Fabio Cocchi da Silva Eiras

BENEFÍCIOS DO PADRÃO IEEE 802.11e PARA TRÁFEGO DE TEMPO REAL EM REDES WLAN NÃO ESTRUTURADAS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

São Paulo

2009

Fabio Cocchi da Silva Eiras

BENEFÍCIOS DO PADRÃO IEEE 802.11e PARA TRÁFEGO DE TEMPO REAL EM REDES WLAN NÃO ESTRUTURADAS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Sistemas Eletrônicos

Orientador:
Prof. Dr. Wagner Luiz Zucchi

São Paulo

2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Eiras, Fabio Cocchi da Silva
Benefícios do padrão IEEE 802.11e para tráfego de tempo real em redes WLAN não estruturadas / F.C.S. Eiras. -- São Paulo, 2009.
99 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1. Wireless 2. Rede de comunicação 3. Análise de desempenho 4. Sistemas de tempo-real I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II. t.

Dedico este trabalho à minha esposa e ao meu filho:
Beatriz e Rafael de Castro Lima Eiras

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Orientador deste trabalho, o Prof. Dr. Wagner Luiz Zucchi, pela clareza, objetividade e generosidade dedicada ao encaminhamento de todas as opções e dúvidas surgidas ao longo da pesquisa.

À minha irmã Fernanda Eiras Geraque pelo apoio, paciência e elaboração da maioria das figuras contidas neste trabalho.

Aos meus pais por sempre me apoiarem e me incentivarem a continuar com este trabalho.

Finalmente, fica a minha gratidão especial à minha querida Beatriz que dedicou valioso tempo, muito amor e paciência na colaboração permanente à realização deste trabalho.

“A vida sem ciência é uma espécie de morte”.
(Sócrates, 470-399 a.C.)

RESUMO

A utilização das redes sem fio nos mais diversos segmentos vem crescendo vertiginosamente nos últimos anos.

Aliado ao crescimento da utilização das redes, está a diversificação de aplicações utilizadas por todos os usuários, sejam eles corporativos ou domésticos. Isto tem contribuído significativamente para o desenvolvimento de tecnologias que ofereçam mecanismos de qualidade de serviço, de forma a permitir o uso satisfatório de aplicações como voz e vídeo em tempo real.

Este trabalho estuda os efeitos que a existência de tráfego de voz e dados em redes sem fio padrão IEEE 802.11 causa no desempenho da rede e por consequência no desempenho das aplicações.

Para realizar este estudo foram executadas simulações baseadas em uma rede sem fio com topologia *ad hoc*, com variações no número de estações e quantidade de tráfego gerado.

Foram simulados os padrões 802.11g e 802.11e com o objetivo de analisar o desempenho dos mecanismos de qualidade de serviço e os benefícios que estes mecanismos geram para a transmissão de tráfego em tempo real em redes sem fio padrão IEEE 802.11.

Verificou-se que o padrão IEEE 802.11e apresenta um ganho de desempenho para aplicações de tempo real, porém ele apresenta limitações que devem ser consideradas nos projetos de redes sem fio.

Palavras-chave: Desempenho de Redes de Computadores. Redes Wireless. Qualidade de Serviço. Voz sobre IP. Simulação.

ABSTRACT

The use of wirelles networks in most various sectors has been growing drastically in past years

Allied to the wireless networks use, the diversification of applications and services provided can be directly verified whether by home or corporate users. This alliance contributes significantly to the needs of technology development which offer the quality of service mechanisms, allowing satisfactory use of real-time applications like voice and video

This paper studies the effects that coexistent voice and data traffic on a IEEE 802.11 standard wireless network cause in the network performance and, consequently, in the applications performance.

To make this study a reality, it was necessary to run simulations of a wireless ad hoc topology network, with variations in the number of workstations and the quantity of generated traffic.

The 802.11g and 802.11e standards were used in the simulations with the purpose of analyzing the performance of quality of service mechanisms and the benefits they create for the real-time transmissions in IEEE 802.11 standard wireless networks.

It was verified that the IEEE 802.11e standard presents a perfomance gain for the real-time applications, but it has limitations that should be considered in wireless networks design.

Keywords: Computer Networks Performance. Wireless Network. Quality of Service. Voice over IP. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Topologia Típica Rede Local Sem Fio – Infraestruturada 26
Figura 2.2 – Topologia Típica Rede Local Sem Fio – *ad hoc* 27
Figura 2.3 – Fluxograma Algoritmo CSMA 29
Figura 2.4 – Transmissão DCF 34
Figura 2.5 – Quadro RTS 35
Figura 2.6 – Quadro CTS 36
Figura 2.7 – Transmissão com RTS e CTS – Fonte: (21) 37
Figura 2.8 – Diagrama de Transmissão – PCF – Fonte: (16) 39
Figura 2.9 – Arquitetura MAC – Fonte: (8) 41
Figura 2.10 – Comparação do Quadro MAC 42
Figura 2.11 – Relação AIFS e Demais Intervalos – Fonte: (8) 44
Figura 2.12 – Filas por Categoria de Acesso 47
Figura 3.1 – Cabeçalho do Protocolo RTP – Fonte: (24) 50
Figura 3.2 – Pacote RTCP – Fonte: (24) 51
Figura 3.3 – Cabeçalho do Protocolo RSVP – Fonte: (26) 52
Figura 3.4 – Ocorrência de *Jitter* na Transmissão – Fonte (25) 56
Figura 4.1 – Arquivo TCL Exemplo de Simulação no NS-2 63
Figura 4.2 – Aplicativo NAM 63
Figura 4.3 – Estrutura do Arquivo Trace 64
Figura 4.4 – Aplicativo Trace graph 66
Figura 4.5 – Variação de Deslocamento da Estação 3 73

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 – Taxa de Perda de Pacotes VoIP – Tráfego VoIP 75
Gráfico 5.2 – Atraso dos Pacotes VoIP – Tráfego VoIP 75
Gráfico 5.3 – Atraso dos Pacotes VoIP – Ambiente 8 Estações e Concorrência de Tráfego 76
Gráfico 5.4 – Taxa de Perda dos Pacotes VoIP – Ambiente 8 Estações e Concorrência de Tráfego 77
Gráfico 5.5 – Atraso dos Pacotes de Dados – Ambiente 8 Estações e Concorrência de Tráfego 77
Gráfico 5.6 – Taxa de Perda dos Pacotes de Dados – Ambiente 8 Estações e Concorrência de Tráfego 78
Gráfico 5.7 – Atraso dos Pacotes VoIP – Ambiente 30 Estações e Concorrência de Tráfego 79
Gráfico 5.8 – Taxa de Perda dos Pacotes VoIP – Ambiente 30 Estações e Concorrência de Tráfego 80
Gráfico 5.9 – Atraso dos Pacotes de Dados – Ambiente 30 Estações e Concorrência de Tráfego 81
Gráfico 5.10 – Taxa de Perda dos Pacotes de Dados – Ambiente 30 Estações e Concorrência de Tráfego 81
Gráfico 5.11 – Atraso dos Pacotes VoIP – Estação 3 Móvel – Cenário 30 Estações 82
Gráfico 5.12 – Taxa de Perda dos Pacotes VoIP – Estação 3 Móvel – Cenário 30 Estações 83
Gráfico 5.13 – Atraso dos Pacotes de Dados – Estação 3 Móvel – Cenário 30 Estações 84
Gráfico 5.14 – Taxa de Perda dos Pacotes de Dados – Estação 3 Móvel – Cenário 30 Estações 84
Gráfico 5.15 – Relação dos Pacotes VoIP Enviados e Gerados – Cenário 30 Estações 85
Gráfico 5.16 – Relação dos Pacotes de Dados Enviados e Gerados – Cenário 30 Estações 85
Gráfico 5.17 – Atraso dos Pacotes VoIP – Estação 3 Móvel – Cenário 4 Estações .. 86

Gráfico 5.18 – Taxa de Perda dos Pacotes VoIP – Estação 3 Móvel – Cenário 4 Estações 86
Gráfico 5.19 – Atraso dos Pacotes de Dados – Estação 3 Móvel – Cenário 4 Estações 87
Gráfico 5.20 – Taxa de Perda dos Pacotes de Dados – Estação 3 Móvel – Cenário 4 Estações 87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores Característicos do Padrão IEEE 802.11 33
Tabela 2.2 – Valores para o Padrão 802.11e 44
Tabela 2.3 – Mapeamento UP – Categoria de Acesso 46
Tabela 3.1 – Notas MOS para Codecs 53
Tabela 3.2 – Largura de Banda Consumida x Codec 58
Tabela 4.1 – Tabela de Roteamento DSDV 68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIFS	*Arbitration Interframe Space*
ANSI	*American National Standards Institute*
AODV	*Ad Hoc On-Demand Distance Vector*
AP	*Access Point* (Ponto de Acesso)
BSS	*Basic Service Set*
CAP	*Controlled Access Periods*
CBR	*Constant Bit Rate*
CFP	*Contention Free Period* (Período Livre de Contenção)
CNAME	*Canonical Name*
CP	*Contention Period* (Período de Contenção)
CTS	*Clear to Send*
CSMA	*Carrier Sense Multiple Access*
CSMA/CA	*Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance*
CSMA/CD	*Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection*
CSRC	*Contributing Source*
DCF	*Distributed Coordination Function*
DIFS	*Distributed Coordination Function Interframe Space*
DLSR	*Delay last Since Sender Report*
DSDV	*Destination Sequenced Distance Vector*
DSR	*Dynamic Source Routing*
DSSS	*Direct Sequence Spread Spectrum*
EDCA	*Enhanced Distributed Channel Access*
EIFS	*Extended Interframe Space*
ESS	*Extended Service Set*
FCS	*Frame Check Sequence*
FIFO	*First-in First-out*
FTP	*File Transfer Protocol*
HC	*Hybrid Coordinator*
HCCA	*Hybrid Coordination Function Controlled Channel Access*
HCF	*Hybrid Coordination Function*
IBSS	*Independent Basic Service Set*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronic Engineers*
IETF	*Internet Egineering Task Force*

IFS	*Interframe Space*
iLBC	*Internet Low Bitrate Codec*
IP	*Internet Protocol*
ISO	*International Organization for Standardization*
ITU	*International Telecommunication Union*
ITU-T	*ITU Telecommunication Standardization Sector*
LSR	*Last Sender Report*
MAC	*Medium Access*
MPDU	*MAC Data Protocol Unit*
MSDU	*MAC Service Data Unit*
NAV	*Network Allocation Vector*
NTP	*Network Time Protocol*
NS	*Network Simulator* (Simulador de Redes)
OFDM	*Orthogonal Frequence Division Multiplexing*
PC	*Point Coordinator* (Ponto Coordenador)
PCF	*Point Coordination Function*
PIFS	*Point Coordination Function Interframe Space*
QAP	*Quality Access Point*
QBSS	*Quality Basic Service Set*
QIBSS	*Quality Independent Basic Service Set*
QoS	Qualidade de Serviço
QSTA	*Quality Stations*
RA	*Receiver Address*
RF	Radio-frequência
RFC	*Request for Comments*
RSVP	*Resource Reservation Protocol*
RTCP	*RTP Control Protocol*
RTS	*Request to Send*
RTP	*Real Time Protocol*
SI	*Selected Service Interval*
SIFS	*Short Interframe Space*
SSRC	*Synchronization Source*
TA	*Transmitter Address*
TCL	*Tool Command Language*
TCP	*Transport Control Protocol*

TS	*Traffic Stream*
TXOP	*Transmission Opportunities* (Oportunidade de Transmissão)
UDP	*User Datagram Protocol*
UP	*User Priority* (Prioridade de Usuário)
VoIP	*Voice over IP* (Voz sobre IP)
WLAN	*Wireless Local Area Network*

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS **5**

RESUMO **7**

ABSTRACT **8**

LISTA DE ILUSTRAÇÕES **9**

LISTA DE GRÁFICOS **10**

LISTA DE TABELAS **12**

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS **13**

SUMÁRIO **16**

1 Introdução **18**

1.1 Objetivo 20

1.2 Motivação 20

1.3 Trabalhos Relacionados 22

1.4 Organização do Trabalho 23

2 Redes Sem Fio – Padrão IEEE 802.11 ..... **24**

2.1 Topologia Física 25

2.2 Funções de Coordenação para Acesso ao Meio 27

2.2.1 Algoritmo CSMA/CA 28

2.2.2 Função de Coordenação Distribuída - DCF 30

2.2.3 Transmissão em Ambiente DCF 31

2.2.4 DCF com RTS/CTS 34

2.2.5 Função de Coordenação - PCF 38

2.3 Padrão IEEE 802.11e 40

2.3.1 Hybrid Coordination Function - HCF 42

2.3.2 HCF Controlled Channel Access 44

2.3.3 HCF Contention-Based Channel Access - EDCA 45

3 Requisitos para Voz sobre IP **48**

3.1 Protocolo de Transporte 48

3.1.1 Real Time Protocol – RTP 49

3.1.2 RTP Control Protocol - RTCP....50
3.2 Resource Reservation Protocol - RSVP....52
3.3 Qualidade de Serviço....53
3.3.1 Atraso....54
3.3.2 Jitter....55
3.3.3 Eco....56
3.3.4 Perda de Pacotes....57
3.3.5 Largura de Banda....57
4 Análise Experimental....59
4.1 Simulador de rede NS-2....59
4.1.1 Arquivos de Entrada....60
4.1.2 Arquivo de Visualização....63
4.1.3 Arquivos de Saída....64
4.1.3.1 Aplicativo Trace Graph....65
4.2 Protocolo de Roteamento - DSDV....66
4.3 Cenários de Simulação....69
4.3.1 Cenários com Estações Fixas....71
4.3.2 Cenários com Estação Móvel....72
5 Resultados....74
5.1 Resultados dos Cenários com Estações Fixas....74
5.2 Resultados dos Cenários com Estação 3 Móvel....82
6 Conclusões....88
6.1 Contribuições....89
6.2 Trabalhos Futuros....90
Referências....91
APÊNDICE A....95

1 Introdução

É praticamente inimaginável que as pessoas não utilizem em um dia de trabalho serviços como correio eletrônico, compartilhamento de arquivos, serviços de impressão, telefonia entre outros.

Em ambientes comerciais e industriais a atual necessidade é a convergência destes serviços, que possuem características e necessidades diferentes, através de uma estrutura única com o objetivo de redução de custos e aumento de produtividade. Desta forma, as características das redes de computadores adquirem fundamental importância neste processo.

Juntamente com a necessidade da convergência, está a mobilidade exigida pelos usuários que, aliada à importância de se prover uma infraestrutura de rede de computadores com grande dinamismo proporciona o ambiente ideal para a utilização das redes locais sem fio nas empresas.

Por outro lado, a redução dos custos das tecnologias de acesso à Internet proporcionou às pessoas conexões com taxas elevadas dentro de suas residências. Isto fez emergir um novo mercado: as redes locais residenciais. Neste caso as redes sem fio também ganham destaque, pois permitem a existência de redes locais de computadores sem a necessidade de infraestrutura física, além de permitir a mobilidade.

O mercado de redes locais sem fio tem crescido vertiginosamente nos últimos anos alavancado principalmente pela queda nos preços dos equipamentos eletrônicos. A *Wi-Fi Alliance*, organização formada pelos principais fabricantes de equipamentos compatíveis com o padrão IEEE 802.11, alcançou no ano de 2008 a marca de 5000 produtos certificados (1), evidenciando o interesse de fabricantes e a alta aceitação destes produtos pelos consumidores.

De acordo com a *Wi-Fi Alliance,* 99% das universidades americanas terão redes locais sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11 até o ano de 2013 (2). Isto mostra que as redes locais sem fio são uma realidade para a implementação de redes de campus.

Porém os serviços exigidos pelos usuários deixaram de ser simplesmente troca de arquivos ou correio eletrônico e passaram a incorporar serviços como transmissão de vídeo em tempo real ou não e serviços de voz. Esta mudança no modo como os usuários utilizam os computadores e a infraestrutura de rede exige implementação de melhorias nos atuais padrões de transmissão.

Para atender a esta nova demanda, juntamente com a convergência é de fundamental importância a implementação de mecanismos que estabeleçam tratamentos diferenciados para cada tipo de serviço, isto é implementação de mecanismos de Qualidade de Serviço (QoS), em qualquer rede de computadores, em particular nas redes sem fio.

A crescente utilização de aplicativos que exigem requisitos mínimos para funcionarem adequadamente são uma realidade e não mais uma projeção de uso. Como exemplo destes aplicativos pode ser citado o SKYPE (3), que é um software que permite o tráfego de voz em redes IP (VoIP), porém para que serviços deste tipo funcionem adequadamente, são necessários requisitos relacionados ao atraso de transferência, largura de banda e taxa de perda de pacotes que devem ser atendidos.

As redes locais sem fio padrão IEEE 802.11 a, b e g implementam os métodos *Distributed Coordination Function* (DCF) e *Point Coordination Function* (PCF) como funções de coordenação para acesso ao meio. Em ambas as funções de coordenação de acesso ao meio não existe nenhuma preocupação com a classificação dos dados a serem transmitidos ou de estabelecimento de prioridades de transmissão, ou seja, não existe a implementação de mecanismos de QoS. Segundo MEDEPALLI (4), mesmo não implementando nenhuma política de QoS o PCF provê um melhor desempenho na transmissão de tráfegos isócronos porém esta melhora é muito pequena quando comparada ao desempenho do DCF. Além disto, o PCF foi definido como opcional no padrão IEEE 802.11, e raramente os fabricantes o implementam.

Uma vez que o método DCF não oferece mecanismos de QoS ou mecanismos de priorização para transmissão de tráfegos em tempo real, alguns estudos vêm sendo desenvolvidos por MEDEPALLI (4), KIM (5), KAWARA (6) e LI (7) para se medir o desempenho destas redes quando ocorre a coexistência de tráfegos com características diferentes como dados, voz e vídeo. Tais estudos levaram ao

surgimento de diversas técnicas para implementação de QoS em ambientes IEEE 802.11.

Dentro deste contexto, com o propósito de padronizar os mecanismos de QoS, o IEEE publicou em 2005 o padrão 802.11e (8) que tem como objetivo definir procedimentos de acesso ao meio para suportar aplicações com requisitos mínimos de qualidade de serviço como voz, vídeo e áudio.

1.1 Objetivo

O objetivo desta pesquisa é apresentar uma análise comparativa do desempenho das redes de computadores sem fio *ad hoc* padrão IEEE 802.11 e 802.11e quando utilizadas para transmissão de tráfegos de voz sobre IP, que exige qualidade de serviço, em conjunto com tráfego de dados do tipo *best effort.*

Para isto é utilizada simulação, através de diferentes cenários, em que é implementada uma rede sem fio padrão IEEE 802.11 utilizando o *Distributed Coordination Function* (DCF) como função de coordenação para acesso ao meio e uma rede sem fio padrão IEEE 802.11e utilizando o *Enhanced Distributed Channel Access* (EDCA) como função de coordenação para acesso ao meio. O EDCA implementa políticas de priorização do tráfego que será transmitido através de sua classificação. Esta classificação é realizada em quatro categorias de acesso distintas que proporcionam a implementação de QoS.

1.2 Motivação

A motivação principal para realização deste trabalho decorre da expectativa de que os objetivos mencionados anteriormente pudessem ser úteis para os projetistas, nos

segmentos comerciais, industriais e residenciais, que necessitam avaliar o comportamento da infraestrutura de rede a ser instalada e para terem certeza de que a mesma será capaz de atender às necessidades dos usuários.

A motivação inicial para execução desta pesquisa resultou de uma necessidade técnica verificada em projetos de infraestrutura de redes sem fio que tinha como objetivo permitir a transmissão de informações em tempo real em conjunto com dados do tipo *best effort* para sistemas de missão crítica em ambiente militar. Tais sistemas possuem requisitos de transmissão para o tráfego em tempo real, similares aos requisitos de transmissão de voz sobre redes IP, ou seja, baixa taxa de perda e baixo atraso de transferência.

Adicionalmente colaborou para a motivação desta pesquisa o fato de diversos estudos realizados por MALONE (9), DAVCEVSKI (10), LAN (11), KYUNG (12) e PAVÓN (13) com o padrão IEEE 802.11e, terem como objetivos principais a análise de desempenho das redes sem fio infraestruturadas e a integração destas redes com redes cabeadas.

Desse cenário, surgiu o interesse em colaborar com o processo de projetos de redes sem fio *ad hoc*, a fim de evitar que o foco do projeto fique restrito aos requisitos de mobilidade, acessibilidade e segurança e passem a considerar, em mesmo grau, os requisitos de qualidade de serviço.

Assim, o trabalho de pesquisa realizado pretende gerar benefícios diretos para as empresas e profissionais, que de alguma forma estejam relacionados com atividades de especificação, projeto ou implantação de redes de computadores sem fio. De forma indireta, os conceitos apresentados neste trabalho podem colaborar para a utilização das redes sem fio padrão IEEE 802.11 em sistemas críticos militares, desde que sejam consideradas as suas limitações.

1.3 Trabalhos Relacionados

O padrão IEEE 802.11 tem sido amplamente estudado e as suas deficiências em relação à implementação de mecanismos de QoS é uma das principais motivações para a realização destes estudos.

As deficiências de QoS do padrão IEEE 802.11 surgem quando tráfegos com diferentes requisitos, como banda e atraso, são transmitidos simultaneamente. A deficiência do padrão IEEE 802.11 é identificada em LIANG (14) quando utilizado para transmissão de vídeo. Neste estudo foi demonstrada a diferença de qualidade obtida quando é transmitido vídeo e tráfego de dados de forma simultânea. Para isto Liang realizou a comparação entre um ambiente de rede local sem fio IEEE 802.11 utilizando o DCF como função de coordenação de acesso ao meio e um ambiente de rede local sem fio IEEE 802.11e utilizando o EDCA como função de coordenação para acesso ao meio, tendo como principal parâmetro de comparação de qualidade a percepção do usuário. Para isto foi utilizado um vídeo como dado de entrada no simulador NS-2. Desta forma foi obtido como dado de saída a imagem transmitida, ficando clara a diferença de qualidade quando utilizado o ambiente IEEE 802.11e.

No estudo realizado por KIM (5) o objetivo da análise é a transmissão de tráfego de voz e tráfego de dados de forma simultânea. Para isto é proposto um novo método de transmissão de voz sobre IP em redes locais sem fio padrão IEEE 802.11 DCF, chamado de vDCF, como alternativa ao não-provisionamento de qualidade de serviço pelo padrão IEEE 802.11, permitindo assim a coexistência de tráfego de voz e tráfego de dados no mesmo ambiente.

No estudo realizado por GURIJALA (15) a proposta é uma classificação detalhada das métricas de qualidade de serviço para aplicações denominadas, aplicações de nova geração em redes sem fio, que são basicamente a transmissão de vídeo em tempo real ou não e a transmissão de voz. Estas aplicações foram divididas em classes e para cada classe foram identificadas métricas de qualidade de serviço. Apesar desta análise ter sido realizada para redes 3G/4G a proposta de definição de métricas e monitoramento da qualidade de serviço pode ser utilizada em qualquer ambiente de redes sem fio, inclusive em redes sem fio padrão IEEE 802.11.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado com a seguinte estrutura:

O Capítulo 1 apresenta uma introdução geral, contendo o objetivo e a motivação da pesquisa na área de redes de computadores sem fio, padrão IEEE 802.11.

O Capítulo 2 apresenta uma visão geral sobre as redes locais sem fio, padrão 802.11, identificando o problema de qualidade de serviço. Posteriormente é apresentado o padrão 802.11e que tem como objetivo resolver o problema da falta de qualidade de serviço nas transmissões de dados em redes locais sem fio.

O Capítulo 3 apresenta uma introdução geral sobre Voz em redes IP (VoIP) descrevendo os principais fatores que influenciam na qualidade da transmissão de voz em redes IP e os protocolos de transporte envolvidos.

O Capítulo 4 apresenta as ferramentas utilizadas para a realização das simulações propostas neste trabalho e a descrição dos cenários construídos para a avaliação de desempenho das redes 802.11 e 802.11e

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nas simulações realizadas. São apresentados os gráficos que demonstram o desempenho das redes simuladas neste trabalho.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e sugestões de trabalhos com objetivo de analisar o comportamento dos mecanismos de qualidade de serviço do padrão IEEE 802.11e.

O Apêndice A contém a descrição de como compilar o simulador NS-2 versão 2.31 com a classe 802.11e, utilizada neste trabalho.

2 Redes Sem Fio – Padrão IEEE 802.11

O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) publicou em 1997 o padrão 802.11 e em 1999 este padrão foi atualizado passando a ser aceito também pelo *American National Standards Institute* (ANSI) e pela *International Organization for Standardization* (ISO). Este padrão define as funções e os serviços requeridos pelos dispositivos que operam de acordo com o IEEE 802.11. Entre estas funções e serviços destacam-se os aspectos referentes ao acesso ao meio, à mobilidade das estações, ao processo de *handoff*, à camada física e à privacidade e segurança nas transmissões dos dispositivos de rede local sem fio.

Originalmente, o padrão IEEE 802.11 (16) estabeleceu transmissões a taxas de 1 Mbps a 2 Mbps. Posteriormente, este padrão foi revisado e no mesmo ano de 1999 o IEEE publicou o padrão 802.11a (17) e o padrão 802.11b (18).

O padrão 802.11a permite transmissão de dados em taxas de até 54 Mbps com uma frequência de transmissão de 5Ghz. Este padrão utiliza a codificação *Orthogonal Frequence Division Multiplexing* (OFDM) com 12 canais não sobrepostos.

O padrão 802.11b opera em frequência de 2.4 GHz e suporta taxas de transmissão de até 11Mbps. Este padrão utiliza codificação *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) em 3 canais não sobrepostos.

O padrão 802.11 sofreu mais uma revisão e no ano de 2003 o IEEE publicou o padrão 802.11g (19). Este padrão também opera em freqüência de 2.4 GHz e suporta taxas de transmissão de dados de até 54Mbps, utilizando codificação OFDM e DSSS. O padrão 802.11g é compatível com o padrão 802.11b, desta forma é possível estabelecer comunicação entre dispositivos que operem de acordo com estes dois padrões.

Outros padrões que implementam melhorias em outras funções e serviços no padrão 802.11 original também foram publicados, entre eles pode ser citado o padrão 802.11i (20) que implementa mecanismos de segurança adicionais e o padrão 802.11e (8) que define melhorias nas funções de coordenação de acesso ao meio, de forma a obter melhor qualidade de serviço.

2.1 Topologia Física

As redes locais sem fio oferecem maior mobilidade e flexibilidade se comparadas às redes tradicionais cabeadas. Os usuários que desejam conectar-se através deste tipo de rede utilizam placas de rede sem fio, que contém um radio transmissor/receptor. Estes clientes podem conectar-se uns aos outros diretamente ou através de *Access Point* (AP). Quando os clientes utilizam o *Access Point* para estabelecer comunicação, a rede sem fio é denominada rede infraestruturada, caso contrário, a rede sem fio é denominada *ad hoc*.

Os *Access Points* conectam-se com as redes cabeadas através de uma porta *ethernet* e com os dispositivos sem fio através de radio-frequência (RF). Os *Access Points* possuem uma área de cobertura denominada célula de cobertura ou *Basic Service Set* (BSS), que varia de acordo com a especificação de cada fabricante, podendo atingir algo em torno de 300 metros. Dentro desta área de cobertura os usuários possuem total mobilidade, sem perda de conexão e devem ter acesso a todos os serviços disponibilizados pela rede.

Com o objetivo de ampliar a área de cobertura, pode ser utilizado mais do que um *Access Point* e o conjunto de todas estas células de cobertura é denominado *Extended Service Set* (ESS). Neste caso, quando um usuário transita de uma área de cobertura para outra é executado um processo denominado *Roaming*, e todos os recursos permanecem disponíveis para o usuário.

A Figura 2.1 ilustra a topologia típica de uma rede sem fio padrão 802.11 infraestruturada.

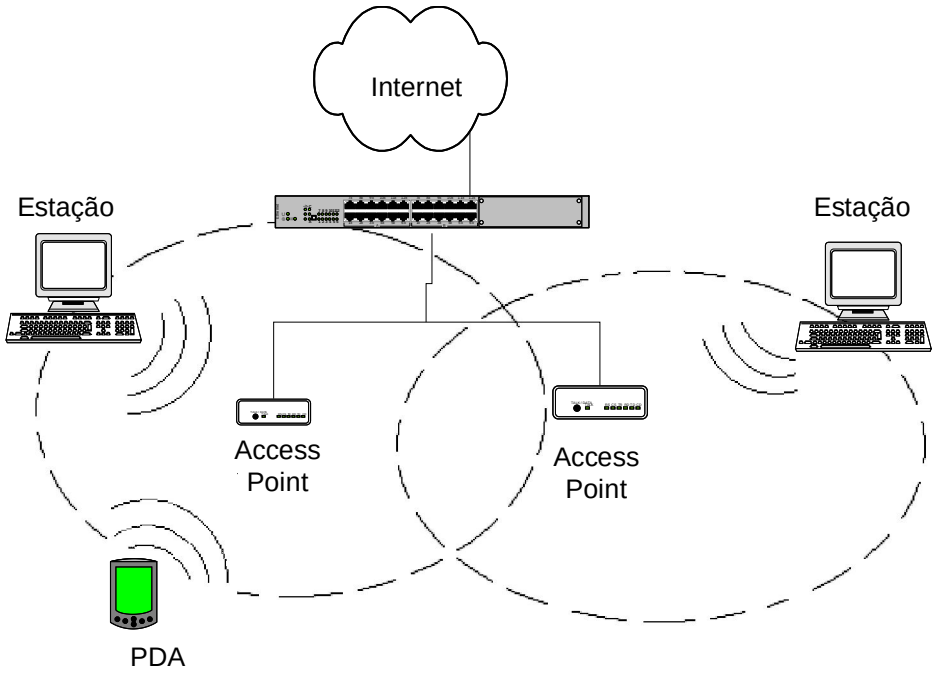

Figura 2.1 – Topologia Típica Rede Local Sem Fio – Infraestruturada

As redes locais sem fio do tipo *ad hoc* são frequentemente utilizadas entre comunicações do tipo *notebook* e *handheld*, telefone celular com *bluetooth* e por grupos de estações que desejam compartilhar recursos, funcionando logicamente de modo similar a uma rede ponto-a-ponto cabeada. Para redes *ad hoc* é definido o termo *Independent Basic Service Set* (IBSS), pois não dependem de um ponto central de acesso aos recursos da rede.

O termo *ad hoc* é empregado porque uma rede deste tipo não possui topologia definida, devendo ser reconstruída dinamicamente à medida que um novo dispositivo “entra” ou “sai” da rede.

A utilização deste método de conexão entre dispositivos implica no conceito de mestre e escravo, para que exista um certo nível de controle durante o processo de troca de informações entre os dispositivos conectados.

A Figura 2.2 ilustra a topologia típica de uma rede sem fio padrão 802.11 *ad hoc.*

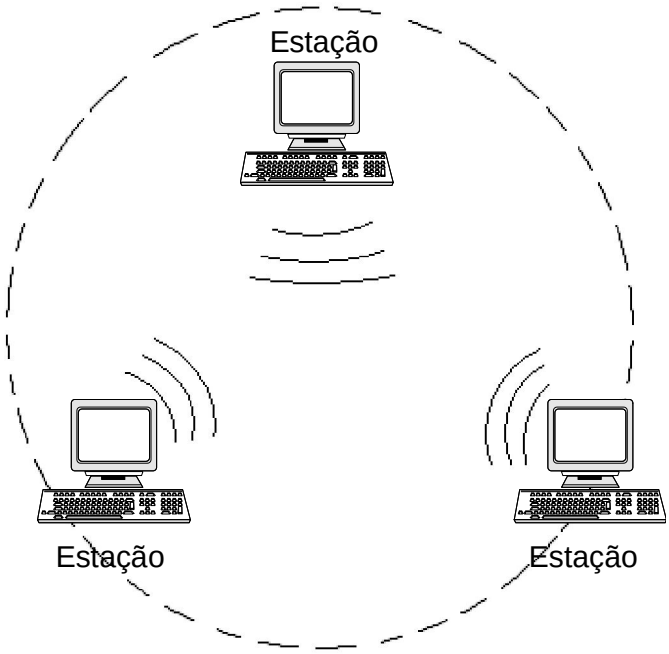

Figura 2.2 – Topologia Típica Rede Local Sem Fio – *ad hoc*

A área de cobertura das redes locais sem fio depende de muitos fatores, tais como banda requerida, capacidade, interferências, características físicas do ambiente, potência e antenas empregadas nas transmissões. Porém, devido ao alcance médio proporcionado pela maioria dos equipamentos disponíveis, a tecnologia de redes locais sem fio tem se tornado muito utilizada em soluções de campus.

2.2 Funções de Coordenação para Acesso ao Meio

O padrão 802.11 publicado pelo IEEE no ano de 1999 define duas funções de coordenação para acesso ao meio, são elas:

- *Distributed Coordination Function* (DCF);

- *Point Coordination Function* (PCF).

A função DCF é obrigatória e deve ser implementada em todos os dispositivos de rede que operam de acordo com o padrão 802.11, independentemente da topologia física da rede ser *ad hoc* ou infraestruturada.

A função PCF é definida como opcional no padrão 802.11 e deve existir somente para a rede infraestruturada, devendo ser implementada no *Access Point* do *Basic Service Set*, para que este tenha a capacidade de definir qual a estação de rede pertencente ao BSS tem o direito de acesso ao meio e consequentemente o direito de iniciar a transmissão dos dados.

Embora as funções de coordenação para acesso ao meio tenham o mesmo objetivo, que é permitir que uma estação obtenha o acesso ao meio para iniciar uma transmissão, é também permitida a coexistência das funções DCF e PCF em um mesmo BSS, porém elas irão operar de forma concorrente.

2.2.1 Algoritmo CSMA/CA

O principal objetivo do método de acesso ao meio é evitar, isto é, diminuir a frequência de colisões durante o mecanismo de acesso ao meio pelas estações que desejam iniciar uma transmissão de dados.

O método *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA) utilizado pelas estações que operam de acordo com o padrão 802.11 permite que cada uma das estações participantes da comunicação determine quando obter o acesso ao meio. Cada estação possui um serviço de entrega da *MAC Service Data Unit* (MSDU), que escuta o meio e após determiná-lo como livre inicia a transmissão dos dados. Cada MSDU é transmitida para outra estação como *MAC Data Protocol Unit* (MPDU), e pode ser dividida em várias MPDUs para ser entregue ao destino final.

O funcionamento do algoritmo CSMA é relativamente simples. Uma estação que deseja transmitir deve escutar o meio. Se o meio for considerado como livre, a estação deve aguardar, isto é, continuar ouvindo o meio por mais um intervalo de tempo igual a *Interframe Space* (IFS), e somente iniciará a transmissão se o meio continuar livre após este tempo IFS.

Se o meio for detectado como ocupado, seja no início do processo ou durante o *Interframe Space*, a estação não iniciará a transmissão e continuará a escutar o

meio até que a transmissão que esteja ocorrendo seja concluída para então iniciar a sua transmissão.

A Figura 2.3 apresenta o fluxograma do funcionamento do algoritmo CSMA.

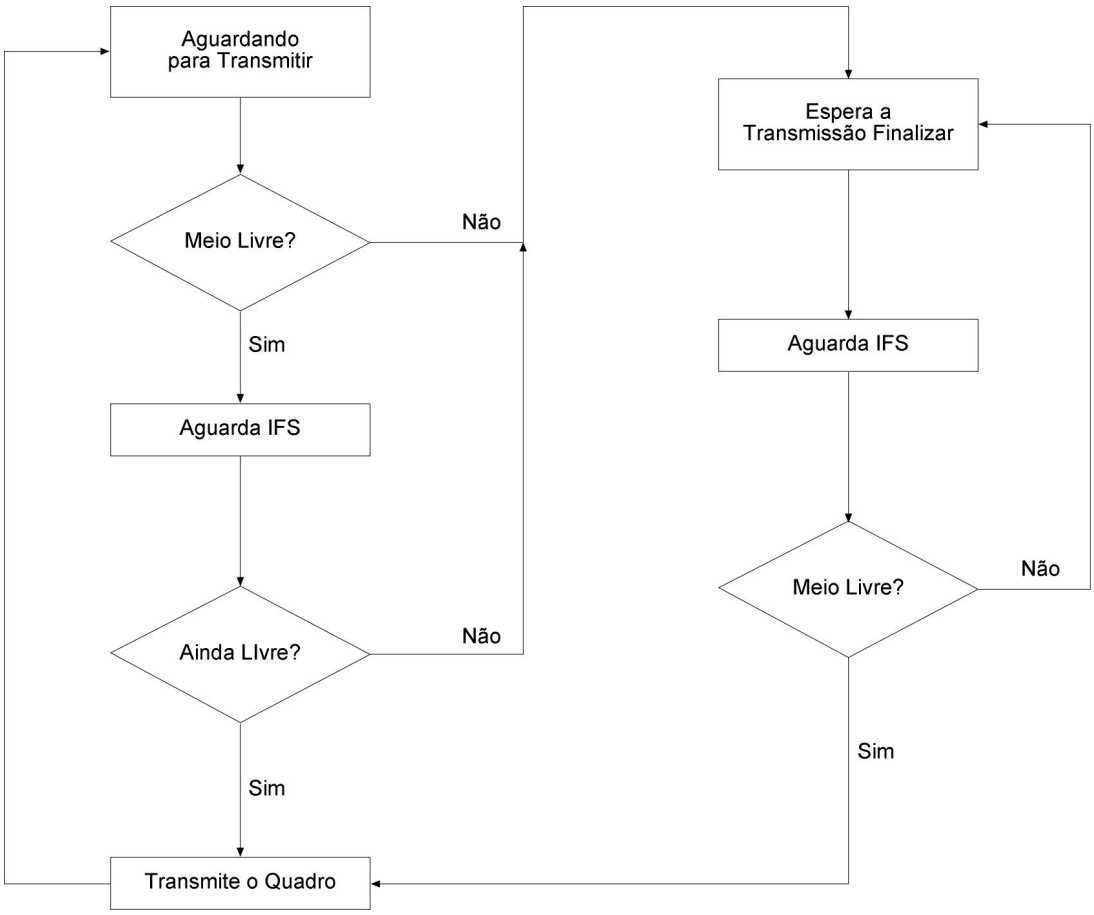

Figura 2.3 – Fluxograma Algoritmo CSMA

O problema deste método é que se duas estações escutarem o meio ao mesmo tempo e determinarem o meio como livre, as duas estações irão iniciar a transmissão no mesmo instante de tempo e inevitavelmente irá ocorrer uma colisão.

Para minimizar este efeito o padrão 802.11 opera com o algoritmo *Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance* (CSMA/CA). Diferentemente do método *Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection* (CSMA/CD), utilizado pelas redes cabeadas, que detecta a ocorrência de colisão, o algoritmo CSMA/CA tem como objetivo evitar que ocorra uma colisão.

Para atingir este objetivo este algoritmo implementa um procedimento chamado *backoff*, onde as estações devem realizar este procedimento antes de iniciar qualquer transmissão.

O procedimento de *backoff* faz com que a estação que deseja iniciar uma transmissão continue monitorando o meio e quando a transmissão que estiver ocorrendo for concluída, a estação que estava monitorando o meio aguarde novamente um período igual a IFS e se o meio permanecer livre a estação aguardará um novo intervalo de tempo determinado de forma aleatória definido como *random backoff time* e novamente escutará o meio. Se ainda assim o meio permanecer livre então a transmissão será iniciada. Se durante o tempo de *backoff* o meio tornar-se ocupado então o contador é parado e a estação voltará a decrementá-lo quando o meio tornar-se livre novamente.

2.2.2 Função de Coordenação Distribuída - DCF

A função de coordenação distribuída utiliza como método de acesso ao meio o CSMA/CA.

Quando uma rede local sem fio padrão 802.11, infraestruturada ou *ad hoc* estiver operando através de DCF, os intervalos IFS envolvidos serão:

- *Short IFS* (SIFS). Este é o menor IFS definido no padrão. É usado para transmissões de quadros de alta prioridade: pacotes ACK (confirmação de recebimento de pacotes) de quadros de dados, quadros CTS, quadros PCF e todo quadro *DCF DATA frames*, exceto o primeiro fragmento de uma rajada.

- *Distributed Coordination Function IFS* (DIFS): Maior do que SIFS. Utilizado para a transmissão de dados em geral (incluindo dados de aplicações multimídia).

- *Extended IFS* (EIFS): Utilizado pelas estações que operam de acordo com o DCF e que tenham recebido quadros com valores de *Frame Check Sequence* (FCS) incorretos. O EIFS é finalizado quando a estação recebe um quadro sem erros de FCS, então volta a operar com DIFS e *backoff time*.

2.2.3 Transmissão em Ambiente DCF

A estação que deseja transmitir deve escutar o meio por um tempo especificado chamado de *DCF Interframe Space* para então considerá-lo como livre, porém para iniciar a transmissão, a estação deve continuar a escutar o meio por um período de tempo adicional que é estabelecido de forma aleatória e independente chamado de *backoff time.* Este *backoff time* é decrementado, de forma que o meio permaneça livre até que o *backoff time* da estação que deseja iniciar a transmissão tenha seu valor em zero, então a transmissão é iniciada.

O *backoff time* somente poderá ser decrementado quando o meio for determinado como livre, caso contrário a estação deverá aguardar o meio ficar livre para então dar início ao procedimento. Se durante o *backoff time* a estação determinar o meio como ocupado, ela irá interromper o procedimento de decrementar o temporizador e retornará ao processo quando o meio for determinado como livre, neste caso não será selecionado um novo *backoff time* e a estação continuará o processo a partir do valor onde ele foi interrompido.

Após o transmissor finalizar o envio de um quadro ele deverá aguardar um novo DIFS e um novo *backoff time* para dar início a uma nova transmissão.

O valor de DIFS é determinado por:

$$DIFS = aSIFSTime + 2 \times aSlotTime,$$

Em que, aSIFSTime e aSlotTime dependem das características utilizadas na camada física, podendo variar de acordo com padrão 802.11 utilizado.

O *backoff time* é um tempo aleatório e determinado com base em um múltiplo de *slot times* e para cada nova transmissão um novo valor é estabelecido. O valor de *backoff time* é dado por:

$$\text{Backoff Time} = \text{Random}(\,) \times \text{aSlotTime},$$

Em que:

- *Random ( )* é um valor aleatório dentro do intervalo [0, CW]
- *aSlotTime* é um valor que depende das características da camada física.

O valor *Random ( )* que a estação seleciona deve estar dentro de um intervalo que varia de 0 até o valor da janela de contenção. O valor da janela de contenção é um valor característico da camada física estabelecido pelo padrão 802.11 e deve estar entre um intervalo mínimo e máximo, $CWmin \leq CW \leq CWmax$.

Sempre que uma estação transmitir um quadro e receber uma confirmação do quadro transmitido, todos os contadores envolvidos no processo de transmissão devem ser reinicializados. Caso a estação transmissora não receba a confirmação de recepção, então o valor da janela de contenção será estabelecido com base no valor anterior e uma nova transmissão será inicializada. Se a transmissão não for bem sucedida, novamente o valor será estabelecido com base no último valor da janela de contenção e assim consecutivamente até o valor da janela de contenção atingir seu valor máximo. Este valor permanecerá assim até que a estação consiga transmitir corretamente o quadro, isto é, receba a confirmação de recepção, fato que levará a estação transmissora a reinicializar todos os valores envolvidos no processo de transmissão. Este procedimento aumenta a estabilidade do protocolo sob condições de alta carga.

Nesta situação o valor de CW é determinado por:

$$CW = (2 \times CWanterior) - 1$$

A Tabela 2.1 ilustra os valores máximo e mínimo que a janela de contenção pode assumir e os valores *aSIFSTime* e *aSlotTime* para os padrões 802.11a, 802.11b e 802.11g.

Tabela 2.1 – Valores Característicos do Padrão IEEE 802.11

Parâmetros	802.11 a	802.11 b	802.11 g
Valor CWmin	31	31	15 para 1, 2, 5.5 e 11 Mbps 31 para até 54 Mbps
Valor CWmax	1023	1023	1023
aSIFSTime	16 us	10 us	10 us
aSlotTime	9 us	20 us	Long = 20 us Short = 9 us

Apesar de todas as estações possuírem os mesmos valores de CWmin e CWmax, cada estação determina de forma independente o valor de *backoff time.*

A Figura 2.4 ilustra de forma simplificada o processo de transmissão de três estações que operam com DCF para coordenar o acesso ao meio. Neste exemplo a estação 1 após ter identificado o meio como livre durante o tempo DIFS e ter seu temporizador *backoff time* em zero transmite o quadro. Durante a transmissão da estação 1 a estação 2 e a estação 3 também desejam transmitir seus quadros, mas detectam o meio como ocupado então aguardam até identificarem o meio como livre.

Após o término da transmissão do quadro da estação 1, a estação 2 e a estação 3 aguardam o tempo DIFS e como o meio continua livre começam a decrementar o temporizador *backoff time*. Como as estações determinam o valor de *backoff time* de forma independente a estação 3 atinge o valor zero antes da estação 2 e então como o meio permaneceu livre durante a sua contagem, a mesma inicia a transmissão do seu quadro.

A estação 2 ao perceber que uma outra estação, neste caso a estação 3, iniciou uma transmissão, interrompe o procedimento de decrementar o temporizador *backoff time* e aguarda o meio ficar livre novamente por um período DIFS. Ao determinar que o meio está livre a estação 2 retoma o processo de decrementar seu temporizador *backoff time* a partir do valor em que foi interrompido o processo. Ao encerrar a contagem ela transmite o seu quadro.

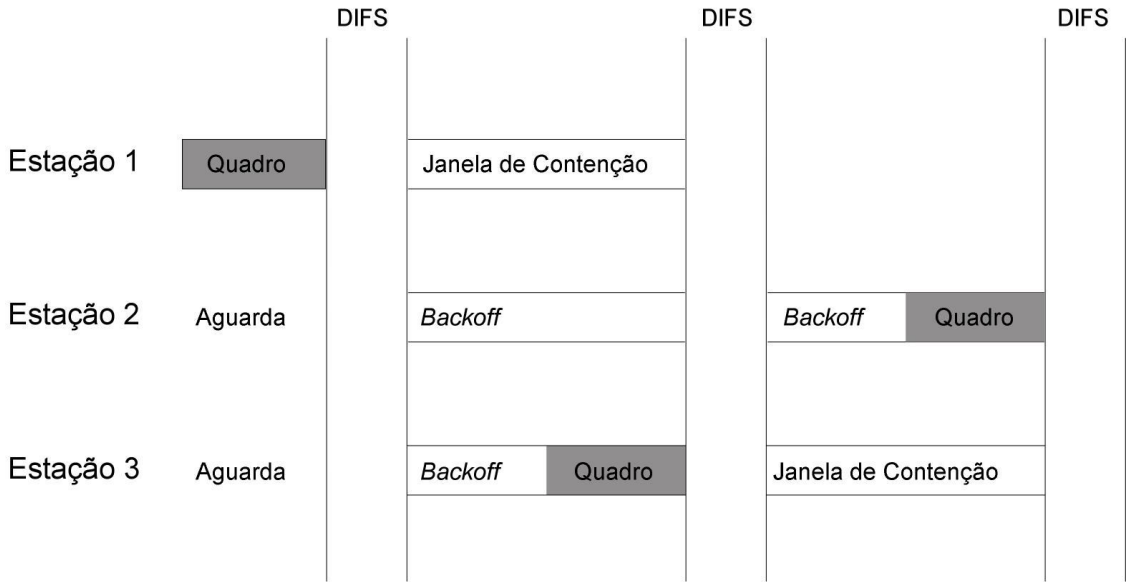

Figura 2.4 – Transmissão DCF

O padrão IEEE 802.11 (16) determina que devido ao fato de a estação transmissora não conseguir determinar a ocorrência de colisão escutando sua própria transmissão, a estação transmissora da MPDU deve ser informada sobre a ocorrência de colisão e consequentemente deverá ser capaz de iniciar uma retransmissão. Para isto o padrão 802.11 implementa um mecanismo de confirmação de recebimento para todas as MPDUs transmitidas. Isto é feito com o envio de um reconhecimento de recepção, MPDU ACK, pela estação receptora. Ao receber uma MPDU a estação receptora aguarda um tempo denominado SIFS, que é menor que DIFS, e então envia a confirmação para a estação transmissora sem escutar o meio para saber se ele está livre ou não. Se a estação transmissora não receber a confirmação então uma retransmissão é programada.

2.2.4 DCF com RTS/CTS

Um dos problemas que pode ocorrer em um ambiente de rede local sem fio é o problema com estações escondidas, ou seja, a existência de uma estação que não

está no campo de alcance de uma estação transmissora ou de uma estação receptora.

A existência de estações escondidas resulta na ocorrência de colisões e por consequência na queda de desempenho da rede como um todo, pois obrigatoriamente existirá um maior número de retransmissões ocorrendo neste ambiente.

Para reduzir este problema o padrão 802.11 implementa um mecanismo baseado em dois sinais de controle, *Request to Send* (RTS) e *Clear to Send* (CTS). Apesar da utilização destes sinais ser opcional, a implementação deles é obrigatória pelo padrão, desta forma todas as estações que operam de acordo com o padrão 802.11 são capazes de responder corretamente à existência dos sinais de controle.

O mecanismo de sinais de controle consiste em uma estação enviar um sinal RTS, após aguardar os tempos definidos no DCF para transmitir. Este sinal RTS é uma mensagem como outra qualquer, não tendo nenhuma prioridade. O RTS inclui o endereço da estação transmissora, o endereço da estação receptora e o tempo que será necessário para transmitir o quadro de dados, incluindo o tempo utilizado para a transmissão da confirmação de recepção ACK, do sinal de controle CTS, mais três intervalos SIFS. Este campo sempre será um valor inteiro.

A Figura 2.5 apresenta o quadro RTS transmitido pelas estações que operam no padrão 802.11

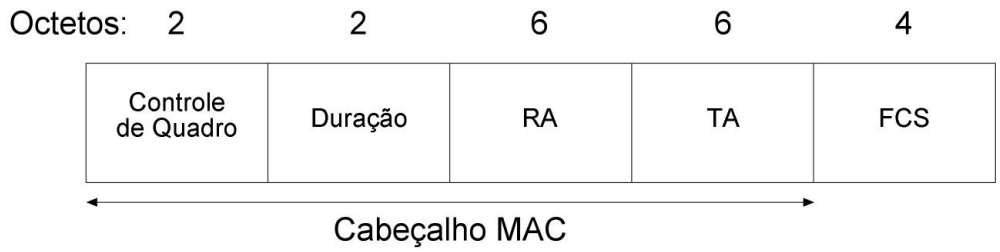

Figura 2.5 – Quadro RTS

Todas as estações que receberem o sinal RTS devem atualizar o seu *Network Allocation Vector* (NAV), que é um vetor que armazena e gerencia os tempos de acesso ao meio, de acordo com a duração do tempo informado no sinal RTS

recebido. O NAV especifica o primeiro instante de tempo em que a estação pode tentar acessar o meio novamente (16).

Quando o destinatário da mensagem a ser enviada pelo transmissor recebe o sinal RTS ele aguarda um tempo SIFS e se o canal for determinado como livre ele envia um sinal CTS. O CTS contém o endereço da estação transmissora do quadro RTS e o tempo necessário para a transmissão da mensagem. Este tempo é calculado com base no tempo informado no quadro RTS menos o tempo requerido para transmitir o CTS e menos o intervalo de tempo SIFS, e sempre será um valor inteiro. Como o CTS contém o tempo que será necessário para a transmissão da mensagem, todas as estações que receberem o CTS devem ajustar o seu NAV, da mesma forma que ocorre com a recepção do RTS.

A Figura 2.6 apresenta o formato do quadro CTS enviado pela estação destino da mensagem e receptora do quadro RTS.

O campo *Receiver Address* (RA) do quadro CTS contém o endereço *Transmitter Address* (TA) que foi informado no quadro RTS recebido.

Figura 2.6 – Quadro CTS

Após receber o quadro CTS do receptor, o transmissor aguarda um intervalo de tempo igual a SIFS e então pode iniciar a transmissão do quadro. Após receber o quadro, o receptor aguarda um intervalo de tempo igual a SIFS e envia o reconhecimento de recepção para o transmissor, indicando desta forma que a transmissão foi bem sucedida.

Como o conjunto de estações que recebe o RTS não é obrigatoriamente idêntico ao conjunto de estações que recebe o CTS, este mecanismo garante que todas as estações que estão sob o raio de atuação da estação transmissora e da estação

receptora possuam a informação de que uma transmissão irá ocorrer e quando elas poderão tentar acessar o meio novamente para transmitirem os seus quadros.

O procedimento de transmissão com a utilização de RTS e CTS, não pode ser utilizado por transmissões do tipo *multicast* e do tipo *broadcast*, pois todas as estações receptoras do quadro RTS teriam que enviar o quadro CTS para iniciar a recepção dos dados, porém somente uma estação conseguiria obter sucesso, o que caracterizaria uma transmissão do tipo *unicast*.

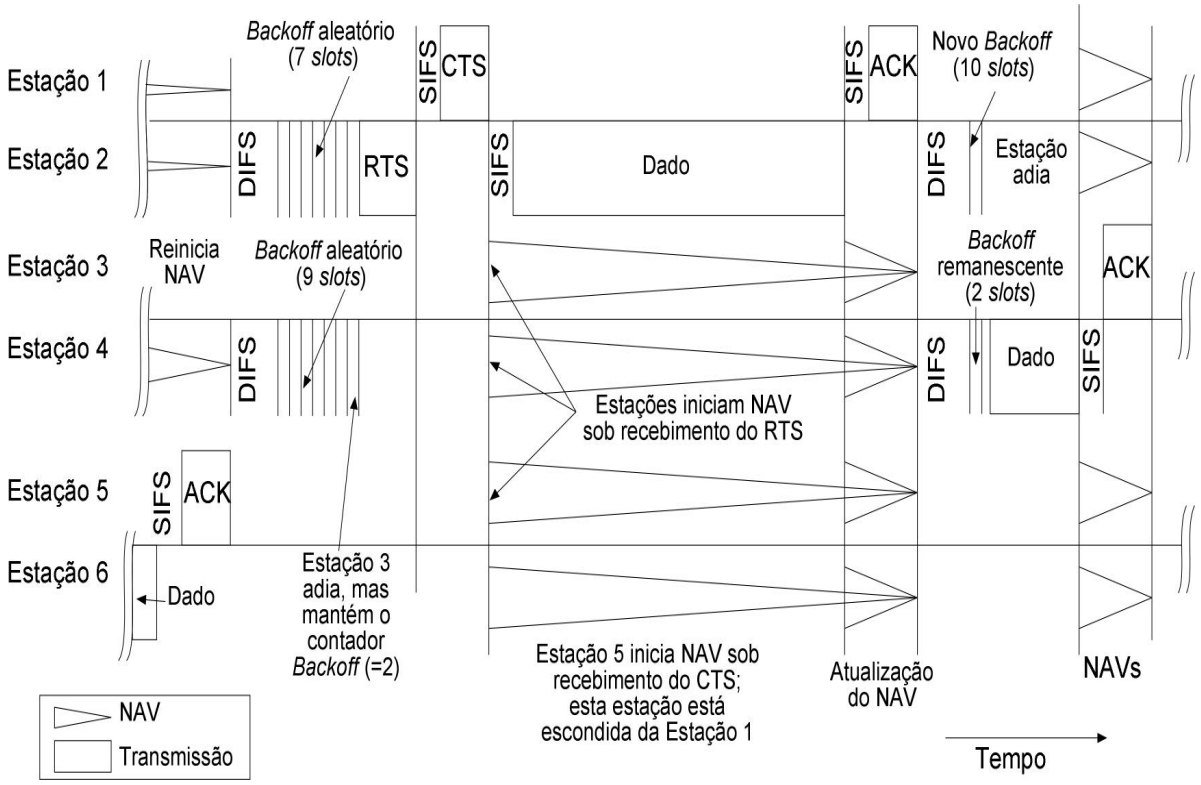

Figura 2.7 – Transmissão com RTS e CTS – Fonte: (21)

A Figura 2.7 ilustra o mecanismo de transmissão utilizando RTS e CTS, com a estação 5 escondida da estação 2, porém ela não causa uma colisão durante a transmissão do quadro enviado, uma vez que ela recebe o CTS da estação 1 e portanto ajusta seu NAV indicando quando ela poderá tentar acessar o meio para iniciar sua transmissão.

2.2.5 Função de Coordenação - PCF

De acordo com o estudo realizado por MEDEPALLI (4) apesar de o PCF ter sido elaborado com a intenção de suportar tráfegos isócronos como voz e vídeo, o ganho obtido em relação ao DCF é muito pequeno. Devido à implementação do PCF nos dispositivos sem fio, operando de acordo com o padrão 802.11, ter sido definida como opcional raramente esta opção é utilizada.

O ambiente de rede local sem fio quando opera baseado na função PCF envolve um novo *Interframe Space:*

- *Point Coordination Function IFS* (PIFS): Este intervalo de tempo é maior que o SIFS. É utilizado para o controle de *polling* do modo PCF.

O PCF consiste em ordenar e controlar o acesso ao meio, determinando qual estação possui o direito de acessar o meio e iniciar a transmissão. O PCF controla os quadros durante o Período Livre de Contenção (CFP). Normalmente o *Access Point* torna-se o *Point Coordinator* (PC).

O CFP deve ser alternado com o Período de Contenção (CP) quando o DCF controlar a troca de quadros.

Para que o *Access Point* inicie o CFP ele espera o meio ficar livre por um intervalo de tempo PIFS, como este intervalo de tempo é menor que DIFS e maior que SIFS, nenhuma outra estação consegue acessar o meio antes do *Access Point*.

Após aguardar o intervalo de tempo PIFS, é iniciado o CFP e quadros do tipo *Beacon* são enviados para as estações, contendo informações do tempo de duração do CFP e quando ele ocorrerá novamente. O valor de PIFS é dado por:

$$PIFS = aSIFSTime + aSlotTime,$$

Em que:

- *aSIFSTime* e *aSlotTime* dependem das características utilizadas na camada física.

Todas as estações que recebem o quadro *Beacon* ajustam o seu NAV com esta informação e desta forma não tentam acessar o meio durante o CFP.

Após enviar o quadro *Beacon* o *Access Point* aguarda um intervalo de tempo SIFS e envia um quadro D1 (dados + *polling*). A primeira estação na lista do *Acces Point* que recebe o *polling* aguarda um intervalo de tempo igual a SIFS e então transmite o seu quadro. O *Access Point* aguarda um novo intervalo de tempo igual a SIFS e envia o quadro D2 para a segunda estação que ao receber o *polling* aguarda um novo intervalo de tempo igual a SIFS e envia o seu quadro. Se em um determinado instante uma estação, que teve seu quadro D, não transmitir, o *Access Point* aguarda um intervalo de tempo igual a PIFS e então envia um novo quadro D para a próxima estação da lista. Caso uma estação receba um *polling* e não tenha nenhum quadro para transmitir ela deverá enviar um quadro nulo – *null frame*, desta forma é garantido ao *Acces Point* que não houve problema de transmissão e/ou recepção de quadros.

Após terminar o tempo de duração do CFP o *Access Point* envia um quadro indicando que o CFP foi finalizado e todas estações que receberem este quadro deverão reinicializar o seus respectivos NAV, e então um novo CP é iniciado obedecendo os procedimentos do DCF.

A Figura 2.8 ilustra o processo de transmissão baseado no PCF.

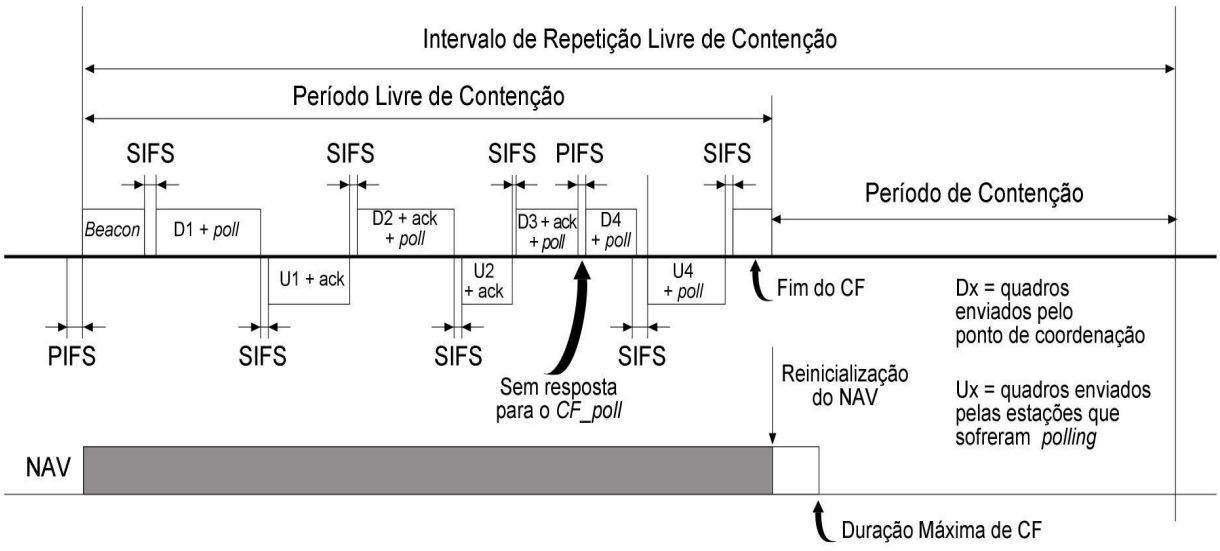

Figura 2.8 – Diagrama de Transmissão – PCF – Fonte: (16)

2.3 Padrão IEEE 802.11e

Os métodos de acesso ao meio do padrão 802.11 não implementam nenhum mecanismo de priorização de tráfego, todas as estações e todo o tráfego estão submetidos às mesmas regras de transmissão, independente da topologia física da rede local sem fio ser infraestruturada ou *ad hoc*.

Quando uma rede local sem fio está operando com o DCF o direito de iniciar uma transmissão é dado para a estação que tiver o menor *backoff time*. Como este *backoff time* é estabelecido baseado nos valores da janela de contenção que são estabelecidos pelo padrão 802.11, não existe priorização da estação que terá o direito de transmissão.

Outro fator é que, independentemente do tipo de tráfego a ser transmitido, voz, vídeo ou dados, o método e os valores envolvidos para se obter o valor do *backoff time* e consequentemente o acesso ao meio, são os mesmos. Isto faz com que uma estação que possua tráfego de voz para transmitir e outra estação que possua tráfego de dados, por exemplo, FTP para transmitir, terão as mesmas oportunidades, ou seja, a transmissão ocorre no método *best effort*.

Em 2005 o IEEE publicou o padrão 802.11e (8) que tem como objetivo estabelecer um método de priorização de acesso ao meio. Este método tem como base a classificação do tráfego a ser transmitido. Esta classificação é realizada em quatro categorias de acesso definidas como: tráfego *background*, tráfego *best effort*, tráfego de vídeo e tráfego de voz.

O padrão 802.11e implementa uma nova função de coordenação para acesso ao meio. Esta nova função pode operar em dois novos métodos de acesso ao meio que suportam os requisitos de qualidade de serviço. Estes novos métodos são:

- *Enhanced Distributed Channel Access* (EDCA): entrega do tráfego baseada em diferentes prioridades de usuário;

- *Hybrid Coordination Function Controlled Channel Access* (HCCA): permite a reserva de oportunidades de transmissão (TXOPs) através do *Hybrid Coordinator* (HC).

As estações que implementam o padrão 802.11e são denominadas *Quality Stations* (QSTA) e o *Access Point* que implementa o padrão 802.11e é chamado de *Quality Access Point* (QAP)

A arquitetura MAC do padrão 802.11e é apresentada na Figura 2.9

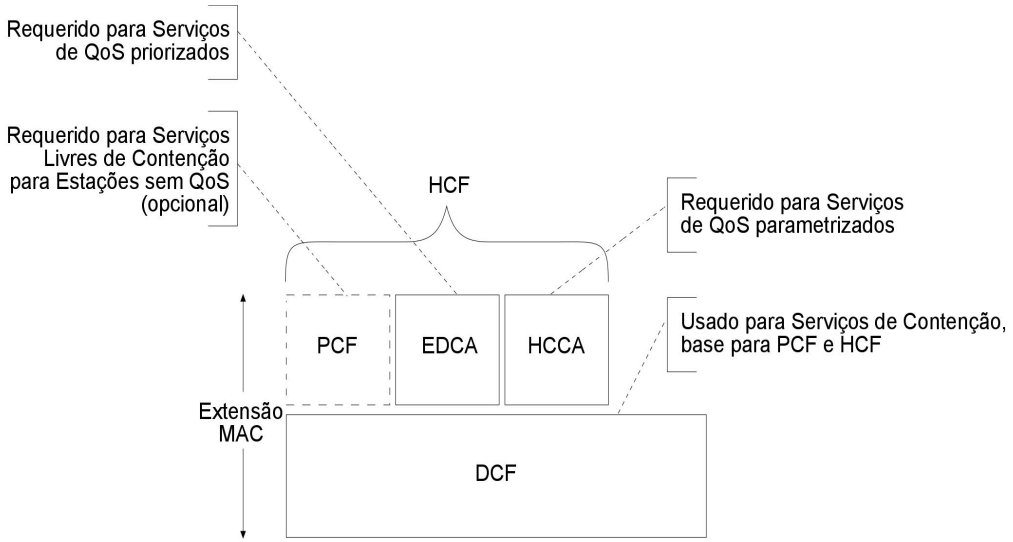

Figura 2.9 – Arquitetura MAC – Fonte: (8)

Para manter a compatibilidade e consequentemente permitir a coexistência de estações padrão 802.11 e estações padrão 802.11e, foram definidas regras de compatibilidade. Basicamente o QAP quando for transmitir para uma estação padrão 802.11 não utilizará o formato do quadro que implementa os requisitos de QoS e caso o quadro tenha sido originado por uma estação padrão 802.11e o QAP compatibilizará o formato do quadro, suprimindo o campo referente ao QoS. Para a situação de coexistência todo o tráfego gerado por estações que não implementem o padrão 802.11e é tratado como tráfego *best effort*, isto é, sem prioridade.

A Figura 2.10 apresenta a diferença entre o formato do quadro MAC do padrão 802.11 e do padrão 802.11e, onde é incluído o campo *QoS control*.

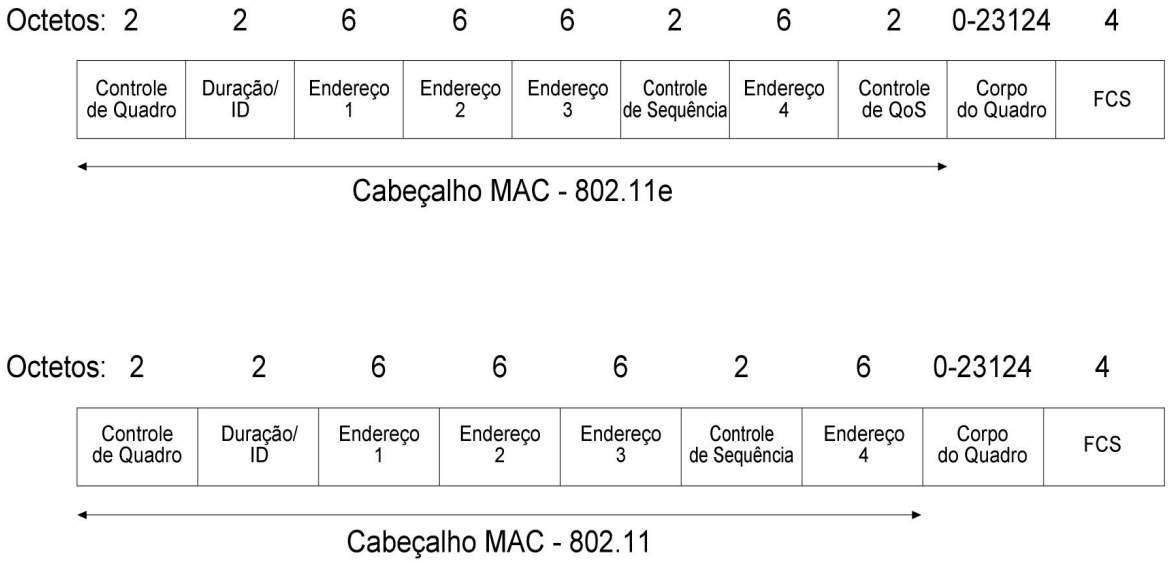

Figura 2.10 – Comparação do Quadro MAC

2.3.1 Hybrid Coordination Function - HCF

Para suportar os requisitos de QoS o padrão 802.11e define uma nova função de coordenação chamada *Hybrid Coordination Function* (HCF). Esta nova função é implementada somente em ambientes de rede local sem fio que implementem os requisitos de QoS. Esta implementação deve ocorrer inclusive nas estações que operam de acordo com o padrão 802.11e. Estes ambientes são denominados *Quality Basic Service Set* (QBSS) para redes sem fio infraestruturadas e *Quality Independent Basic Service Set* (QIBSS) para redes sem fio *ad hoc*.

A HCF combina funções do DCF e do PCF, porém com algumas evoluções (8). São especificados formatos de quadro e mecanismos que permitem a troca de dados que tenham requisitos de QoS durante os períodos de contenção (CP) e dos períodos livres de contenção (CFP). O HCF utiliza ambos os métodos para transmitir quadros. O método baseado em contenção é chamado de EDCA e o método livre de contenção é chamado de HCCA.

Os novos parâmetros de acesso ao meio introduzidos pelo padrão 802.11e são:

- *Arbitration Interframe Space* (AIFS): é o intervalo de tempo em que a estação escuta o meio antes de iniciar o procedimento de *backoff*. Quanto maior for a categoria de acesso menor será o AIFS (22);

- *Transmission Oportunity* (TXOP): é a máxima duração que uma categoria de acesso pode reter o meio após determiná-lo como livre e “adquiri-lo” para si;

- *Contention Window* (CW): a janela de contenção tem seu funcionamento semelhante ao padrão 802.11. A alteração do padrão 802.11e, neste parâmetro, está relacionada aos valores envolvidos de CWmin e CWmax que são diferentes para cada categoria de acesso. Diferentemente do padrão 802.11 em que os valores são os mesmos para toda e qualquer transmissão independentemente do tipo de tráfego.

O AIFS é independente das taxas de transmissão das estações e deve ser usado pelas estações do tipo QSTA para transmitir todos os quadros MPDU, todos os quadros de gerenciamento e os seguintes quadros de controle: PS-Poll, RTS, CTS, BlockAckreq e BlockAck. O valor de AIFS é determinado por:

$$AIFS[AC] = AIFSN[AC] \times aSlotTime + aSIFSTime,$$

Em que:

- *AIFSN* deve ser maior ou igual a 2 para estações do tipo QSTA e maior ou igual a 1 para o *Access Point* do tipo QAP.

A Tabela 2.2 apresenta os valores dos parâmetros implementados pelo padrão 802.11e para cada categoria de acesso.

Tabela 2.2 – Valores para o Padrão 802.11e

Categoria de Acesso	CWmin	CWmax	AIFSN	TXOP máximo	
				802.11 802.11b	802.11a 802.11g
AC_BK	aCWmin	ACWmax	7	0	0
AC_BE	aCWmin	ACWmax	3	0	0
AC_VI	(aCWmin+1)/2-1	ACWmin	2	6,016ms	3,008ms
AC_VO	(aCWmin +1)/4-1	(aCWmin +1)/2-1	2	3,264ms	1,504ms

A Figura 2.11 apresenta a relação do AIFS e dos intervalos de tempo existentes no padrão 802.11.

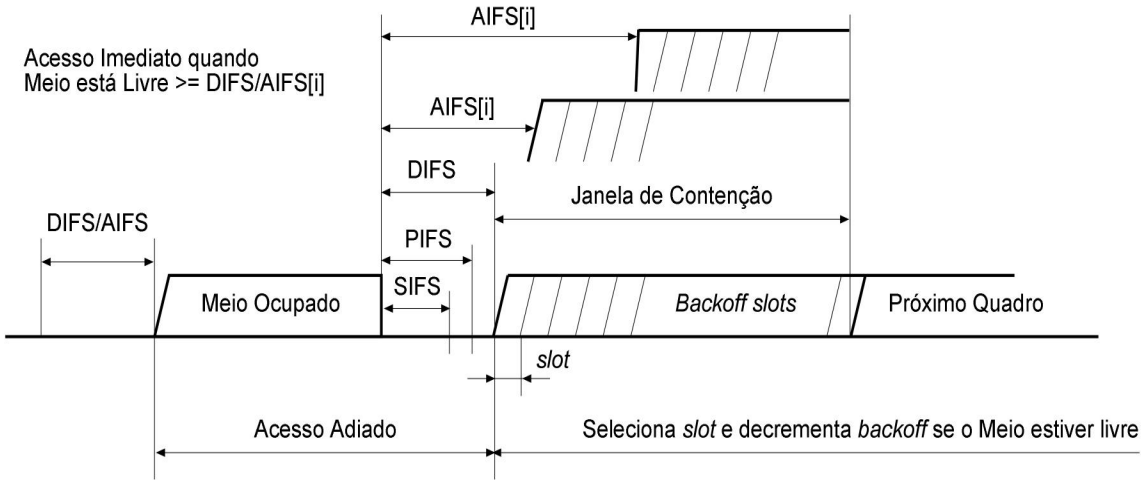

Figura 2.11 – Relação AIFS e Demais Intervalos – Fonte: (8)

2.3.2 HCF Controlled Channel Access

O HCCA utiliza um mecanismo coordenado centralizado chamado de *Hybrid Coordinator*, similar ao *Point Coordinator* do PCF, porém com regras diferentes.

O HC coordena as trocas de quadros em um ambiente livre de contenção e é implementado no QAP. Para isto ele utiliza uma prioridade de acesso mais alta que os demais serviços implementados pelo padrão. Desta forma ele consegue tomar o meio para si e coordenar as trocas de quadros entre as estações alocando TXOP para todo o ambiente inclusive para ele mesmo.

O QAP deve indicar a disponibilidade de CF-Polls para as estações que não operam de acordo o padrão 802.11e.

Um QAP pode iniciar alguns períodos livres de contenção chamados de *Controlled Access Periods* (CAP) usando HCCA após considerar o meio como livre por um intervalo de tempo igual a PIFS. Como PIFS é menor que DIFS e menor que AIFS, o QAP tem a oportunidade de iniciar o HCCA. Um QAP pode iniciar o período livre de contenção durante todo o intervalo de *beacon.* Para deixar espaço suficiente para o EDCA a máxima duração do HCCA é limitada pela variável $T_{CAPLimit}$ (23).

Para iniciar uma transmissão é estabelecido um *Traffic Stream* (TS) e cada QSTA pode ter no máximo oito TS com diferentes prioridades. Para iniciar uma conexão uma QSTA envia um quadro chamado *QoS Request* que contém a especificação do tráfego para o QAP. Esta especificação descreve os requisitos de QoS necessários para a transmissão, tamanho do quadro, taxa média e atraso. Com base nestes requisitos o QAP determina o *Selected Service Interval* (SI). A partir do SI as estações são indagadas em intervalos de tempo suficientemente espaçados para atender os requisitos de QoS necessários para concluir a transmissão de forma satisfatória.

2.3.3 HCF Contention-Based Channel Access - EDCA

O EDCA implementa oito prioridades de usuários (UP) mapeadas em quatro categorias de acesso. O mapeamento das oito UP para as categorias de acesso estão representadas na Tabela 2.3 e as quatro categorias de acesso com seus

respectivos parâmetros de CWmin, CWmax, AIFSN e TXOP estão representadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.3 – Mapeamento UP – Categoria de Acesso

Prioridade	Prioridade de Usuário - UP (802.1D)	Categoria de Acesso – AC	Descrição
Mais Baixa	0	AC_BK	*Background*
↓	1	AC_BK	*Backgorund*
↓	2	AC_BE	*Best Effort*
↓	3	AC_BE	*Best Effort*
↓	4	AC_VI	Vídeo
↓	5	AC_VI	Vídeo
↓	6	AC_VO	Voz
Mais Alta	7	AC_VO	Voz

Cada categoria de acesso funciona como uma fila onde os dados a serem transmitidos são classificados pelas camadas mais altas em uma das quatro categorias de acesso e a partir de então são armazenados em uma fila do tipo *First-in First-out* (FIFO) para serem transmitidos. Cada fila funciona como um DCF independente e com parâmetros específicos pertencentes à categoria de acesso na qual o dado foi classificado. As filas para cada categoria de acesso são apresentadas na Figura 2.12.

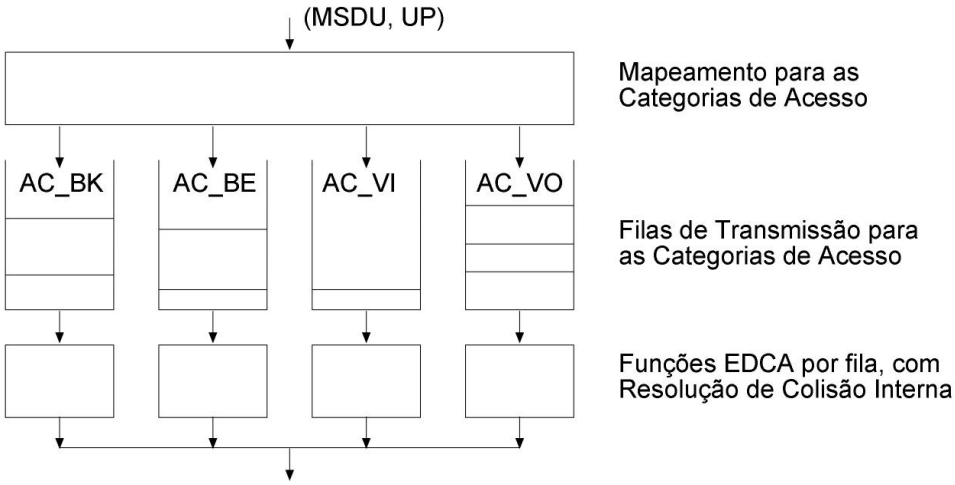

Figura 2.12 – Filas por Categoria de Acesso

Para iniciar uma transmissão uma estação QSTA deve escutar o meio por um tempo igual a AIFS. Após o determiná-lo como livre cada uma das quatro categorias de acesso darão início ao seu processo *backoff time*. Como cada categoria de acesso possui um valor diferente de CWmin e CWmax e estes valores são determinados de modo a implementar a priorização de transmissão, o tráfego classificado como voz tem maior prioridade de transmissão que o tráfego de vídeo, que por sua vez tem maior prioridade do que o tráfego classificado como *best effort*. Como o *backoff time* de cada categoria de acesso continua a ser definido de forma aleatória é possível ocorrer uma colisão interna entre diferentes categorias de acesso, neste caso a QSTA irá transmitir o tráfego que pertencer à categoria de acesso com maior prioridade.

Como cada estação possui os mesmos valores de CWmin , CWmax e AIFSN e utilizam um processo aleatório para determinar o procedimento de *backoff* existe a possibilidade de duas estações tentarem transmitir ao mesmo tempo ocorrendo então uma colisão, neste caso é utilizado o mesmo procedimento implementado no 802.11.

3 Requisitos para Voz sobre IP

Para viabilizar a transmissão de voz sobre redes IP de forma satisfatória alguns requisitos devem ser cumpridos. Fatores como largura de banda, atraso, *jitter*, eco e perda de pacotes podem interferir significativamente na compreensão do diálogo entre os interlocutores.

As redes IP por padrão não implementam nenhum controle sobre estes fatores, o que inviabiliza a transmissão de voz. Desta forma, a implementação de qualidade de serviço passa a exercer significativa importância, pois tem como objetivo garantir a disponibilização de banda e atraso em níveis que permitam o estabelecimento de um diálogo.

Este capítulo apresenta os protocolos de transporte utilizados para transmissão de voz sobre redes IP e os fatores de qualidade de serviço que influenciam na transmissão.

3.1 Protocolo de Transporte

As transmissões de voz em redes IP utilizam como protocolo de transporte o *User Datagram Protocol* (UDP). Porém o UDP não oferece todas as informações necessárias para transmissões em tempo real. Devido à esta deficiência do UDP, o *Internet Engineering Task Force* (IETF) adotou o *Real Time Protocol* (RTP), definido na *Request for Comments* (RFC) 3550 (24) para aplicações em tempo real, que opera sobre o protocolo UDP. Portanto o tráfego VoIP opera com um cabeçalho RTP/UDP/IP.

3.1.1 Real Time Protocol – RTP

O RTP é um protocolo que proporciona um serviço de entrega fim-a-fim para dados com característica de tempo real como o áudio e vídeo, operando de forma transparente para transmissões *unicast* ou *multicast.* Proporciona identificação de tipo de *payload,* número de seqüência e marca temporal (*timestamp*). Porém não contém um mecanismo para entrega em tempo adequado, não garante qualidade de serviço, não garante a entrega e não garante uma sequência ordenada de entrada para o receptor.

O RTP usa o número de sequência para determinar quando os pacotes estão chegando em ordem e usa o *timestamp* para determinar o intervalo de chegada entre os pacotes.

A utilização do RTP implica que o cabeçalho do pacote RTP/UDP/IP terá 40 *bytes*, que é o dobro do tamanho do *payload* de um pacote usando G.729 com duas amostras de voz, isto pode influenciar severamente na banda consumida para a transmissão dos pacotes de voz.

Com o objetivo de reduzir a banda consumida, pode ser utilizado o RTP, que permite a compressão do cabeçalho IP/UDP/RTP de 40 *bytes* para 2 *bytes* quando o *checksum* do UDP não é utilizado ou 4 bytes quando o *checksum* é utilizado. Segundo JONATHAN (25) este cabeçalho comprimido pode ser enviado em 98% do tempo, contudo, periodicamente um cabeçalho inteiro não-comprimido deve ser enviado para verificar que ambos os lados operam com o estado adequado.

O cabeçalho do protocolo RTP é apresentado na Figura 3.1.

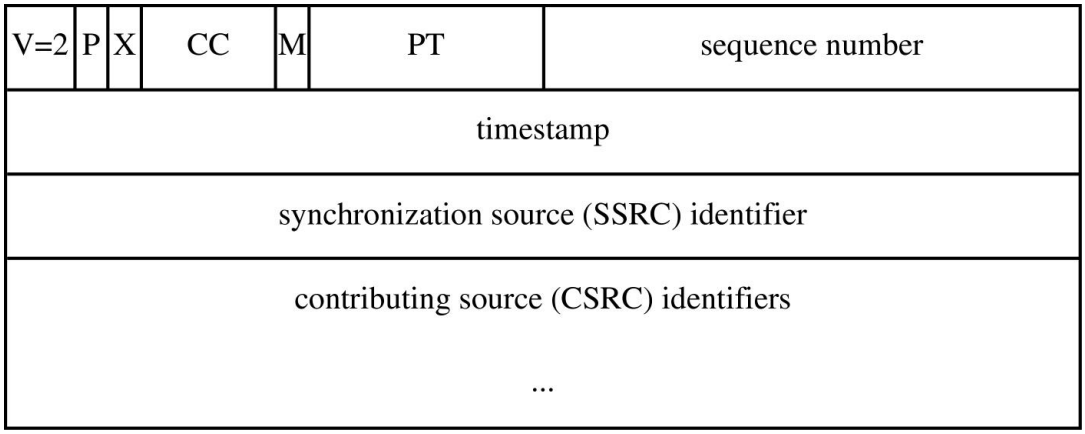

Figura 3.1 – Cabeçalho do Protocolo RTP – Fonte: (24)

3.1.2 RTP Control Protocol - RTCP

O *RTP Control Protocol* (RTCP) é um protocolo que atua em conjunto com RTP exercendo as funções de controle.

O RTCP tem quatro funções, são elas:

- Efetuar a realimentação da qualidade de entrega dos dados;

- O RTCP também será responsável por distribuir o nome canônico dos participantes (CNAME), este deve ser único para cada um dos participantes. O identificador das fontes de sincronização (SSRC) pode mudar caso haja conflito, mas não é permitido escolher CNAME's conflitantes, e o participante continuará a ser reconhecido através deste;

- Como os participantes devem enviar pacotes RTCP a taxa de envio deve ser controlada de forma a não provocar congestionamento na rede e permitir que o número de participantes seja escalável. Desta forma o RTCP calcula a taxa que os pacotes serão enviados com base no número de participantes. Como cada participante envia um pacote de controle para todos os outros participantes, cada um pode de maneira independente determinar o número de participantes na comunicação;

- Transmissão de funções de controle como identificação dos participantes.

A Figura 3.2 apresenta um pacote RTCP contendo relatório gerado pelo transmissor.

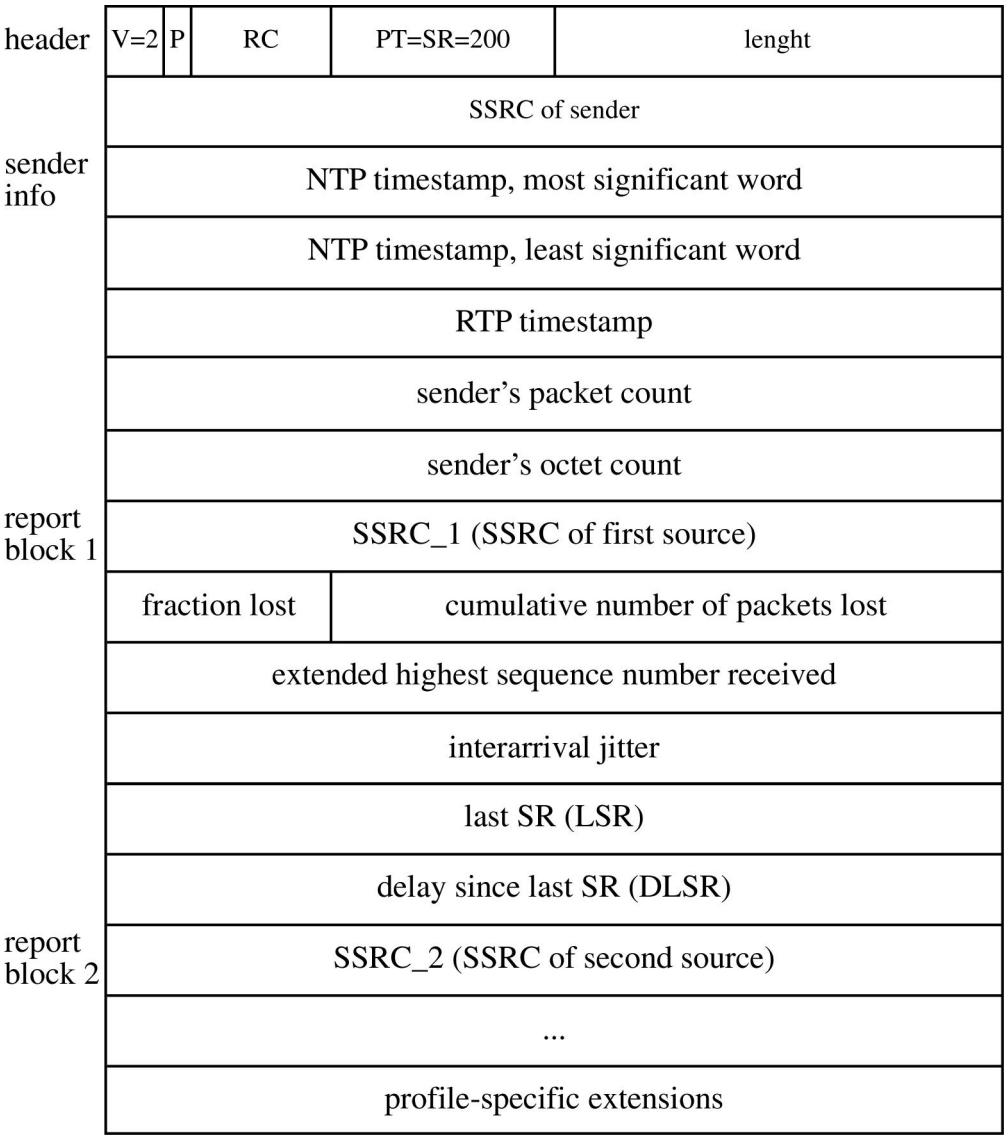

Figura 3.2 – Pacote RTCP – Fonte: (24)

3.2 Resource Reservation Protocol - RSVP

O *Resource Reservation Protocol* (RSVP) é um protocolo de sinalização fim-a-fim que estabelece um caminho entre o transmissor e o receptor com o objetivo de disponibilizar qualidade de serviço para a comunicação estabelecida. O RSVP é definido pelo IETF através da RFC 2205 (26).

O RSVP não reserva recursos ao longo da rede, ele apenas sinaliza para os nós da rede, por exemplo, roteadores, as requisições de QoS do pacote de voz. Porém o roteador é que determinará quando estas requisições serão atendidas, como por exemplo, banda e atraso.

As aplicações que solicitaram as requisições de QoS são realimentadas com a informação sobre quando as mesmas foram aprovadas ou negadas. É interessante ressaltar que o originador da requisição de níveis de serviço do RSVP é a estação receptora e não a estação transmissora. Isto permite que o RSVP seja utilizado em transmissões *multicast*.

O RSVP apresenta três limitações: escalabilidade, controle de admissão e o tempo que demanda para configurar a reserva fim-a-fim.

O cabeçalho do protocolo RSVP é apresentado na Figura 3.3.

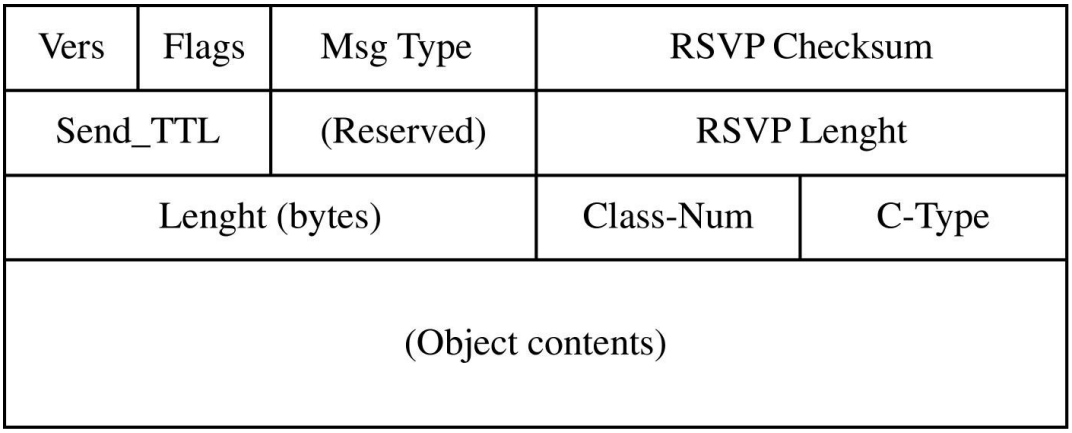

Figura 3.3 – Cabeçalho do Protocolo RSVP – Fonte: (26)

3.3 Qualidade de Serviço

O principal objetivo da qualidade de serviço é obter requerimentos de largura de banda, atraso, *jitter*, entre outros de forma a permitir que uma aplicação transmita sua informação de forma satisfatória. Para as transmissões de voz sobre redes IP, atraso, *jitter*, perda de pacotes e largura de banda são fatores que devem ser controlados e constantemente monitorados para garantir a transmissão.

Os *codecs* utilizados para transmissão de voz podem ser avaliados através do teste *Mean Opinion Score* (MOS). O MOS é realizado com um grupo de ouvintes, os quais dão para cada amostra de voz transmitida uma classificação que varia de 1 a 5, sendo 1 qualidade ruim e 5 qualidade excelente.

A Tabela 3.1 apresenta a classificação MOS para alguns *codecs* do ITU-T e para o *codec* de código aberto *Internet Low Bitrate Codec* (iLBC).

Tabela 3.1 – Notas MOS para Codecs

Codec	**Nota MOS**
G.711 PCM	4,1
G.726 ADPCM	3,85
G.729a CS-ACELP	3,7
G.723.1 MP-MLQ	3,9
G.723.1 ACELP	3,65
iLBC Freeware	3,9

Fonte: (25)

3.3.1 Atraso

O atraso fim-a-fim de uma transmissão de voz é obtido através da medição do tempo que a voz leva para chegar ao ouvido do receptor a partir do momento em que ela saiu da boca do transmissor.

Existem três tipos de atraso que podem ser analisados em uma transmissão de VoIP. São eles:

- Atraso de Propagação;
- Atraso de Processamento;
- Atraso de Fila;

O atraso de propagação é causado pela distância que um sinal deve viajar via luz em uma rede de fibra óptica ou via impulsos elétricos em redes de cobre. Normalmente este atraso sozinho é imperceptível ao ouvido humano, porém em conjunto com os outros atrasos pode gerar degradação no sinal de forma a comprometer a qualidade da transmissão.

O atraso de processamento pode ter diferentes causas, tais como compressão e comutação dos pacotes. Ao longo da transmissão de um pacote o mesmo pode passar por diversos dispositivos e cada um deles introduzirá um atraso de processamento.

Amostras de voz são geradas em intervalos regulares, por exemplo, equipamentos CISCO geram amostras de voz a cada 10ms utilizando o *codec* G.729. Uma certa quantidade de amostras é colocada dentro de um pacote, e então este pacote é transmitido. Isto significa que se em um pacote forem colocadas duas amostras e cada amostra for gerada a cada 10ms, o atraso do pacote é de 20ms. Não existe uma determinação de quantas amostras de voz pode existir em um pacote, porém cada amostra inserida no pacote obrigatoriamente impactará no aumento do atraso do mesmo, se for utilizado o *codec* G.729 para a geração das amostras, cada inserção impactará em 10 ms de atraso.

O atraso de fila é ocasionado quando os pacotes são mantidos em uma fila de saída de um determinado dispositivo devido à existência de congestionamento na rede de transmissão.

A composição destes atrasos resulta no atraso fim-a-fim. Segundo a recomendação *ITU Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T) G.114 (27), o atraso fim-a-fim aceitável para o estabelecimento de uma comunicação de voz satisfatória é de no máximo 150ms. Porém, vale ressaltar que comunicações estabelecidas através de enlaces de satélite tem um atraso de aproximadamente 500 ms, o que indica que níveis satisfatórios são na verdade estabelecidos pelo usuário.

3.3.2 Jitter

Jitter é a diferença entre o instante de tempo no qual o pacote é esperado pelo receptor e instante de tempo no qual o pacote é efetivamente recebido. Por exemplo, no caso de uma transmissão constante com intervalo de 20 ms entre a transmissão de um pacote e outro a recepção destes pacotes no destino ocorre em intervalos de 20 ms. Porém, como cada pacote pode trafegar na rede por diferentes rotas e diferentes meios, esse tempo de chegada pode variar, implicando em uma diminuição de qualidade de serviço. A Figura 3.4 apresenta a transmissão de três pacotes e a ocorrência de *jitter* na transmissão do último pacote.

Para solucionar este problema um buffer de *jitter* é necessário para compensar esta variação de atraso. Quanto maior o *jitter* existente na transmissão maior deverá ser o buffer.

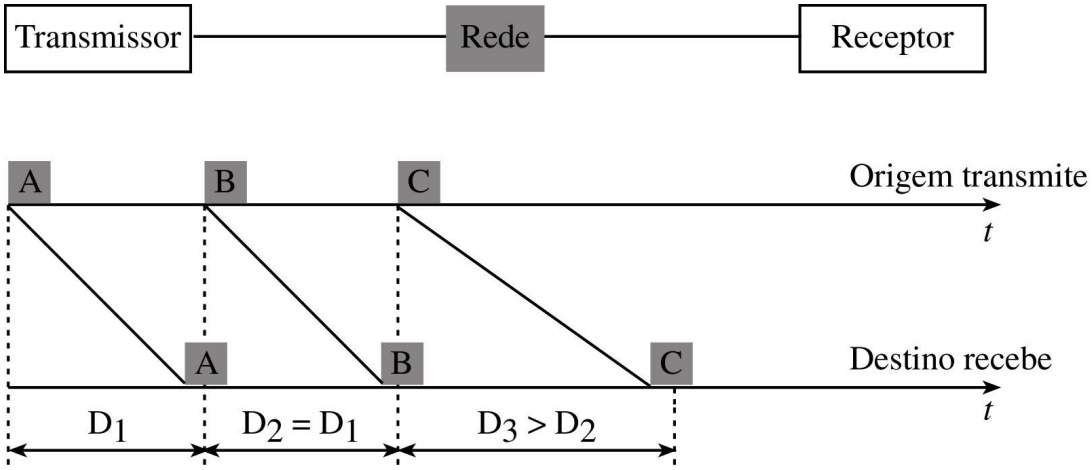

Figura 3.4 – Ocorrência de *Jitter* na Transmissão – Fonte (25)

3.3.3 Eco

De uma forma bastante simples, eco pode ser definido como sendo a repetição do som causada pela reflexão do sinal e que é claramente percebida como um sinal distinto do transmitido originalmente. Este fenômeno causa um desconforto para os interlocutores em uma transmissão de voz, podendo inclusive comprometer severamente a qualidade da transmissão de forma a inviabilizá-la.

Para eliminar este problema, supressores de eco devem ser utilizados. Atualmente os fabricantes de equipamentos de rede de pacotes para transmissões VoIP implementam supressores de eco que podem ser configurados de acordo com as características da rede.

3.3.4 Perda de Pacotes

A perda de pacotes é um fator crítico que implica diretamente na qualidade de serviço e ocorrem constantemente em uma rede de pacotes. Existem vários fatores que podem levar à perda de um pacote IP, como por exemplo, congestionamento da rede, falhas nos enlaces de dados, falhas em equipamentos de transmissão como roteadores ou *swicthes*, entre outros.

Para minimizar o problema de perda de pacotes em transmissões de voz são utilizadas técnicas de compensação.

A estratégia de compensação, utilizada pelo G.729 do ITU-T (28), reinjeta o último pacote recebido de forma que o receptor não perceba a ocorrência de falha devido à perda de pacotes. Como a perda do pacote representa 20ms da voz transmitida o receptor normalmente não percebe a diferença na qualidade da voz. Por exemplo, em uma transmissão são enviados os pacotes 1, 2, 3 e 4, porém o pacote 4 não chega ao destino. A estação receptora aguarda um intervalo de tempo, que varia de acordo com o tamanho do *buffer* de *jitter* e então executa a estratégia de compensação, reinjetando o pacote 3.

Esta técnica de compensação somente pode ser utilizada quando apenas um pacote é perdido. No caso de vários pacotes serem perdidos é necessário aguardar a chegada de outros pacotes.

De uma forma geral o ITU-T recomenda taxas de perda inferior a 5% para o estabelecimento de uma conversão satisfatória.

3.3.5 Largura de Banda

A largura de banda é um fator essencial para que se tenha uma qualidade de serviço em conversações telefônicas. A largura de banda para a transmissão de voz pode

ser calculada facilmente de acordo com informações de amostragem, algoritmos de compressão e etc.

Por exemplo, o *codec* G.729 com duas amostras de 10ms consome 20 *bytes* por quadro. Considerando os cabeçalhos IP/UDP/RTP adiciona-se 40 *bytes* a cada quadro, resultando em um consumo de banda de 24Kbps.

É importante ressaltar que na maioria do tempo a banda disponível nas redes é utilizada também por outras aplicações que podem ser de tempo real ou não. Devido a esta natureza de utilização, mecanismos de QoS tornam-se essenciais para transmitir voz em uma rede de pacotes.

A Tabela 3.2 apresenta a largura de banda consumida dependendo do *codec* e da quantidade de amostras utilizadas.

Tabela 3.2 – Largura de Banda Consumida x Codec

Codec	**Banda Consumida**
G.729 com uma amostra de 10ms/quadro	40 Kbps
G.729 com quatro amostras de 10ms/quadro	16 Kbps
G.729 com duas amostras de 10ms/quadro	24 Kbps
G.711 com uma amostra de 10ms/quadro	112 Kbps
G.711 com duas amostras de 10ms/quadro	96 Kbps

Fonte: (25)

4 Análise Experimental

Para analisar o desempenho de uma rede 802.11 com a implementação de mecanismos de QoS foi utilizado um simulador de redes.

O simulador utilizado neste trabalho foi o *Network Simulator – 2* (NS-2). O NS-2 é um simulador gratuito e de código aberto amplamente utilizado em experimentos acadêmicos e comerciais para avaliação de redes computacionais (29).

4.1 Simulador de rede NS-2

O NS-2 é um simulador de eventos discretos concebido para gerar e analisar redes computacionais. O NS-2 provê suporte para simulações TCP/UDP, roteamentos, protocolos *multicast*, dentre diversas outras características, a partir da utilização de redes cabeadas e redes sem fio. O NS-2 pode ser utilizado em plataforma Windows, através do aplicativo Cygwin, ou plataforma Linux.

Para a criação dos cenários de simulação, deve ser utilizado um arquivo do tipo *Tool Command Language* (TCL) que descreve todo o ambiente a ser analisado e estabelece informações como topologia, quantidade de nós, configuração dos enlaces, tipo de protocolo de roteamento, taxas de transmissão, tipo de dados, protocolo de transporte, entre outras configurações.

Após a execução da simulação o NS-2 gera arquivos de saída contendo informações sobre a simulação realizada. Estas informações podem variar de acordo com as configurações estabelecidas no arquivo de criação dos cenários. Basicamente o NS-2 gera dois arquivos de saída: um de extensão NAM e outro de extensão TR.

4.1.1 Arquivos de Entrada

Para qualquer simulação realizada com o NS-2 um arquivo do tipo TCL deve ser gerado. Este arquivo obrigatoriamente deverá conter todas as características e eventos do cenário simulado.

As características que devem ser descritas incluem:

- Número de estações na rede;
- Características dos *links* entre as estações;
- Características da camada física;
- Características da camada de enlace;
- Protocolo de roteamento;
- Características do tráfego de dados entre estações;
- Tempo de simulação;
- Instante de tempo de início e fim da troca de dados;
- Características de mobilidade das estações;
- Variáveis de saída.

A Figura 4.1 apresenta um exemplo de simulação para uma rede sem fio.

Neste exemplo é criado um ambiente de rede sem fio padrão IEEE 802.11g com taxa de 54 Mbps. Neste ambiente foram criadas quatro estações em uma topologia *ad hoc*. A simulação tem duração de 250 segundos e nos instantes 1 e 1,2 são iniciadas as aplicações do tipo *Constant Bit Rate* (CBR) entre as estações *n*0 e *n*2.

```
# Definindo Parametros Wireless
set val(chan)   Channel/WirelessChannel    ;# channel type
set val(prop)   Propagation/TwoRayGround   ;# radio-propagation model
set val(netif)  Phy/WirelessPhy            ;# network interface type
set val(mac)    Mac/802_11                 ;# MAC type
set val(ifq)    Queue/DropTail/PriQueue
set val(ll)     LL                         ;# link layer type
set val(ant)    Antenna/OmniAntenna        ;# antenna model
set val(ifqlen) 20                         ;# max packet in ifq
set val(nn)     4                          ;# number of mobilenodes
set val(rp)     DSDV                       ;# routing protocol
```

```
set val(x)      250                         ;# Dimensão X da Topografia
set val(y)      250                         ;# Dimensão Y da Topografia
set val(stop)   250                         ;# Tempo de duração da simulação
em segundos
#---------------------------------------------------------------------
# Definindo Parametros de Camada Fisica - IEEE 802.11g

Mac/802_11 set CWMin_     15
Mac/802_11 set CWMax_     1023
Mac/802_11 set SlotTime_  0.000009
Mac/802_11 set SIFS_      0.000010
Mac/802_11 set PreambleLength_ 16
Mac/802_11 set PLCPHeaderLength_ 24
Mac/802_11 set PLCPDataRate_ 54M
Mac/802_11 set dataRate_ 54M
Mac/802_11 set basicRate_ 54M
Mac/802_11 set ShortRetryLimit_ 7
Mac/802_11 set LongRetryLimit_ 4
Mac/802_11 set CCAtime_ 4us

# Inicializando variaveis
set ns_     [new Simulator]
$ns_ use-newtrace
# Abrindo Arquivos Trace
set trace [open sim1.tr w]
$ns_ trace-all $trace
# Arquivos NAM
set nam [open sim1.nam w]
$ns_ namtrace-all-wireless $nam $val(x) $val(y)

# Definindo Topografia
set topo       [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)
#
# Criando God
create-god $val(nn)

# Criação do Canal
set chan_1_ [new $val(chan)]

# Criando os nós e conectando-os ao canal - A quantidade de nós criadas
será a especificada em set val(nn); na qual nn representa o número de nós
# Configuração dos Nós

        $ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
                   -llType $val(ll) \
                   -macType $val(mac) \
                   -ifqType $val(ifq) \
                   -ifqLen $val(ifqlen) \
                   -antType $val(ant) \
                   -propType $val(prop) \
                   -phyType $val(netif) \
                   -channel $chan_1_ \
                   -topoInstance $topo \
                   -agentTrace ON \
                   -routerTrace ON \
                   -macTrace OFF \
                   -movementTrace ON

for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {
            set node_($i) [$ns_ node]
```

```
            $node_($i) random-motion 0         ;# desabilita random motion
      }
# Coordenadas iniciais da localização dos nós (X,Y, Z=0)
$node_(0) set X_ 85.0
$node_(0) set Y_ 85.0
$node_(0) set Z_ 0.0
$node_(1) set X_ 75.0
$node_(1) set Y_ 180.0
$node_(1) set Z_ 0.0
$node_(2) set X_ 145.0
$node_(2) set Y_ 160.0
$node_(2) set Z_ 0.0
$node_(3) set X_ 170.0
$node_(3) set Y_ 80.0
$node_(3) set Z_ 0.0

# Criando a posição inicial dos nós no NAM
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
      $ns_ initial_node_pos $node_($i) 10
}

set udp1 [new Agent/UDP]
set null1 [new Agent/LossMonitor]
$ns_ attach-agent $node_(0) $udp1
$ns_ attach-agent $node_(2) $null1
$ns_ connect $udp1 $null1

set udp2 [new Agent/UDP]
set null2 [new Agent/LossMonitor]
$ns_ attach-agent $node_(2) $udp2
$ns_ attach-agent $node_(0) $null2
$ns_ connect $udp2 $null2

# Link - Trafego - Fluxo
# trafego CBR
#Fluxo UDP1
set cbr1 [new Application/Traffic/CBR]
$cbr1 set packetSize_ 260
$cbr1 set interval_ 0.020
$cbr1 attach-agent $udp1

#Fluxo UDP2
set cbr2 [new Application/Traffic/CBR]
$cbr2 set packetSize_ 260
$cbr2 set interval_ 0.020
$cbr2 attach-agent $udp2

$ns_ at 1.0 "$cbr1 start"
$ns_ at 1.2 "$cbr2 start"

$ns_ at 248.0 "$cbr1 stop"
$ns_ at 248.5 "$cbr2 stop"

#Informando aos nós sobre o fim da simulação
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns_ at $val(stop) "$node_($i) reset";
}

#Finalizando a Simulação e o NAM
$ns_ at $val(stop) "$ns_ nam-end-wireless $val(stop)"
$ns_ at $val(stop) "finish"
```

```
$ns_ at $val(stop).01 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"

proc finish {} {
    global ns_ trace f1 nam
    $ns_ flush-trace
    close $trace
    close $f1
    close $nam
    exec nam sim1.nam
    exit 0
}
$ns_ run
```

Figura 4.1 – Arquivo TCL Exemplo de Simulação no NS-2

4.1.2 Arquivo de Visualização

O NS-2 possui incluído em seu pacote o aplicativo NAM. Este aplicativo tem por finalidade permitir a visualização gráfica da simulação gerada através do arquivo TCL.

A Figura 4.2 apresenta o aplicativo NAM com o cenário simulado apresentado no arquivo TCL da Figura 4.1

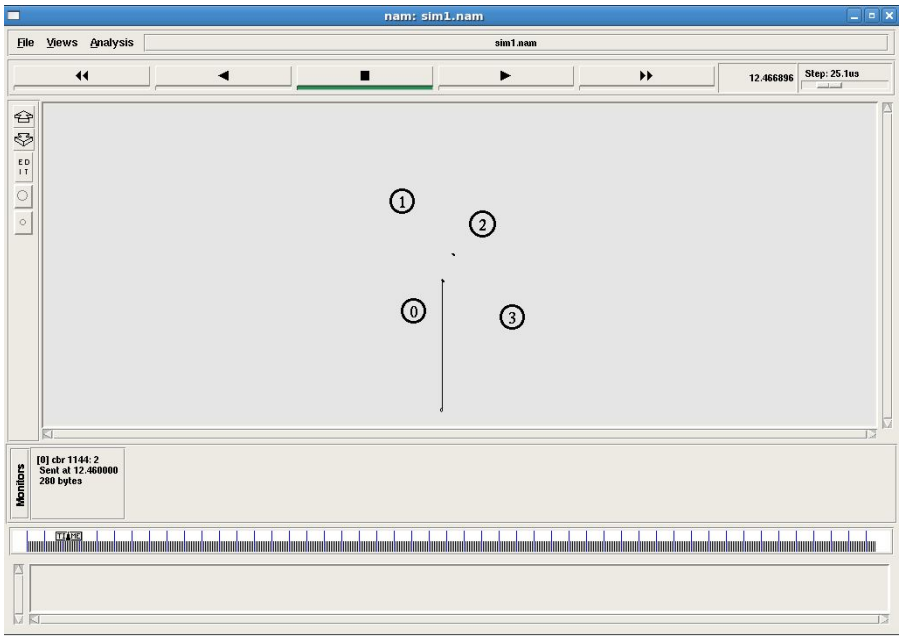

Figura 4.2 – Aplicativo NAM

Os pontos entre as estações *n*0 e *n*2 representam o fluxo de dados gerado entre elas. Através do NAM é possível navegar sobre o tempo e visualizar o percurso de um determinado pacote ou destacar o fluxo de uma aplicação específica para análise. Na figura 6.1 um pacote enviado do nó *n*2 para o nó *n*0 está sendo monitorado. O tamanho do pacote, tipo de aplicação e instante de tempo é apresentado na guia *Monitors* do NAM.

4.1.3 Arquivos de Saída

O NS-2 pode gerar as informações de saída em arquivos do tipo TR. Estes arquivos contêm informações sobre determinadas ocorrências durante a simulação. Todas as informações contidas nos arquivos TR devem ser declaradas nos arquivos TCL.

É possível, por exemplo, verificar a quantidade de pacotes perdidos em um nó específico durante o período de simulação. Normalmente estes resultados são apresentados em forma de uma tabela.

Também é possível gerar um arquivo TR definindo todas as informações calculadas pelo NS-2. Para isto no arquivo TCL deve ser incluída a linha *$ns trace-all [open <nome do arquivo.tr> w]*.

No arquivo gerado com a opção *trace-all* cada linha representa um evento gerado durante a simulação. Para esta dissertação foi utilizada a opção *trace-all* do NS-2 e que gera um arquivo de saída TR com estrutura apresentada na Figura 4.3.

Event	Time	From node	To node	Pkt type	Pkt size	Flags	Fid	Src addr	Dst addr	Seq num	Pkt id

Figura 4.3 – Estrutura do Arquivo Trace

Em que cada campo do arquivo gerado tem o significado descrito a seguir:

<event> Tipo de evento. Cada evento pode ser “+” (empilha no buffer), “-“ (desempilha do buffer) e “r” (entregue).

<Time> Instante de tempo em que o evento ocorreu.

<From Node> Identificação do nó que envia o pacote.

<To Node> Identificação do nó que recebe pacote.

<Pkt Type> Tipo de pacote. Pode ser “cbr”, “tcp” e etc.

<Pkt Size> Tamanho do pacote.

<Flags> Sinalizações adicionais do pacote, normalmente não utilizado.

<Fid> Identificação do fluxo.

<Src Addr> Identifica o nó de origem.

<Dst Addr> Identifica o nó de destino.

<Seq Num> Número de seqüência do pacote. Inclusive para pacotes UDP, para efeito de análise.

<Pkt Id> Identificação única do pacote.

Para analisar o arquivo de saída TR gerado nas simulações executadas neste trabalho foi utilizado o aplicativo Trace graph.

4.1.3.1 Aplicativo Trace Graph

O Trace graph é um aplicativo gratuito que pode ser utilizado em plataforma Linux ou Windows. Este aplicativo é um analisador de arquivos TR gerados pela simulação do NS-2 e oferece suporte à arquivos *trace* para redes cabeadas, redes sem fio, redes de satélites e redes cabeadas integradas à redes sem fio.

O Trace graph gera gráficos e estatísticas de atraso, *jitter, Round Trip Time*, tempo de processamento, número de nós intermediários e vazão, para toda a rede, para *links* e para estações individuais.

Todos os resultados estatísticos podem ser armazenados em arquivos texto e os gráficos podem ser armazenados em arquivos do tipo *jpeg*.

A Figura 4.4 apresenta a tela inicial do Trace graph, onde pode ser selecionado o tipo de pacote a ser analisado, a estação de destino e de origem e o intervalo de tempo da análise.

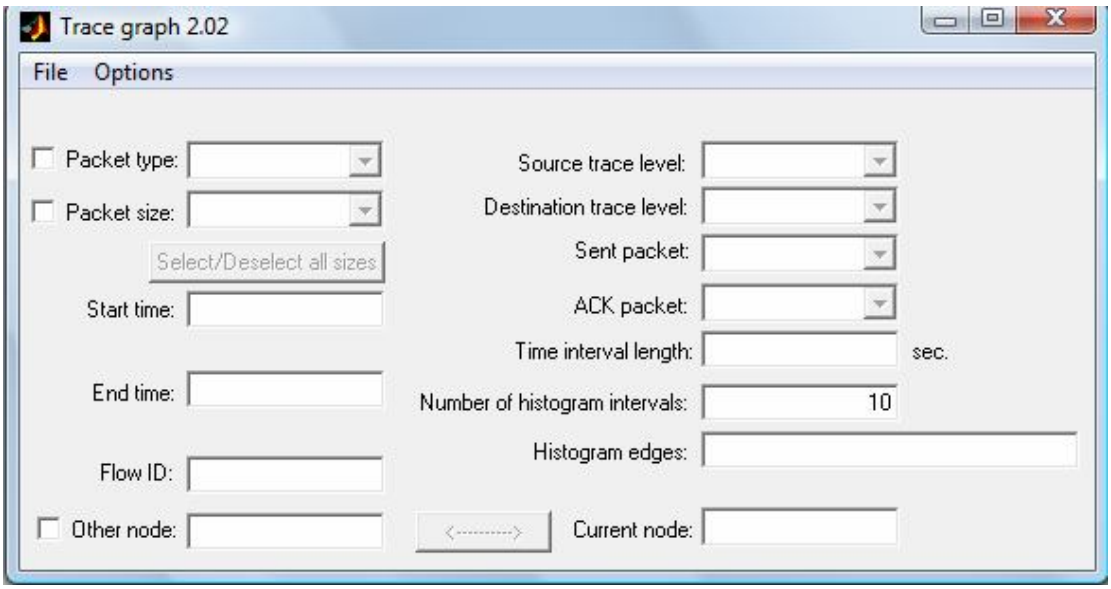

Figura 4.4 – Aplicativo Trace graph

4.2 Protocolo de Roteamento - DSDV

Os protocolos de roteamento têm por função informar aos nós qual o caminho que um pacote deve seguir para chegar ao seu destino. Porém, os protocolos de roteamento projetados para redes *ad hoc* têm que tratar problemas específicos desta topologia de rede, tais como, mobilidade dos nós e a existência de nós escondidos.

O tempo de convergência destes protocolos é fundamental no desempenho da rede, uma vez que devido à característica de mobilidade dos nós as rotas entre destino e origem são alteradas constantemente.

Considerando-se a maneira de estabelecimento das rotas e como as informações sobre estas rotas são mantidas existem dois tipos de protocolo de roteamento, são eles:

- Reativos: são protocolos de roteamento que executam a descoberta da rota entre destino e origem somente quando necessário. Como exemplo de protocolos de roteamento reativos podem ser citados o *Ad hoc On-Demand Distance Vector* (AODV) e o *Dynamic Source Routing* (DSR).

- Pró-ativos: são os protocolos de roteamento que trocam informações periódicas sobre a topologia da rede, desta forma todos os nós possuem conhecimento desta topologia e consequentemente mantém uma tabela de roteamento. Com isto cada nó pode identificar qual a melhor rota para encaminhar um pacote para o destino. Como exemplo de protocolo de roteamento pode ser citado o *Destination Sequenced Distance Vector* (DSDV).

O problema dos protocolos de roteamento pró-ativos é que existe uma troca constante de mensagens de controle na rede e consequentemente ocupa uma parte da banda disponível para a realização da troca destas mensagens. Com o crescimento do número de nós e a presença de mobilidade, esta ocupação de banda tende a aumentar consumindo recursos que poderiam ser utilizados para transmissão de dados. Já os protocolos de roteamento reativos exigem um menor número de mensagens trocadas na rede, portanto consome menos banda. Porém estes protocolos levam mais tempo para descobrir uma rota.

Para esta dissertação foi considerado o protocolo de roteamento DSDV.

A Tabela 4.1 apresenta um exemplo da tabela de roteamento armazenada em um nó quando utilizado o protocolo DSDV.

Tabela 4.1 – Tabela de Roteamento DSDV

Destino	Prox	Métrica	No. Seq.	Tempo	Estab. Dados
A	A	0	A-550	001000	Ptr_A
B	B	1	B-102	001200	Ptr_B
C	B	3	C-588	001200	Ptr_C
D	B	4	D-312	001200	Ptr_D

O significado de cada campo da tabela de roteamento é apresentado a seguir:

- **Destino**: aponta os possíveis nós que uma informação pode ser enviada;

- **Prox**: Indica para qual nó vizinho a informação deve ser enviada para que chegue ao destino;

- **Métrica**: Indica a quantos saltos o nó destino está do nó de origem;

- **Nº Seq**: Número criado pelo destino para evitar problemas de *loops*;

- **Tempo**: Utilizado para decidir se uma rota deve ser descartada ou não;

- **Estabilidade dos Dados**: aponta para uma tabela que mantém informações sobre a estabilidade daquela rota.

Para realizar a atualização de rotas, os nós anunciam periodicamente suas tabelas de rotas para seus vizinhos. BOUKERCHE (30) deixa claro que alguns eventos obrigam a divulgação imediata tais como rompimento de enlace, mudança de métrica e entrada de uma nova rota. Ao receber uma tabela de rota de um vizinho o nó deve avaliar quais atualizações deve realizar em sua própria tabela de rotas.

Esta atualização acontece de duas formas:

1- Se um destino possui um número de sequência mais novo do que o número que consta em sua própria tabela, a mesma é atualizada independentemente dos outros parâmetros da tabela. Desta forma o nó garante uma maior proximidade entre a sua tabela de rotas e a verdadeira topologia da rede.

2- Se o número de sequência para um destino for igual ao número de sequência existente em sua própria tabela, o nó analisará o campo métrica

e somente realizará a atualização de sua tabela se a nova métrica for menor que a existente em sua tabela.

Com o objetivo de minimizar a troca de mensagens de controle para atualização de rotas o protocolo DSDV pode enviar dois tipos de mensagens para atualizar as tabelas de rotas existentes nos nós da rede. São elas:

- *Incremental Update:* o nó envia somente as alterações que existiram em sua tabela desde o último envio. As informações são comprimidas em um único pacote e enviada para todos os vizinhos. Quando as informações de alteração não couberem mais em um único pacote o nó realiza uma atualização completa

- *Full Update:* o nó envia todas as informações contidas em sua tabela para todos os seus vizinhos.

4.3 Cenários de Simulação

Para analisar o comportamento das redes 802.11 e 802.11e foi utilizado o simulador NS-2 versão 2.31 instalado em um computador PC rodando sobre a plataforma LINUX Fedora Core 6, Kernel 2.6.22.

Como a versão utilizada do NS-2 não implementa o padrão IEEE 802.11e foi utilizada a classe desenvolvida por WIETHÖLTER (31), porém esta classe foi desenvolvida para a versão 2.26 e 2.28 do simulador NS-2, necessitando então ser recompilada para a versão 2.31.

A classe 802.11e utilizada, implementa como função de coordenação para acesso ao meio o EDCA e permite a geração de várias filas de tráfego utilizando os modelos existentes no simulador NS-2, permitindo que cada tráfego gerado possa ser associado a uma das quatro prioridades existentes no padrão 802.11e.

Para a classificação do tráfego gerado de acordo com a prioridade desejada os seguintes comandos foram adicionados ao arquivo de entrada TCL.

Set val (mac) Mac/802_11e: sinaliza para o simulador que deve ser utilizado o padrão 802.11e e a função de coordenação de acesso ao meio EDCA.

$udp set prio_ 0: utilizado para classificar o tráfego UDP como prioridade 0, ou seja máxima prioridade de transmissão.

$tcp set prio_ 2: utilizado para classificar o tráfego TCP como prioridade 2, ou seja prioridade de transmissão de tráfego *best effort*.

O comando de prioridade deve ser utilizado para cada fluxo de dados gerado na simulação.

Nesta dissertação foram simulados dois tipos de tráfego: tráfego de voz com prioridade 0 e tráfego de dados com prioridade 2.

Para simular o tráfego de prioridade 0, classificado no padrão 802.11e como voz, foi utilizado como base o tamanho da amostra de voz gerada pelo *codec* G.711 (32), isto é 160 *bytes* e transmissão a cada 20 ms, desta forma o tráfego foi classificado como CBR no arquivo TCL. Foi considerada a pilha de protocolos RTP/UDP/IP o que acrescenta mais 40 *bytes* ao cabeçalho do pacote de voz gerado. Considerando-se os cabeçalhos das camadas mais baixas para a utilização do padrão 802.11g acrescenta-se mais 60 *bytes* ao pacote resultando em um pacote final com tamanho de 260 *bytes*. Os fluxos de voz foram estabelecidos de forma a existir troca de dados entre as duas estações em ambos os sentidos, simulando assim o estabelecimento de um diálogo.

Para simular o tráfego de prioridade 2, classificado no padrão 802.11e como dados, foi utilizado um pacote de 1500 *bytes*. Como protocolo de transporte foi utilizado o TCP simulando uma aplicação FTP. Os dados são transmitidos continuamente e os fluxos foram estabelecidos sempre se considerando um receptor e um transmissor, de forma a não existir uma única estação transmissora.

Para analisar o desempenho da rede sem fio foram criados cenários onde todas as estações são fixas e cenários onde apenas uma estação apresenta mobilidade.

4.3.1 Cenários com Estações Fixas

Para todos os cenários simulados foram utilizadas as seguintes características básicas:

- Taxa de Transmissão de 54 Mbps, padrão 802.11g;
- Tempo de simulação de 250 segundos;
- Topologia *ad hoc*;
- Protocolo de Roteamento DSDV;
- Área de 250m x 250m.

Inicialmente foi estabelecido um cenário com somente 4 estações em um ambiente de 250m x 250m. Estas 4 estações inicialmente trocam somente tráfego de voz e o tráfego de dados foi incrementado progressivamente de forma a estabelecer um crescimento gradativo da concorrência de tráfegos até que todas as estações trocassem tráfego de dados e voz simultaneamente.

A partir deste cenário inicial foi realizado o acréscimo de estações ao ambiente obtendo-se cenários com 4, 8, 16, 20, 24 e 30 estações. Para cada um destes cenários foi repetido o processo de troca de tráfegos, isto é, inicialmente todas as estações trocam o tráfego de voz enquanto o tráfego de dados é aumentado de forma gradativa.

Não existe a obrigatoriedade de uma mesma estação estabelecer a troca de tráfego de dados e voz com o mesmo receptor. Para esta primeira análise todas as estações estão fixas no ambiente.

A distribuição das estações no ambiente e com qual estação o tráfego de voz ou de dados foi estabelecido é determinado de forma aleatória, portanto no mesmo ambiente existem estações muito próximas trocando tráfego e também estações fisicamente distantes trocando informações.

Todos os cenários foram simulados utilizando o padrão 802.11g com taxa de 54 Mbps tendo o DCF como função de coordenação para o acesso ao meio. Depois os mesmos cenários foram simulados novamente tendo o padrão 802.11e com EDCA

como função de coordenação de acesso ao meio, implementando QoS na rede sem fio.

4.3.2 Cenários com Estação Móvel

Para avaliação do desempenho da rede sem fio com a presença de mobilidade foram utilizados os cenários com 4 e com 30 estações.

Para todos os cenários simulados foram utilizadas as seguintes características básicas:

- Taxa de Transmissão de 54 Mbps, padrão 802.11g;
- Tempo de simulação de 250 segundos;
- Topologia *ad hoc*;
- Protocolo de Roteamento DSDV;
- Área de 250m x 250m;
- Estação 3 móvel.

Para cada cenário a variação de mobilidade ocorreu apenas na estação 3, onde foram estabelecidas três variações de mobilidades. A primeira variação possui a estação 3 próxima da estação 1. A estação 3 inicia um movimento constante com velocidade de 0,68 m/s. Com esta velocidade a estação 3 percorre uma distância de 135 metros.

A segunda variação estabelece uma velocidade um pouco maior para a estação 3, fazendo com que a estação percorra uma distância de 213 metros com uma velocidade constante de 1,06 m/s. E por fim a terceira variação estabelece uma velocidade de deslocamento de 1,31 m/s tendo a estação 3 percorrido uma distância de 263 metros ao final da simulação.

A Figura 4.5 apresenta as variações de deslocamento da estação 3 em relação à estação 1.

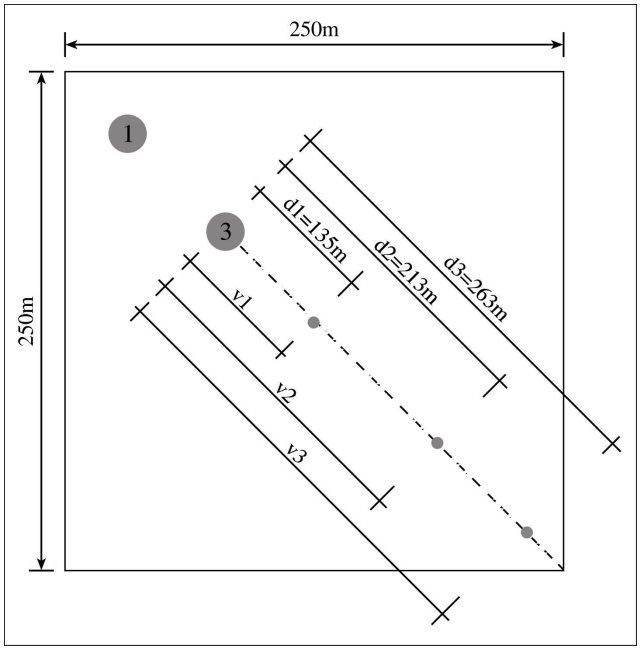

Figura 4.5 – Variação de Deslocamento da Estação 3

Para cada uma das três variações de mobilidade foram estabelecidos três tipos de transmissões:

- Transmissão 1: todas as estações estabelecem transmissão de tráfego de voz;

- Transmissão 2: todas as estações permanecem com transmissão de tráfego de voz e a estação 3 inicia a transmissão de tráfego de dados simultaneamente. Esta transmissão é estabelecida com a estação 1;

- Transmissão 3: todas as estações estabelecem transmissão de voz e dados.

Todos os cenários e as variações foram simulados utilizando o padrão 802.11g com taxa de 54 Mbps tendo o DCF como função de coordenação para o acesso ao meio. Depois os mesmos cenários foram simulados novamente tendo o padrão 802.11e com EDCA como função de coordenação de acesso ao meio, implementando QoS na rede sem fio.

5 Resultados

Este capítulo tem como objetivo a apresentação dos resultados coletados pela simulação dos cenários descritos no capítulo 4.

A análise realizada tem como objetivo verificar o impacto que o acréscimo de estações ao ambiente, a existência de transmissão de tráfego de dados e voz simultaneamente e a presença de mobilidade acarretam na taxa de perda de pacotes e no atraso.

5.1 Resultados dos Cenários com Estações Fixas

O Gráfico 5.1 apresenta o comportamento da rede sem fio em relação à taxa de perda de pacotes. Neste cenário existe somente transmissão de tráfego VoIP e o número de estações é acrescido gradativamente.

Pode ser observado que para o ambiente com 4 estações a taxa de perda é maior que para o ambiente com 30 estações, isto ocorre porque para o ambiente com 4 estações, a estação 1 estabelece um fluxo de voz com a estação 3 e as mesmas estão fisicamente distantes influenciando negativamente na taxa de perda. Quando o ambiente possui 30 estações passam a existir estações intermediárias que garantem a entrega dos pacotes gerados pela estação 1 para a estação 3.

É possível observar também que a taxa de perda quando o padrão 802.11e é utilizado pode ser considerada igual a taxa de perda de quando não é utilizado o padrão 802.11e, isto ocorre pela simples razão de que como não existe diferentes tipos de tráfegos não existe priorização para transmissão dos mesmos, ou seja, todo o tráfego gerado pelas estações tem a mesma prioridade.

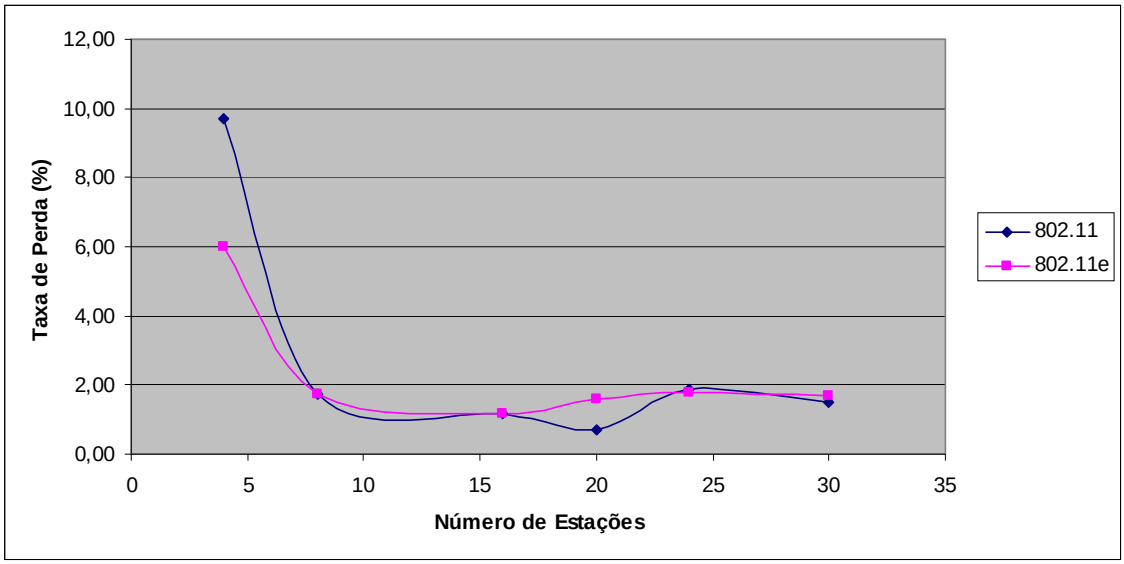

Gráfico 5.1 – Taxa de Perda de Pacotes VoIP – Tráfego VoIP

O Gráfico 5.2 apresenta o atraso dos pacotes para o mesmo ambiente do Gráfico 5.1. É possível observar que o atraso aumenta conforme são acrescidas estações ao ambiente. Novamente a utilização do padrão 802.11e não acarreta em melhora de desempenho devido a não existência de concorrência de tráfegos classificados com prioridades diferentes.

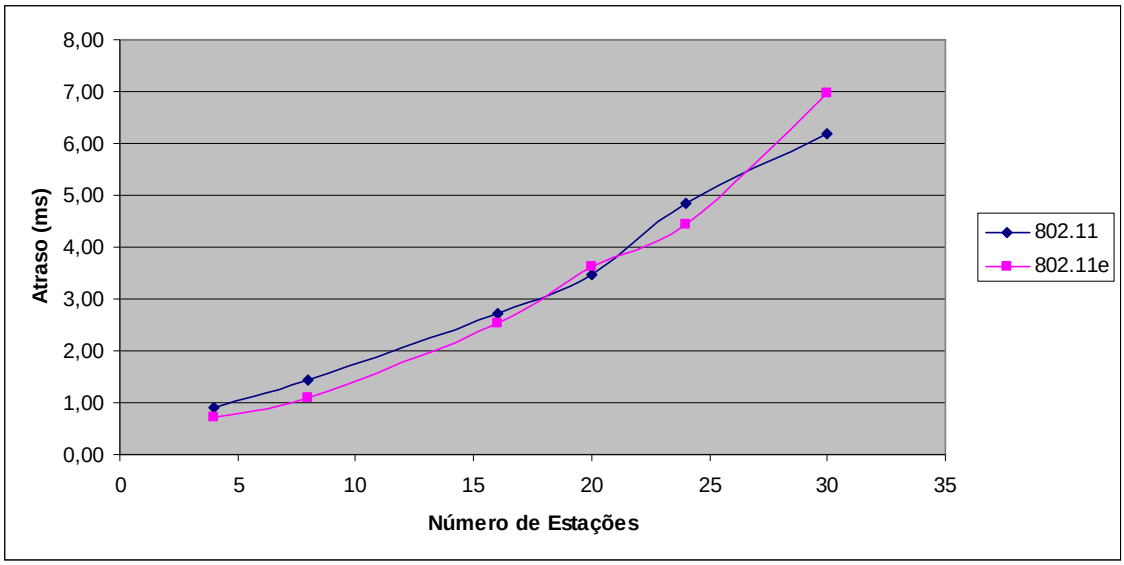

Gráfico 5.2 – Atraso dos Pacotes VoIP – Tráfego VoIP

O Gráfico 5.3 apresenta o atraso dos pacotes VoIP em um cenário com 8 estações. Neste cenário todas as estações estabelecem tráfego VoIP e são acrescidos

gradativamente os fluxos de dados – TCP. A simulação foi realizada com a classificação de pacotes e sem a classificação de pacotes.

É possível observar que quando é utilizado o mecanismo de QoS do padrão 802.11e o atraso permanece praticamente constante e com valores bem inferiores. Quando todas as estações estão ativas com tráfego de voz e dados, o atraso dos pacotes VoIP sem a utilização do padrão 802.11e é de 27 ms, enquanto que com a utilização do padrão 802.11e o atraso cai para aproximadamente 2 ms.

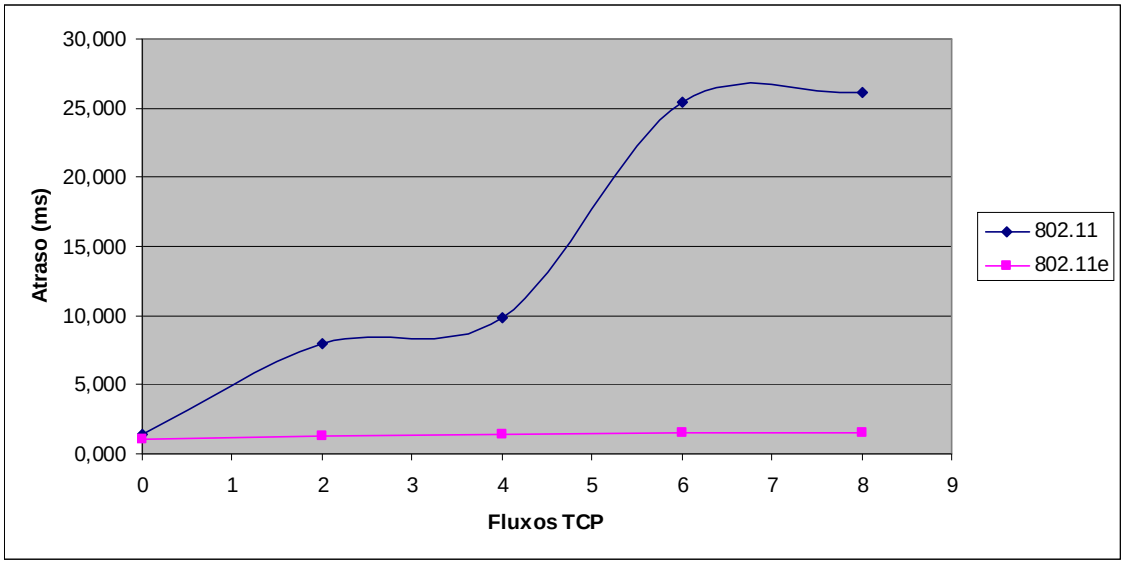

Gráfico 5.3 – Atraso dos Pacotes VoIP – Ambiente 8 Estações e Concorrência de Tráfego

O Gráfico 5.4 apresenta a taxa de perda dos pacotes VoIP para o mesmo cenário apresentado no Gráfico 5.3. Da mesma forma que a utilização do padrão 802.11e influencia positivamente no atraso dos pacotes, a taxa de perda também tem significativa melhora. Quando todas as estações estão ativas de forma a possuírem tráfego de voz e dados a taxa de perda quando é utilizado o padrão 802.11e é de 2% enquanto que a não utilização do padrão 802.11e implica em uma taxa de perda de 14%.

Mesmo quando apenas duas estações estabelecem a troca de tráfego classificado como dados, existe ganho na utilização do padrão 802.11e. Para este caso a taxa de perda dos pacotes VoIP quando utilizado o padrão 802.11e cai de 6% para 2%.

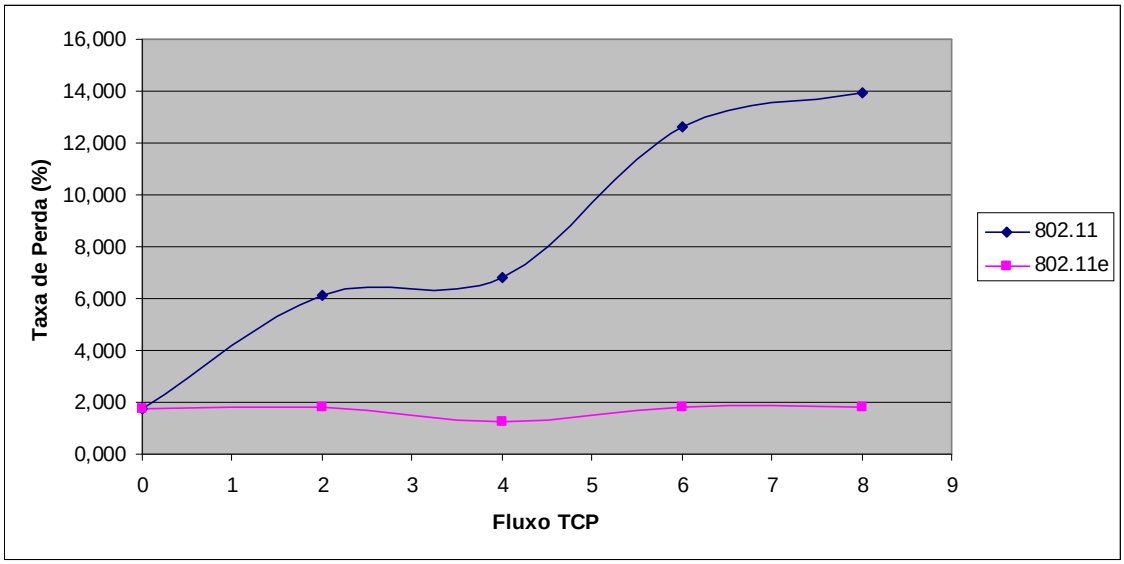

Gráfico 5.4 – Taxa de Perda dos Pacotes VoIP – Ambiente 8 Estações e Concorrência de Tráfego

Os Gráficos 5.3 e 5.4 deixam evidentes os benefícios da utilização do padrão 802.11e para o tráfego VoIP, porém é necessário avaliar o impacto causado nos pacotes de dados – TCP. Este impacto é apresentado nos Gráficos 5.5 e 5.6

O Gráfico 5.5 apresenta o atraso dos pacotes de dados para o mesmo cenário analisado nos gráficos 5.3 e 5.4.

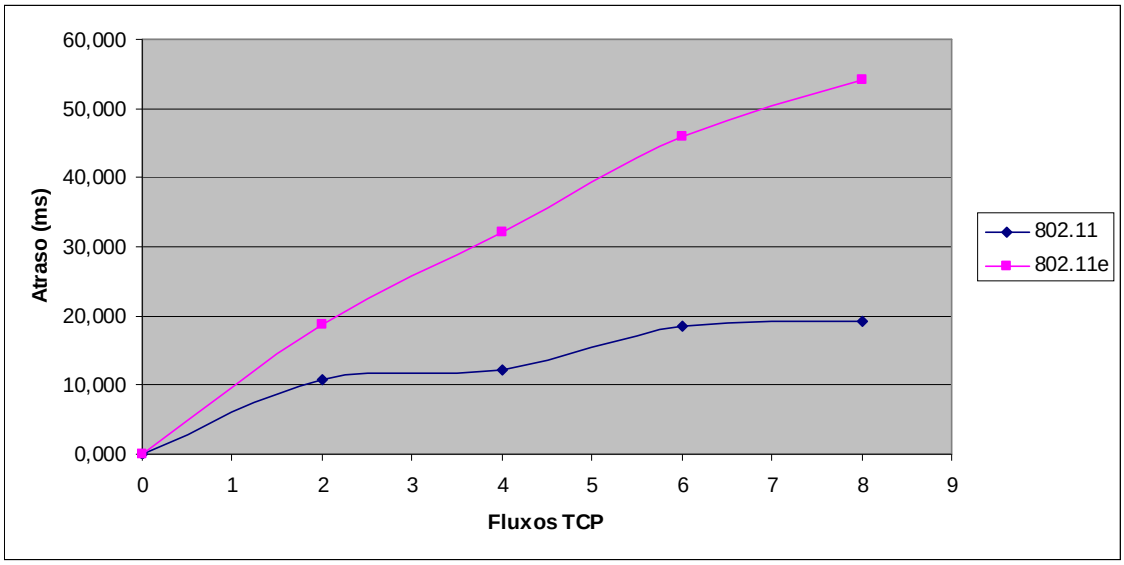

Gráfico 5.5 – Atraso dos Pacotes de Dados – Ambiente 8 Estações e Concorrência de Tráfego

É possível observar que para os pacotes de dados, quando o padrão 802.11e é utilizado, o atraso aumenta significativamente. Isto ocorre porque o padrão 802.11e

prioriza a transmissão do tráfego de voz e consequentemente o tráfego de dados é penalizado.

Para permitir que o atraso dos pacotes VoIP seja reduzido, o atraso do pacote de dados sobe de 20 ms para 55 ms.

É possível observar através do Gráfico 5.6 que o mesmo efeito ocorre com a taxa de perda, isto é o padrão 802.11e para priorizar a transmissão dos pacotes VoIP penaliza os pacotes de dados.

Para este cenário a taxa de perda dos pacotes de dados sobe de 2,5% para aproximadamente 4%.

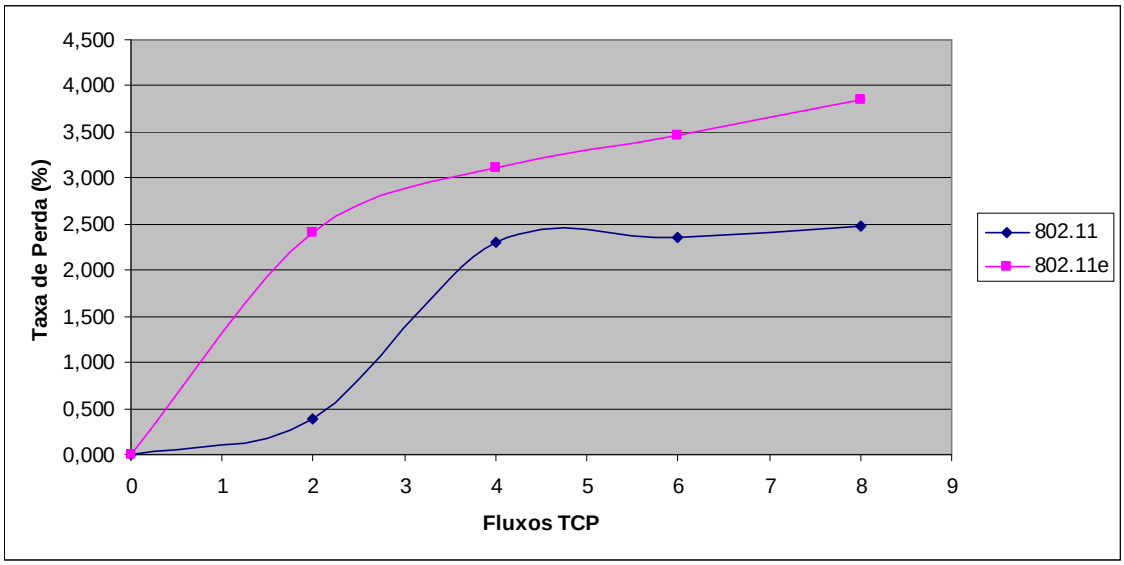

Gráfico 5.6 – Taxa de Perda dos Pacotes de Dados – Ambiente 8 Estações e Concorrência de Tráfego

Para avaliar os efeitos do aumento do número de estações no ambiente foram desenhados os gráficos referentes ao cenário com 30 estações.

O Gráfico 5.7 apresenta o atraso dos pacotes VoIP para o cenário com 30 estações, onde inicialmente todas as estações estabelecem transmissão VoIP e gradativamente são acrescentadas as transmissões de dados, de forma que todas as estações possuam transmissões VoIP e de dados concorrendo pelo acesso ao meio.

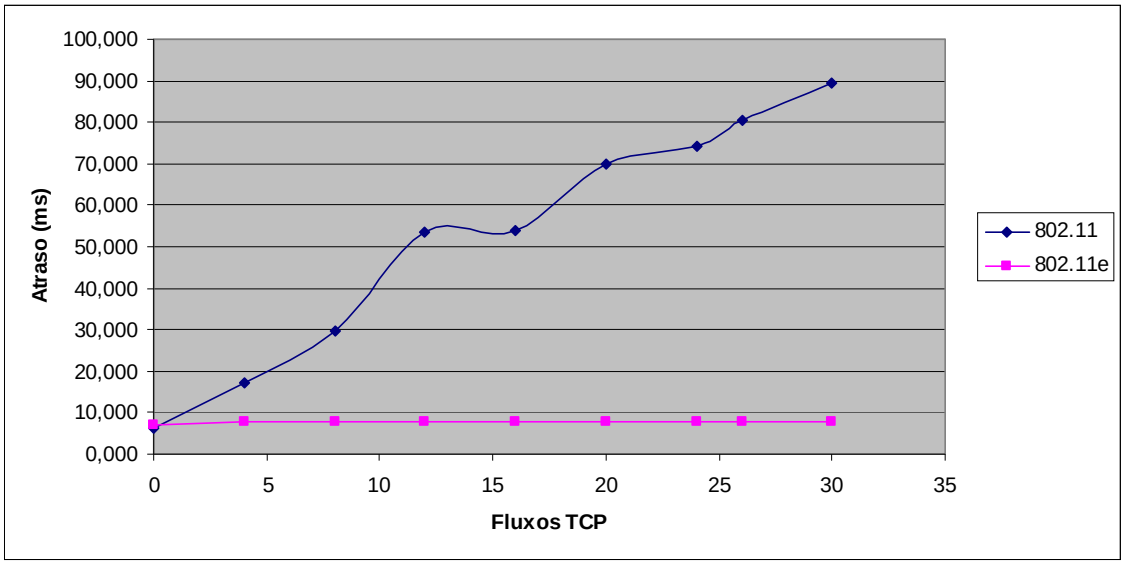

Gráfico 5.7 – Atraso dos Pacotes VoIP – Ambiente 30 Estações e Concorrência de Tráfego

Através do Gráfico 5.7 é possível analisar que a utilização do protocolo 802.11e contribui significativamente na transmissão VoIP. O atraso dos pacotes diminuiu de 90 ms para 8 ms. Também existiu melhora na variação do atraso conforme novos fluxos de dados são inseridos no ambiente, quando todas as estações transmitem somente pacotes VoIP o atraso é da ordem de 7 ms e quando todas as 30 estações transmitem pacotes VoIP e pacotes de dados o atraso é da ordem 8 ms.

Ao comparar as medidas do Gráfico 5.7 com as medidas do Gráfico 5.3 é possível verificar como o acréscimo de estações influencia no atraso dos pacotes VoIP e conseqüentemente no desempenho das redes sem fio padrão 802.11 mesmo quando o padrão 802.11e é utilizado. Enquanto que para 8 estações o atraso máximo obtido, sem a utilização de QoS, foi de 27 ms. Quando o número de estações aumenta para 30 este atraso sobe para 90 ms, ocasionado apenas pelo aumento na concorrência pelo meio.

O Gráfico 5.8 apresenta a taxa de perda dos pacotes VoIP para o mesmo cenário, isto é 30 estações transmitindo pacotes VoIP e acréscimo gradual da transmissão de dados.

É possível observar que a taxa de perda dos pacotes VoIP aumenta significativamente com o aumento das transmissões de dados de forma a inviabilizar a existência de um ambiente com 30 estações estabelecendo fluxos de VoIP e dados simultaneamente. Sem a utilização de mecanismos de QoS não é possível 30

estações transmitem pacotes VoIP e 6 delas transmitirem simultaneamente pacotes de dados, pois a taxa de perda dos pacotes VoIP para este caso é de 10%. Com a utilização dos mecanismos de QoS do padrão 802.11e o número de estações que podem estabelecer transmissão simultaneamente de pacotes VoIP e pacotes de dados sobe para 15, portanto existe um ganho de 2,5 vezes no número de estações.

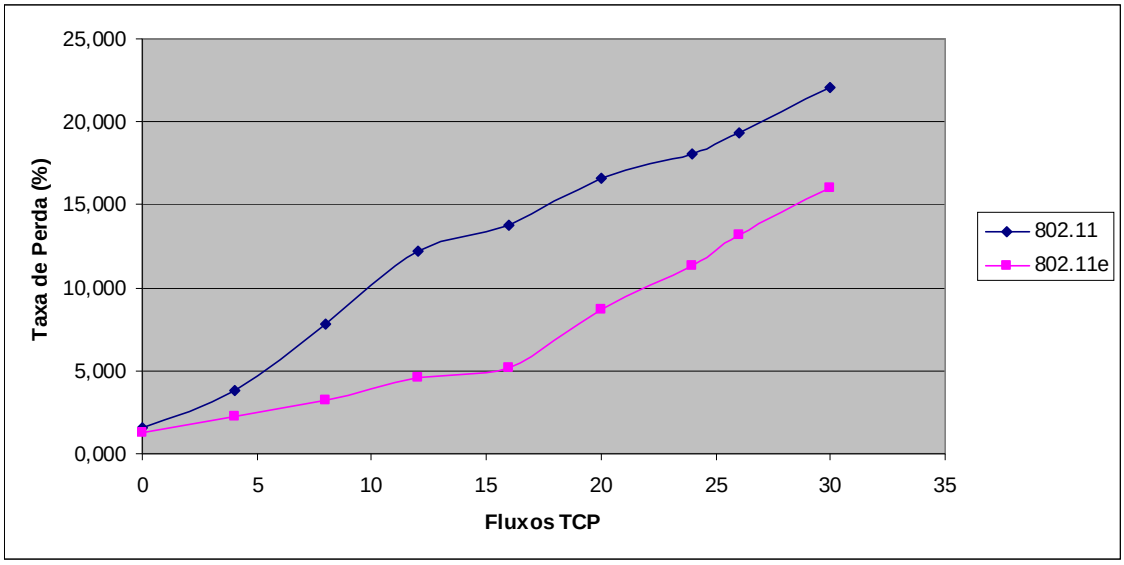

Gráfico 5.8 – Taxa de Perda dos Pacotes VoIP – Ambiente 30 Estações e Concorrência de Tráfego

O Gráfico 5.9 e o Gráfico 5.10 apresentam respectivamente o atraso e a taxa de perda dos pacotes de dados para o cenário com 30 estações.

Novamente fica clara a penalização sofrida pelos pacotes de dados quando é utilizado o padrão 802.11e.

Com os mecanismos de QoS o atraso dos pacotes de dados sobe de 68 ms para 300 ms quando todas as estações estabelecem os dois tipos de transmissão, VoIP e dados. Em relação à taxa de perda a mesma sobe de 4% para aproximadamente 16%.

Considerando que a análise dos pacotes VoIP evidenciou que, quando utilizando os mecanismos de QoS, para este cenário as taxas de perda e atraso permanecem em níveis aceitáveis quando existe 30 estações transmitindo VoIP e até 15 estações transmitindo simultaneamente dados, é possível observar que para este caso específico o atraso dos pacotes de dados é de 200 ms e a taxa de perda é de 7%.

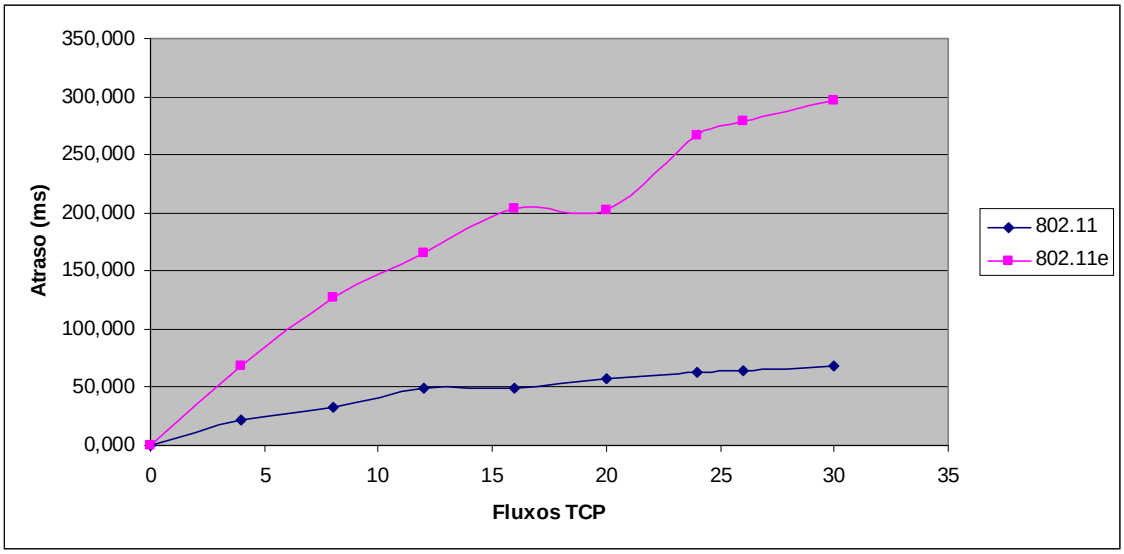

Gráfico 5.9 – Atraso dos Pacotes de Dados – Ambiente 30 Estações e Concorrência de Tráfego

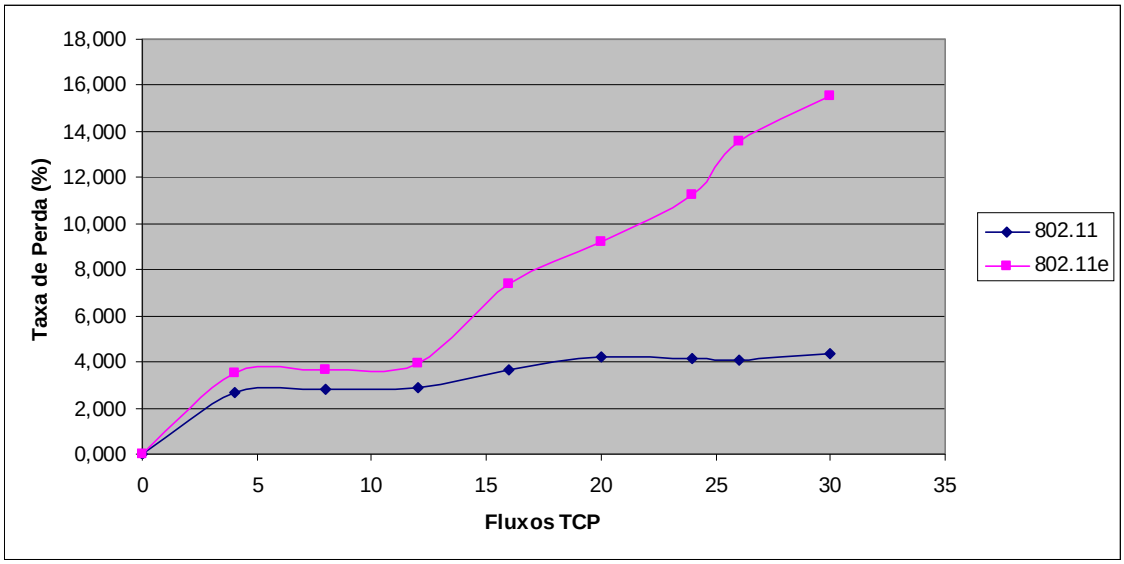

Gráfico 5.10 – Taxa de Perda dos Pacotes de Dados – Ambiente 30 Estações e Concorrência de Tráfego

5.2 Resultados dos Cenários com Estação 3 Móvel

O Gráfico 5.11 apresenta o atraso dos pacotes VoIP para a estação 3, em um ambiente com 30 estações em que todas as estações estabelecem transmissão de voz e dados, em função da distância percorrida por esta mesma estação durante a execução da simulação.

A distância percorrida pela estação 3 é sempre em relação a estação 1, uma vez que a transmissão de dados e VoIP ocorrem entre estas duas estações.

O atraso medido para os pacotes VoIP da estação 3 aumentam de acordo com a distância que a mesma está da estação 1. Porém quando é utilizado o padrão 802.11e o atraso tem uma queda significativa. Para a menor distância entre as estações que é de aproximadamente 25 metros o atraso cai de 42 ms com o padrão 802.11 para 2 ms com o padrão 802.11e. Para a maior distância entre as estações os atrasos são de 65 ms e 4 ms respectivamente.

Quando a estação 3 está em movimento o roteamento das mensagens entre a estação de origem e a estação de destino é alterado constantemente, porém todas as estações estão operando de acordo com o padrão 802.11e fazendo com que o tráfego da estação 3 tenha prioridade sobre o tráfego de dados gerado pelas estações intermediárias.

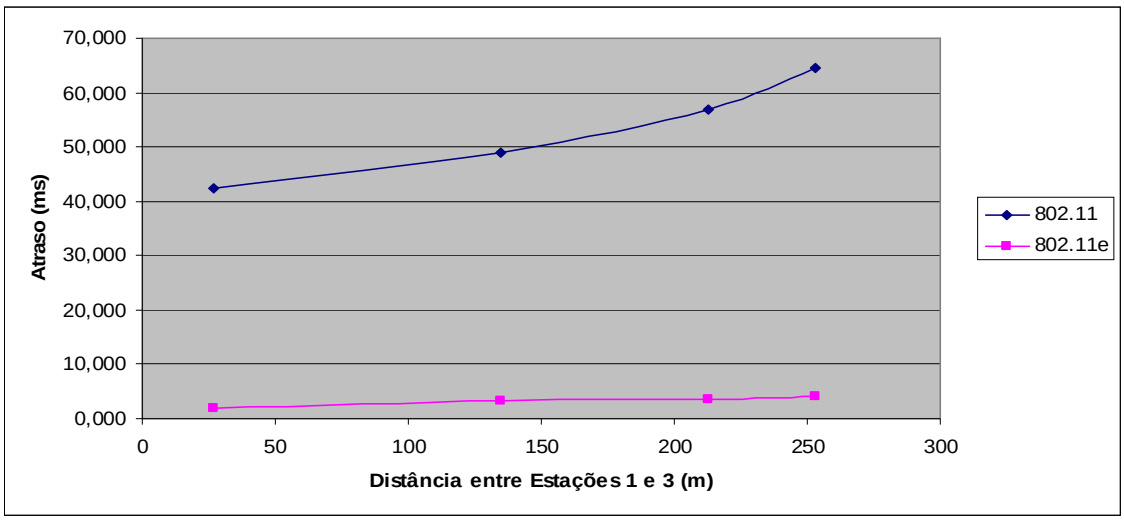

Gráfico 5.11 – Atraso dos Pacotes VoIP – Estação 3 Móvel – Cenário 30 Estações

O Gráfico 5.12 apresenta a taxa de perda dos pacotes VoIP para a mesma simulação. Neste gráfico é possível observar que o mesmo efeito percebido com o atraso também é percebido com a taxa de perda de pacotes. Porém apesar da taxa de perda ter sido reduzida, praticamente pela metade com a utilização do padrão 802.11e, a transmissão de pacotes VoIP torna-se inviável a partir de 120 m de distância aproximadamente. Isto porque para esta distância a taxa de perda atinge o valor de 5%.

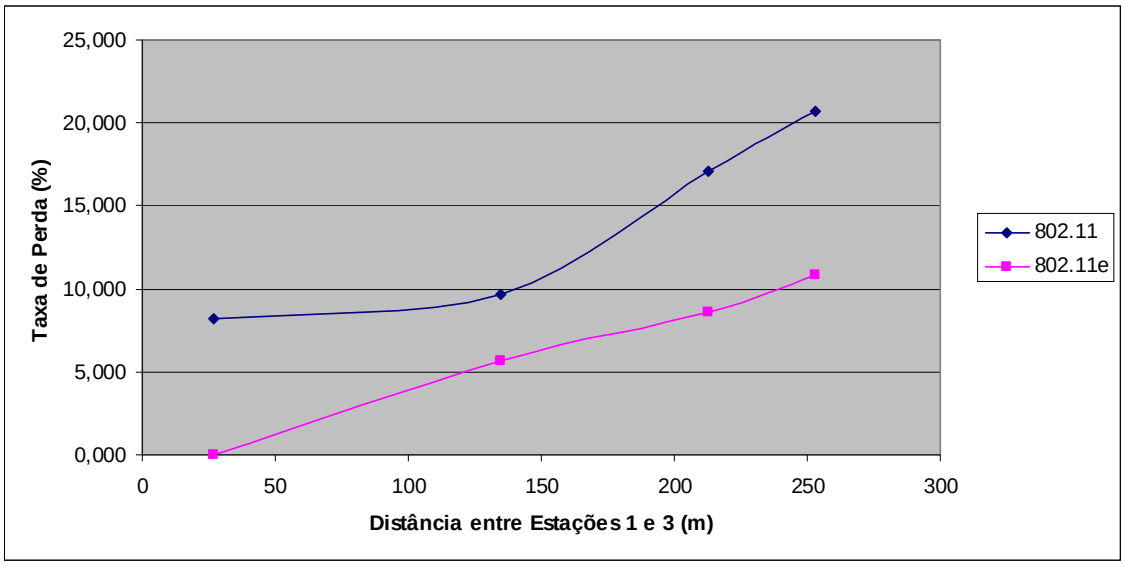

Gráfico 5.12 – Taxa de Perda dos Pacotes VoIP – Estação 3 Móvel – Cenário 30 Estações

Os Gráficos 5.13 e 5.14 apresentam o comportamento do tráfego de dados para o mesmo cenário.

Neste caso o atraso aumenta significativamente com a distância quando o padrão 802.11e é utilizado, ou seja, independentemente da estação 3 ser móvel ou fixa, o tráfego de dados é penalizado para que o tráfego VoIP possa ser priorizado.

A taxa de perda dos pacotes sofre o mesmo impacto que o atraso, tendo como taxa máxima o valor de 11% de perda quando utilizado o padrão 802.11e em oposição ao valor de aproximadamente 5% quando não existem mecanismos de QoS.

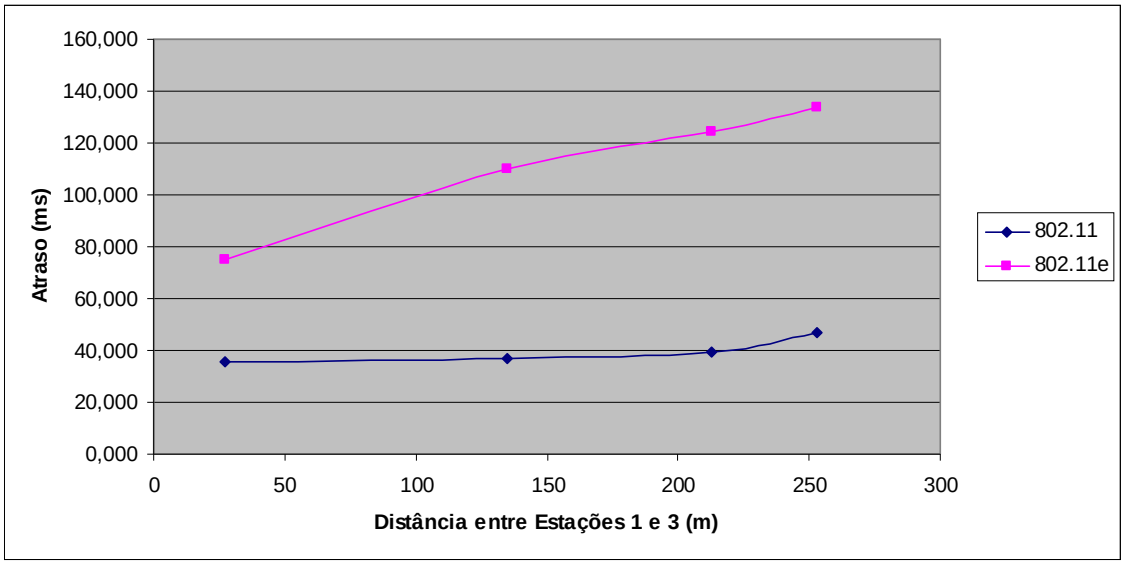

Gráfico 5.13 – Atraso dos Pacotes de Dados – Estação 3 Móvel – Cenário 30 Estações

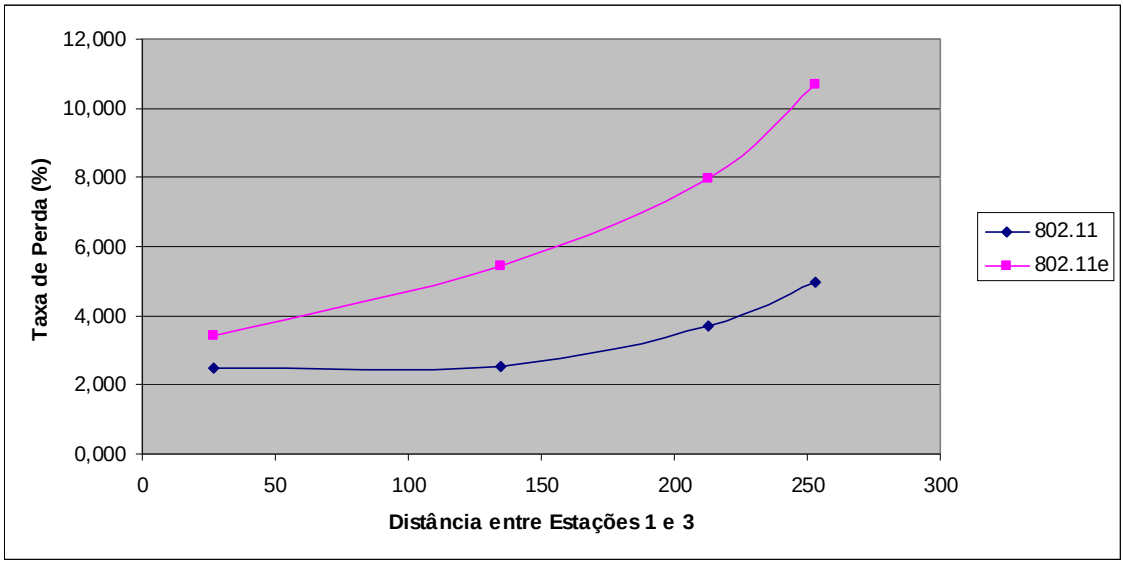

Gráfico 5.14 – Taxa de Perda dos Pacotes de Dados – Estação 3 Móvel – Cenário 30 Estações

Os Gráficos 5.15 e 5.16 apresentam a relação entre os pacotes gerados e os pacotes enviados em função da distância entre as estações 1 e 3. Respectivamente é apresentada a relação para os pacotes VoIP e para os pacotes de dados.

O Gráfico 5.15 mostra que com o padrão 802.11 mesmo quando as estações estão próximas não é possível enviar todos os pacotes gerados, deixando clara a disputa entre o tráfego VoIP e o tráfego de dados pelo acesso ao meio. Com o padrão 802.11e esta disputa diminui, e o número de pacotes gerados que são enviados

aumenta, mesmo com a distância entre as estações aumentando o padrão 802.11e continua a beneficiar o envio dos pacotes VoIP.

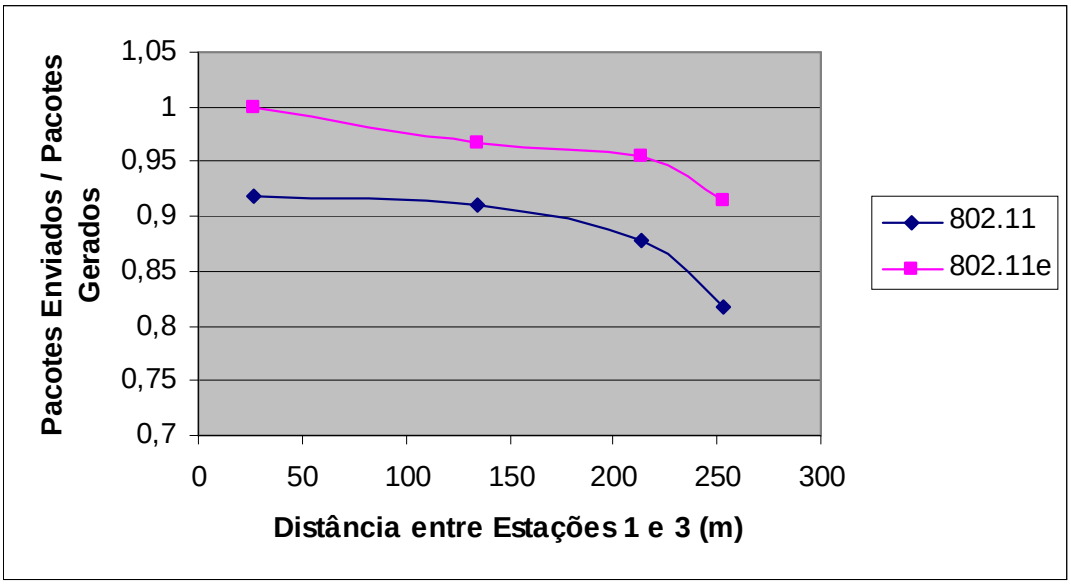

Gráfico 5.15 – Relação dos Pacotes VoIP Enviados e Gerados – Cenário 30 Estações

O Gráfico 5.16 mostra exatamente o efeito contrário com os pacotes de dados, deixando clara a penalização dos pacotes de dados.

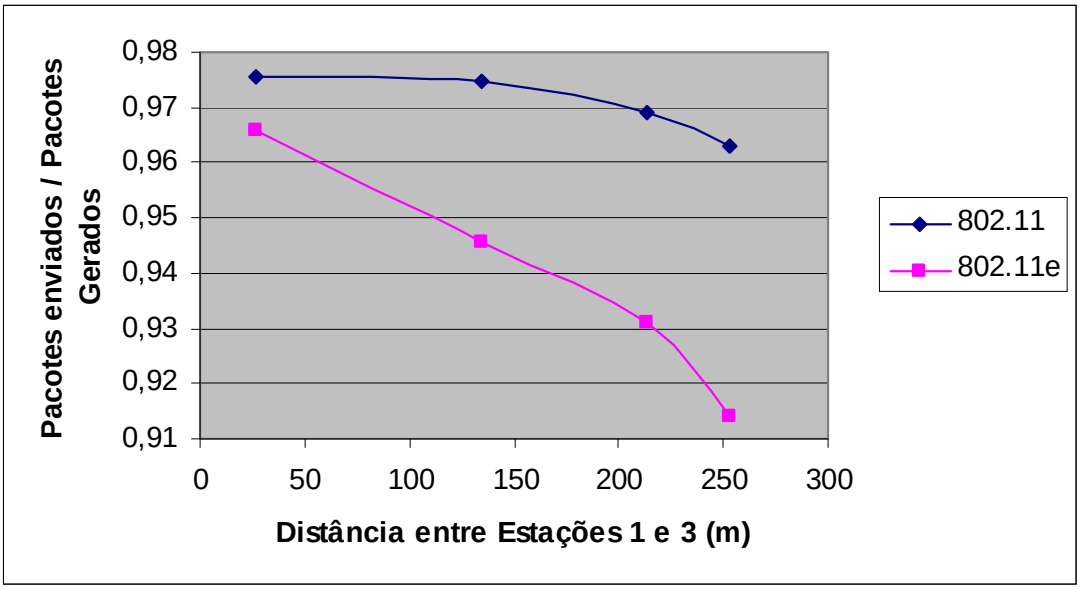

Gráfico 5.16 – Relação dos Pacotes de Dados Enviados e Gerados – Cenário 30 Estações

O Gráfico 5.17 e o Gráfico 5.18 apresentam respectivamente o atraso e a taxa de perda para os pacotes VoIP, para o cenário com 4 estações em que todas as estações estabelecem transmissão de voz e de dados.

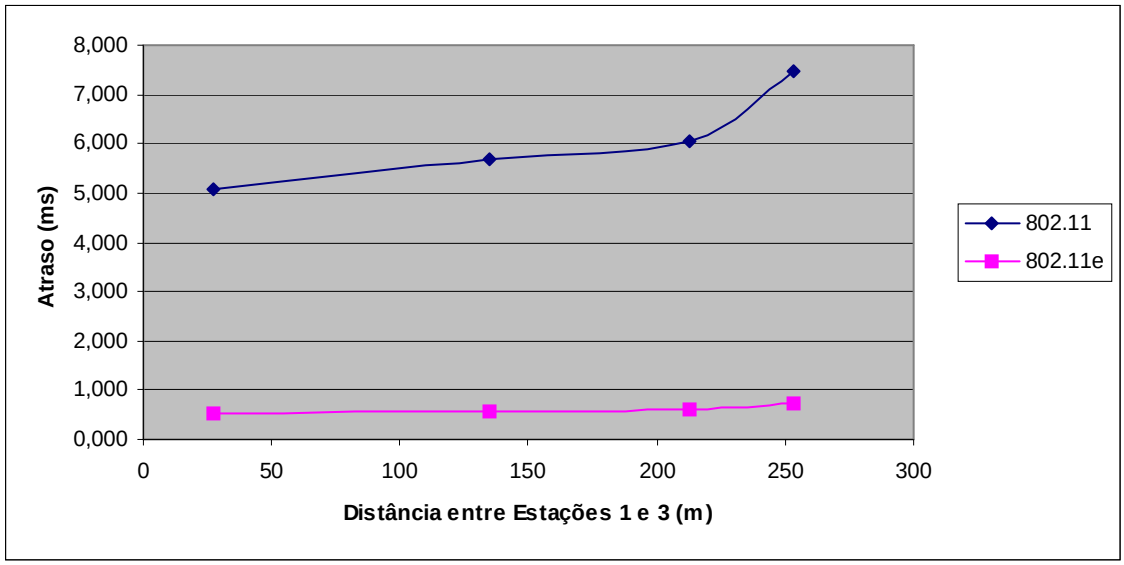

Gráfico 5.17 – Atraso dos Pacotes VoIP – Estação 3 Móvel – Cenário 4 Estações

É possível observar que a taxa de perda para os pacotes VoIP aumentam em função da distância. Porém neste cenário o principal fator causador destas perdas é a distância, uma vez que a geração de tráfego por apenas quatro estações não inviabiliza as transmissões, conforme demonstrado nos resultados obtidos com as estações fixas.

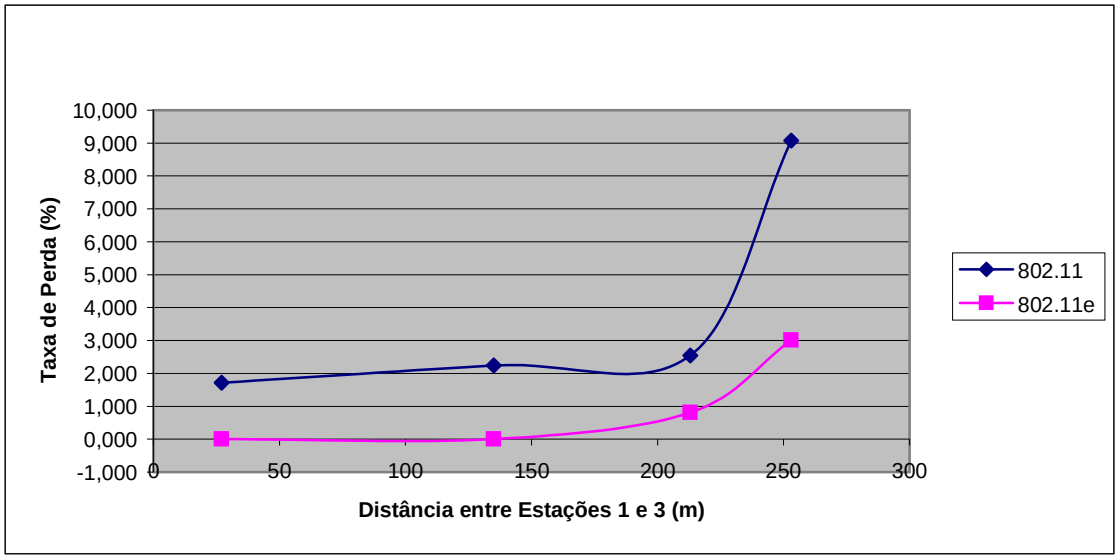

Gráfico 5.18 – Taxa de Perda dos Pacotes VoIP – Estação 3 Móvel – Cenário 4 Estações

O Gráfico 5.19 e o Gráfico 5.20 apresentam respectivamente o atraso e a taxa de perda para os pacotes de dados, para o cenário com 4 estações em que todas as estações estabelecem transmissão de voz e de dados.

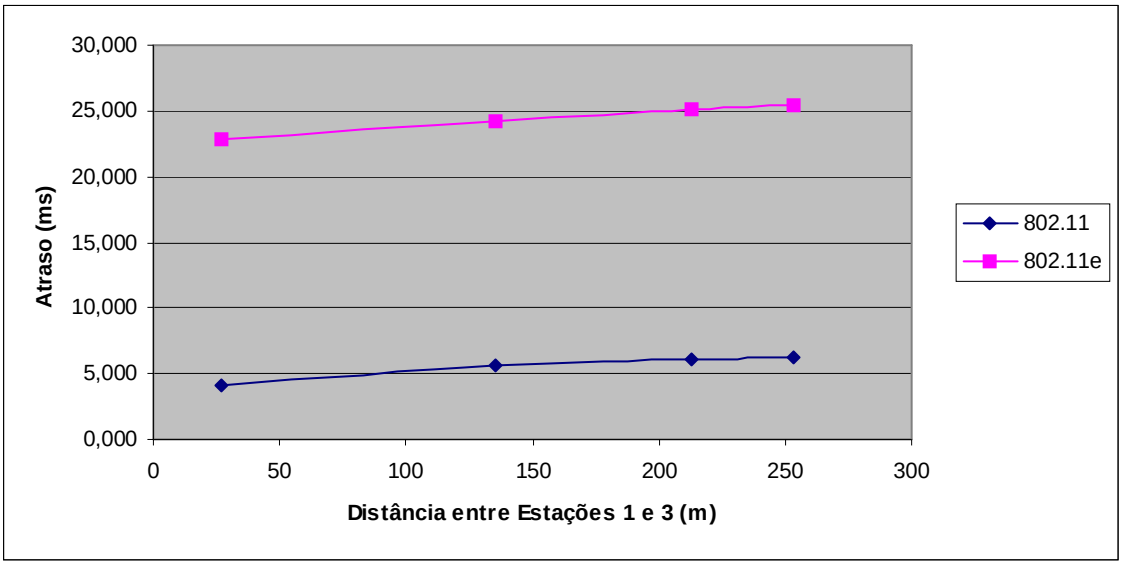

Gráfico 5.19 – Atraso dos Pacotes de Dados – Estação 3 Móvel – Cenário 4 Estações

O atraso e a taxa de perda dos pacotes TCP também aumentam em função da distância. Como no caso dos pacotes VoIP os pacotes TCP tem como principal fator a distância, porém para estes pacotes quando o protocolo 802.11e é utilizado tanto a perda quanto o atraso são maiores, devido a priorização do tráfego VoIP.

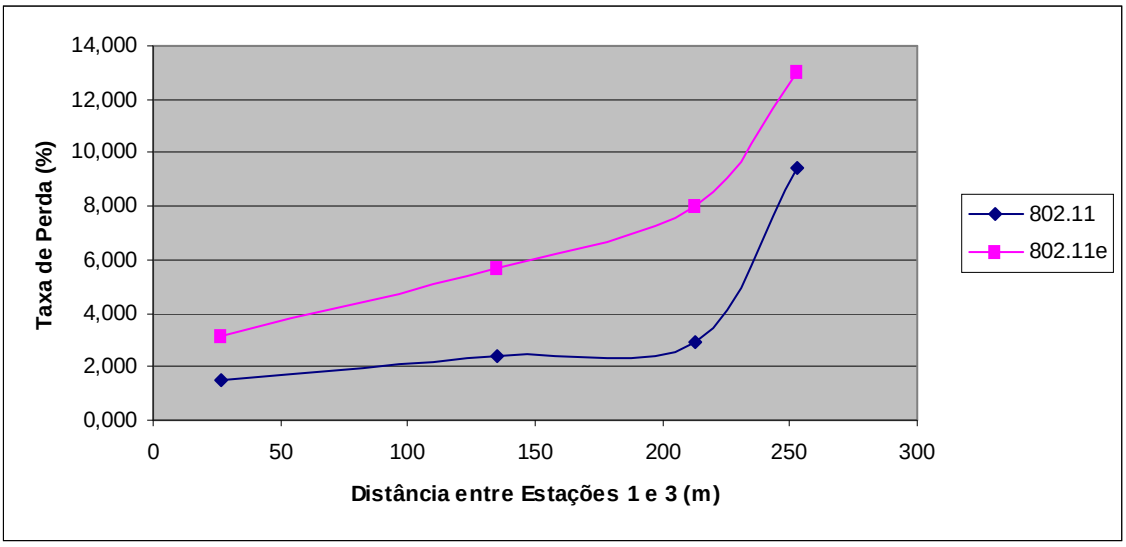

Gráfico 5.20 – Taxa de Perda dos Pacotes de Dados – Estação 3 Móvel – Cenário 4 Estações

6 Conclusões

A partir das simulações realizadas foi constatado que as transmissões de voz em redes 802.11 sem mecanismos de qualidade de serviço ficam comprometidas em ambientes com muitas estações e com a presença da concorrência de tráfego de voz e de dados no mesmo ambiente.

Com base nos resultado obtidos ficam evidentes os benefícios do padrão 802.11e para as transmissões VoIP.

É possível reduzir o atraso de transmissão, diminuir a taxa de perda de pacotes e por consequência viabilizar o aumento do número de estações no ambiente que podem transmitir pacotes VoIP e pacotes de dados simultaneamente.

Para os ambientes estudados a utilização do padrão 802.11e propiciou um aumento de 2,5 vezes no aumento do número de estações que conseguem estabelecer simultaneamente fluxos de dados e voz com níveis satisfatórios de qualidade de serviço. Este número é de 6 estações para o padrão 802.11 e de 15 estações para o padrão 802.11e.

Estes níveis de qualidade foram estabelecidos com base nas recomendações do ITU-T que determinam que para o estabelecimento de uma transmissão VoIP o atraso fim-a-fim não deve ser superior a 150 ms e a taxa de perda de pacotes VoIP não deve ser superior a 5%. É importante observar que o número de 15 estações é limitado pela taxa de perda que atinge o valor de 5%, mas o atraso de 8 ms continua dentro dos critérios recomendados.

Todos estes benefícios, apesar de verdadeiros, podem na prática não serem possíveis de se obter, isto porque para que os pacotes VoIP possam ser beneficiados os pacotes de dados classificados no padrão 802.11e como prioridade 2 são drasticamente penalizados.

Para efeito de comparação, para o mesmo número de estações analisadas o tráfego de dados passa a ter um atraso de 200 ms em oposição ao atraso de 50 ms quando não é utilizado o padrão 802.11e e a taxa de perda sobe de 3,5% para 7% quando é utilizado o padrão 802.11e.

Para a maioria das aplicações estas taxas podem ser aceitáveis, porém para aplicações militares que transmitem por exemplo, plano de voo a taxa de perda de 7% inviabiliza a transmissão.

Ficou claro também que a distância percorrida por uma estação influencia diretamente no atraso e na taxa de perda dos pacotes, porém a utilização do padrão 802.11e traz benefícios para a mobilidade, aumentando inclusive a distância que uma estação de origem pode estar da estação de destino, desde que existam nós intermediários que possibilitem o roteamento dos pacotes.

Este aumento é possível porque os nós intermediários também passam a priorizar o tráfego VoIP que deve ser roteado em detrimento de outros tipos de tráfegos com prioridades mais baixas e que estas estações podem estar transmitindo.

6.1 Contribuições

Este trabalho contribui para o entendimento do comportamento das redes sem fio com topologia *ad hoc* quando utilizado os mecanismos de QoS que o padrão 802.11e oferece, auxiliando desta forma na tomada de decisão de quando utilizar os mecanismos de QoS implementados no padrão 802.11e avaliando suas limitações e efeitos causados na transmissão dos dados classificados com prioridades mais baixas.

Além disso acrescentou-se um roteiro para a compilação da classe 802.11e utilizada neste trabalho com o objetivo de auxiliar futuras análises que necessitem da classe 802.11e no NS-2.

6.2 Trabalhos Futuros

Este trabalho avaliou uma rede 802.11 com topologia *ad hoc* em um ambiente livre de interferências e sem impactos de topologia. Como trabalhos futuros poderão ser estudados os impactos que a topologia do ambiente exerce sobre o desempenho da rede, causando interferências que podem ocasionar uma maior taxa de perda, atraso ou até mesmo impossibilitando a comunicação entre duas estações.

É interessante também a realização de um estudo que considere uma rede 802.11 híbrida, isto é com estações em topologia *ad hoc* e estações que se associam ao *Access Point*.

Do ponto de vista dos mecanismos de QoS é interessante a realização de um estudo que avalie o impacto da transição das estações entre BSS nas transmissões estabelecidas com priorização de tráfego e o comportamento do tráfego de tempo real em ambientes mistos, isto é, que possuam estações com mecanismos de QoS e estações sem mecanismos de QoS.

REFERÊNCIAS

1 Wi-Fi Alliance. **College Students Say Wi-Fi has Become a Fixture on Campus**. Disponivel em: <http://www.wi-fi.org/pressroom_overviwe.php?newsid=723>. Acesso em: 31 dez. 2008.

2 Wi-Fi Alliance. **Global Appetite for Interoperable and Protecded Wi-Fi pushes Wi-Fi certified to 5,000- product milestone.** Disponivel em: <http://www.wi-fi.org/pressroom_overviwe.php?newsid=743>. Acesso em: 31 dez. 2008.

3 SKYPE. São Paulo. Apresenta o software SKYPE. Disponível em : <http://www.skype.com/intl/pt/>. Acesso em out. 2007.

4 MEDEPALLI, K. et al. Voice Capacity of IEEE 802.11b, 802.11a and 802.11g Wireless LANs. In: GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE, GLOBECOM´04, 2004. **Anais GLOBECOM´04:** IEEE, nov. 2004. V. 3, p 1549-1553, 2004.

5 KIM, J.; TODE, H.; MURAKAMI, K. Friendly Coexistence of Voice and Data Traffic in IEEE 802.11 WLANs. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, n. 2, V. 52, p 347-354, jul. 2006.

6 KAWARA, T. et al. Using Dynamic PCF to Improve the Capacity for VoIP Traffic in IEEE 802.11 Networks. In: WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 2005. **Anais WCNC. 2005**: IEEE, maio 2005. V. 3, p 1589-1595.

7 LI, C.; LI, J.; CAI, X. Performance Evaluation of IEEE 802.11 WLAN – High Speed Packet Wireless Data Network for Supporting Voice Service. In: WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 2004. **Anais WCNC 2004**: IEEE, mar. 2004. V. 3, p 1463-1468.

8 ANSI, IEEE **Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements.** IEEE Std 802.11e. New York, 2005. 211 p.

9 MALONE, I.; LEITH, D. Experimental Evaluation of 802.11e EDCA for Enhanced Voice over WLAN Performance. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MODELING AND OPTIMIZATION IN MOBILE, AD HOC AND WIRELESS NETWORKS, 4., 2006. **Anais WiOpt 2006**: IEEE, abr. 2006. p.1-7.

10 DAVCEVSKI, M.; JANEVSKI, T. Analysis of IEEE 802.11e QoS in multimedia environment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TELECOMMUNICATIONS IN MODERN SATELLITE CABLE AND BROADCASTING SERVICES, 7., 2005. **Anais TELSIKS 2005:** IEEE, set. 2005. V. 1, p. 45 – 48.

11 LAN, Y. et al. Performance enhancement of IEEE 802.11e EDCA by contention adaption. In: VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 2005. **Anais VTC 2005**: IEEE, jun. 2005. V. 3, p. 2096- 2100.

12 KYUNG, H.; SEO, S.; PARK, S. QoS (quality-of-service) improvement in IEEE 802.11e enhanced distributed channel access (EDCA). In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGY, 2004. **Anais ISCIT 2004**: out. 2004. V. 1, p. 302- 307.

13 PAVÓN, J. P.; SHANKAR, S. Impact of Frame Size, Number of Stations and Mobility on the Throughput Performance of IEEE 802.11e. In: WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 2004. **Anais WCNC 2004**: IEEE mar. 2004. V. 2, p. 789-795.

14 LIANG, H.M. et al. Performance Evaluation of 802.11e EDCF in Infrastructure Mode with Real Audio/Video Traffic. In: INTERNATIONAL CONFERENCE on NETWORKING AND SERVICES, 2006. **Anais ICNS´06**: set. 2006. p 92.

15 GURIJALA, A.; MOLINA, C. Defining and Monitoring QoS Metrics in the Next Generation Wireless Networks. In: TELECOMMUNICATIONS QUALITY OF SERVICES: THE BUSINESS OF SUCCESS – QoS, 2004. **Anais:** IEEE mar. 2004. p 37-42.

16 ANSI, IEEE **Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications**. **IEEE Std 802.11**. Piscataway, 1999. 528 p.

17 ANSI, IEEE **Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std 802.11a**. Piscataway, 1999. 91 p.

18 ANSI; IEEE **Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 2: High-speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band. IEEE Std 802.11b**. New York, 1999. 96 p.

19 ANSI, IEEE **Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band. IEEE Std 802.11g**. New York, 2003. 78 p.

20 ANSI; IEEE **Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications; Medium Access Control (MAC) Security Enhancements. IEEE Std 802.11i**. New York, 2004.

21 MANGOLD, S. et al. Analysis of IEEE 802.11e for QoS Support in Wireless LANs. **IEEE Wireless Communications Magazine**, v. 10, p. 44-50, dez. 2003.

22 LIU, H.; ZHAO, Y. Adpative EDCA Algorithm Using Vídeo Prediction for Multimedia IEEE 802.11e WLAN. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS AND MOBILE COMMUNICATIONS, 2006. **Anais ICWMC´06**: jul 2006. p. 10.

23 NI, Q. Performance Analysis and Enhancements for IEEE 802.11e Wireless Network. **IEEE Network Magazine**, v. 19, p. 21-27, ago. 2005.

24 Internet Engineering Task Force. **RFC 3550** – RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. 2003. Disponível em: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3550.txt?number=3550>. Acesso em 20 março 2008.

25 JONATHAN, D. et al. **Fundamentos de VoIP Segunda Edição**. Tradução de Ricardo Balbinot. Porto Alegre: Bookman, 2008. 389 p.

26 Internet Engineering Task Force. **RFC 2205** – Resource Reservation Protocol (RSVP). 1997. Disponível em: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2205.txt?number=2205>. Acesso em 20 março 2008.

27 ITU-T. **G.114 – Series G:** Transmission System and Media, Digital Systems and Networs**.** ITU-T Telecommunication Standardization Sector of ITU-T, 2003.

28 ITU-T. **G.729 – Series G:** Coding of Speech at 8K Kbit/s Using Conjugate-Structure Algebraic-Code-Excited Linear Preditcion (CS-ACELP). ITU-T Telecommunication Standardization Sector of ITU-T, 2007.

29 The Network Simulator - NS-2 versão 2.31. Disponibiliza para uso o software NS-2. Disponível em: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acesso em março 2007.

30 BOUKERCHE, A.; DAS, S. K.; FABBRI, A. Analysis of a Randomized Congestion Control Scheme with DSDV Routing in Ad Hoc Wireless Network. **Journal of Parallel and Distributed Computing**, n. 7, v.1, p. 967-995, jul 2001.

31 WIETHÖLTER, S.; EMMELMANN, M.; HOENE, C. TKN EDCA Model for ns-2. **Technical University Berlin,** [Online] 2006. Disponível em: <http://www.tkn.tu-berlin.de/research/802.11e_ns2/> Acesso em Janeiro.

32 ITU-T. **G.711 – Series G:** Pulse Code Modulation (PCM) of Voice Frequencies. ITU-T Telecommunication Standardization Sector of ITU-T, 1988.

APÊNDICE A

Compilação da Classe 802.11 no Simulador NS-2 versão 2.31

Para a compilação da classe 802.11e utilizada neste trabalho no simulador NS-2 versão 2.31, todas as ferramentas, aplicativos e compiladores que são necessários para a instalação do NS-2 devem estar instaladas e corretamente configuradas.

A classe 802.11e deve ser "baixada" da Internet através do site: http://www.tkn.tu-berlin.de/research/802.11e_ns2/

O arquivo que deve ser copiado é: EDCA_ns-2_2.28-v1-0-2.tgz

O arquivo baixado da Internet deve ser descompactado e seu conteúdo deve ser copiado para a pasta de instalação do ns-2.31 no diretório ns-2.31/mac.

Após a cópia destes arquivos para a pasta de destino alguns arquivos do ns-2 necessitam ser modificados.

1.Alteração de Arquivos

1.1 - Arquivo Makefile.in

Em INLCUDES deve ser adicionada a linha:

```
-I./mac/802_11e
```

Em OBJ_CC devem ser adicionadas as linhas:

```
mac/802_11e/mac-802.11e.o mac/802_11e/priq.o
mac/802_11e/d-tail.o mac/802_11e/mac-timers_802_11e.o
```

Em NS_TCl_LIB deve ser removida a linha:

```
tcl/lib/ns-mobilenode.tcl \
```

Em NS_TCL_LIB devem ser adicionadas as linhas:

mac/802_11e/ns-mobilenode_EDCA.tcl \

mac/802_11e/priority.tcl \

1.2 - Arquivo tcl/lib/ns-lib.tcl

Na lista de “Source” remover a seguinte linha:

source ns-mobilenode.tcl

Na lista “Source” adicionar as seguintes linhas:

source ../../mac/802_11e/ns-mobilenode_EDCA.tcl

source ../../mac/802_11e/priority.tcl

1.3 - Arquivo tcl/lib/ns-default.tcl

Adicionar as seguintes linhas

Queue/Dtail set drop_front_ false	
Queue/Dtail set summarystats_ false	
Queue/Dtail set queue_in_bytes_ false	
Queue/Dtail set mean_pktsize_ 500	
Queue/Dtail/Priq set Prefer_Routing_Protocols	1
Queue/Dtail/Priq set Max_Levels	4
Queue/Dtail/Priq set Levels	4
Mac/802_11e set SlotTime_	0.000020
Mac/802_11e set SIFS_	0.000010
Mac/802_11e set PreambleLength_	144
Mac/802_11e set PLCPHeaderLength_	48
Mac/802_11e set PLCPDataRate_	1.0e6
Mac/802_11e set RTSThreshold_	3000

Mac/802_11e set ShortRetryLimit_ 7

Mac/802_11e set LongRetryLimit_ 4

1.4- Arquivo tcl/lan/ns-mac.tcl

A seguinte estrutura deve ser adicionada

```
# IEEE 802.11e MAC settings
if [TclObject is-class Mac/802_11e] {
Mac/802_11e set delay_ 64us
Mac/802_11e set ifs_ 16us
Mac/802_11e set slotTime_ 16us
Mac/802_11e set cwmin_ 16
Mac/802_11e set cwmax_ 1024
Mac/802_11e set rtxLimit_ 16
Mac/802_11e set bssId_ -1
Mac/802_11e set sifs_ 8us
Mac/802_11e set pifs_ 12us
Mac/802_11e set difs_ 16us
Mac/802_11e set rtxAckLimit_ 1
Mac/802_11e set rtxRtsLimit_ 3
Mac/802_11e set basicRate_ 1Mb ;# set this to 0 if want to use bandwidth_ for
Mac/802_11e set dataRate_ 1Mb ;# both control and data pkts
Mac/802_11e set cfb_ 0 ;#disables CFB
}
```

Para a utilização dos padrões IEEE 802.11a, b ou g a estrutura acima deverá ser configurada com os parâmetros descritos na Tabela A.

Tabela A – Parâmetros de Configuração

Parâmetros	802.11a	802.11b	802.11g
slotTimes_	9us	20us	9us
sifs_	16us	10us	10us
pifs_	25us	30us	19us
difs_	34us	50us	28us
cwmin_	31	31	15
cwmax_	1023	1023	1023
basicrate_	54Mb	11Mb	54Mb
datarate_	54Mb	11Mb	54Mb

1.5- Arquivo mac/wireless-phy.h

Substituir a linha de estado do canal (SLEEP, IDLE, RECV, SEND) pela linha (SLEEP,IDLE,RECV,SEND)

1.6- Arquivo mac/wireless-phy.cc

Todas as ocorrências de RECV e SEND devem ser substituídas respectivamente por RECVING e SENDING

1.7- Arquivo common/packet.h

Adicionar a seguinte linha

#define HDR_MAC802_11E(p) ((hdr_mac802_11e *)hdr_mac::access(p))

2. Recompilação do NS-2 versão 2.31

Para recompilar o NS-2 os seguintes comandos devem ser executados na ordem descrita.

./configure

make clean

make depend

make

make install

Após executar os comandos de recompilação sem a apresentação de mensagens de erros, o NS-2 poderá ser testado através da seguinte linha de comando:

Ns mac/802_11e/multi_udpflows.tcl

A alteração dos parâmetros CWmin, CWmáx, AIFS, Txop Limit para cada fila implementada no mecanismo de prioridade do padrão 802.11e pode ser executada diretamente no arquivo 802_11e/priority.tcl.

Após a realização de qualquer alteração neste arquivo o NS-2 necessita ser recompilado.