2,91 \times 10^6$	$3,46 \times 10^6$	$5,43 \times 10^5$ (+18,6%)	$7,99 \times 10^9$	$7,29 \times 10^9$	$-7,0 \times 10^8$ (-8,81%)

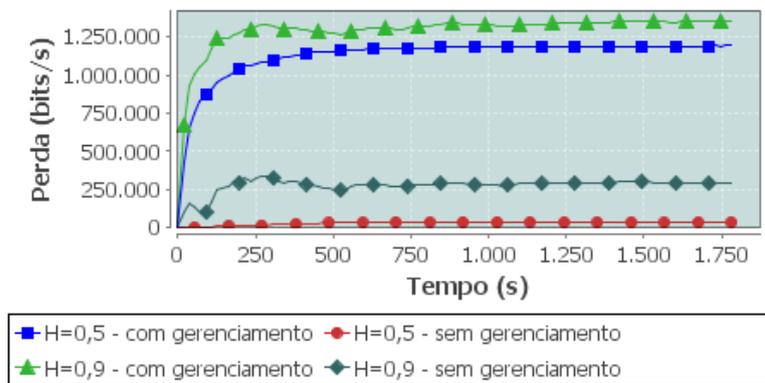
Tabela 5.15: Composição do tráfego: R3 TL $H = 0,9$

	Quantidade de quadros			Total de bits		
	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)
Dados	$1,60 \times 10^6$ (50,96%)	$1,38 \times 10^6$ (39,92%)	$-2,25 \times 10^5$ (-14,0%)	$8,17 \times 10^9$ (94,55%)	$6,33 \times 10^9$ (87,08%)	$-1,8 \times 10^9$ (-22,4%)
Controle	$1,54 \times 10^6$ (49,03%)	$1,19 \times 10^6$ (34,35%)	$-3,58 \times 10^5$ (-23,1%)	$4,70 \times 10^8$ (5,447%)	$3,61 \times 10^8$ (4,975%)	$-1,0 \times 10^8$ (-23,1%)
Gerenciamento	-	$8,91 \times 10^5$ (25,72%)	-	-	$5,77 \times 10^8$ (7,940%)	-
Total	$3,15 \times 10^6$	$3,46 \times 10^6$	$3,06 \times 10^5$ (+9,71%)	$8,64 \times 10^9$	$7,27 \times 10^9$	$-1,3 \times 10^9$ (-15,8%)

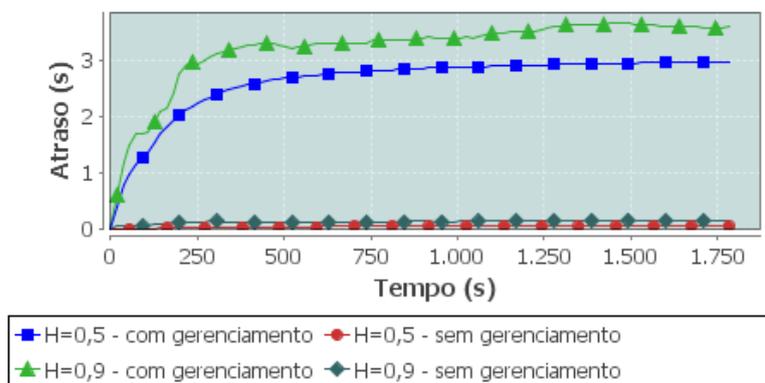
5.2.3.2 Tráfego Pesado

WLAN

Em relação às simulações da rede 3 submetida ao tráfego pesado, observa-se que os resultados mostram uma situação em que os desempenhos são ainda mais degradados. Pela figura 5.20(a) pode-se ver que as taxas de perdas são muito altas para os casos com gerenciamento, principalmente para $H = 0,9$. As perdas para o cenário sem gerenciamento,



(a) Perda média de pacotes por estouro de buffer (bits/seg)



(b) Atraso médio de pacotes da camada de enlace (seg)

Figura 5.20: Estatísticas WLAN - R3 TP

$H = 0,9$ não são mais mínimas e apresentam valores consideráveis. O atraso, como mostrado na figura 5.20(b), também é mais elevado para os casos com gerenciamento.

Voz

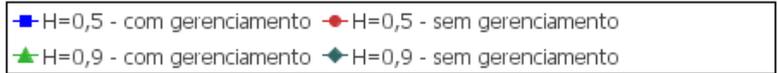
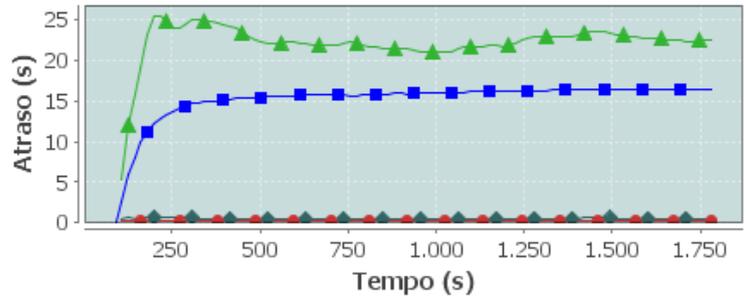
A figura 5.21 mostra as estatísticas do tráfego de voz para a situação em questão. Constatase pela figura 5.21(a) que os atrasos são bastante altos quando há tráfego de gerenciamento, sendo que para $H = 0,9$ são ainda maiores. Quando não há quadros de gerenciamento, os atrasos são baixos. A variação de atraso (figura 5.21(b)) do caso com gerenciamento, $H = 0,9$ prevalece em relação aos demais casos.

Web

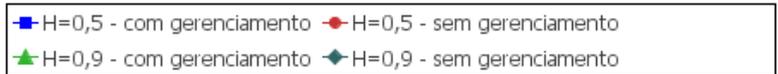
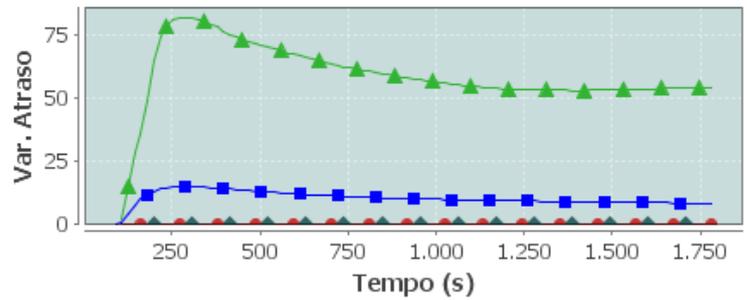
Em relação às estatísticas Web (figura 5.22), novamente existe a ausência de curvas devido à falta das estatísticas do tráfego com gerenciamento. Para o tráfego sem gerenciamento, o tempo de resposta de objeto e de página é maior quando $H = 0,9$ na maior parte do tempo.

Síntese dos resultados

Conforme a tabela 5.16, que sintetiza os resultados dos últimos casos abordados, o desempenho quando há tráfego de gerenciamento é ruim. A alta carga na rede, associada à presença desse tipo de quadro, provoca uma situação de grande congestionamento,



(a) Atraso fim-a-fim médio de pacotes de voz (seg)



(b) Média da variação do atraso de pacotes de voz

Figura 5.21: Estatísticas Voz - R3 TP

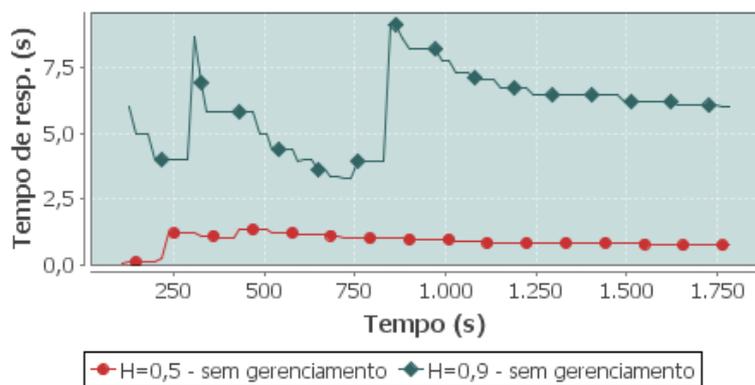
prejudicando todos os parâmetros monitorados. Também, redes com maior valor de H possuem pior desempenho que aquelas com menor valor. Os resultados do tráfego Web para os casos com gerenciamento não são mostrados porque não puderam ser computados, conforme explicado anteriormente.

Tabela 5.16: Resumo do valor médio das estatísticas: R3 TP

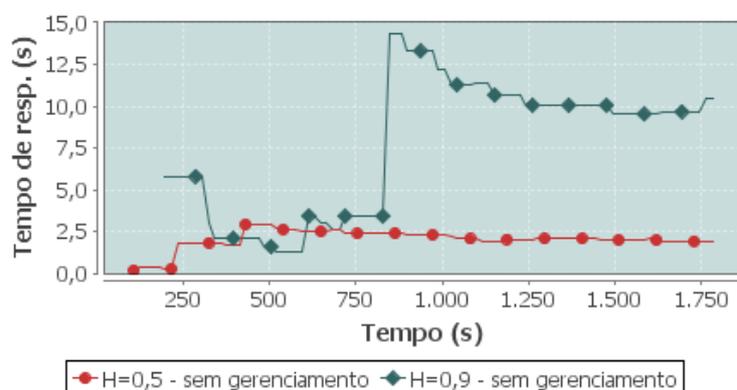
	WLAN		Voz		Web	
	Perdas (bits/s)	Atraso (s)	Atraso (s)	Var. Atraso	Resp. Obj. (s)	Resp. Pág. (s)
H=0,5 - CG	$1,19 \times 10^6$	2,97	16,4	8,35	-	-
H=0,5 - SG	$3,45 \times 10^4$	0,052	0,200	0,021	0,730	1,92
H=0,9 - CG	$1,35 \times 10^6$	3,59	22,4	53,8	-	-
H=0,9 - SG	$2,92 \times 10^5$	0,157	0,532	0,283	5,98	10,4

Composição do tráfego R3 TP

As tabelas 5.17 e 5.18 apresentam a descrição dos componentes do tráfego da rede 3 com tráfego pesado. Pode-se ver que, embora o tráfego de gerenciamento seja de aproximadamente 26%, a sua presença causa grande impacto na rede. Se comparado com o caso em que não há quadros de gerenciamento, há diminuição tanto no número de quadros quanto no volume trafegado. Isso caracteriza uma rede muito saturada, causando um grande



(a) Tempo médio de resposta de objeto (seg)



(b) Tempo médio de resposta de página (seg)

Figura 5.22: Estatísticas Web - R3 TP

número de perdas. Essa situação é causada pelo grande número de estações que concorrem pelo meio e se interferem mutuamente.

Tabela 5.17: Composição do tráfego: R3 TP $H = 0,5$

	Quantidade de quadros			Total de bits		
	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)
Dados	$1,87 \times 10^6$ (51,83%)	$1,37 \times 10^6$ (40,30%)	$-5,01 \times 10^5$ (-26,6%)	$9,63 \times 10^9$ (94,78%)	$6,44 \times 10^9$ (87,44%)	$-3,1 \times 10^9$ (-33,1%)
Controle	$1,74 \times 10^6$ (48,16%)	$1,15 \times 10^6$ (33,69%)	$-5,94 \times 10^5$ (-34,0%)	$5,30 \times 10^8$ (5,217%)	$3,49 \times 10^8$ (4,746%)	$-1,8 \times 10^8$ (-34,0%)
Gerenciamento	-	$8,88 \times 10^5$ (26,00%)	-	-	$5,75 \times 10^8$ - (7,806%)	
Total	$3,62 \times 10^6$	$3,41 \times 10^6$	$-2,07 \times 10^5$ (-5,72%)	$1,01 \times 10^{10}$	$7,37 \times 10^9$	$-2,7 \times 10^9$ (-27,4%)

Análise

Essa topologia representa a rede com maior número de nós estudada. Isso faz com que haja uma maior concorrência pelo meio e aumenta a probabilidade de colisões (interferência e perdas), e maiores tempos de deferimento da transmissão de quadros em cada estação

Tabela 5.18: Composição do tráfego: R3 TP $H = 0,9$

	Quantidade de quadros			Total de bits		
	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)	SG (proporção)	CG (proporção)	SG → CG (variação)
Dados	$1,93 \times 10^6$ (52,39%)	$1,38 \times 10^6$ (40,61%)	$-5,58 \times 10^5$ (-28,7%)	$9,60 \times 10^9$ (94,71%)	$6,46 \times 10^9$ (87,54%)	$-3,1 \times 10^9$ (-32,7%)
Controle	$1,76 \times 10^6$ (47,60%)	$1,13 \times 10^6$ (33,29%)	$-6,30 \times 10^5$ (-35,7%)	$5,35 \times 10^8$ (5,285%)	$3,44 \times 10^8$ (4,663%)	$-1,9 \times 10^8$ (-35,7%)
Gerenciamento	-	$8,87 \times 10^5$ (26,08%)	-	-	$5,74 \times 10^8$ (7,789%)	-
Total	$3,70 \times 10^6$	$3,40 \times 10^6$	$-3,01 \times 10^5$ (-8,13%)	$1,01 \times 10^{10}$	$7,38 \times 10^9$	$-2,7 \times 10^9$ (-27,2%)

(atraso). Por esses motivos, essa topologia apresenta piores congestões que as demais redes, considerando-se as mesmas cargas de tráfego. A presença de quadros de gerenciamento promove situações mais críticas dos parâmetros monitorados.

Nesta rede, a situação de tráfego leve já demonstra níveis de congestão relativamente altos. As perdas e atrasos da camada de enlace, assim como as demais estatísticas, se mostram piores que os outros cenários, principalmente nos casos onde há quadros de gerenciamento. Nesse caso, o efeito da alta autossimilaridade já se mostra prejudicial para a rede. Os problemas são agravados para as simulações com tráfego pesado. Todo o desempenho da rede é prejudicado, sendo ainda pior para os casos com quadros de gerenciamento.

Pelos resultados obtidos pode-se ver que, de fato, a retirada dos quadros de gerenciamento favorece os parâmetros analisados, o que está coerente com as hipóteses estudadas nesse trabalho.

5.3 AVALIAÇÃO DO GRAU DE AUTOSSIMILARIDADE RESULTANTE NOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Agora, serão mostrados cálculos do parâmetro de Hurst para os cenários de redes simuladas. O cálculo é realizado sobre o tráfego coletado no meio aéreo, por meio do *sniffer*, utilizando-se os métodos citados anteriormente. Diversos fenômenos, como a agregação de diversas fontes, concorrência pelo meio dos diversos elementos, dentre outros, podem fazer com que o H medido sobre o tráfego coletado na rede não seja igual ao H do tráfego inserido na camada IP. Na verdade, é esperado que a agregação de múltiplas fontes autossimilares tornem o tráfego agregado mais autossimilar.

A tabela 5.19 mostra os valores de H calculado para a Rede 2, tráfego leve, $H = 0,5$ e com gerenciamento com agregação em diferentes escalas de tempo. Para simplificar a visualização dos resultados, para os demais cenários serão exibidos apenas os valores

calculados na escala 0,05 segundos. Assim, as tabelas 5.20 a 5.25 mostram os valores de H para as variações das redes 1, 2 e 3. Pode-se observar $H > 0,6$ em todos os casos. Esses resultados mostram que, para os casos estudados, a agregação de tráfego da rede sem fio, mesmo onde o tráfego inserido possui um H baixo, a agregação dos fluxos resultam em um tráfego autossimilar. Porém, em alguns casos de $H = 0,9$ que ocorre a redução do H resultante. Esse fenômeno está associado às dinâmicas dos protocolos da porção sem fio da rede. Quadros de controle e gerenciamento podem alterar o fator de autossimilaridade dos quadros de dados, provocando a redução do H em alguns casos. Mas é importante ressaltar que, mesmo havendo uma pequena diminuição, o parâmetro de Hurst demonstra que o tráfego é autossimilar.

Tabela 5.19: Hurst para diferentes escalas - R2 TL $H = 0,5$ CG

Estimador	Esc. 0,05	Esc. 0,1	Esc. 1,0	Esc. 10,0
Kettani-Gubner	0,685	0,739	0,907	0,771
VTP	0,767	0,843	0,938	0,670
Whittle	0,685	0,730	0,999	0,999
Periodograma	0,809	0,941	1,133	0,578

Tabela 5.20: Valores de H para escala 0,05 - R1 TL

Estimador	$H = 0,5$ CG	$H = 0,5$ SG	$H = 0,9$ CG	$H = 0,9$ SG
Kettani-Gubner	0,656	0,618	0,801	0,785
VTP	0,747	0,656	0,863	0,855
Whittle	0,666	0,629	0,747	0,728
Periodograma	0,751	0,667	0,783	0,758

Tabela 5.21: Valores de H para escala 0,05 - R1 TP

Estimador	$H = 0,5$ CG	$H = 0,5$ SG	$H = 0,9$ CG	$H = 0,9$ SG
Kettani-Gubner	0,671	0,757	0,803	0,843
VTP	0,715	0,809	0,862	0,894
Whittle	0,678	0,743	0,757	0,777
Periodograma	0,735	0,838	0,818	0,836

Tabela 5.22: Valores de H para escala 0,05 - R2 TL

Estimador	$H = 0,5$ CG	$H = 0,5$ SG	$H = 0,9$ CG	$H = 0,9$ SG
Kettani-Gubner	0,685	0,620	0,708	0,716
VTP	0,767	0,657	0,790	0,782
Whittle	0,685	0,628	0,700	0,696
Periodograma	0,809	0,665	0,804	0,724

O modelo de cálculo do parâmetro de Hurst da seção 3.3 também foi utilizado nas capturas do tráfego das simulações. As tabelas 5.26 a 5.29 mostram os resultados de cálculos para alguns dos casos estudados. As colunas com (*) mostram os H 's parciais dos componentes

Tabela 5.23: Valores de H para escala 0,05 - R2 TP

Estimador	$H = 0,5$ CG	$H = 0,5$ SG	$H = 0,9$ CG	$H = 0,9$ SG
Kettani-Gubner	0,641	0,755	0,678	0,856
VTP	0,724	0,777	0,765	0,898
Whittle	0,655	0,749	0,679	0,791
Periodograma	0,787	0,796	0,792	0,844

Tabela 5.24: Valores de H para escala 0,05 - R3 TL

Estimador	$H = 0,5$ CG	$H = 0,5$ SG	$H = 0,9$ CG	$H = 0,9$ SG
Kettani-Gubner	0,676	0,660	0,679	0,771
VTP	0,748	0,674	0,746	0,812
Whittle	0,680	0,661	0,680	0,733
Periodograma	0,772	0,687	0,771	0,759

Tabela 5.25: Valores de H para escala 0,05 - R3 TP

Estimador	$H = 0,5$ CG	$H = 0,5$ SG	$H = 0,9$ CG	$H = 0,9$ SG
Kettani-Gubner	0,653	0,772	0,647	0,780
VTP	0,721	0,827	0,713	0,841
Whittle	0,663	0,754	0,659	0,757
Periodograma	0,769	0,858	0,762	0,841

do tráfego, a coluna “Total” mostra o valor de H calculado aplicando-se os métodos sobre o tráfego agregado, a coluna “Modelo” exibe os valores de H obtidos pelo modelo baseado nos componentes do tráfego e a coluna “Diferença” mostra o valor absoluto da diferença entre as duas formas de cálculo. Os cálculos são feitos para a escala de agregação 0,05 segundos.

Tabela 5.26: Hurst calculado pelo modelo - R1 TL $H = 0,5$ CG

Estimador	Dados*	Controle*	Gerenciamento*	Total	Modelo	Diferença
Kettani-Gubner	0,760	0,785	0,796	0,799	0,782	0,017
VTP	0,867	0,867	0,877	0,879	0,871	0,007
Whittle	0,714	0,736	0,743	0,745	0,732	0,012
Periodograma	0,759	0,774	0,783	0,784	0,773	0,010

Tabela 5.27: Hurst calculado pelo modelo - R2 TP $H = 0,9$ CG

Estimador	Dados*	Controle*	Gerenciamento*	Total	Modelo	Diferença
Kettani-Gubner	0,594	0,797	0,786	0,804	0,735	0,068
VTP	0,632	0,873	0,865	0,879	0,802	0,077
Whittle	0,610	0,744	0,737	0,748	0,703	0,044
Periodograma	0,717	0,817	0,818	0,823	0,789	0,034

Pode ser observado nas tabelas que a diferença dos valores entre os modos de cálculo é bastante pequena, tornando o modelo válido para o estudo das situações apresentadas.

Então observa-se que, conforme os estudos realizados nesses trabalhos, que de fato o tráfego no núcleo da rede é autossimilar e isso acontece ainda quando as fontes que são agregadas

Tabela 5.28: Hurst calculado pelo modelo - R3 TP $H = 0,9$ CG

Estimador	Dados*	Controle*	Gerenciamento*	Total	Modelo	Diferença
Kettani-Gubner	0,680	0,799	0,798	0,808	0,764	0,043
VTP	0,722	0,869	0,867	0,876	0,826	0,050
Whittle	0,673	0,752	0,752	0,757	0,729	0,028
Periodograma	0,706	0,801	0,802	0,809	0,774	0,035

Tabela 5.29: Hurst calculado pelo modelo - R3 TP $H = 0,9$ SG

Estimador	Dados*	Controle*	Gerenciamento*	Total	Modelo	Diferença
Kettani-Gubner	0,841	0,868	0,878	0,878	0,863	0,014
VTP	0,900	0,915	0,922	0,922	0,913	0,008
Whittle	0,777	0,808	0,816	0,816	0,801	0,014
Periodograma	0,828	0,872	0,883	0,883	0,862	0,020

não tem um alto grau de autossimilaridade. Isso apresenta naturalmente um problema em relação ao desempenho das aplicações de redes sem fio e provoca um estudo mais aprofundado de como fazer a gestão desse grau de autossimilaridade no núcleo da rede.

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As simulações apresentadas neste capítulo tiveram a finalidade de estudar as hipóteses levantadas anteriormente. A expectativa era que o maior grau de autossimilaridade interferisse negativamente, enquanto que a ausência de quadros de gerenciamento fosse positiva. Através dos resultados experimentais, verificou-se que essas expectativas ocorrem de fato. Na sequência serão discutidos alguns pontos importantes observados em cada topologia.

Na topologia simulada na rede 1, em que existe apenas uma célula, todos os usuários concorrem simultaneamente para a utilização do mesmo AP, as maiores taxas de perdas, atrasos, etc. ocorrem em casos em que há tráfego de gerenciamento. Isso já mostra um efeito coerente da proposta deste trabalho. Quando há uma menor sobrecarga na rede, os parâmetros de autossimilaridade causaram efeitos pouco perceptíveis, ao contrário do que ocorre quando há maior sobrecarga da rede. Neste caso, o tráfego mais autossimilar se mostra negativo para a maioria dos casos. Esses resultados remetem à possibilidade do aumento do tráfego agravar outros problemas, além do aumento da carga em si. Em outras palavras, conforme se aumenta o tráfego, é preciso que a rede se adapte para uma nova situação, levando em conta determinados quesitos, como a autossimilaridade do tráfego.

Essa situação se assemelha ao que ocorre com a rede 2. Os parâmetros se apresentam piores para o caso com maior autossimilaridade e com gerenciamento. A interferência se acentua com a carga pesada de tráfego. Este caso também segue as propostas citadas anteriormente.

É visto que o desempenho é prejudicado, na maioria dos casos, por maiores níveis de autossimilaridade e pela presença de tráfego de gerenciamento.

O maior nível de complexidade da rede fez com que os valores de parâmetros de desempenho se tornasse ainda mais degradados. O grande número de usuários concorrendo pela rede em diversas células provocou um maior número de colisões resultando em desempenhos piores. Nessa topologia, é visto com clareza que há interferência do grau de autossimilaridade e da presença/ausência de tráfego de gerenciamento.

Pelos três casos estudados, conclui-se que a abordagem levantada pelas hipóteses propostas nesse trabalho são pertinentes. Por ter se confirmado, essas características podem ser usadas para trazer melhorias aos protocolos 802.11, como a implementação de protocolos adaptativos que observem tanto a distribuição estatística do tráfego quanto a carga na rede, e a partir desse ponto, utilizasse outras políticas de gerenciamento que diminuam o fluxo desses pacotes na rede.

Um aspecto interessante observado nas simulações é que, na maioria dos casos, a inclusão do tráfego de gerenciamento provoca um aumento no número de quadros enviados pelo meio aéreo, porém o número de bits diminui. Quadros de gerenciamento, em média, são menores que quadros de dados. No caso de redes sem fio, qualquer quadro que trafega pelo meio gera latências provocadas pelos intervalos de tempo de prevenção de colisão. Pode-se perceber então que, o tamanho dos quadros na rede interfere diretamente na vazão de dados, conforme ilustrado nas simulações. Ao se transportar esse resultado sobre o tamanho dos quadros de dados, abre-se a possibilidade de uma análise da interferência do tamanho médio dos quadros de dados sobre o desempenho da rede.

O cálculo do grau de autossimilaridade do tráfego da camada WLAN resultante mostrou que o tráfego agregado de diversas fontes possui altos valores de parâmetro de Hurst. Na maioria dos casos, os valores de H variam entre 0,7 e 1,0. Pode ser observado o H são mais altos para os casos em que o tráfego inserido tem $H = 0,9$. Mesmo para os casos de tráfego com $H = 0,5$ o tráfego resultante é autossimilar mostrando que, assim como em (WANG; YU; MAO, 2009), a agregação de tráfegos provocou um aumento da autossimilaridade.

Finalmente, os estudos deste trabalho permitem mais uma importante observação. Dado que existe um tráfego considerado desnecessário e não deve estar sempre presente na rede, estes estudos mostraram que há a necessidade de se avaliar a especificação do protocolo para limitar o volume do tráfego de gerenciamento ao efetivamente necessário. Na sua forma atual, o protocolo atua da mesma forma em qualquer situação, no entanto é preciso que sua resposta seja diferente para situações críticas da rede. Além da congestão causada pelo aumento de quadros na rede, a grande quantidade de quadros de gerenciamento agrava o efeito negativo inerente à autossimilaridade do tráfego. Portanto, o problema resultante é pior que ao se considerar os aspectos individualmente.

5.5 RESUMO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou os resultados experimentais deste trabalho. Foram levantadas duas hipóteses de parâmetros que pudessem interferir no desempenho de redes sem fio: o grau de autossimilaridade do tráfego e a presença de quadros de gerenciamento. Foi mostrado através de simulações de três topologias de rede que, conforme esperado, a retirada dos quadros de gerenciamento oferece ganhos significativos ao desempenho. Foi demonstrado também que o efeito negativo causado pelo alto grau de autossimilaridade se torna mais grave nas situações de congestionamento provocada pelo grande número de quadros de gerenciamento. Além disso, o tráfego agregado na rede apresenta alto valor de H , mesmo quando as fontes não são autossimilares.

O próximo capítulo apresenta as conclusões deste trabalho, sintetizando os principais resultados e propondo trabalhos futuros.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho estudou o problema do desempenho em redes sem fio IEEE 802.11 a partir da caracterização do tráfego e eficiência de protocolos da camada de enlace. Foi realizado um estudo bibliográfico sobre os temas de pesquisa mais atuais relacionados a este trabalho. Com isso, foram desenvolvidas análises detalhadas em séries de tráfego real e realizadas simulações de diversas topologias de rede para a verificação das seguintes hipóteses: 1) confirmação da influência da influência negativa da autossimilaridade sobre o desempenho e; 2) verificação do ganho obtido ao se remover o tráfego que pode ser caracterizado como desnecessário

O principal ponto de partida para a verificação das hipóteses deste trabalho foi o estudo taxonômico sobre o tráfego real. Esse estudo descreveu a composição do tráfego e suas características nas camadas de enlace, rede e transporte. Na camada de enlace, mostrou-se que grande parte dos quadros é transmitida a baixas taxas, provocando um maior tempo de ocupação do meio. Também, cada tipo de quadro (gerenciamento, dados e controle) corresponde a cerca de um terço da quantidade total de pacotes. Isso significa que quadros de gerenciamento e controle, específicos da camada de enlace, representam uma grande parte do número de quadros que trafegam na rede. Na camada de rede, observou-se que a maior parte do fluxo de quadros ocorre em *downstream*, ou seja, com sentido da rede externa para a rede interna. O protocolo mais utilizado na camada de rede é o TCP. Por meio da análise de portas, descobriu-se que o maior tráfego está associado a uma porta não definida oficialmente, mas que é comumente utilizada por aplicações *peer-to-peer*. Portas de tráfego SSH e HTTP também foram bastante utilizadas. A análise estatística do tráfego revelou que ele é autossimilar nas três camadas e sob diversas escalas de agregação, o que confirmou estudos que faziam referências a essas características (YU; PETROPULU, 2006; WANG; YU; MAO, 2009).

As simulações tiveram como objetivo a verificação de elementos de possível otimização nos protocolos. As hipóteses anteriormente apresentadas foram abordadas em três topologias distintas que têm como objetivo realizar comparações de diferentes cenários de uso da rede.

- A primeira topologia representa o caso em que existe apenas um dispositivo de acesso e vários usuários se conectam a ele.
- A segunda topologia está relacionada à situação em que há uma pequeno grupo de pontos de acesso, e com uma baixa densidade de usuários.
- A terceira topologia representa um maior nível de complexidade, onde há diversos pontos de acesso e um maior número de usuários.

Cada uma dessas redes foi simulada com dois volumes de tráfego (um leve e um pesado), num total de 24 simulações. Os parâmetros de desempenho monitorados foram, na camada de enlace, atraso e perda de quadros e na camada de aplicação, atraso e variação de atraso de pacotes de voz e tempo de resposta de páginas e objetos Web. Esses parâmetros foram escolhidos por abranger estatísticas relativas ao protocolo de acesso ao meio e aplicações de tempo real e melhor esforço. Esperava-se que os resultados dos três ambientes permitissem estabelecer pontos comuns entre os elementos avaliados.

Nas três redes simuladas, os resultados podem ser considerados próximos. Os cenários simulados sem tráfego de gerenciamento apresentam melhores resultados se comparados com os casos em que ele está presente. A variação do desempenho é bastante significativa, chegando a se detectar situações em que seria impraticável o suporte a algumas aplicações, principalmente as de tempo real. Por exemplo, em um caso observou-se que o atraso médio de quadros de voz variou de cerca de 0,5 segundo (sem gerenciamento) para 22,4 segundos (com gerenciamento). Também foi verificado que um alto grau de autossimilaridade é prejudicial para o desempenho de aplicações da rede. O efeito negativo é agravado nas situações de maior congestão da rede e quando há quadros de gerenciamento. Portanto, o problema se torna mais complexo, pois a combinação de altas cargas de tráfego juntamente com um grande número de quadros de gerenciamento provoca um forte efeito de autossimilaridade, o que resulta em um cenário caótico e de difícil tratabilidade e administração.

Um resultado interessante foi observado na comparação do volume total de tráfego das simulações com e sem quadros de gerenciamento. A inserção de quadros de gerenciamento causa um aumento considerável na quantidade de quadros que trafegam pela rede, porém o volume de bits total se reduz. Esse resultado foi causado pelo fato de que quadros de gerenciamento são pequenos se comparados com os de dados, mas geram *overhead* que diminuem a vazão da rede. Esse resultado demonstra que a queda do desempenho não é provocada pelo aumento do volume de tráfego, e sim pela forma como se dá a interação dos elementos na rede. Essa conclusão motiva futuros estudos de como aumentar a eficiência dos protocolos da camada de enlace.

Na atual forma do protocolo, a remoção completa do tráfego de gerenciamento não é possível para todas as situações, pois é parte importante para o funcionamento da rede. No entanto, os resultados obtidos neste trabalho podem levar ao desenvolvimento de outras alternativas para o favorecimento do desempenho das redes sem fio. Um dos possíveis caminhos é a possibilidade de se fazer modificações nos protocolos atuais para que eles reajam de forma adaptativa às situações que foram identificadas na rede e reduzir consideravelmente o volume de tráfego de gerenciamento. Outro caminho pode ser a proposta de outro protocolo que utilize uma metodologia diferente para a gestão da rede, e que pondere a quantidade de quadros de gerenciamento de acordo com a situação. Nos dois casos, há a necessidade que

se faça uma avaliação até que ponto essas alterações são viáveis para a operação normal da rede.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Um possível trabalho futuro é o desenvolvimento de um protótipo de protocolo adaptativo da camada de enlace. De acordo com situações de congestionamento e pouca mobilidade observada na rede, ao se aproximar de uma situação crítica e verificar certas condições, o protocolo estabeleceria a redução dos quadros de gerenciamento emitidos, dando mais oportunidade para a transmissão de quadros dos outros tipos.

Uma outra possibilidade de trabalho futuro é o estudo do modo PCF em redes sem fio e conseqüentemente a proposta de modificações no seu modo de operação para que se contorne os problemas apresentados neste trabalho. O modo DCF, utilizado nas simulações apresentadas, é parte integrante do ciclo de transmissão de dados em uma rede. Cabe então uma avaliação de como o protocolo de acesso ao meio deve atuar para que se otimize o tráfego de informação útil na rede.

Outro possível trabalho futuro é o aprofundamento nos estudos de um modelo de desempenho para redes sem fio com base nas propriedades de autossimilaridade do tráfego.

O tráfego de rede real analisado é proveniente de uma rede de grande porte, com grande intensidade de utilização, conforme descrita no capítulo 4. É interessante que se estenda esse estudo para redes com outras características, tais como redes com grande índice de mobilidade, redes com ampla região de cobertura (por exemplo, campus) e etc. Esse estudo é importante para a identificação de outras características não encontradas na rede estudada e, com o cruzamento de informações, avaliar as possibilidades de otimização das redes abrangendo um maior número de situações.

Referências Bibliográficas

- BARRETO, P. A. S. *Uma Metodologia De Engenharia De Tráfego Baseada Na Abordagem Auto-Similar Para A Caracterização De Parâmetros E A Otimização De Redes Multimídia*. Tese (Doutorado), dez. 2007.
- BERAN, J. *Statistics for long-memory processes*. [S.l.]: Chapman & Hall, 1994. Hardcover.
- BHATIA, G.; KUMAR, V. Adapting mac 802.11 for performance optimization of manet using cross layer interaction. *airccse.org*, v. 2, n. 4, p. 31–42, 2010. Disponível em: <<http://airccse.org/journal/jwmn/1110ijwmn03.pdf>>.
- BIANCHI, G.; OTHERS. Performance analysis of the IEEE 802. 11 distributed coordination function. *IEEE Journal on selected areas in communications*, Cíteseer, v. 18, n. 3, p. 535–547, 2000.
- CARVALHO, P. H. P. D. et al. Uma Ferramenta em Código Aberto para Análise de Desempenho em Redes Convergentes. *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, 2005.
- CLEGG, R. A practical guide to measuring the Hurst parameter. *Arxiv preprint math/0610756*, 2006. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/math.ST/0610756>>.
- DEUS, M. A. D. Estratégias de Gerenciamento de Banda IP/MPLS para o Transporte Eficiente de Serviços Integrados. *UnB*, 2007.
- GAST, M. *802.11 wireless networks: the definitive guide*. [S.l.]: O'Reilly Media, 2005.
- GE, X.; YANG, Y. Characteristics of Frame Traffic in 802.11 Wireless Networks. *2008 The 4th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, Ieee, p. 295–298, dez. 2008.
- GE, X. et al. Characteristics analysis and modeling of frame traffic in 802.11 wireless networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, John Wiley & Sons, v. 10, n. 4, p. 584–592, 2010. Disponível em: <<http://www3.interscience.wiley.com/journal/122600828/abstract>>.
- GOSPODINOV, M.; GOSPODINOVA, E. The graphical methods for estimating hurst parameter of self-similar network traffic. In: *Proceedings of the 2005 International Conference on Computer Systems and Technologies*. [s.n.], 2005. p. 1–6. Disponível em: <<http://ecet.ecs.ru.acad.bg/cst05/Docs/cp/SIII/IIIB.19.pdf>>.
- HALEPOVIC, E.; WILLIAMSON, C.; GHADERI, M. Wireless data traffic: a decade of change. *IEEE Network*, v. 23, n. 2, p. 20–26, mar. 2009. ISSN 0890-8044. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4804332>>.
- HSU, C.; HOU, T.; WU, C. A Transport Layer Mechanism for Fair TCP Throughput over 802 . 11 Multi-hop Wireless Mesh Networks. *Communications Society*, p. 5–10, 2010.
- JARDOSH, A. et al. *CRAWDAD data set ucsb/ietf2005* (v. 2005-10-19). out. 2005. Downloaded from <http://crawdad.cs.dartmouth.edu/ucsb/ietf2005>.

- JARDOSH, A. P. et al. IQU: Practical Queue-Based User Association Management for WLANs. *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking - MobiCom '06*, ACM Press, New York, New York, USA, p. 158, 2006. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1161089.1161108>>.
- JARDOSH, A. P. et al. Understanding congestion in IEEE 802.11b wireless networks. *Proceedings of the 5th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement - IMC '05*, ACM Press, New York, New York, USA, p. 14, 2005. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1330107.1330140>>.
- JARDOSH, A. P. et al. Understanding link-layer behavior in highly congested IEEE 802.11b wireless networks. *Proceeding of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Experimental approaches to wireless network design and analysis - E-WIND '05*, ACM Press, New York, New York, USA, p. 6, 2005. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1080148.1080151>>.
- KARPINSKI, S.; BELDING-ROYER, E. M.; ALMEROTH, K. C. Wireless traffic: The failure of CBR modeling. *2007 Fourth International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems (BROADNETS '07)*, Ieee, p. 660–669, 2007. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4550497>>.
- KETTANI, H.; GUBNER, J. A novel approach to the estimation of the Hurst parameter in self-similar traffic. *27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, 2002. Proceedings. LCN 2002.*, IEEE Comput. Soc, n. November, p. 160–165, 2002. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1181780>>.
- KOUCHERYAVY, Y. et al. Traffic and QoS Management in Wireless Multimedia Networks. 2009.
- KRAMER, G. *Generator of Self-Similar Network Traffic*. 2004. Página da Internet disponível em http://www.csif.cs.ucdavis.edu/~kramer/code/trf_gen1.html (acessado em 18 de janeiro de 2011).
- LELAND, W. et al. On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version). *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 2, n. 1, p. 1–15, 1994. ISSN 10636692. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=282603>>.
- LI, M. et al. Block-switched networks: A new paradigm for wireless transport. In: *Proceedings of the 6th USENIX symposium on Networked systems design and implementation*. USENIX Association, 2009. p. 423–436. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1558977.1559006>>.
- MAHANTI, A.; WILLIAMSON, C.; ARLITT, M. Remote analysis of a distributed WLAN using passive wireless-side measurement. *Performance Evaluation*, v. 64, n. 9-12, p. 909–932, out. 2007. ISSN 01665316. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0166531607000545>>.
- MAO, J. et al. An Adaptive MAC Scheme to Achieve Throughput Optimization and Airtime Fairness for IEEE 802.11 Multirate Networks. *2009 International Conference on*

Wireless Networks and Information Systems, Ieee, p. 97–101, dez. 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5381568>>.

MHATRE, V.; PAPAGIANNAKI, K. Using smart triggers for improved user performance in 802.11 wireless networks. *Proceedings of the 4th international conference on Mobile systems, applications and services - MobiSys 2006*, ACM Press, New York, New York, USA, 2006. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1134680.1134706>>.

MUNARETTO, A. et al. A link-state QoS routing protocol for ad hoc networks. *4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network*, Ieee, p. 222–226, 2002. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1045726>>.

OPNET. *Modeler, SP Guru, IT Guru Academic Edition*. 2010. Documentação disponível eletronicamente em www.opnet.com.

PAHLAVAN, K.; PROBERT, T.; CHASE, M. Trends in local wireless networks. *Communications Magazine, IEEE*, IEEE, v. 33, n. 3, p. 88–95, 2002. ISSN 0163-6804. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=364929>.

PAIVA, V.; FRAGA, T. Modelagem e caracterização de tráfego de redes com propriedades multifractais. *UnB*, 2007.

PATEL, G.; DENNETT, S. The 3GPP and 3GPP2 movements toward an all-IP mobile network. *IEEE Personal Communications*, v. 7, n. 4, p. 62–64, 2000. ISSN 1070-9916. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=863998>.

PAUL, S. et al. The cache-and-forward network architecture for efficient mobile content delivery services in the future internet. In: *Innovations in NGN: Future Network and Services, 2008. K-INGN 2008. First ITU-T Kaleidoscope Academic Conference*. IEEE, 2008. p. 367–374. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4542289>.

PAXSON, V. Fast, approximate synthesis of fractional Gaussian noise for generating self-similar network traffic. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, ACM, v. 27, n. 5, p. 5–18, out. 1997. ISSN 0146-4833. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=269790.269792>>.

PHIL, C. et al. Techniques for simulation of realistic infrastructure wireless network traffic. *2009 7th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks*, Ieee, p. 1–7, jun. 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5291645>>.

QUEIROZ, B. G.; CARNEIRO, B. N. Modelagem, Geração e Análise de Tráfegos em Redes Multiserviços. *UnB*, 2006.

RAGHAVENDRA, R. et al. Unwanted Link Layer Traffic in Large IEEE 802.11 Wireless Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 9, n. 9, p. 1212–1225, set. 2010. ISSN 1536-1233. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5467084>>.

- RECOMMENDATION, G. 06.10 GSM full rate speech transcoding. *ETSI/TC SMG*, 1992.
- SALES, L. M. et al. An Experimental Evaluation of DCCP Transport Protocol: A Focus on the Fairness and Hand-Off over 802.11g Networks. *2008 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, Ieee, p. 1149–1153, 2008. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4446556>>.
- SILVA, P. Estudo do Tráfego Auto-Similar em Redes Multiserviço. *UnB*, 2005.
- SIORPAES, S. et al. Mobile interaction with the internet of things. *Embedded Interaction Research Group*, Citeseer, 2004.
- STALLINGS, W. Wireless communications and networking. *New York*, 2002.
- TICKOO, O.; SIKDAR, B. On the impact of IEEE 802.11 MAC on traffic characteristics. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 21, n. 2, p. 189–203, fev. 2003. ISSN 0733-8716. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1177184>>.
- TICKOO, O.; SIKDAR, B. Modeling Queueing and Channel Access Delay in Unsaturated IEEE 802.11 Random Access MAC Based Wireless Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 16, n. 4, p. 878–891, ago. 2008. ISSN 1063-6692. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4457810>>.
- VIEIRA, P.; BARRETO, P. A. S.; BORDIM, J. L. Estimativa de Vazão em Redes WiFi para Suporte a Aplicações HTTP. *SBRT*, v. 32, n. 6, dez. 2009.
- VIJAYASANKAR, K.; TAUFIQUE, A. An Analytical Model with Improved Accuracy of IEEE 802.11 Protocol Under Unsaturated Conditions. *University of Texas*, n. June, 2010. Disponível em: <<http://opnear.utdallas.edu/publications/reports/UTD-EE-06-2010.pdf>>.
- WANG, T.; YU, Q.; MAO, Y. Fractal characteristics analysis of wireless network traffic based on Hurst parameter. *2009 International Conference on Communications, Circuits and Systems*, Ieee, n. m, p. 173–176, jul. 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5250546>>.
- WEN, L. et al. Performance analysis of IEEE 802.11a in non-saturation conditions. *2009 IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content*, Ieee, p. 837–841, nov. 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5360816>>.
- XIANG, L. et al. A Self-Similarity Frame Traffic Model Based on the Frame Components in 802.11 Networks. *2009 International Conference on Computational Science and Engineering*, Ieee, n. 60872007, p. 955–960, ago. 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5283379>>.
- YACOUB, M. D. *Foundations of Mobile Radio Engineering*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 1993. ISBN 0849386772.

- YAMKHIN, D.; WON, Y. Modeling and Analysis of Wireless LAN Traffic. *Journal of Information Science and Engineering*, Institute of Information Science and Academia Sinica, Taipei, 115, Taiwan,, v. 25, n. 6, p. 1783–1801, 2009. ISSN 1016-2364.
- YANG, Y.; FU, Y. An adaptive IEEE 802.11 MAC based on moving average of effective backoff (MAEB). *2009 15th Asia-Pacific Conference on Communications*, Ieee, n. Apcc, p. 59–63, out. 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5375689>>.
- YEH, C.-h.; YOU, T. A QoS MAC protocol for differentiated service in mobile ad hoc networks. *2003 International Conference on Parallel Processing, 2003. Proceedings.*, Ieee, p. 349–356, 2003. Disponível em: <<http://www.computer.org/portal/web/csdl/doi/10.1109/ICPP.2003.1240598>>.
- YEO, J.; YOUSSEF, M.; AGRAWALA, A. A framework for wireless LAN monitoring and its applications. *the 3rd ACM workshop on Wireless*, ACM Press, New York, New York, USA, p. 70, 2004. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1023660>>.
- YU, J.; PETROPULU a.P. Study of the Effect of the Wireless Gateway on Incoming Self-Similar Traffic. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 54, n. 10, p. 3741–3758, out. 2006. ISSN 1053-587X. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1703844>>.