

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA
COMPUTAÇÃO**

Madalena Pereira da Silva

**Análise de Desempenho e Diferenciação de Serviços no
Sub Nível MAC do Padrão IEEE 802.11e em
Redes Ad Hoc**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Prof. Dr. Carlos Becker Westphall

Florianópolis, fevereiro de 2004

**Análise de Desempenho e Diferenciação de Serviços no Sub
Nível MAC do Padrão IEEE 802.11e em
Redes Ad Hoc**

Madalena Pereira da Silva

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação, Área de Concentração **Sistemas de Computação** e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.

Prof. Dr. Raul Sidnei Wazlawick

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Ciência da Computação

Banca Examinadora

Prof. Dr. Carlos Becker Westphall

Orientador

Profa. Dr^a. Carla Merkle Westphall

Prof. Dr. Carlos Barros Montez

Prof. Dr. Roberto Willrich

“É melhor tentar e falhar, que se preocupar e ver a vida passar;
É melhor tentar, ainda que em vão, que se sentar fazendo nada até o final;
Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias tristes em casa me esconder;
Eu prefiro ser feliz, embora louco, que em conformidade viver...”.

DEDICATÓRIA

Á Deus criador de todas as obras.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Orientador - Professor Carlos Becker Westphall pelo apoio, compreensão, paciência, inteligência e dedicação.

Aos meus Pais - Ana Maria e Hermelino que me deram a vida e me ensinaram vivê-la com dignidade, honestidade, persistência e determinação.

Aos meus queridos irmãos, cunhados, cunhadas, sobrinhos e familiares, que acompanharam, choraram, riram, aconselharam, incentivaram e acreditaram na minha pessoa.

Ao meu namorado – Júnior que ouviu meus desabafos, respeitou o meu silêncio e compreendeu a minha ausência.

A minha amiga – Cleonice pela oportunidade do primeiro emprego, o qual serviu de base para as descobertas do mundo profissional.

Ao meu amigo e conselheiro – Delcio, no qual eu encontrei exemplos de humanidade, perseverança, persistência, coragem. Mostrou-me que com muita bravura, responsabilidade e determinação é possível chegar ao ápice de uma pirâmide e manter-se eternamente no cume com muito equilíbrio.

Aos meus amigos que estiveram juntos nesta caminhada e que sempre foram solidários nas mais diversas situações. Extensivo a Marcos Dias Assunção, Juliano Anderson Pacheco, José Coelho Melo Filho, Marcos André Pisching, Michel Ribas Lobato, Rafael Kruger Tavares, Underléia Cabreira, Luciane Fernandes, Valério, Aujor Tadeu e Jean Pierre.

Ao Criador Maior – DEUS, pois sem ele eu nada seria.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	IV
AGRADECIMENTOS	V
SUMÁRIO	VI
LISTA DE QUADROS	IX
LISTA DE GRÁFICOS	X
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS	XIV
RESUMO	XVII
ABSTRACT	XVIII
1. INTRODUÇÃO	19
1.1. OBJETIVOS	21
1.2. JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÕES.....	22
1.3. CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO	23
1.4. TRABALHOS RELACIONADOS	24
1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2. REDES SEM FIO (WIRELESS)	29
2.1. INTRODUÇÃO	29
2.2. PADRÃO IEEE 802.11.....	31
2.3. REDE LOCAL SEM FIO (WIRELESS LOCAL AREA NETWORK – WLAN).....	33
2.4. ARQUITETURA DO 802.11	34
2.5. TOPOLOGIAS DAS WLANS.....	36
2.5.1 <i>Redes sem Infra Estrutura – Ad Hoc</i>	36
2.5.2 <i>Redes com Infra-Estrutura</i>	37
2.6. CAMADA FÍSICA DO 802.11.....	39
2.6.1 <i>Espalhamento Espectral por Salto de Frequência (FHSS)</i>	41
2.6.2 <i>Espalhamento Espectral por Seqüência Direta (DSSS)</i>	43
2.6.3 <i>Raios Infravermelhos (IR)</i>	45
2.7. SUBCAMADA DE CONTROLE DE ACESSO AO MEIO (<i>MEDIUM ACCESS CONTROL – MAC</i>).....	46
2.7.1 <i>Métodos de Acesso</i>	47
2.7.2 <i>Função de Coordenação Distribuída – DCF</i>	48
2.7.3 <i>Função de Coordenação em um Ponto – PCF</i>	54
2.7.4 <i>Fragmentação</i>	56
3. PADRÃO 802.11 E QUALIDADE DE SERVIÇO	57

3.1.	QUALIDADE DE SERVIÇO	57
3.1.1	<i>Requisitos das Aplicações</i>	58
3.1.2	<i>Qualidade de Serviços em Redes Móveis</i>	61
3.2.	DIFERENCIAÇÃO DE SERVIÇO NO MAC 802.11	62
3.2.1	<i>Limitações do PCF e do DCF</i>	62
3.2.2	<i>Técnicas de Diferenciação no Modo DCF</i>	65
3.3.	EXTENSÃO 802.11E	68
4.	METODOLOGIA E FERRAMENTAS UTILIZADAS	74
4.1.	METODOLOGIA.....	74
4.2.	TIPOS DE SIMULAÇÃO.....	74
4.2.1.	<i>Simulação de Monte Carlo</i>	75
4.2.2.	<i>Simulação Discreta Baseado em Eventos</i>	75
4.2.3.	<i>Simulação Baseada em Traces</i>	76
4.3.	NETWORK SIMULATOR – NS.....	76
4.3.1.	<i>Características do Simulador</i>	77
4.3.2.	<i>O modelo de programação do ns</i>	78
4.3.3.	<i>Fases no desenvolvimento da pesquisa utilizando o ns</i>	78
4.3.4.	<i>Componentes básicos</i>	79
4.4.	STATISTICA.....	80
5.	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	82
5.1.	OBJETIVO E CONTEXTO DA SIMULAÇÃO	82
5.2.	PREPARAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	83
5.3.	MODELO DE MOBILIDADE.....	84
5.4.	PARÂMETROS, FATORES E NÍVEIS	85
5.4.1.	<i>Parâmetros Fixos</i>	85
5.4.2.	<i>Parâmetros Variáveis</i>	87
5.5.	EXECUÇÃO DAS SIMULAÇÕES E COLETA DOS DADOS	89
5.6.	SIMULAÇÕES EM FUNÇÃO DO AIFS E DO TAMANHO DO QUADRO DE DADOS	89
5.6.1.	<i>Cenário das Simulações e Configurações do Ambiente</i>	89
5.6.2.	<i>Modelo de Tráfego</i>	91
5.6.3.	<i>Apresentação e Análise dos Resultados</i>	91
5.7.	SIMULAÇÕES EM FUNÇÃO DO BACKOFF EXPONENCIAL BINÁRIO E DO TAMANHO DO QUADRO DE DADOS	106
5.7.1.	<i>Cenário das Simulações e Configurações do Ambiente</i>	106
5.7.2.	<i>Modelo de Tráfego</i>	107

5.7.3.	<i>Apresentação e Análise dos Resultados</i>	107
5.8.	SIMULAÇÕES EM FUNÇÃO DO AIFS, BACKOFF EXPONENCIAL BINÁRIO E TAMANHO DO QUADOR DE DADOS	120
5.8.1.	<i>Cenário das Simulações e Configurações do ambiente</i>	120
5.8.2.	<i>Modelo de Tráfego</i>	123
5.8.3.	<i>Apresentação e Análise dos Resultados</i>	123
6.	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	128
7.	BIBLIOGRAFIA	132
	ANEXO I - ANÁLISE ESTATÍSTICA	142

LISTA DE QUADROS

QUADRO I- VAZÃO TÍPICA DE ALGUMAS APLICAÇÕES	58
QUADRO II- REQUISITOS DE QOS DAS APLICAÇÕES.....	60
QUADRO III- PARÂMETROS DAS QSTAS EM FUNÇÃO DA PRIORIDADE.....	121

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – VAZÃO MÉDIA DE 1 FONTE CBR EM FUNÇÃO DO AIFS	93
GRÁFICO 2 – VAZÃO MÉDIA DE 2 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO AIFS.....	93
GRÁFICO 3 – VAZÃO MÉDIA DE 4 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO AIFS.....	94
GRÁFICO 4 – VAZÃO MÉDIA DE 8 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO AIFS.....	94
GRÁFICO 5 – VAZÃO MÉDIA DE 16 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO AIFS.....	95
GRÁFICO 6 – LATÊNCIA MÉDIA DE 1 FONTE CBR EM FUNÇÃO DO AIFS	96
GRÁFICO 7 – LATÊNCIA MÉDIA DE 2 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO AIFS	97
GRÁFICO 8 – LATÊNCIA MÉDIA DE 4 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO AIFS	97
GRÁFICO 9 – LATÊNCIA MÉDIA DE 8 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO AIFS	98
GRÁFICO 10 LATÊNCIA MÉDIA DE 16 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO AIFS	98
GRÁFICO 11 – JITTER MÉDIO DE 1 FONTE CBR EM FUNÇÃO DO AIFS	100
GRÁFICO 12 – JITTER MÉDIO DE 2 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO AIFS	100
GRÁFICO 13 – JITTER MÉDIO DE 4 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO AIFS	101
GRÁFICO 14 – JITTER MÉDIO DE 8 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO AIFS	101
GRÁFICO 15 – JITTER MÉDIO DE 16 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO AIFS	102
GRÁFICO 16 – TAXA DE DESCARTE DE PACOTES DE 1 FONTE CBR EM FUNÇÃO AIFS	103
GRÁFICO 17 – TAXA DE DESCARTE DE PACOTES DE 2 FONTES CBR EM FUNÇÃO AIFS.....	103
GRÁFICO 18 – TAXA DE DESCARTE DE PACOTES DE 4 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO AIFS	104
GRÁFICO 19 – TAXA DE DESCARTE DE PACOTES DE 8 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO AIFS	104
GRÁFICO 20 – TAXA DE DESCARTE DE PACOTES DE 16 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO AIFS	105
GRÁFICO 21 – VAZÃO DE 1 FONTE CBR EM FUNÇÃO DO CWMIN.....	108
GRÁFICO 22 – VAZÃO DE 2 FONTES CBR EM FUNÇÃO CWMIN	108
GRÁFICO 23 – VAZÃO DE 4 FONTES CBR EM FUNÇÃO AIFS.....	109
GRÁFICO 24 – VAZÃO DE 8 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO CWMIN	109
GRÁFICO 25 – VAZÃO DE 16 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO CWMIN	110
GRÁFICO 26 – LATÊNCIA DE 1 FONTE CBR EM FUNÇÃO DO CWMIN	111
GRÁFICO 27 – LATÊNCIA DE 2 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO CWMIN	112
GRÁFICO 28 – LATÊNCIA DE 4 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO CWMIN	112
GRÁFICO 29 – LATÊNCIA DE 8 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO CWMIN	113
GRÁFICO 30 – LATÊNCIA DE 16 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO CWMIN	113
GRÁFICO 31 – JITTER DE 1 FONTE CBR EM FUNÇÃO DO CWMIN.....	114
GRÁFICO 32 – JITTER DE 2 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO CWMIN	115
GRÁFICO 33- JITTER DE 4 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO CWMIN.....	115
GRÁFICO 34 – JITTER DE 8 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO CWMIN	116
GRÁFICO 35 – JITTER DE 16 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO CWMIN	116

GRÁFICO 36 – TAXA DE DESCARTE DE PACOTES DE 1 FONTE CBR EM FUNÇÃO CWMIN	117
GRÁFICO 37 – TAXA DE DESCARTE DE PACOTES DE 2 FONTES CBR EM FUNÇÃO DE CWMIN.....	118
GRÁFICO 38 – TAXA DE DESCARTE DE PACOTES DE 4 FONTES CBR EM FUNÇÃO DE CWMIN.....	118
GRÁFICO 39 – TAXA DE DESCARTE DE PACOTES DE 8 FONTES CBR EM FUNÇÃO DO CWMIN	119
GRÁFICO 40 – TAXA DE DESCARTE DE PACOTES DE 16 FONTES CBR EM FUNÇÃO DE CWMIN.....	119
GRÁFICO 41 – MÉDIA DA VAZÃO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO AIFS, CWMIN, PACOTE.....	124
GRÁFICO 42 - MÉDIA DA LATÊNCIA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO AIFS, CWMIN, PACOTE	125
GRÁFICO 43 - MÉDIA DO JITTER EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO AIFS, CWMIN, PACOTE	125
GRÁFICO 44 – TAXA DE DESCARTE EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO AIFS, CWMIN, PACOTE	126

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MODELO DE REFERÊNCIA RM – OSI x PADRÃO 802.11.....	32
FIGURA 2 - EXEMPLO DE UMA WLAN.....	33
FIGURA 3 - EXEMPLO DE UMA WLAN TÍPICA.....	35
FIGURA 4 - COMPONENTES DE UMA REDE 802.11 AD HOC	37
FIGURA 5 - COMPONENTES DE UMA REDE 802.11 INFRA-ESTRUTURADA	39
FIGURA 6 – BANDAS ISM	41
FIGURA 7 – EXEMPLO DA TÉCNICA FHSS	42
FIGURA 8 – EXEMPLO DE SEQUÊNCIA DE CHIP	44
FIGURA 9 – ESPAÇAMENTO MÍNIMO ENTRE CANAIS NA AMÉRICA DO NORTE	44
FIGURA 10 - COMUNICAÇÃO UTILIZANDO IR DIFUSOS	46
FIGURA 11 - ESTRUTURA DA CAMADA MAC	48
FIGURA 12 – TERMINAL ESCONDIDO.....	49
FIGURA 13 - MECANISMO DE ACESSO BÁSICO DA CAMADA MAC.....	50
FIGURA 14 - ACESSO DCF COM EXTENSÃO RTS E CTS.....	52
FIGURA 15 - MÉTODOS DE ACESSO PCF E DCF	54
FIGURA 16 - RELAÇÕES DOS INTERVALOS ENTRE QUADROS DO MAC 802.11.....	55
FIGURA 17 - SUPERQUADRO NO MAC 802.11E	70
FIGURA 18 - MAC PROPOSTO NO EDCF	71
FIGURA 19 - RELAÇÕES DOS INTERVALOS ENTRE QUADROS NO 802.11E	72
FIGURA 20 - CONJUNTO DE PARÂMETROS DE QoS DO EDCF.....	73
FIGURA 21 – PARÂMETROS DE UMA REDE AD HOC	80
FIGURA 22 – MODELO SIMULADO: DADOS.....	90
FIGURA 23 - MODELO SIMULADO: ÁUDIO, VÍDEO E DADOS	121

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA A VAZÃO EM MBPS	143
TABELA 2 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA A LATÊNCIA EM MS.....	145
TABELA 3 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O JITTER EM MS.....	147
TABELA 4 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O DESCARTE EM PERCENTAGEM	149
TABELA 4 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O DESCARTE EM PERCENTAGEM	149
TABELA 5 – RESULTADO DA ANOVA PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA VAZÃO.....	151
TABELA 6 - RESULTADO DA ANOVA PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA LATÊNCIA	151
TABELA 7 - RESULTADO DA ANOVA PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA JITTER	151
TABELA 8 - RESULTADO DA ANOVA PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA DESCARTE DE PACOTES	152
TABELA 9 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA A VAZÃO EM MBPS	153
TABELA 10 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA A LATÊNCIA EM MS	154
TABELA 11 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O JITTER EM MS.....	156
TABELA 12 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O DESCARTE EM PERCENTAGEM.....	157
TABELA 13 - RESULTADO DA ANOVA PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA VAZÃO	159
TABELA 14 - RESULTADO DA ANOVA PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA LATÊNCIA	159
TABELA 15 - RESULTADO DA ANOVA PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA JITTER	159
TABELA 17 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA A VAZÃO EM MBPS	161
TABELA 18 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA A LATÊNCIA EM MS.....	161
TABELA 19 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA A JITTER EM MS.....	162
TABELA 20 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O DESCARTE EM PERCENTAGEM.....	163
TABELA 21 – RESULTADO DA ANOVA PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA VAZÃO.....	164
TABELA 22 - RESULTADO DA ANOVA PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA LATÊNCIA	164
TABELA 23 - RESULTADO DA ANOVA PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA JITTER	164
TABELA 24 - RESULTADO DA ANOVA PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA DESCARTE DE PACOTES	165
TABELA 25 – RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA VAZÃO	166
TABELA 26 - RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA LATÊNCIA	166
TABELA 27 - RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA JITTER	167
TABELA 28 - RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA DESCARTE	168

LISTA DE ABREVIATURAS

ACK	<i>Acknowledgment</i>
AIFS	<i>Arbitration Interframe Space</i>
AM	<i>Modulação de amplitude</i>
AP	<i>Access Point</i>
BA	<i>Basic Access</i>
BSA	<i>Basic Service Area</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
BWA	<i>Broadcasting Wireless Access</i>
CAP	<i>Controlled Access Period</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment Signal</i>
CCK	<i>Complementing Code Keying</i>
CFP	<i>Contention Free Period</i>
CP	<i>Contention Period</i>
CPE	<i>Customer Premises Equipment</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i>
CTS	<i>Clear to Send</i>
CW	<i>Contention Window</i>
DBPSK	<i>Differential Binary Phase Shift Keying</i>
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i>
DFS	<i>Dynamic Frequency Selection</i>
DIFS	<i>Distributed Interframe Space</i>
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>
DS	<i>Distribution System</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
EDCF	<i>Enhanced Distributed Coordination Function</i>
ESS	<i>Extended Service Set</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FCS	<i>Frame Check Sequence</i>

FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
FIFO	<i>First In, First Out</i>
FM	<i>Modulação de Frequência</i>
GFSK	<i>Gaussian frequency Spread Spectrum</i>
HC	<i>Hybrid Coordinator</i>
HCF	<i>Hybrid Coordination Function</i>
HiperLAN	<i>High Performance Radio Lan</i>
HomeRF	<i>Home Radio Frequency</i>
iBSS	<i>Independence Basic Service Set</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IFS	<i>Inter Frame Space</i>
IR	<i>Raios Infravermelhos</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LLC	<i>Logic Link Control</i>
LMDS	<i>Local Multipoint Distribution System</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
MANET	<i>Mobile Ad Hoc Network</i>
NAV	<i>Net Allocation Vectors</i>
NS	<i>Network Simulator</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PA	<i>Ponto de Acesso</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PCF	<i>Point Coordination Function</i>
PCM	<i>Pulse Code Modulation</i>
PF	<i>Fator de Prioridade</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PN	<i>Pseudo Noise</i>

PPM	<i>Pulse Position Modulation</i>
PS	<i>Provedor de Serviço</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QAP	<i>QoS Access Point</i>
QBSS	<i>QoS Basic Service Set</i>
QSTA	<i>QoS Station</i>
RF	<i>Rádio Frequência</i>
RFC	<i>Request For Comments</i>
RTC	<i>Request to Send</i>
SA	<i>Disponibilidade do Serviço</i>
SAP	<i>Service Access Point</i>
SE	<i>Elemento de Serviço</i>
SIFS	<i>Short Interframe Space</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i>
STA	<i>Estações 802.11</i>
TC	<i>Traffic Categories</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
TI	<i>Tecnologia de Informação</i>
TPS	<i>Transmit Power Control</i>
TxOp	<i>Transmission Opportunity</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UNII	<i>Unlicensed National Information Infrastructure</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WAP	<i>Wireless Application Protocol</i>
WGs	<i>Working Groups</i>
WEP	<i>Wired Equivalent Privacy</i>
WI-FI	<i>Wireless Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WLL	<i>Wireless Local Loop</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WirelessMAN	<i>Broadband Wireless Metropolitan Area Network</i>

RESUMO

Um dos grandes desafios das redes locais sem fio, especialmente nas redes MANET (*Mobile Ad Hoc Network*) é o fornecimento de Qualidade de Serviço (*Quality of Service – QoS*) às aplicações. Para suprir esta carência, o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) está desenvolvendo o padrão 802.11e, como uma extensão à especificação original. Neste padrão, muitas questões sobre o fornecimento de QoS permanecem em aberto, fator que incentiva a busca de novos mecanismos para prover níveis de desempenho aceitáveis às aplicações multimídia e de tempo real.

A contribuição do trabalho consiste no emprego de técnicas de diferenciação de serviços na extensão da função de coordenação distribuída (*Enhanced Distribution Coordination Function - EDCF*) do MAC 802.11e, alterando a forma com que cada uma das estações acessa o meio e estabelecendo prioridade de acesso entre as estações que compõem uma rede *Ad Hoc*.

Para prover diferenciação de serviços na camada MAC e avaliar o desempenho dessa diferenciação em redes *Ad Hoc*, algumas métricas de QoS foram consideradas, sendo elas: vazão, latência, *jitter* e descarte de pacotes. As técnicas de diferenciação de serviços empregadas compreendem: variações do tamanho de pacotes, alterações no tamanho do AIFS (*Arbitration Interframe Space*) e no cálculo de *Backoff* Exponencial Binário.

São realizadas simulações para comprovar a validade do uso conjunto das técnicas de diferenciação no MAC 802.11e, estabelecer limiares para as métricas de QoS, oferecer prioridades no acesso ao meio e manter alto o nível de utilização da rede MANET. As simulações foram efetuadas no *Network Simulator 2*.

Palavras Chaves: IEEE 802.11, QoS, Wlan, Ad Hoc, Manet, EDCF, NS-2.

ABSTRACT

One of the greatest challenges of wireless local networks, especially in MANET (Mobile Ad Hoc Network) networks is the providing of Quality of Service to applications. To compensate this lack, the IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) is developing the 802.11e model, as an extension of the original specification. In this model, many questions about Quality of Service are left open, factor that stimulates the search for new mechanisms to supply acceptable performance levels to multimedia and real-time applications.

The work contribution consists of the use of service differentiation techniques in the Enhanced Distributed Coordination Function (EDCF) of MAC 802.11e, altering the way as each of the stations access the network and establishing access priorities among the stations that compose an Ad Hoc network.

To provide service differentiation in the MAC layer and to evaluate the performance of Ad Hoc networks, some metrics of Quality of Service were considered, which are: throughput, latency, jitter and package discard. The service differentiation techniques utilized were: package size variation, AIFS (Arbitration Interframe Space) size alterations, and calculus of Binary Exponential Backoff.

Simulations are performed to assure the validity of the combined use of differentiation techniques in the MAC 802.11e, to establish thresholds to Quality of Service metrics, to provide medium access priorities and to keep the high level of MANET network utilization. The simulations were performed using the Network Simulator 2.

Words Keys: IEEE 802,11, QoS, Wlan, Ad Hoc, Manet, EDCF, NS-2.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, com a grande diversidade de dispositivos, tais como: computadores pessoais, computadores de mão, telefones celulares, eletrodomésticos entre outros, as tecnologias relacionadas a ambientes de comunicação móvel sem fio passaram a ser mais utilizadas, pois tem o poder de combinar funcionalidade, flexibilidade, conectividade de dados e mobilidade de usuários em diversos ambientes. O uso disseminado da telefonia celular é uma constatação da crescente proliferação das redes de comunicação sem fio.

Para acomodar a amplitude de aplicações e coberturas surgiram nos últimos anos diferentes padrões, protocolos e tecnologias implementadas especificamente para os ambientes que utilizam algum dispositivo de comunicação sem fio. Para prover mobilidade e tornar as tecnologias escaláveis, foram concebidos os padrões para as redes de telefonia celular; os padrões para as WLAN (*Wireless Local Area Network*) [83], Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) [84], Hiperlan (*High Performance Radio Lan*) [85], utilizados em ambientes locais; os padrões para as Wpans (*Wireless Personal Area Network*) [86], empregados na comunicação de redes pessoais; e o padrão para os sistemas móveis, representados pelo protocolo WAP (*Wireless Application Protocol*) [87].

Apostando no crescimento das redes de comunicação sem fio, instituições e empresas investiram na tecnologia, de forma que as mesmas pudessem ser utilizadas não somente em redes de longas distâncias, mas também em redes locais como é o caso das WLANs. Esta tendência foi fortalecida pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*).

Para as redes locais sem fio, o IEEE definiu uma padronização que garante a interoperabilidade entre produtos de diferentes fabricantes e permite que as redes sejam configuradas de dois modos distintos: *Ad Hoc* ou *MANET* – constituídas apenas por estações sem fio e *infra-estruturadas* – nas quais um nó central, chamado de ponto de acesso, fornece às estações sem fio acesso a rede fixa.

Inicialmente, o IEEE constituiu um grupo de pesquisas para criar padrões abertos que pudessem tornar a tecnologia *Wireless* cada vez mais realidade. O projeto chamado de Padrão IEEE 802.11 [1] permaneceu na inércia por alguns anos e muitos esforços foram empregados no sentido de fazer com que a tecnologia sem fio fosse de fato aceita. Um dos fatores que mais interferia era a baixa taxa de transferência de dados, que inicialmente contemplava apenas alguns Kbps. No instante em que a velocidade de transmissão se elevou para 1 a 2 Mbps, a rede sem fio passou a ser vista como uma tecnologia promissora e a receber incentivos para a construção de equipamentos que permitissem a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fornecedores.

Mesmo o IEEE definindo uma arquitetura, métodos de transmissão e elevando a taxa de transferência de dados de alguns Kbps para 2 Mbps, a velocidade de transmissão das WLANs não contemplava as exigências de banda necessárias para atender as requisições das aplicações. Em função disso, o IEEE investiu no melhoramento do padrão 802.11 mantendo a mesma arquitetura e tecnologia, mas conseguindo maior velocidade de transmissão – entre 5 e 11 Mbps, assim o padrão passou a ser denominado de “Padrão IEEE 802.11b” [2], [3], [4].

O grupo de pesquisa do IEEE continua buscando a melhoria contínua dos padrões para as redes de comunicação sem fio. Embora existam outros padrões, atualmente o padrão mais utilizado nas WLANs é o IEEE 802.11b [2]. Porém, apesar das melhorias que cada padrão contempla, nenhum deles oferece suporte à Qualidade de Serviço (*Quality of Service – QoS*) para as aplicações multimídia e de tempo real. Essa deficiência crítica é suprida pelo IEEE com o desenvolvimento da especificação 802.11e [5], padrão que está sendo implementado como uma extensão à especificação original com a finalidade de oferecer QoS para as redes de comunicação sem fio.

Com a existência de diferentes tecnologias e derivações de padrões para implementar uma rede móvel sem fio e com tantos dispositivos disponíveis, os usuários de Tecnologia de Informação (TI) almejam usufruir o máximo dos recursos destas redes e utilizá-los tanto para o tráfego de mídias discretas¹, quanto para o tráfego de mídias

¹ Mídias com dimensões unicamente espaciais, como por exemplo, textos, imagens, gráficos.

contínuas². Neste contexto se faz necessário realizar um estudo nas redes *Wireless Ad Hoc* e apresentar mecanismos para estabelecer prioridades entre as aplicações multimídia.

O mecanismo de contenção pelo meio do protocolo de acesso aleatório 802.11 garante que cada estação receba uma parte igual da banda total disponível, sendo esta uma das principais características que necessitam ser alteradas para se obter uma diferenciação na camada MAC. As técnicas de diferenciação empregadas neste trabalho têm por objetivos priorizar as estações por categoria de tráfego, favorecendo, por exemplo, classes de áudio e vídeo, que exigem vazão, atraso e *jitter* garantidos, bem como beneficiar as classes de tráfego que são intolerantes à perda de pacotes.

Visando atender os requisitos de QoS impostos pelas aplicações multimídia e de tempo real, bem como oferecer serviços com qualidade aos usuários das redes *Ad Hoc*, uma análise de desempenho deve ser efetuada sobre as redes sem fio. Principalmente no que se refere aos parâmetros de vazão, atraso, variação de atraso, descarte de pacotes. Para que de posse destas informações, seja possível traçar o perfil das Redes *Ad Hoc*, bem como oferecer diferenciação no MAC, priorizando o acesso ao meio de acordo com as categorias de tráfego geradas pelas aplicações.

Para o escopo deste trabalho está sendo considerada a questão de diferenciação da camada MAC para: - priorizar o acesso ao meio entre as STAs (Estações 802.11); verificar se a partir das alterações efetuadas no MAC do padrão original 802.11 é possível prover um melhor desempenho na rede e fornecer níveis de QoS aceitáveis para as aplicações multimídia e de tempo real.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é realizar análise de desempenho e validar técnicas de diferenciação de serviços para oferecer prioridades no acesso ao meio às

² Mídias com dimensões temporais, como por exemplo, sons, vídeos, animações.

aplicações multimídia e de tempo real que são executadas nas estações das redes *Ad Hoc*.

Ao término da dissertação, almeja-se que os objetivos específicos listados a seguir sejam alcançados:

- Proporcionar um material teórico, experimental e prático a respeito dos temas: análise de desempenho e redes de comunicação sem fio.
- Propor técnicas de diferenciação na camada MAC do padrão IEEE 802.11 para prover diferenciação no acesso ao meio entre as classes de usuários e/ou aplicações das redes MANET.
- Desenvolver o projeto experimental do modelo que será simulado; realizar simulações nas redes MANET para obter informações de desempenho, estabelecer limiares para as métricas de QoS.

1.2. JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÕES

Os principais fatores que influenciaram na escolha do tema da pesquisa estão relacionados com a mobilidade e principalmente com a diferenciação de serviços entre as estações que compõem uma rede *Wireless Ad Hoc*.

As redes de comunicação sem fio têm como principal função prover aos usuários acesso permanente à rede independente da localização física. Além disso, devem garantir qualidade de serviço para os diferentes tipos de mídias, sejam elas discretas ou contínuas em um meio de comunicação compartilhado e não confiável.

A diferenciação de serviços é uma questão amplamente estudada em cenários de redes fixas, no entanto em redes sem fio esta temática ainda é um desafio, sobretudo em redes *Ad Hoc*.

A extensão 802.11e cria o suporte à qualidade de serviço nas WLANs, mas não define como este suporte deve ser utilizado. No acesso com contenção, por exemplo,

fica em aberto a questão de como o conjunto de parâmetros de QoS deve ser composto para cada classe de tráfego gerada pelas estações. Numa rede infra-estruturada o controle da funcionalidade de QoS é de responsabilidade de um nó especial, geralmente o próprio ponto de acesso [9], enquanto que nas redes *Ad Hoc*, as próprias estações podem ser providas com os parâmetros de QoS de acordo com as classes de tráfegos das fontes [10].

1.3. CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

Nas redes de comunicação sem fio, o mecanismo de contenção pelo meio do protocolo de acesso aleatório 802.11 não estabelece prioridades no acesso ao meio e garante que cada estação receba uma parte igual da banda total disponível, independente dos requisitos de QoS que cada aplicação necessita. Esta é uma das principais características que necessita ser alterada para se obter uma diferenciação na camada MAC.

Diferenciação de serviços é um conceito que está inserido num contexto mais amplo de qualidade de serviço, tendo como proposta privilegiar determinada classe de usuários e/ou aplicações. As técnicas de diferenciação empregadas no trabalho têm por objetivos priorizar as estações por categoria de tráfego, favorecendo, por exemplo, classes de áudio e vídeo, que exigem vazão, atraso e *jitter* garantidos. Assim como, beneficiar as classes de tráfego que são intolerantes à perda de pacotes.

Nas redes móveis, o problema de provisão de QoS deve ser tratado na camada de enlace, dada as limitações dos recursos de transmissão disponíveis nas redes sem fio. O meio sem fio apresenta taxas de transmissão mais baixas e taxas de erros mais altas que as observadas nas redes fixas, e sofre ainda variações na capacidade de transmissão de dados provocadas por fatores externos, como interferência eletromagnética e condições atmosféricas.

Diante das problemáticas levantadas anteriormente, na intenção de oferecer alguma diferenciação de serviços para as aplicações, são realizadas alterações na

camada MAC para privilegiar o acesso ao meio e verificar a possibilidade de oferecer uma melhor performance nas redes *Ad Hoc*. A análise de desempenho é de suma importância para conhecer o comportamento destas redes e estimar valores para as métricas de QoS (vazão, latência, jitter e descarte de pacotes).

1.4. TRABALHOS RELACIONADOS

Em alguns trabalhos encontrados na literatura, os autores realizam análise de desempenho, empregam técnicas e propõem métodos para prover diferenciação de serviços para as aplicações em redes *Ad Hoc*. Diferentemente da pesquisa realizada nesta dissertação, a maioria das outras propostas realizam simulações na função DCF (*Distributed Coordination Function*) e apresentam poucos resultados, pois a análise de desempenho é efetuada somente sobre uma ou duas métricas de QoS e geralmente empregam apenas um ou dois tipos de classes tráfego.

Na literatura, a avaliação de desempenho do 802.11 está sendo executada por meio de modelos analíticos [7], [8], [11], [12], [13], [41], ou através de simulações [6], [30].

Nos trabalhos descritos em [7], [11], [12] são considerados um valor constante ou geometricamente distribuído para a janela de contenção. Em [8] é realizada uma análise estocástica sobre os valores do janela de contenção. Em [13] um *backoff* exponencial com somente dois estágios é modelado usando uma cadeia bidimensional de *Markov*. Em [41], um modelo mais geral é proposto, explicando detalhadamente o processo do *backoff* exponencial.

As simulações realizadas em [6] têm por objetivo analisar os métodos de acesso suportados pelo sub nível MAC e verificar o desempenho da rede no que se refere a métrica *throughput*. Na pesquisa documentada em [30] é realizada uma análise de desempenho por simulação da subcamada MAC do padrão IEEE 802.11 para redes locais sem fio, mas nenhum mecanismo de diferenciação é utilizado.

Com a intenção de permitir a diferenciação de serviços entre as estações das redes locais sem fio, diversas propostas foram elaboradas [55], [56], [58], [59]. Tais propostas consistem na configuração de um ou mais parâmetros básicos do método de acesso (DCF – *Distributed Coordination Fncion*, PCF – *Point Coordination Function*) para prover diferenciação, alterando a forma com que cada uma das estações tem acesso ao meio e estabelecendo prioridades entre as estações que disputam a banda passante oferecida pela rede.

Para suportar os requisitos de QoS para vários tipos de serviços, uma possibilidade é prover diferenciação na camada MAC do IEEE 802.11, como proposto em [44], [45], [46], [47], [61].

Em [44] um esquema de prioridades para o IEEE 802.11 foi proposto, onde uma estação de prioridade elevada tem um tempo de espera menor para obter acesso ao meio. Em [45] é proposto um esquema de diferenciação de serviços que utiliza dois parâmetros do sub nível MAC do IEEE 802.11: - o intervalo de *backoff* e do IFS entre cada transmissão de dados para fornecer diferenciação. Em [46] a diferenciação é suportada ajustando diferentes valores para o tamanho mínimo da janela de contenção (CWmin). Para contribuir com a pesquisa apresentada em [41], no trabalho descrito em [61] é proposto um esquema eficaz que restaura o valor da janela de contenção estendendo o desempenho da DCF do IEEE 802.11.

Durante o processo de busca por trabalhos correlatos, os que possuem alguma similaridade com o trabalho desenvolvido nesta dissertação estão documentados em [9], [10], [47], [63].

A documentação descrita em [9] relata um mecanismo de controle de admissão e utiliza técnicas de diferenciação similares com as que serão abordadas no decorrer desta dissertação. Porém é utilizado somente um tipo de fluxo, a métrica que está sendo considerada corresponde somente à vazão e o mecanismo de controle de qualidade de serviço proposto é específico para as redes infra-estruturadas.

O trabalho desenvolvido em [10] resulta num esquema chamado AEDCF (*Adaptive Enhanced Distributed Coordination Function*), que considera o novo método

de acesso com contenção do 802.11e e o torna mais adaptativo, obtendo bons resultados com relação a eficiência na utilização do canal. Esse esquema foi construído para evitar a ocorrência de colisões virtuais³ (descrito na seção 3.2.3). Nesta pesquisa são utilizadas três classes de serviço, mas as análises não contemplam as métricas de variação de atraso e descarte de pacotes.

No trabalho disponível em [47] três esquemas de diferenciação de serviços são propostos para a função DCF do IEEE 802.11. O primeiro consiste em atribuir valores para a CW de acordo com a prioridade de cada fluxo. O segundo associa diferentes IFS para diferentes classes de tráfego. E o terceiro utiliza quadros de tamanho diferentes. Neste trabalho [47] apenas um tipo de tráfego está sendo utilizado e a análise é realizada em redes infra-estruturada e as simulações são efetuadas na DCF.

Em [63] os autores empregam três técnicas de diferenciação de serviços na função EDCF (*Enhanced Distributed Coordination Function*) do 802.11e para oferecer QoS para o tráfego multimídia nas redes *Ad Hoc*. As técnicas utilizadas estão relacionadas com as alterações do CWmin; alterações no IFS (*Inter Frame Spacing*) e variações no tamanho dos pacotes. Uma análise de desempenho é realizada para verificar a influência destas técnicas sobre as métricas de *throughput* e *delay*. Neste trabalho, os pesquisadores utilizam apenas dois tamanhos de pacotes, dois tipos de tráfego e realizam a análise somente sobre duas métricas de QoS. Além disso, os valores dos parâmetros IFS e CWmin, assim como apresentado em [10] não sofrem alterações ao longo do tempo da simulação, ou seja, estes valores permanecem fixos em cada rodada da simulação.

A diferenciação de serviços descrita nesta dissertação emprega três técnicas para privilegiar o acesso ao meio de aplicações com prioridades alta, intermediária e baixa entre fontes de áudio, vídeo e dados. As técnicas de diferenciação utilizadas compreendem: - alterações do AIFS (*Arbitration Interframe Space*); alterações de *Backoff* Exponencial Binário e alterações no tamanho dos pacotes. São realizadas

³ A inclusão de múltiplas filas em uma mesma QSTA (estação 802.11e) pode resultar em “colisões virtuais”. A colisão virtual, interna a uma estação, ocorre sempre que duas categorias de uma mesma QSTA têm seus temporizadores expirados simultaneamente, obtendo acesso ao meio no mesmo instante de tempo

simulações na função EDCF do 802.11e. Na análise de desempenho é realizado uma verificação estatística da influência de cada fator utilizado nas técnicas de diferenciação sobre as métricas de QoS: vazão, latência, *jitter* e descarte de pacotes.

1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para explicitar o direcionamento e a fundamentação da pesquisa, no primeiro capítulo, foram descritos os objetivos, as justificativas, as motivações, a contribuição da pesquisa e os trabalhos correlatos.

No segundo capítulo serão apresentadas a arquitetura, o funcionamento, as características e as técnicas de transmissão das redes WLAN, definidas pelo padrão IEEE 802.11.

Questões relacionadas ao suporte à qualidade de serviços para as redes locais sem fio são apresentadas no terceiro capítulo. Nesta parte do trabalho estarão descritos aspectos de QoS em geral, citação das principais técnicas de diferenciação de serviços e apresentação da extensão 802.11e.

A explanação da metodologia adotada para desenvolver a pesquisa, os tipos de simulações existentes, as ferramentas utilizadas nas simulações, estão dispostas no quarto capítulo.

A apresentação dos modelos simulados, bem como os resultados obtidos nas simulações, estão contidos no quinto capítulo. Neste capítulo serão apresentados os gráficos e as considerações para cada uma das métricas de QoS.

Diante da necessidade de verificar a influência dos variáveis independentes (tamanho dos pacotes, valores de AIFS, valores de CWmin, número de fontes) sobre as variáveis dependentes (vazão, latência, *jitter*, descarte de pacotes), uma análise estatística foi realizada. Esta análise está devidamente documentada no Anexo I.

No sétimo capítulo serão expressas as conclusões e perspectivas de implementações futuras. Finalizando o oitavo capítulo com as referências bibliográficas.

2. REDES SEM FIO (*WIRELESS*)

Este capítulo tem por objetivo explicar o funcionamento das redes sem fio, descrevendo o padrão que a define, de que forma a arquitetura é composta, os tipos de topologias que a rede suporta, funcionamento das camadas físicas e de enlace.

2.1. INTRODUÇÃO

A década de 90 foi o marco da miniaturização dos componentes eletrônicos e do desenvolvimento da comunicação pessoal sem fio, o número de usuários tanto da Internet quanto de sistemas celulares passaram da ordem de centenas de milhares no início da década para centenas de milhões nos dias atuais. Para atender a demanda de conectividade e acesso aos dados das aplicações multimídia e de tempo real requisitadas pelos usuários, surgem no mercado soluções e uma série de produtos *wireless*. Fazendo emergir a necessidade de estabelecimento de padrões para o amadurecimento da tecnologia de redes sem fio. Esta tarefa foi atribuída ao comitê de padronização do IEEE.

Para atender as diferentes demandas nas comunicações de dados *wireless*, os padrões atuais disponíveis possuem características técnicas bem diversificadas. Os padrões são criados por órgãos de padronização internacional da área de telecomunicações. O IEEE é um desses órgãos e possui três grupos de trabalhos (*Working Groups* ou *WGs*) dedicados a redes sem fio. Os respectivos grupos, listados a seguir [9], são integrantes do Comitê de Padrões 802, que elabora as normas para as redes locais (*Local Area Networks* ou *LANs*) e metropolitanas (*Metropolitan Area Networks* ou *MANs*).

- a) Grupo de Trabalho 11 [14]: desenvolve especificações para o padrão 802.11 das redes locais sem fio. As WLANs foram desenvolvidas para oferecer aos usuários móveis experiências de uso semelhante às redes cabeadas. Dependendo das condições de transmissão do ambiente uma WLAN possui

um alcance que varia de 100 a 500 metros. O padrão 802.11 utiliza somente faixas de frequência não-licenciadas e em sua especificação original [1] provê taxas de transmissão de dados de 1 a 2 Mbps. A extensão 802.11b [2] fornece taxas adicionais de 5,5 e 11 Mbps com faixa de frequência situada em torno de 2,4 Ghz, denominada de “banda ISM” (*Industrial Scientific And Medical*). A extensão 802.11a [15] suporta taxas que variam de 6 a 54 Mbps na faixa situada em torno de 5Ghz, chamada de “banda UNII” (*Unlicensed National Information Infrastructure*). Pelo fato de utilizarem uma frequência mais alta, as estações de uma rede 802.11a possuem um alcance menor que as estações das redes 802.11b. As extensões do padrão original não estão limitadas a isto, na seção 2.6.5 serão descritas com mais detalhes as principais características das extensões da camada física 802.11.

- b) Grupo de Trabalho 15 [16]: implementa padrões para as redes de área pessoal – WPAN. As redes WPANs interligam dispositivos portáteis e de computação móvel e possuem uma abrangência de até dez metros de raio. O *Bluetooth* [17] é um exemplo típico das principais tecnologias utilizadas nesta área. Esta tecnologia utiliza banda ISM e oferece taxas de até 1 Mbps. Dentro do WG 15 outros grupos de tarefas estudam as tecnologias para WPANs de altas (TG3) e de baixas taxas de transmissão (TG4).
- c) Grupo de Trabalho 16 [18]: elabora especificações para as redes metropolitanas sem fio (*Broadband Wireless Metropolitan Area Networks* ou *WirelessMANs*), almejando a implantação de sistemas de acesso fixo em banda larga (*fixed BWA – Broadcasting Wireless Access*). Para estabelecer sistemas de distribuição de serviços de voz, dados, Internet e vídeo em banda larga, usando uma arquitetura de rede similar à das redes celulares (porém para acesso fixo), o 802.16 utiliza tecnologias como WLL (*Wireless Local Loop*) / LMDS (*Local Multipoint Distribution System*). As faixas de

freqüência utilizadas não são licenciadas⁴ e situam-se entre 10 e 66 Ghz, mas também utiliza faixas não-licenciadas⁵.

A lista de padrões descrita acima não é exaustiva, pois apresentou apenas o trabalho desenvolvido pelo IEEE. No entanto, outros padrões desenvolvidos por diferentes órgãos de padronização internacional nas áreas de telecomunicações podem ser consultados na literatura [19], [20], [21], [22], [23], [24].

2.2. PADRÃO IEEE 802.11

Os primeiros movimentos e empenhos em aplicar a transmissão sem fio em redes de computadores partiram das instituições e das empresas. Diante disto, em 1990, com o objetivo de viabilizar esta tecnologia, o IEEE constitui um grupo de pesquisa [16] para criar padrões abertos. Esse projeto foi denominado de padrão IEEE 802.11, mas em função da baixa taxa de transferência de dados, que era de apenas alguns Kbps, não foi possível validar o padrão. Somente no segundo semestre de 1997, o IEEE de fato conseguiu publicar o padrão para as WLANs.

No instante em que esta tecnologia atingiu 1 até 2 Mbps, a rede sem fio passou a ser vista como uma tecnologia promissora e, novos investimentos foram aplicados para a construção de equipamentos que permitissem a interoperabilidade entre diferentes equipamentos. Desde então, o padrão IEEE 802.11, elaborado para a maturação das diversas tecnologias que compõem uma rede local sem fio, continua em desenvolvimento.

Conforme descrito na seção 2.1, o padrão 802.11 foi criado pelo Grupo de Trabalho 11 do Comitê de Padrões 802 do IEEE. Este padrão, assim como todos os

⁴ Definem as faixas de freqüência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) para serem utilizadas nas redes sem fio, baseadas em radiofreqüência. Podem ser usadas sem a necessidade de pedido de autorização para operação.

⁵ Definem faixas de freqüência variadas que para serem utilizadas necessitam de autorização para uso, como por exemplo, os sistemas de telefonia celular.

protocolos da família 802.x, envolvem a camada física e de enlace do Modelo de Referência Básico para Interconexão de Sistemas Abertos (ISO/IEC 7498-1:1994) (*Open Systems Interconnections Basic Reference Model*), conhecido como Modelo OSI e criado pela ISO (*International Organization for Standardization*) [25]. A versão atual da especificação do 802.11 foi editada em 1999 [1] e adotada também pela ISO como padrão internacional no documento ISO/IEC 8802-11:1999. Através da Figura 1 [35] é possível visualizar uma comparação entre o modelo padrão de redes de computadores e o padrão IEEE 802.11.

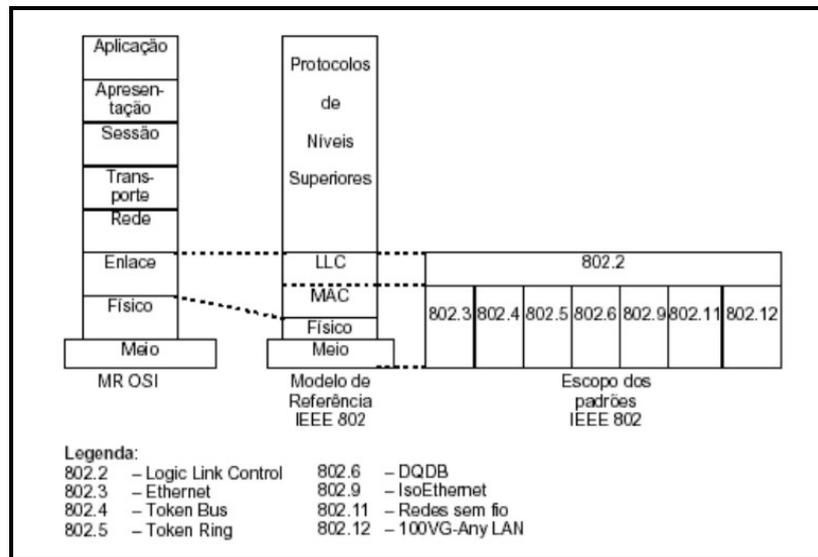


Figura 1 - Modelo de Referência RM – OSI x Padrão 802.11

A camada de enlace de dados (Figura 1) foi subdividida em uma subcamada de controle do enlace lógico (*Logical Link Control – LLC*) e outra de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control – MAC*). O LLC é descrito na especificação 802.2 e é comum a todos os demais padrões da família 802. Esses outros padrões, por sua vez, especificam o nível físico e a subcamada MAC do nível de enlace. Assim foram gerados, por exemplo, as especificações para as redes *Ethernet* (802.3), *Token Bus* (802.4), *Token Ring* (802.5) e *DQDB* (802.6). O padrão 802.11 foi projetado para ser compatível com os demais padrões da família 802, ou seja, deve ser visto pela LLC como qualquer outra rede 802.

2.3. REDE LOCAL SEM FIO (WIRELESS LOCAL AREA NETWORK – WLAN)

Uma rede local sem fio pode ser considerada uma extensão de uma rede local cabeada, que converte os pacotes de dados em ondas de rádio ou raios infravermelhos e os envia para outros equipamentos da rede ou para um ponto de acesso que serve como uma conexão para uma LAN (*Local Area Network*). Ou ainda uma WLAN é um sistema que interconecta vários dispositivos móveis ou fixos usando o ar como meio de transmissão (Figura 2).

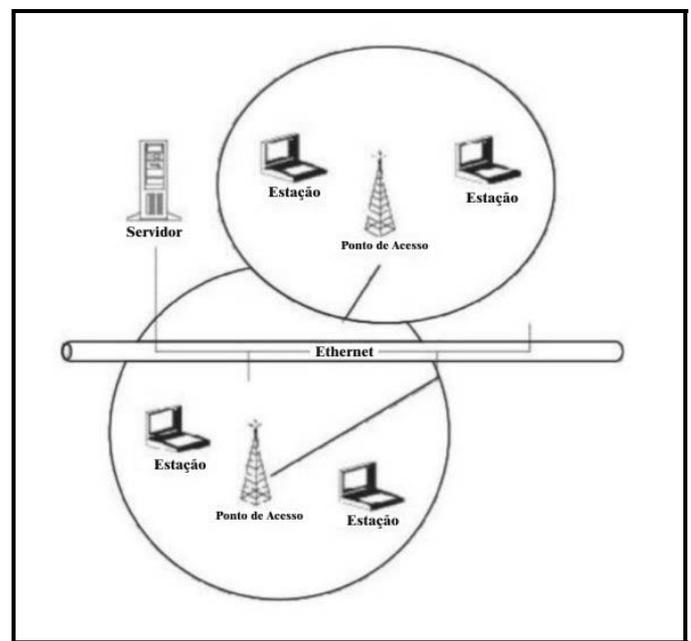


Figura 2 - Exemplo de uma WLAN

O exemplo da Figura 2 apresentou uma WLAN típica onde os pontos de acesso (*Access Point – AP*) são conectados a uma LAN *Ethernet* convencional com fio. Os AP fornecem a conexão com a rede local convencional e intermediam o tráfego com os APs vizinhos, num esquema de micro células com *roaming* semelhante a um sistema de telefonia celular.

A transmissão dos pacotes de dados num ambiente local de comunicação sem fio pode ser efetuada através da utilização das portadoras de rádio ou infravermelhos. No entanto, para que a mensagem possa ser reconhecida pelo transmissor e pelo receptor, os dados são modulados na portadora de rádio e transmitidos através de ondas

eletromagnéticas. Num mesmo meio, podem coexistir múltiplas portadoras de rádio sem que uma interfira a outra. Para realizar a extração dos dados, o receptor sintoniza numa frequência específica e rejeita as outras portadoras de frequências diferentes.

As WLANs constituem-se como uma alternativa para as LANs, pois fornecem as mesmas funcionalidades, porém de forma flexível, são de fácil instalação e proporcionam uma conectividade em áreas prediais ou de campus em situações em que as áreas a serem cobertas pela rede são de difícil acesso, ou ainda quando a instalação do cabeamento é economicamente inviável.

Quando existem várias tecnologias disponíveis para comunicação sem fio, todas utilizando o ar como meio de transmissão, existe a necessidade de se regular as faixas do espectro de frequências que cada uma dessas tecnologias emprega. Há as faixas licenciadas e não licenciadas. As licenciadas dependem de um órgão regulador dos serviços de telecomunicações de cada País e só podem ser usadas mediante pagamento de taxas. Este o caso das faixas empregadas nos sistemas celulares.

2.4. ARQUITETURA DO 802.11

A arquitetura 802.11 é formada por alguns componentes que interagem para prover uma WLAN com suporte à mobilidade de estações de modo transparente para as camadas superiores. Estes componentes compreendem a unidade básica (*Basic Service Set - BSS*), as estações (STAs), o meio sem fio, o ponto de acesso (*Access Point - AP*), o sistema de distribuição (*Distribution System - DS*) e o conjunto estendido de serviços (*Extended Service Set - ESS*) [26].

O principal bloco de construção da arquitetura do 802.11 é o BSS, definido como um grupo de STAs que estão sob o controle direto de uma mesma função de coordenação (seção 2.7). Esta função é quem determina quando cada STA pode enviar e receber dados utilizando o meio de transmissão sem fio. A área ocupada pelos membros de um BSS é denominada de BSA (*Basic Service Area*).

Uma WLAN segue uma arquitetura modular, onde o sistema é dividido em células. Cada célula, chamada de BSS, é composta por uma ou mais estações e pela estação base – AP. Todo o controle das estações presentes na célula é realizado pela estação base e para se comunicarem com o AP as estações utilizam o protocolo MAC 802.11 [27].

Uma WLAN pode ser constituída por uma única célula com um único AP, no entanto para permitir a construção de redes que devem cobrir áreas maiores que uma célula, utiliza-se um DS, no qual os APs são conectados por intermédio de um *backbone Ethernet* ou *Wireless*. Neste contexto, o DS representa a infra-estrutura de comunicação que interliga as células que constituem a rede.

O conjunto de estações e APs formados pela união de vários BSS conectados por um DS, é conhecido como um conjunto estendido de serviços. O ESS é visto pela camada de protocolos superior (IP) como uma simples rede 802, do mesmo modo que uma rede *Ethernet* 802.3 usando *bridge* é vista como uma simples rede 802 pelas camadas de protocolo superiores.

Para obter uma melhor compreensão entre os diversos componentes que formam a arquitetura IEEE 802.11, através da Figura 3 [31], tem-se um esboço de uma WLAN típica.

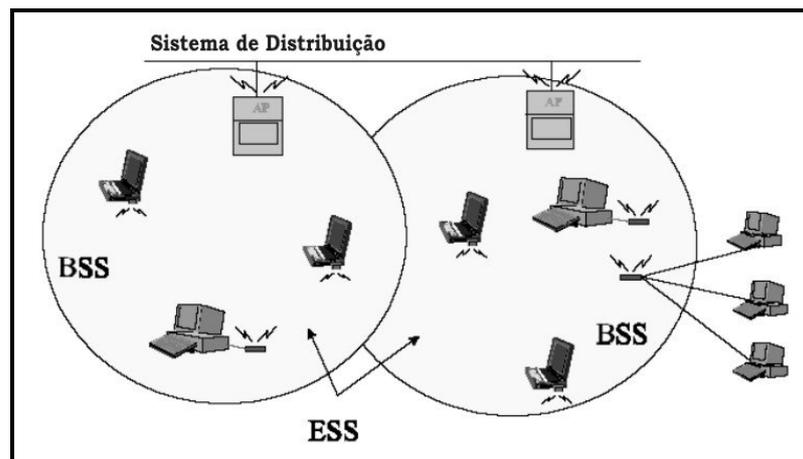


Figura 3 - Exemplo de uma WLAN Típica

Para que haja uma identificação da rede, cada ESS recebe uma identificação, denominada de ESS-ID. Dentro de cada ESS, cada BSS recebe uma identificação, chamada de BSS-ID. Onde o conjunto formado pelos dois identificadores (ESS-ID e BSS-ID), constitui o *Network-ID* de uma WLAN [28].

2.5. TOPOLOGIAS DAS WLANS

Conforme especificações do padrão IEEE 802.11, as redes locais sem fio podem ser configuradas de dois modos distintos: infra-estruturada e sem infra-estrutura [29], [30], [31]. A seguir será descrito como as estações podem se organizar para comunicar entre si diretamente ou indiretamente.

2.5.1 REDES SEM INFRA ESTRUTURA – *AD HOC*

As redes sem infra-estrutura, também conhecidas como redes *Ad Hoc* ou MANET (*Mobile Ad Hoc Network*), são formadas por somente estações móveis dentro de uma área restrita, que se comunicam sem a necessidade de uma estação base. Dentro de um BSS as estações móveis estabelecem entre si uma comunicação do tipo *peer-to-peer*, o que dispensa qualquer estrutura de comunicação de apoio. Neste modo de configuração o AP é inutilizado, pois as estações de um BSS são capazes de estabelecerem uma comunicação direta sem que a informação passe por um ponto de acesso centralizado. Nas redes MANET o BSS é denominado de BSS independente (iBSS). Um iBSS é formado por duas ou mais STAs 802.11.

Pelo fato dos nodos móveis poderem estabelecer uma comunicação direta entre os pares de uma BSS, as redes *Ad Hoc* são vistas como redes dinâmicas, mudando rapidamente, randômicas, com topologias *multihop* e compostas por restrições de banda em canais sem fio [32], [33]. A Figura 4 apresenta um exemplo de uma rede MANET.

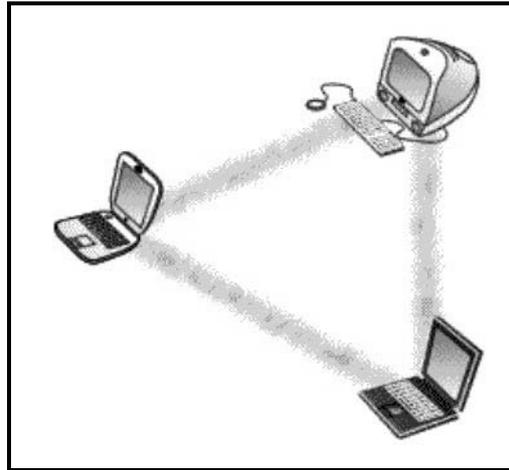


Figura 4 - Componentes de uma Rede 802.11 Ad Hoc

Para contextualizar, as redes *Ad Hoc* estão associadas com cenários aonde não se pode ou não faz sentido instalar uma rede fixa, como por exemplo: coordenação de equipes de resgate; trocas de informações táticas bélicas. Ou ainda quando existe a carência de instalar rapidamente uma rede para ser utilizada, como por exemplo: em reuniões, salas de aula, conferência, viagem de carro, trem, avião entre outras aplicabilidades. Uma vez que esta rede é configurada, os usuários munidos com seus laptops compartilham informações pertinentes ao que lhes convier, formando uma rede espontânea e independente, na qual os *hosts* móveis podem estar em movimento e conectando-se com diferentes *hosts* móveis ao longo do caminho. O tipo de topologia aplicada nesse contexto é uma rede *Ad Hoc* que necessita ser instalada e configurada rapidamente numa organização qualquer.

2.5.2 REDES COM INFRA-ESTRUTURA

As redes com infra-estrutura são formadas pelas estações e pelos pontos de acesso, este último é responsável por quase toda funcionalidade da rede. Diferentemente de uma rede *Ad Hoc*, uma estação em uma BSS não é capaz de estabelecer uma comunicação com uma outra estação sem que a informação passe por um ponto de acesso centralizador. Quando uma STA dentro de um BSS deseja se comunicar com

outra STA, a comunicação obrigatoriamente é interceptada pelo AP, para posteriormente ser enviada à estação de destino.

Pelo fato de todas as estações dentro de um BSS se comunicarem com o AP duas comunicações ocorrerão originando e terminando no mesmo BSS, ocasionando o consumo duplo da largura de banda, gerando um custo significativo. No entanto, os benefícios superam os custos, pois um AP, desempenha as seguintes funções [28]:

- Autenticação, associação e reassociação: onde através da função de *handoff*, um nodo móvel pode se deslocar da célula de origem e permanecer conectado à infra-estrutura sem perder a comunicação.
- Gerenciamento de potência: através do modo *Power Save*, um AP realiza a bufferização do tráfego para uma estação móvel enquanto ela estiver operando em baixa capacidade de energia.
- Sincronização: todas as estações associadas a um AP são sincronizadas por um relógio comum.

De modo a aumentar a abrangência de cobertura destas redes, vários APs podem ser interligados por intermédio de *backbones*. Sendo assim, quando houver mais de uma BSS, será preciso interconectar as BSSs formando uma ESS. Nestas redes, a infra-estrutura é caracterizada pela presença do AP e pelo sistema de distribuição que interliga esses APs.

Nas redes com infra-estrutura, o AP é responsável por prover a conexão com as demais BSS ou, se for o caso, com a rede local fixa e ainda assume a função de transmissor e receptor das estações de uma BSS local. Os DSs interligam todos os APs presentes e também oferecem os recursos necessários para interligar a WLAN com outras redes. A Figura 5 apresenta um exemplo de uma rede infra-estruturada.

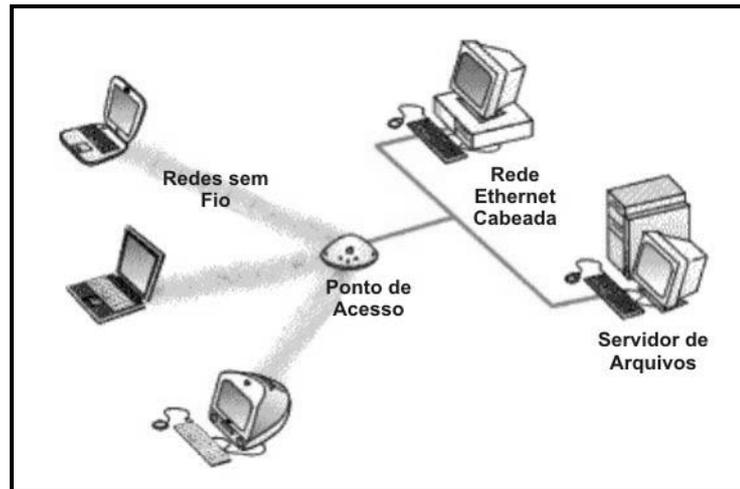


Figura 5 - Componentes de uma Rede 802.11 Infra-Estruturada

A aplicabilidade desta topologia pode ser empregada em locais aonde já exista uma LAN, mas necessita-se oferecer flexibilidade e mobilidade para algumas estações. Ou ainda, em redes *Wi-Fi*, que nada mais é que uma rede local sem fio, configurada em locais públicos como hotéis, restaurantes, aeroportos. Locais chamados de *Hot Spots*, freqüentados por muitos usuários, que munidos de seus laptops e PDAs compartilham o mesmo acesso à internet. No trabalho descrito [9], a contextualização é feita sobre os *Hot Spots*.

2.6. CAMADA FÍSICA DO 802.11

Para a transmissão dos dados da camada física do padrão IEEE 802.11 [1] foram definidas três formas de transmissão: duas de rádio frequência (RF) baseadas em espalhamento de espectro, conhecidas como espalhamento de espectro por salto em frequências (*Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS*) e espalhamento de espectro por seqüência direta (*Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS*) e uma para a transmissão infravermelha difusa (IR). A escolha das técnicas dependerá de vários fatores relacionados com a aplicação dos usuários e o ambiente onde a rede irá operar.

Todas as camadas físicas do 802.11 incluem a provisão de um sinal de avaliação de canal livre (*Clear Channel Assessment Signal – CCA*), que indica o estado atual do uso do meio sem fio. Esse sinal é utilizado pela camada MAC (seção 2.7) para indicar se o meio está livre. Cada camada física do padrão IEEE 802.11 oferece uma taxa de 1 a 2 Mbps.

Para a transmissão em radiofrequência são utilizadas as técnicas FHSS e DSSS, que codificam dados e modulam sinais de modos distintos para equilibrar velocidade, distância e capacidade de transmissão. De forma a permitir a transmissão simultânea de vários quadros, ao invés de usar um único canal, as técnicas FHSS e DSSS transmitem os quadros de dados enviando-os por vários canais disponíveis dentro de uma frequência.

A técnica DSSS distribui o sinal sobre uma gama extensiva da faixa de frequência e os pacotes são reorganizados no receptor. Enquanto que a FHSS remete segmentos curtos de dados, transmitidos através de frequências específicas, controlando o fluxo com o receptor, que negocia velocidades menores comparadas às velocidades oferecidas pela técnica DSSS, mas menos suscetíveis a interferências.

As redes sem fio baseadas em radiofrequência usam as faixas de frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) para a transmissão. O padrão IEEE 802.11 define que as tecnologias de transmissão por espalhamento espectral operem na faixa de 2,400 a 2,4835 Ghz da banda ISM. Esta faixa foi escolhida, pela disponibilidade na maioria dos países [1].

As bandas ISM apresentadas na Figura 6 [31] foram definidas como uma faixa de frequência para serem utilizadas nas redes sem fio, baseadas em radiofrequência. O responsável por esta regulamentação é o órgão FCC (*Federal Communications Commission*), define que a banda ISM pode ser utilizada sem a necessidade de pedido de autorização para operação. Sendo assim, para a transmissão nestas faixas não é exigido nenhum tipo de licença [34].

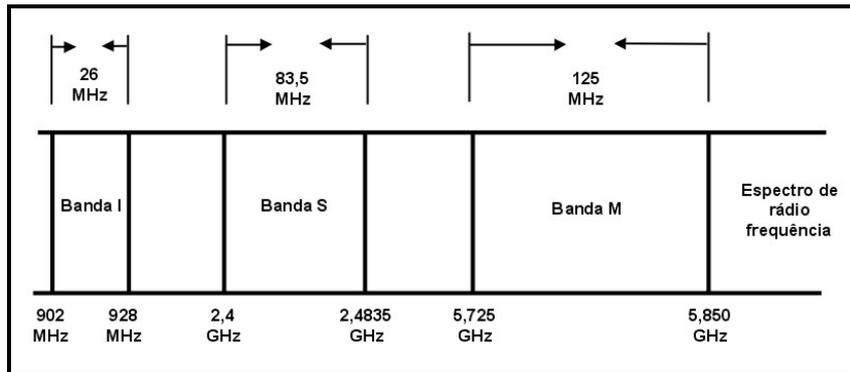


Figura 6 – Bandas ISM

Além das formas de transmissão FHSS e DSSS uma outra técnica poderá ser utilizada – infravermelho. Apesar de possuir uma maior vazão que as técnicas baseadas em rádio frequência, alguns inconvenientes, como por exemplo, o fato dos raios infravermelhos não atravessarem certos tipos de materiais e a ocorrência de interferências provocada pela luz solar, caracteriza alguns aspectos que impedem o uso do infravermelho em redes locais sem fio.

2.6.1 ESPALHAMENTO ESPECTRAL POR SALTO DE FREQUÊNCIA (FHSS)

A técnica FHSS é uma das três camadas físicas suportadas pelo padrão IEEE 802.11, onde o meio de transmissão utilizado é a radiofrequência, operando na banda ISM não licenciada que vai de 2,4000 a 2,4835 Ghz. Neste sistema ocorre a divisão da banda passante em subcanais de pequenas bandas (vários canais de frequência); o transmissor e o receptor de forma sincronizada utilizam um desses canais por um certo tempo e depois saltam para um outro canal, seguindo canais pseudo-aleatórios de uso dos canais chamados de seqüência de saltos. Esse espalhamento proporciona maior segurança e menor susceptibilidade à interferência eletromagnética.

Os subcanais resultantes da divisão da banda passante são espaçados uniformemente sobre a faixa de frequência de 83.5 Mhz, ocupando uma largura de banda de 1 Mhz (Figura 7 [35]). O sinal é difundido numa seqüência pseudo-randômica

destes canais. Em um determinado momento, conforme uma seqüência, o transmissor envia os dados ciclicamente em diversos subcanais e para que o receptor possa receber os dados corretamente, deverá percorrer os subcanais na mesma ordem em que o transmissor os utiliza, ou seja, para recuperar os dados o receptor deverá saltar em sincronia com o transmissor. No entanto, a informação só será totalmente resgatada se a série de canais do transmissor for conhecida pelo receptor. Neste processo, o uso de um subcanal deve ocorrer em um curto espaço de tempo e em média todos os subcanais devem ser igualmente utilizados [35].

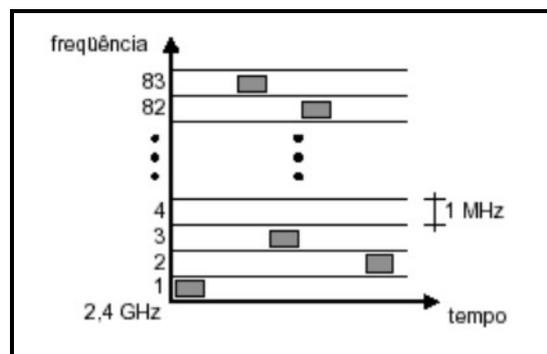


Figura 7 – Exemplo da Técnica FHSS

Segundo o FCC a largura de banda da PHY FHSS de 83,5 Mhz é dividida em 83 subcanais de 1 Mhz, devendo ser utilizada em sistemas FHSS no mínimo 75 subcanais. No entanto, como o número de canais alocados para o espalhamento do espectro depende da localização geográfica, nos EUA e em quase toda a Europa são empregados 79 canais. O primeiro canal possui uma freqüência central de 2,402 Ghz e os canais subseqüentes estão separados por 1 Mhz, sendo que cada canal possui uma banda de 1 Mps e os saltos devem ter uma distância mínima de 6 Mhz, ou seja, 6 canais. Prevê-se ainda três conjuntos com 26 seqüências de saltos. Os três conjuntos existem para evitar períodos de colisões entre diferentes seqüências de saltos [36]. Em função da seqüência de saltos, em uma mesma área geográfica é possível coexistir até três redes (BSSs).

A taxa básica de 1 Mbps usa uma modulação gaussiana por chaveamento de freqüência (*Gaussian Frequency Shift Keying – GFSK*) de dois níveis. Os dados passam por um filtro gaussiano em banda base e são modulados em freqüência (um 1 lógico é

codificado usando uma frequência $F_c + f$ e um 0 lógico usa uma frequência $F_c - f$). A taxa opcional de 2 Mbps usa a modulação GFSK de quatro níveis, onde dois bits são codificados por vez usando quatro frequências [37]. Sendo assim, é possível coexistir várias redes em uma mesma área através da separação destas redes por diferentes padrões pseudo-aleatórios de uso do canal chamados seqüências de saltos.

2.6.2 ESPALHAMENTO ESPECTRAL POR SEQÜÊNCIA DIRETA (DSSS)

A técnica DSSS é uma das três camadas físicas suportadas pelo padrão IEEE 802.11, utiliza o espalhamento de espectro, na qual diferentes transmissões são separadas por códigos e não por frequência como ocorre no FHSS. O meio utilizado para a transmissão é a radiofrequência, operando na banda ISM não licenciada, de 2,4 Ghz. O espalhamento do sinal é feito sobre a larga banda de rádio frequência disponível, criando um padrão redundante o qual recebe o nome de *chip*⁶.

A taxa básica de 1 Mbps é gerada através de uma modulação diferencial binária por chaveamento de fase (*Differential Binary Phase Shift Keying – DBPSK*) e a taxa opcional de 2 Mbps usa uma modulação diferencial quaternária por chaveamento de fase (*Differential Quadrature Phase Shift Keying – DQPSK*) [37].

Na técnica DSSS cada estação possui uma seqüência pseudo-randômica de símbolos binários (n bits), convencionada de seqüência de *chips*. Para transmitir o bit 1, uma estação deve enviar a uma seqüência de chips e para remeter o bit 0, utiliza-se o complemento desta seqüência. Baseado neste contexto, na transmissão de 1 Mbit/s, tem-se o envio de n Mchip/s, onde a largura de banda disponível para a transmissão deve ser aumentada por um fator n [35], [38]. A Figura 8 [31] apresenta uma seqüência com $n=11$, onde n é chamado de fator de espalhamento de espectro.

⁶ O chip é o tempo para realizar a transmissão de um bit ou um simples símbolo de um código PN (*Pseudo Noise*), um sinal digital com propriedades de ruído.

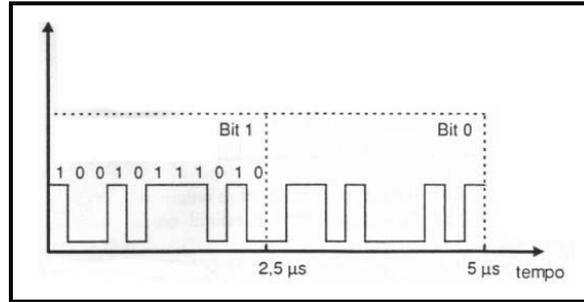


Figura 8 – Exemplo de seqüência de chip

Segundo a especificação do padrão IEEE 802.11, para a PHY DSSS o espalhamento é realizado através da divisão da banda disponível em 11 subcanais, onde cada canal possui uma largura de banda de 11 Mhz; cada símbolo de dados é espalhado usando uma seqüência de *Barker*, composta por 11 *chips* dada por: (+1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1). Redes localizadas em uma mesma área devem usar canais cujas freqüências centrais sejam separadas de pelo menos 30 Mhz, para evitar interferência mútua. Assim, de forma similar ao que ocorre no FHSS, no DSSS podem coexistir no máximo três redes em uma mesma área [7],[40]. Uma representação do espaçamento mínimo entre canais para a América do Norte pode ser visualizada através da Figura 9 [31].

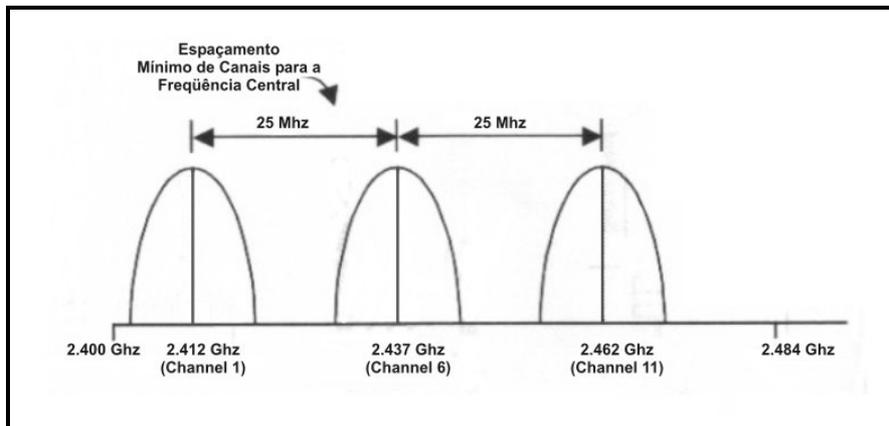


Figura 9 – Espaçamento Mínimo entre canais na América do Norte

2.6.3 RAIOS INFRAVERMELHOS (IR)

O sistema de transmissão IR é uma das três camadas físicas suportadas pelo padrão IEEE 802.11. Para a transmissão dos dados, a PHY IR utiliza raios com comprimento de onda muito alto (850 a 950 nm), um pouco abaixo do espectro da luz.

Em virtude das interferências em que a tecnologia IR está sujeita, o IR foi projetado para ser empregado em ambientes fechados, não conseguindo penetrar em objetos opacos, por isso as comunicações infravermelhas são realizadas de forma direcionada (direta) ou por difusão (reflexão).

Para entender a forma de funcionamento da comunicação direta, pode-se utilizar como exemplo o controle remoto de um aparelho de televisão ou a transferência de arquivos entre dois computadores, aonde os sinais de transmissão dos IRs são centrados e dirigidos diretamente para um receptor [31]. Neste tipo de rede os nodos devem estar alinhados formando um anel, ou seja, o nodo que recebe os dados deve estar alinhado com o nodo transmissor e com o nodo a qual irá enviar os dados. A distância empregada na transmissão direcionada é muito pequena (poucos metros) e seu uso é restrito a PANs e algumas aplicações específicas em WLANs, embora alcançando uma maior vazão que a comunicação difusa, não oferecem mobilidade pela exigência de alinhamento rígido com seus respectivos pares.

Na comunicação por difusão ou reflexão, a transmissão utilizando IR não necessita ser direcionada, mas fica restrita a ambientes fechados, pois os equipamentos *Wi-Fi* são dependentes das estruturas do ambiente, tais como tetos e paredes, para refletir os sinais das portadoras. A Figura 10 [31] ilustra um ambiente de comunicação por difusão, composta pelo emissor e alguns receptores que se comunicam através de um ponto de reflexão. Neste tipo de rede, caso não existam fontes de calor e sol interferindo na transmissão, a maior distância entre as estações e o plano de reflexão pode atingir 10 metros. Ou no caso da utilização de receptores mais sensíveis, as transmissões podem ocorrer até 20 metros e, para que todas as estações visualizem o ponto de reflexão, em nenhum dos casos podem existir obstáculos.

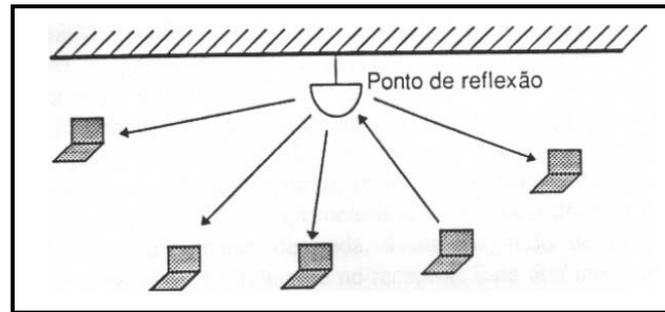


Figura 10 - Comunicação utilizando IR difusos

Para as transmissões na taxa básica de 1Mbps, emprega-se a modulação por posição de pulso (16 – *Pulse Position Modulation* – PPM), na qual quatro bits de dados são mapeados em 16 bits codificados para transmissão. Na taxa opcional de 2Mbps utiliza-se uma 4-PPM, onde dois bits de dados são mapeados em quatro bits codificados para transmissão [1].

2.7. SUBCAMADA DE CONTROLE DE ACESSO AO MEIO (*MEDIUM ACCESS CONTROL* – MAC)

O grupo de trabalho IEEE 802.11 foi formado com o objetivo de especificar um padrão internacional para as redes locais sem fio, que contemplasse alguns requisitos: prover a interconexão com os sistemas pré-existentes e garantir tempos de respostas aceitáveis, sem comprometer a produtividade do usuário final. Para que estes objetivos sejam alcançados, a camada MAC deve aparecer para a camada LLC (*Logic Link Control*) e superiores como qualquer outra rede 802.x, como por exemplo, uma rede *Ethernet* cabeada. Para que isto seja possível, o padrão IEEE descreve:

- Funções e serviços exigidos por um dispositivo 802.11 para operar dentro de uma rede sem fio, bem como aspectos relacionados com a mobilidade da estação dentro destas redes;
- Procedimentos MAC que devem suportar a entrega dos dados sensíveis a tempo e assíncronos;

- Serviços para proporcionar segurança e privacidade para os dispositivos 802.11.

A especificação da MAC 802.11 é similar ao padrão 802.3 da rede *Ethernet* cabeada. Porém, pelo fato da dificuldade de detectar colisões em uma rede de transmissão por radio frequência, o protocolo de acesso ao meio utilizado nas redes 802.11 é o CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), utilizado para evitar colisões. Já o algoritmo CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*), empregado nas redes 802.3, é capaz de detectar colisões.

O controle de acesso ao meio do 802.11 é baseado em funções de coordenação. A função de coordenação é quem determina qual e quando uma STA pertencente ao BSS possui permissão para enviar e receber dados utilizando o meio sem fio. O padrão IEEE 802.11 especifica dois tipos de funções de coordenação: uma obrigatória - função de coordenação distribuída (*Distributed Coordination Function – DCF*) e outra opcional - função de coordenação em um ponto (*Point Coordination Function – PCF*), as quais encontram-se descritas na seção 2.7.1.

2.7.1 MÉTODOS DE ACESSO

O método básico e obrigatório de acesso ao meio da camada MAC é o DCF, que provê acesso múltiplo assíncrono e com contenção, com detecção de portadora e prevenção de colisão CSMA/CA. O PCF, que é um mecanismo com serviços livres com contenção pode ser opcionalmente oferecido. Ambos os métodos de acessos ou funções de coordenação provêm acesso assíncrono com retardo limitado. A Figura 11 [35] apresenta a estrutura lógica da camada MAC.

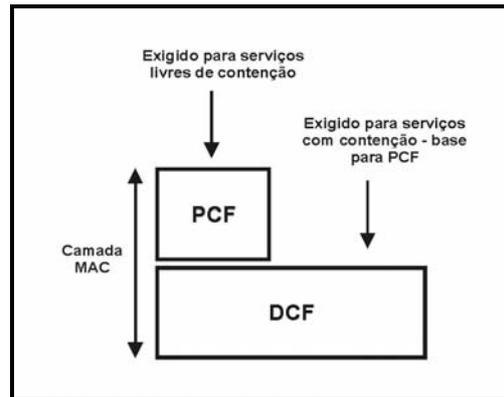


Figura 11 - Estrutura da Camada MAC

A função de coordenação é o mecanismo que determina quando uma estação está autorizada a transmitir. Se a função de coordenação utilizada for a DCF, a própria estação se responsabiliza de escolher o melhor momento para efetuar a transmissão, o que pode ocasionar transmissões simultâneas. No entanto, quando a função de coordenação adotada é PCF, as estações não se preocupam mais em tentar descobrir o momento exato para iniciar as transmissões, em vez disto aguardam as decisões provenientes do ponto central. O ponto central é quem irá decidir qual é a estação e em que momento ela está habilitada para proceder à transmissão. Neste mecanismo evita-se a ocorrência de colisões [28].

2.7.2 FUNÇÃO DE COORDENAÇÃO DISTRIBUÍDA – DCF

A função DFC é o mecanismo básico de controle de acesso ao meio da camada MAC 802.11. É uma função de acesso múltiplo assíncrono e com contenção, com detecção de portadora e evitando as colisões – CSMA/CA. Como protocolo MAC, as redes *Ethernet* IEEE 802.3, utilizam o CSMA/CD. Esta técnica é adequada para ser utilizada nas redes convencionais, porém em redes *wireless* este algoritmo torna-se inadequado no instante em que se depara com os terminais escondidos⁷ (Figura 12).

⁷ O problema do terminal escondido ocorre quando uma estação B é capaz de receber quadros de dois diferentes transmissores, A e C, porém estes transmissores estão fora do alcance um do outro. Diz-se que

Além disso, a detecção de colisões é muito difícil por assumir que todas as estações ouvem as outras, por requererem um rádio *full duplex* de custo elevado e porque a taxa de erro de bit na camada MAC do 802.11 é de 10^{-5} [43].

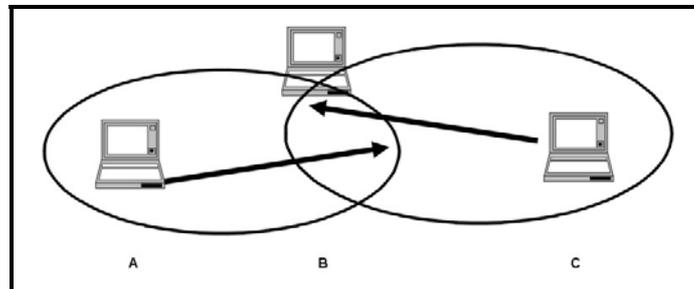


Figura 12 – Terminal Escondido

Conforme ilustração da Figura 12, percebe-se que o nodo A não consegue visualizar o nodo C e vice e versa. Neste exemplo, se o nodo A transmitir, o nodo C não reconhece esta transmissão, podendo inclusive iniciar sua própria transmissão simultaneamente, originando conflitos em função das colisões.

Para evitar a ocorrência de colisões, o IEEE [1] especificou dois tipos de DCF: um baseado no mecanismo CSMA/CA, com reconhecimento positivo (*Positive Acknowledge*) que é obrigatório. E outro opcional que assim como o mecanismo obrigatório, também emprega pedidos e permissões para efetuar a transmissão dos dados (*Request to Send – RTS*) e (*Clear to Send – CTS*).

A Figura 13 retirada de [57] apresenta o primeiro tipo de DFC, o esquema do mecanismo básico da camada MAC, ilustrando o funcionamento do CSMA/CA utilizado com o objetivo de impedir a ocorrência de colisões.

A está escondido para C e vice-versa. Nesse caso, o transmissor A pode achar que o meio está livre mesmo que C esteja transmitindo, o que resultará em colisão no receptor B.

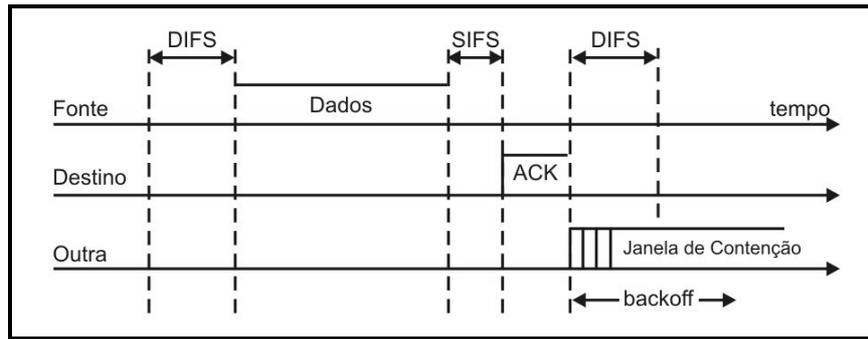


Figura 13 - Mecanismo de Acesso Básico da Camada MAC

No esquema básico, quando uma estação deseja transmitir algum quadro de dados, primeiramente ela escuta o meio, detectando ou não a portadora. A sub-camada física utiliza um algoritmo (*Clear Channel Assentment – CCA*) para determinar se o canal está livre. Este é acompanhado pela medida do nível de energia de rádio-freqüência na antena e determina a força do sinal recebido. Se a força do sinal recebido é menor que um determinado valor, a estação entende que o canal está liberado e a camada MAC recebe o estado de canal livre para transmitir os dados. Caso o meio esteja livre após ou pelo menos um determinado tempo chamado espaço distribuído entre quadros (*Distributed Interframe Space – DIFS*), a estação transmite o quadro de dados.

Se o canal estiver ocupado, a transmissão é prorrogada até o término da transmissão corrente. Neste caso, inicia-se um processo de *backoff*, conhecido como *Backoff Exponencial Binário*, no qual a estação escolhe um valor aleatório, a partir de uma distribuição uniforme no intervalo entre zero e o tamanho da janela de contenção (*Contention Window – CW*) e cria um temporizador de *backoff*. Na situação inicial, CW tem um tamanho mínimo, configurado pelo parâmetro (CWmin). O valor escolhido é multiplicado pelo tempo de duração de um *slot*, denominado *slottime*⁸, para criar um temporizador de *backoff*. O temporizador é decrementado a cada *slot* caso não haja transmissão no meio. Se alguma transmissão for detectada, o temporizador é paralisado e só é reiniciado quando o meio ficar livre novamente por DIFS. Quando finalmente o

⁸ Um *slottime* corresponde ao atraso máximo de propagação de ida e volta dentro de um BSS, incluindo ainda um tempo de processamento no receptor.

temporizador expira, a estação envia o seu quadro. Agindo assim, o procedimento de *backoff* busca evitar sucessivas colisões entre estações que estão tentando transmitir simultaneamente, pois distribuem no tempo as tentativas de transmissão.

Antes de efetivar a confirmação do quadro, a estação receptora faz uma detecção de erros através da utilização do método de verificação cíclica (CRC). Se o pacote estiver correto, imediatamente depois da recepção do quadro de dados e após um intervalo de tempo chamado espaço curto entre quadros (*Short Interframe Space – SIFS*), a estação receptora envia um quadro de reconhecimento – ACK. Por definição, o SIFS é menor que o DIFS, ou seja, a estação receptora ouve o meio por SIFS para posteriormente enviar um ACK (Figura 13), para o padrão 802.11b DSSS, a duração do SIFS (*sifstime*) é 10. O transmissor não pode, por intermédio de sua própria transmissão, saber se o quadro foi recebido. Por isso fica aguardando um ACK. Se o quadro de confirmação não for recebido no tempo esperado, o transmissor entenderá que o quadro colidiu ou foi recebido com erro, escalonará uma retransmissão e entrará em *backoff* descrito anteriormente. O valor de CW é dobrado e um novo temporizador é criado. A cada transmissão não sucedida, o valor de CW é aumentado para a próxima potência de 2 (menos 1 unidade), até que seja atingido um valor máximo pré-definido chamado CW_{max} (no 802.11b DSSS, CW_{min} é igual a 31 e CW_{max} é igual a 1023). Caso um número máximo de tentativas de transmissões seja alcançado (7, por padrão), o quadro é descartado e o nível superior é informado sobre a falha de transmissão.

O procedimento de *backoff* também é executado após cada transmissão bem sucedida de uma estação, para evitar que ela monopolize o meio, impedindo as demais de transmitir.

No esquema básico do DCF (Figura 13), para o 802.11b DSSS, a duração do SIFS (*sifstime*) é 10 μ s e a do *slottime* é 20s. O DIFS é definido por $SIFS + 2 * slottime$, o que resulta num tempo de espera de 50 μ s.

Para minimizar o problema de terminais escondidos inerente no CSMA, o padrão oferece um outro mecanismo de DFC que inclui pacotes de solicitação (RTS) e permissão de transmissão (CTS). Este método de acesso é opcional, a detecção da portadora pode ser feita pelo mecanismo físico CCA e virtual. No mecanismo de

detecção virtual, antes de enviar os dados, as estações trocam quadros de controle RTS e CTS com o propósito de que o meio de transmissão seja reservado por um tempo necessário para efetuar a troca de quadros de dados entre uma estação e outra. Os pacotes RTS e CTS contêm informações do nó de destino; da duração da transmissão que inclui o tempo necessário ao recebimento do ACK referente ao pacote de dados que se quer transmitir e é escutado por todas as estações que se encontram na área de cobertura do transmissor. A Figura 14 [53] apresenta o modo DCF com as extensões RTS e CTS.

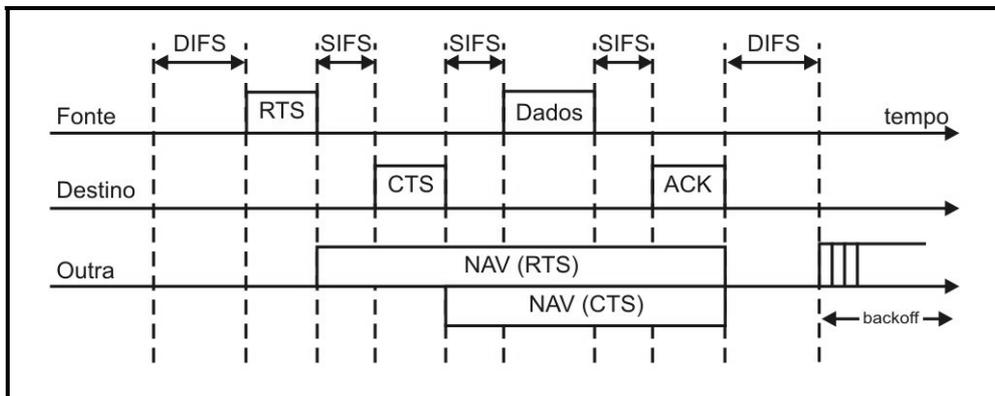


Figura 14 - Acesso DCF com Extensão RTS e CTS

Antes de realizar a transmissão dos dados, uma estação escuta o meio por um tempo maior ou igual a DIFS. Se o meio estiver livre por pelo menos DIFS segundos, a estação transmite um quadro de solicitação RTS, a fim de reservar o meio. Caso o meio encontre-se livre por pelo menos SIFS segundos e o receptor esteja pronto para receber, por sua vez responde com um CTS. Ao receber o CTS e aguardar o meio ficar livre por pelo menos SIFS segundos, o transmissor inicia o envio do quadro de dados e passa a aguardar o ACK correspondente. Se dentro de um intervalo de tempo pré-determinado, o nó que originou o RTS não receber o CTS, o transmissor entra na fase de *Backoff* e retransmite o RTS conforme as regras do algoritmo exponencial binário.

Todos os quadros RTS e CTS contêm um campo que indica o tempo necessário para o envio do quadro de dados. Todas as estações da área de abrangência do transmissor e do receptor recebem um RTS, um CTS ou ambos e ao término da troca de

RTS/CTS, as estações da área de cobertura de ambos os participantes da negociação guardam a informação referente ao tempo de transmissão do pacote de dados e atualizam os respectivos vetores de alocação da rede (*Net Allocation Vectors - NAV*), que é utilizado para a detecção virtual da portadora. Esta informação indica o tempo que um nodo não poderá transmitir dados, mesmo que o CCA apresente o meio de transmissão como livre. Desta forma, as estações só entrarão em contenção pelo meio depois de decorrido o tempo estipulado nos quadros de controle, ou seja, neste intervalo de tempo o meio já está reservado para o envio do pacote do emissor que enviou o RTS. Isto contribui para que não ocorram colisões, pois qualquer terminal escondido poderá adiar a sua transmissão.

O uso de RTS e CTS é controlado em cada estação através de um parâmetro configurável chamado de limiar de RTS (*RTSthreshold*). A estação irá utilizar o RTS somente na transmissão de quadros com tamanhos maiores que o limiar, caso contrário, utilizará o esquema de acesso básico. Uma estação que tenha a opção de RTS e CTS implementada, mas não esteja usando RTS em suas transmissões deve ainda ser capaz de responder com o CTS para outras que estejam usando esse recurso.

É evidente que a colisão de um quadro RTS de 20 bytes é menos severa e menos provável que uma colisão dos quadros de dados de 2304 bytes, por exemplo. Contudo, quando a estação está utilizando quadro de tamanhos pequenos, a sobrecarga adicionada pela transmissão dos quadros RTS e CTS pode reduzir o benefício trazido pelo uso desses quadros. O parâmetro *RTSthreshold* permite decidir quando usar ou não o esquema de acesso com RTS/CTS, controlando o efeito dessa sobrecarga.

Tanto o mecanismo obrigatório, quanto o opcional da função DCF, são distribuídos e podem ser utilizados tanto em redes infra-estruturadas como em redes *Ad Hoc*, porém são assíncronos, o que não garante retardo máximo ou banda mínima forçando as estações adquirirem características de *best-effort*.

2.7.3 FUNÇÃO DE COORDENAÇÃO EM UM PONTO – PCF

A camada MAC 802.11 suporta dois métodos de acesso: um método distribuído básico, obrigatório (DCF) e um método de acesso centralizado, opcional (PCF). Por ser um mecanismo centralizado, o PCF, só pode ser empregado em redes infra-estruturadas, onde por intermédio de consulta feita em cada estação, um único ponto controla o acesso ao meio, oferecendo a oportunidade das estações transmitirem sem contenção. Para oferecer suporte à transmissão de tráfego assíncrono ou com retardo limitado (*time bounded*), os dois métodos podem coexistir. O método de acesso distribuído forma a base sobre a qual é construído o método centralizado. A verificação de operação conjunta do PCF e DCF pode ser contemplada através da Figura 15 [53].

O ponto coordenador (PC) que opera e situa-se no AP, é quem gerencia os serviços sem contenção e define qual das estações está autorizada a transmitir. Para contemplar uma determinada estação, o PC começa um período livre de contenção e realiza um *pooling* entre as estações, com isto sabe-se quais as estações que desejam transmitir, faz-se um registro na lista de *pooling*, estabelece-se uma ordem de prioridades, diferencia-se determinadas estações e elege-se regularmente as estações que estão aptas para o tráfego.

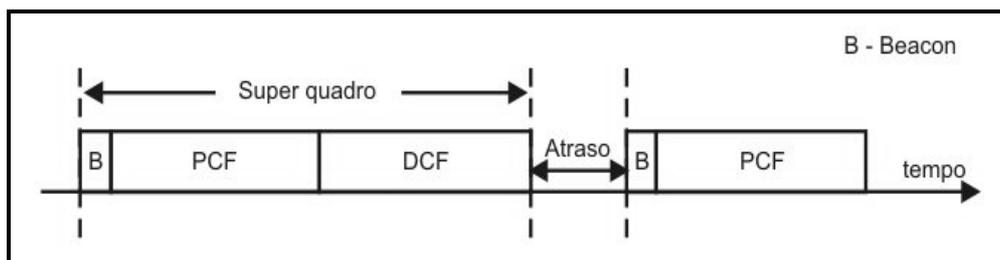


Figura 15 - Métodos de Acesso PCF e DCF

Conforme visto na Figura 15, evidencia-se que a construção do mecanismo centralizado PCF funciona sobre a base do DCF e ambos operam simultaneamente. Para o escopo do trabalho, o funcionamento do PCF será apresentado conforme descrito em [9], [26], [31], [35].

O PC divide o tempo de acesso em períodos de superquadros (Figura 15). Cada superquadro compreende um período livre de contenção (*Contention Free Period – CFP*) controlado pelo PCF e um período com contenção (*Contention Period - CP*) controlado pelo DCF.

O PC ouve o meio por um intervalo de tempo denominado PIFS (*Point Coordination Interframe Space*) segundos e então inicia um período livre de contenção. Por definição, PIFS é menor do que DIFS, sendo assim nenhuma estação pode iniciar a transmissão dos dados no modo DCF antes do PC. No início de cada CFP, após escutar o meio por PIFS, o PC informa através da difusão de um sinal de *beacon* qual a duração máxima do período livre de contenção ($CFP_{maxduration}$) e quando ocorrerá novamente. Para evitar que alguma estação assuma o controle do meio durante este período, todas as estações adicionam em seus respectivos NAVs a duração máxima de CFP. A relação entre os diversos intervalos entre quadros e a seqüência das ações tomadas pela estação ao realizar uma transmissão, podem ser visualizados por intermédio da Figura 16 [9].

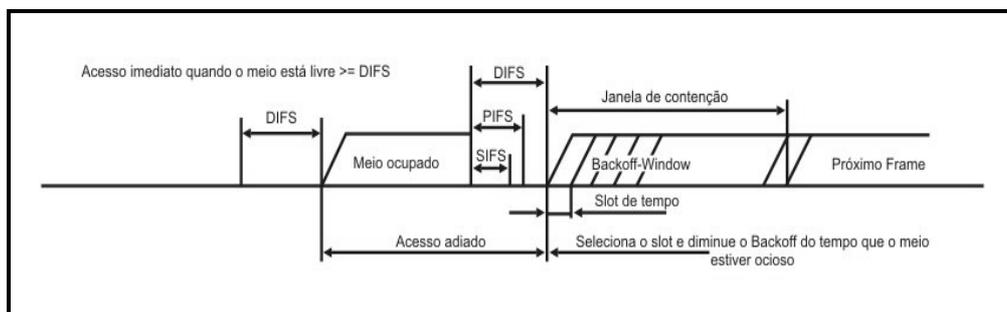


Figura 16 - Relações dos Intervalos entre Quadros do MAC 802.11

Após aguardar um intervalo de tempo SIFS, o PC pode enviar os dados, requisitar que as estações enviem os dados, confirmar o recebimento de dados e dependendo do tráfego disponível e do tamanho da lista de *pooling* a qualquer momento terminar com o CFP, enviando um quadro CF_{end} mesmo que o tempo de duração informado no quadro de *beacon* não tenha sido esgotado. Além disso, em função da transmissão de alguma estação no modo DCF, o início de um CFP pode ser prorrogado.

Todas as estações poderão receber dados, no entanto, só poderão transmitir aquelas estações que estiverem contidas na lista de *pooling*. Quando uma estação é

escolhida para transmitir, o PC envia um pacote de dados, caso exista algum a ser enviado, dentro de um pacote de consulta (*piggyback*). Como resposta, depois de SIFS segundos o receptor envia um ACK, também com dados se for o caso. Após o término da transmissão a todas as estações existentes na lista de consultas, o PC reinicia o processo de consulta, após PIFS segundos. As estações que não estão transmitindo por alguns ciclos são retiradas da lista e consultadas novamente no início do próximo período livre de contenção.

2.7.4 FRAGMENTAÇÃO

Para evitar a probabilidade de erros devido ao enfraquecimento do sinal e ao ruído, devem ser transmitidos quadros de tamanhos pequenos. O MAC 802.11 provê suporte a fragmentação e remontagem de quadros em transmissões ponto-a-ponto, permitindo a transmissão de um quadro grande em uma seqüência de quadros menores, tornando o processo de remontagem transparente para as camadas superiores. A implementação é obrigatória em todos os receptores, contudo o padrão não obriga a sua utilização nos transmissores. Um limiar de fragmentação configurável ($Fragmentation_{threshold}$) é estabelecido, de forma que um quadro seja fragmentado somente quando for maior que o limiar. O tamanho máximo de um fragmento também é dado por $Fragmentation_{threshold}$.

No período com contenção, usando uma única invocação do procedimento de acesso ao meio do DCF, os fragmentos de um mesmo quadro são enviados em rajada. Um fragmento é enviado após SIFS segundos do recebimento de um ACK relativo ao fragmento anterior. A informação da duração no pacote de um fragmento indica o tempo necessário para a recepção do ACK do próximo fragmento, fazendo com que as outras estações que obtiverem essa informação não transmitam. O campo duração nos quadros de dados e no ACK especifica a duração total do próximo fragmento e do seu ACK. No período livre de contenção, os fragmentos são enviados como quadros individuais.

3. PADRÃO 802.11 E QUALIDADE DE SERVIÇO

Este capítulo trata de questões relacionadas com a qualidade e a diferenciação de serviços em redes sem fio. Nele estarão descritos os requisitos das aplicações em relação a QoS, as técnicas que podem ser utilizadas para prover diferenciação e uma extensão IEEE 802.11e que apresenta especificações de como oferecer QoS para as aplicações multimídia e de tempo real.

3.1. QUALIDADE DE SERVIÇO

O conceito de Qualidade de Serviço (*Quality of Service – QoS*) foi introduzido pela ISO para mensurar a qualidade de serviços oferecida por uma rede de comunicações, ou seja, refletir o quanto ela é capaz de atender às expectativas de seus usuários através dos serviços que ela disponibiliza [48]. Inicialmente, este conceito foi focado na rede, posteriormente evoluiu para uma noção mais ampla contemplando as múltiplas camadas da interação usuário-sistema. No trabalho de Nahrstedt [49] foi desenvolvido um modelo relacionado com a própria percepção do usuário, aos requisitos das aplicações e os recursos disponíveis no sistema, seja no equipamento do usuário ou na rede.

Nas redes fixas, o problema de provisão de QoS normalmente é resolvido na camada de rede do modelo OSI ou nas camadas superiores, podendo ser tratado até mesmo na camada de aplicação. Nas redes móveis, em função das limitações dos recursos de transmissão disponíveis, o problema de provisão de QoS já deve ser tratado na camada de enlace de dados. Além de sofrerem variações na capacidade de transmissão de dados provocadas por interferência eletro-magnéticas e condições atmosféricas, as redes de comunicação sem fio apresentam altas taxas de erros e baixas taxas de transmissão quando comparadas com as redes cabeadas.

3.1.1 REQUISITOS DAS APLICAÇÕES

Independente de a rede ser cabeada ou sem fio, as aplicações multimídia e de tempo real demandam diferentes recursos de rede e geram classes diferentes de tráfegos. Para alocar recursos de rede às aplicações dos usuários os principais requisitos de QoS devem considerados e traduzidos para parâmetros de desempenho da rede comumente empregados conforme proposto em [50], [51]:

- **Largura de banda (*bandwith*):** a largura de banda é determinada pelo meio de transmissão que está sendo utilizado, pelos protocolos, pela distância entre os nós intermediários e pela velocidade de comutação nos nós intermediários.
- **Vazão (*throughput*):** a vazão em uma rede é a largura de banda efetiva ou a taxa de bits efetiva, ou seja, a quantidade de dados transmitidos com sucesso por unidade de tempo. Pode ser definida como sendo a diferença entre a taxa de bits do enlace e os vários *overheads* (sobrecarga). Em termos práticos, as aplicações geram vazões que devem ser atendidas pela rede. A vazão na maioria das redes sofre variações no decorrer no tempo. Em algumas situações, a vazão pode se alterar rapidamente devido às falhas nos nós da rede ou linhas ou devido ao congestionamento quando grandes fluxos de dados são introduzidos na rede. O Quadro I, extraído de [52], apresenta a vazão típica de algumas aplicações.

Aplicação	Vazão (típica)
Aplicações transacionais	1 kbps a 50 kbps
Quadro branco (Whiteboard)	10 kbps a 100 kbps
Voz	10 kbps a 120 kbps
Aplicações web	10 kbps a 500 kbps
Transferências arquivos grandes	10 kbps a 1 Mbps
Vídeo (streaming)	100 kbps a 1 Mbps
Aplicação conferência	500 kbps a 1 Mbps
Vídeo MPEG	1 Mbps a 10 Mbps
Aplicação imagens médicas	10 Mbps a 100 Mbps
Aplicação realidade virtual	80Mbps a 150 Mbps

Quadro I- Vazão Típica de algumas aplicações

- **Retardo (*delay*):** um dos principais parâmetros de desempenho da rede é o atraso. Denota o tempo decorrido para transmitir um bloco de dados de um emissor a um receptor. Na camada de aplicação, o retardo é a diferença de tempo

(fim-a-fim) transcorrida entre a geração do dado no transmissor e a sua apresentação no receptor. Essa diferença inclui parcelas referentes ao processamento nos nós intermediários (roteadores, comutadores) e finais (*endpoints*), a disputa pelo acesso ao meio nos enlaces compartilhados e ao tempo de propagação no meio físico. Caso a conexão entre transmissor e receptor envolva múltiplos saltos, como é o comum em redes comutadas por pacotes, a soma de todos os retardos salto-a-salto mais o retardo de processamento deve ser igual ou inferior ao retardo fim-a-fim desejado. Normalmente deseja-se limitar algum parâmetro relativo à curva de distribuição do retardo, como um valor médio, máximo, ou um percentual.

- Variação do retardo (*Jitter*): em redes a pacotes, os fluxos são adicionalmente divididos em blocos de dados, e cada bloco é transmitido em seqüência. Se a rede é capaz de enviar todos os blocos com uma seqüência uniforme, então cada bloco deveria chegar no destino após um atraso uniforme. Muitas redes não garantem um atraso uniforme para seus usuários. Variações em atraso são comuns. Os atrasos na transmissão são causados por muitos fatores, tais como: diferenças de tempo de processamento dos pacotes, diferenças de tempo de acesso à rede e diferenças de tempo de enfileiramento. Se as variações nos atrasos são devido às imperfeições do sistema na rede (*software* ou *hardware*), ou devido às condições de tráfego dentro da rede, estas variações são normalmente chamadas de *jitter*. O *jitter* é a variação observada no conjunto de valores de retardo de unidades de dados consecutivos. Como no caso do retardo, deseja-se limitar valores estatísticos da distribuição.
- Taxa de erros de bits (*bit error rate – BER*): é a razão entre a quantidade de bits recebidos com erros ou corrompidos e a quantidade de bits enviados.
- Taxa de erros ou de perdas de pacotes (*packet error/loss rate – PLR/PER*): é a razão entre a quantidade de pacotes perdidos e a quantidade de pacotes enviados. Os pacotes são perdidos na rede por descarte nas filas dos nós intermediários, ou podem ser corrompidos por colisão com outros pacotes em enlaces compartilhados e ainda por variação no meio físico (tendo, nesse caso, relação com a taxa de erros de bits).

A QoS solicitada ao provedor de serviços depende dos requisitos específicos das aplicações. Aplicações de *áudio e vídeo* exigem a garantia de uma *vazão mínima, baixo retardo e baixa variação de retardo*, mas são *ligeiramente tolerantes a erros e perdas*. A perda de alguns quadros em fluxo de vídeo, por exemplo, não é suficiente para comprometer a percepção do usuário com relação ao conteúdo da informação audiovisual. Por outro lado, aplicações de *transferência de arquivos* como FTP são *intolerantes a erros*, mas *não necessitam de garantias de retardo ou vazão*, embora uma transferência mais rápida traga mais satisfação para o usuário [9]. O Quadro II apresenta os requisitos de QoS de algumas aplicações multimídia e de tempo real.

Requisitos de QoS	Voz	FTP	E-mail	Vídeo Broadcast	Vídeo Interativo
Largura Banda	Baixa a Média	Baixa	Baixa	Alta	Alta
Descarte de Pacotes	Média	Média	Média	Média	Média
Atraso	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Alta
Jitter	Alta	Baixa	Baixa	Média	Alta

Quadro II- Requisitos de QoS das Aplicações

No que diz respeito as necessidades de QoS, o IETF classifica as aplicações em dois grandes grupos [54]: as de tempo real e as elásticas. Nas aplicações de tempo real, os dados são esperados por um certo tempo para que sejam considerados úteis. Estas aplicações são subdivididas em tolerantes – aquelas que suportam violações do limite de retardo e intolerantes – aquelas que não suportam violações ocasionais. Nas aplicações elásticas, a utilidade dos dados não está relacionada ao seu tempo.

Existem ainda as aplicações adaptativas, que procuram adequar-se as condições da rede a cada instante. Como exemplo podemos adotar uma aplicação de vídeo que varia a sua taxa de geração de dados trocando o codificador de vídeo ou reduzindo a resolução, o número de cores e o número de quadros de vídeo apresentados por segundo.

Assim como a taxa de erros, o atraso pode ser considerado como um dos principais fatores de QoS. Em aplicações tempo-real, como por exemplo, para o tráfego de voz quando o atraso é alto, ocorre a perda de QoS, ocasionando eco e sobreposição de conversação. Já para o tráfego de dados a sensibilidade ao atraso é baixa. Independente do grau de sensibilidade do atraso para as aplicações é imprescindível

estabelecer limiares e configurar a rede para que a mesma possa atender as solicitações nos tempos estipulados, evitando com isto a perda dos pacotes.

3.1.2 QUALIDADE DE SERVIÇOS EM REDES MÓVEIS

Nas redes móveis, a qualidade de serviço está sujeita às peculiaridades deste tipo de rede. Em relação a QoS, como diferenças importantes entre as redes móveis e as redes fixas, destacam-se os efeitos da *mobilidade* e o *meio de comunicação* empregado [50].

Em função da mobilidade das estações pertencentes às redes sem fio, existe a necessidade de reservar recursos adicionais para suportar a transferência de conexões ativas entre células (*handoff*). Naturalmente que quanto maior a mobilidade, maior a probabilidade de ocorrência de *handoff* entre as células vizinhas, e maior reserva de recursos devem ser alocados. Quando as estações movem-se para longe do centro da célula, as mesmas ficam temporariamente sujeitas a um nível mais baixo de recepção do sinal. É sabido que quanto maior a distância entre transmissor e receptor, menor é a potência do sinal recebido, o que contribui para que os quadros cheguem abaixo do limiar de recepção, muitas vezes não podendo ser corretamente interpretados. O que evidencia que a distância entre origem e destino possui influência direta na degradação da QoS oferecida pela rede, podendo inclusive ocorrer perda de conexão.

Outros problemas de provisão de QoS em redes móveis, diz respeito ao próprio meio físico de comunicação. A qualidade dos enlaces sem fio pode sofrer uma variação ao longo do tempo, causada por condições atmosféricas adversas, como chuva forte e raios, e por fontes de interferência magnética; suportam baixas taxas de transmissões, na ordem de 1 até 54 Mbps; apresentam altas taxas de erros, 1 bit a cada 10^5 transmitidos. Além disto, os usuários ao passarem por áreas que possuam barreiras físicas à transmissão sem fio, poderão perceber os problemas inerentes deste tipo de rede.

3.2. DIFERENCIAÇÃO DE SERVIÇO NO MAC 802.11

Após a publicação das especificações dos padrões das redes locais sem fio, surgiram diferentes propostas com o objetivo de identificar os problemas no controle de acesso ao meio entre as estações no padrão IEEE 802.11. A grande maioria está relacionada com a utilização do TCP em redes 802.11, como o problema da injustiça no compartilhamento da banda passante disponível [47], [54], [55], [56] e o da instabilidade provocada no TCP em redes sem fio de múltiplos saltos [47]. Estes problemas, aliados à necessidade de provisão de QoS nas redes locais sem fio, sinalizam a necessidade de evolução do MAC 802.11.

Com a intenção de permitir a diferenciação de serviços entre as estações das redes locais sem fio, diversas propostas foram elaboradas [9], [10], [44], [45], [46], [47], [55], [56], [58], [59], [61], [63]. Tais propostas consistem na configuração de um ou mais parâmetros básicos do método de acesso (DCF, PCF, EDCF, HCF) para prover diferenciação, alterando a forma com que cada uma das estações tem acesso ao meio e estabelecendo prioridades entre as estações que disputam a banda passante oferecida pela rede.

As propostas de QoS cujo o método de acesso é sem contenção (PCF) envolvem normalmente esquemas avançados de consulta (*polling*), que levam em consideração a prioridade das estações. As simulações dos modelos de redes *Ad Hoc* serão realizadas no método de acesso DCF.

3.2.1 LIMITAÇÕES DO PCF E DO DCF

Apesar do método PCF ter sido projetado para suportar um serviço de acesso sem contenção e ser adequado a aplicações sensíveis ao atraso, o número de estações inscritas na lista de consulta, limita a capacidade de garantir QoS nas estações das redes sem fio. Quanto maior for o número de estações inscritas na lista de consultas, maior será a dificuldade enfrentada pelo AP para atender os limites de vazão e de atraso das

estações. Além disto, existem dois outros problemas [60]: a imprevisibilidade do intervalo entre os quadros de *beacon* e o desconhecimento da duração das transmissões das estações consultadas.

O problema da imprevisibilidade do intervalo entre os quadros de *beacon* ocorre sempre que uma estação que utiliza o método DCF no período com contenção (CP) obtém acesso ao meio já no término deste período. Como esta transmissão não pode ser interrompida, o AP fica impossibilitado de enviar o *beacon* até que essa estação conclua a sua transmissão, originando um atraso no início do próximo período livre de contenção (Figura 15). Este atraso é proporcional ao tamanho do quadro empregado pela estação em modo DCF, e pode provocar uma violação dos requisitos de atraso e variação de atraso das estações em modo PCF (embora o atraso seja limitado ao tempo de transmissão de um quadro de tamanho máximo, seu valor é indeterminado).

O problema do desconhecimento da duração das transmissões das estações consultadas decorre em função de que uma estação no modo PCF, uma vez que tenha sido consultada pode enviar um quadro de até 2304 bytes, inteiro ou fragmentado, utilizando qualquer uma das taxas de dados disponíveis no BSS (1, 2, 5,5 ou 11 Mbps no 802.11b; 6 a 54 Mbps no 802.11a). Fazendo com que o tempo de transmissão desta estação esteja fora do controle do ponto de acesso, o que reduz a sua capacidade de cumprir os limites de atraso das demais estações inscritas no CFP.

Em relação às limitações do DCF, algumas análises do desempenho disponíveis na literatura [12], [41], [61], [62] apresentam que a vazão máxima obtida pelas estações nas WLANs é dependente do tipo de tráfego, do tamanho dos quadros e do número de estações presentes na rede. O tempo total gasto para transmitir cada quadro de dados empregando o acesso básico (sem RTS/CTS) é dado pela equação⁹ [62]:

$$t_m = \text{DIFS} + t_{\text{dados}} + \text{SIFS} + t_{\text{ACK}} + t_{\text{backoff}}(m) \quad (1.0)$$

Na equação 1.0, m corresponde o número de estações transmitindo, DIFS e SIFS são valores de intervalos entre-quadros definidos no padrão, t_{dados} indica o tempo de transmissão dos quadros de dados, t_{ACK} representa o tempo de transmissão de

⁹ A equação desconsidera o atraso de propagação em um BSS, que é de 2 μ s.

reconhecimento, $t_{\text{backoff}}(m)$ é o tempo médio gasto com o procedimento de recuo exponencial binário ou *backoff*.

Tendo uma única estação ($m=1$), transmitindo continuamente em um BSS 802.11b com nível físico DSSS. Para esse caso, SIFS é igual a $10 \mu\text{s}$ e DIFS μs é igual a $50 \mu\text{s}$. O tempo de um *slot* é $20 \mu\text{s}$ e CWmin é 31; multiplicando-se a média do intervalo uniforme $[0,31]$ pelo tempo de um *slot*, tem-se que $t_{\text{backoff}}(m)$ é igual a $320 \mu\text{s}$ (mesmo havendo uma única estação transmitindo, o *backoff* é sempre executado após a transmissão bem sucedida de um quadro, para evitar que a estação capture o meio).

Para todos os quadros, de dados ou de controle, a especificação requer que o preâmbulo do nível físico e o cabeçalho do protocolo de convergência de nível físico (*Physical Layer Convergence Protocol* - PLCP) sejam sempre transmitidos usando uma taxa básica (por exemplo, 1 Mbps), para que todas as estações pertencentes a um BSS sejam capazes de recebê-los corretamente, independentemente das taxas de dados que cada uma delas esteja usando (1, 2, 5,5 ou 11 Mbps). Esse campos somam juntos 192 bits, que são transmitidos em $192 \mu\text{s}$.

Os quadros de controle, como RTS, CTS e ACK, devem ser também transmitidos com uma taxa básica. O tempo de transmissão de um ACK (14 bytes) é, portanto, $t_{\text{ACK}} = (14 * 8 / 1000000) + 192 = 304 \mu\text{s}$.

Se a estação estiver usando a taxa de dados máxima de 11 Mbps e quadros de tamanho máximo (2304 bytes), o tempo para transmitir um quadro de dados é $t_{\text{dados}} = ((2304 + 34) * 8 / 11000000) + 192 = 1892 \mu\text{s}$. Os 34 bytes a mais são do cabeçalho MAC e do campo *Frame Check Sequence* - FCS, adicionados pela subcamada MAC antes da transmissão do quadro.

O tempo total para a transmissão (t_1), dado pela equação 1 quando o número de estações (m) é igual a 1, é de $2576 \mu\text{s}$, no exemplo em questão. A razão $t_{\text{dados}}=t_1$ dá uma noção da sobrecarga imposta pelo método de acesso. Nesse caso, dos $2576 \mu\text{s}$ totais gastos na transmissão, apenas $1892 \mu\text{s}$ se referem à transmissão do quadro de dados em si. Assim, a banda útil máxima, medida na subcamada MAC para uma única estação em um canal DSSS, é cerca de 73,4% ($1892 / 2576 * 100$) dos 11 Mbps, ou seja, 8,079

Mbps. Essa banda útil diminui à medida que são empregados quadros de dados menores.

À medida que cresce o número de estações transmitindo simultaneamente (m), cresce a probabilidade de uma estação encontrar o meio ocupado, acarretando um aumento do tamanho médio da janela de contenção das estações e de t_{backoff} (m). O DCF busca, através da execução do procedimento de *backoff*, distribuir no tempo as tentativas de transmissão e minimizar o efeito da contenção. Porém, se o número de estações crescer de forma ilimitada, haverá situações em que t_{backoff} (m) será excessivamente alto, o que reduz drasticamente a eficiência na utilização do canal.

A partir das análises de desempenho do DCF disponíveis [12], [41], [61], [62] percebe-se que tanto a vazão agregada da rede quanto à obtida pelas fontes individualmente sofrem grande influência da carga total imposta à rede pelas estações, do tamanho dos quadros, dos intervalos entre-quadros usados no protocolo e do procedimento de *backoff*. As técnicas de diferenciação no DCF, apresentadas a seguir, exploram esses efeitos.

3.2.2 TÉCNICAS DE DIFERENCIAÇÃO NO MODO DCF

As principais técnicas de diferenciação empregadas no método de acesso DCF contemplam a variação do tamanho do DIFS, a variação no tamanho dos quadros de dados, as alterações no procedimento de recuo exponencial binário e persistência do protocolo de acesso múltiplo. Nos modelos simulados (Capítulo 5) são utilizadas as técnicas de variação do tamanho do AIFS, variação do tamanho do quadro de dados e alterações no procedimento de *backoff*, estas técnicas são apresentadas conforme descritas em [9], [56].

3.2.2.1 Variação do Valor do DIFS

Conforme apresentado na seção 2.7.2, DIFS controla o tempo que uma estação espera antes de iniciar uma transmissão de dados, quando o valor de DIFS é variado, pode-se estabelecer prioridade relativa entre as estações das WLANs. Para que uma estação de alta prioridade possa obter sucesso no acesso ao meio, o valor de DIFS deve ser menor, quando comparada com outra de menor prioridade de transmissão, com maior valor de DIFS. Isto irá reduzir a probabilidade da estação com maior prioridade encontrar o meio ocupado em uma disputa com outra de menor prioridade. Como DIFS pode ser definido por $SIFS + N * Slottime$, a diferenciação consiste em variar o valor de N^{10} , ou seja, aumentar ou reduzir o número de *Slots* que a estação espera além do tempo SIFS. Para que o valor de DIFS, não seja equivalente ao valor de SIFS ou PIFS, ocasionando falhas no funcionamento do MAC, este valor deve ser diferente de 0 ou 1. Para evitar que uma estação de baixa prioridade nunca transmita na presença de outra de alta prioridade, os valores de N não devem ser excessivamente altos. Esse efeito negativo é denominado de inanição (*starvation*).

3.2.2.2 Variação do Tamanho dos Quadros de Dados

A disputa pelo acesso ao meio é realizada quadro a quadro, logo a variação do tamanho dos quadros de dados também possibilita diferenciação [56]. Tendo em vista que toda a sobrecarga do protocolo CSMA/CA é fixa (tamanho dos quadros RTS/CTS/ACK e dos intervalos entre quadros), o tamanho do quadro de dados passa a ter o efeito de regular o tempo que uma estação mantém o controle sobre o meio após vencer uma disputa. As estações com maior prioridade para transmitir, usam quadros de maior tamanho nas suas transmissões, garantindo um maior tempo de utilização do meio. Contudo em [56] é descrito que o quanto maior for o tamanho dos quadros, maior a propensão de erros, reduzindo a eficácia desta técnica quando empregada em meios com taxas de erros altas. Por este motivo existe o suporte a fragmentação no MAC 802.11. Esta técnica também não é adequada para algumas aplicações de tempo real,

¹⁰ Por definição, no padrão 802.11 o valor de N é igual a 2.

como as de voz, que empregam quadros de menor tamanho para reduzir o retardo de cada unidade de dados.

3.2.2.3 Alterações no Procedimento de Backoff

O procedimento de recuo exponencial binário ou *backoff* efetua o controle do tempo que uma estação aguarda antes de tentar uma transmissão. O procedimento de *backoff* é executado pelas estações nas seguintes situações: na transmissão de cada quadro caso a estação encontre o meio ocupado; entre as transmissões de quadros adjacentes, evitando, assim, a captura do meio; nas retransmissões de quadros que não foram reconhecidos pelo receptor.

A técnica de diferenciação consiste na escolha de intervalos distintos para a seleção do tamanho da janela de contenção (CW) de cada estação, controlados pelos parâmetros CWmin e CWMax. Nesta técnica as estações são priorizadas de acordo com as necessidades de transmissão, ou seja, maior e menor prioridade. Sejam, por exemplo, duas estações com alta e baixa prioridade de transmissão, com CWmin=31 e CWmin=63, respectivamente. A estação mais prioritária selecionará valores aleatórios para CW no intervalo uniformemente distribuído [0, 31], enquanto que a estação menos prioritária escolherá valores no intervalo [0, 63]. Neste processo a estação de maior prioridade dificilmente perderá a disputa de acesso ao meio para a estação de menor prioridade, pois espera em média menos tempo para tentar transmitir. Para o tráfego com restrições de retardo, CWmin deve ser o menor possível, podendo assumir um valor igual a 7 para a classe mais prioritária, reduzindo assim o tempo gasto em *backoff* e mantendo-se um número mínimo de *slots* selecionáveis.

O valor de CWMax quando é modificado também provoca diferenciação, uma vez que este parâmetro regula o limite máximo para o tamanho da janela de contenção. Contudo, esta técnica começa a fazer diferença quando existe muita retransmissão, o que a torna menos efetiva que a alteração do CWmin. Alterar o valor de CWMax também pode ser útil para reduzir a probabilidade de que as janelas de contenção de estações com prioridades diferentes se sobreponham. Como por exemplo, uma estação

de alta prioridade, com $CW_{min}=7$ e $CW_{Max}=31$ utilizará, no pior caso, 31 *slots* no procedimento de *backoff*, enquanto uma de baixa prioridade, com $CW_{min}=31$ e $CW_{Max}=1023$ usará até 1023. Nesta situação, ainda existe uma pequena probabilidade de que a estação de baixa prioridade escolha valores menores que a de alta prioridade. Como o valor de CW é escolhido no intervalo $[0, CW_{min}]$, pode ocorrer que a estação de alta prioridade escolha $CW=6$ no intervalo $[0,7]$ enquanto que a de baixa prioridade escolha $CW=5$ no intervalo $[0, 31]$.

As variações do procedimento de *backoff* foram aplicadas em muitos estudos referenciados neste trabalho e podem ser encontrados em [9], [44], [45], [46], [47], [55], [56], [58], [59], [61], [63].

3.3. EXTENSÃO 802.11E

Tendo em vista as necessidades de um padrão que oferecesse QoS e diferenciação de serviços entre diferentes classes de tráfego para as estações de uma WLAN, o IEEE dentro do grupo de trabalho 11 [14], criou o grupo de tarefas E, resultando na extensão IEEE 802.11e [5]. Essa extensão denominada *MAC Enhancements for Quality of Service*, continua em processo de desenvolvimento, as definições aqui apresentadas foram extraídas de [9] e estão sujeitas a alterações que por ventura possam ocorrer no *draft* [5].

No padrão 802.11e, as estações (STAs) são denominadas de QSTAs (*QoS Stations*), o ponto de acesso (AP) é chamado de QAP (*QoS Access Point*) e o BSS é designado de QBSS (*QoS Basic Service Set*). Na extensão 802.11e, duas funções de coordenação foram incorporadas, intituladas de Função de Coordenação Distribuída Estendida (*Enhanced Distributed Coordination Function – EDCF*) e Função de Coordenação Híbrida (*Hybrid Coordination Function – HCF*).

Um conceito importante no 802.11e é o de oportunidade de transmissão, ou TxOp (*Transmission Opportunity*). Uma TxOp é definida como um intervalo de tempo no qual uma estação tem o direito de iniciar transmissões. Ela é marcada por um tempo

de início e uma duração. Durante uma TxOp, uma estação pode enviar vários quadros em rajada, separados por SIFS, sem ter que disputar o meio quadro a quadro. Para evitar retardo excessivo nas outras estações que estão aguardando o acesso, a duração de uma TxOp é limitada.

Na função HCF, um coordenador Híbrido (*Hybrid Coordinator – HC*), geralmente localizado no ponto de acesso, é o responsável pelo estabelecimento e coordenação do PCF e do DCF e introduz outras novas funções específicas para QoS, bem como novos tipos de quadros para permitir transferência de dados com restrições de QoS tanto no período com contenção (CP) quanto no período livre de contenção (CFP). A especificação permite coexistência com estações legadas (802.11/b/a) de forma transparente para essas estações.

Na função HCF dois métodos de acesso são utilizados: - um baseado em consulta, denominados de *HCF Polled Channel Access*, que é executado de forma centralizada no HC, e – outro baseado em contenção, chamado *HCF Contention Based Channel Access*, que é executado nas estações.

No acesso baseado em consulta, as TxOps são atribuídas explicitamente pelo QAP (*polled TxOp*), de forma centralizada, através de quadros especiais. Isso pode ser realizado tanto durante o CFP quanto durante o CP, para satisfazer prioridades de entrega, taxas de serviço ou requisitos de retardo e *jitter* pré-definidos. Tirando partido de seu acesso privilegiado, o QAP cria períodos de acesso controlado com duração limitada (*CAPs – Controlled Access Periods*). O QAP usa o conhecimento que tem dos fluxos presentes no QBSS para criar esses períodos e exercer o controle da funcionalidade de QoS em qualquer instante do superquadro. A QSTA, ao receber uma TxOp, pode transferir múltiplos quadros em rajada, dependendo do tamanho da TxOp que lhe foi atribuída. Esse tamanho é informado no quadro de atribuição.

A Figura 17 [60] mostra o superquadro no MAC 802.11e. Como pode ser visto na Figura 17, o HC usa os quadros de *Beacon* para iniciar e CF-End para finalizar o CFP. Quadros especiais QoS CF-Poll são usados para atribuição direta de TxOps as STAs, mas há também TxOps obtidas por contenção no CP. Em cada TxOp, o transmissor realiza a troca de quadros RTS/CTS/DATA/ACK com o receptor, podendo

enviar um ou mais quadros de dados, dependendo da duração máxima permitida para a oportunidade de transmissão.

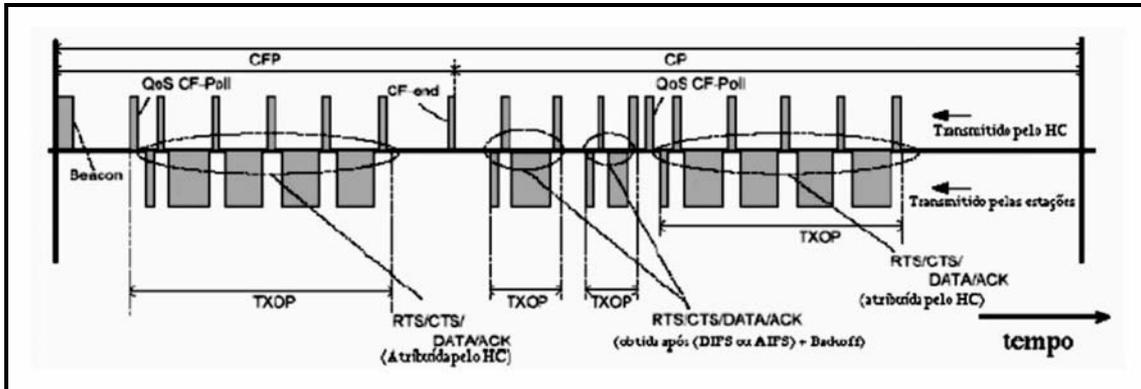


Figura 17 - Superquadro no MAC 802.11e

No acesso baseado em contenção, as categorias de tráfego existentes nas QSTAs competem pelas TxOps de uma forma distribuída, empregando a função EDCAF. Numa mesma QSTA podem existir múltiplas filas de transmissão, cada uma com um nível de prioridade diferente. Este mecanismo é baseado em uma proposta anterior chamada Virtual-DCF ou VDCF [64], [65]. Nessa proposta, dentro de uma mesma estação, várias instâncias do DCF são executadas em paralelo, como se fossem “MACs virtuais”, com filas diferentes e parâmetros de QoS (DIFS e CWmin) distintos para cada instância. A Figura 18 [60] esquematiza este processo.

No EDCAF são criadas oito classes de tráfego (TC) onde cada uma delas entra em contenção por uma oportunidade de transmissão (TxOp). Dentro de uma estação as MSDs são entregues por instâncias múltiplas de *backoff* de acordo com os parâmetros específicos de TC. A diferenciação é feita por alguns parâmetros, definidos por classe de tráfego:

- AIFS [TC]: O DIFS de cada categoria é chamado de AIFS (*Arbitration Interframe Space*), substitui o DIFS do padrão atual, criando uma diferenciação baseada no IFS (*Inter Frame Space*).
- CW [TC]: os valores da janela de contenção CWmin [TC] e CWMax [TC] podem ser alterados conforme descritos na seção 3.2.2.

Essas instâncias, definidas como categorias de tráfego (*Traffic Categories – TCs*), executam o procedimento de *backoff* independentemente umas das outras, e competem entre si pelas oportunidades de transmissão. Cada estação 802.11e pode suportar de 2 a 8 categorias de acesso. O QAP, no entanto, deve suportar no mínimo 4.

A inclusão de múltiplas filas em uma mesma QSTA pode resultar em “*colisões virtuais*”. A colisão virtual, interna a uma estação, ocorre sempre que duas categorias de uma mesma QSTA têm seus temporizadores expirados simultaneamente, obtendo acesso ao meio no mesmo instante de tempo. Os conflitos entre essas categorias são resolvidos internamente pela estação, onde o escalonador concede a TxOp para a categoria de maior prioridade e as de menor prioridade executam o procedimento de *backoff*. Naturalmente, que o quadro transmitido ainda fica sujeito às colisões externas.

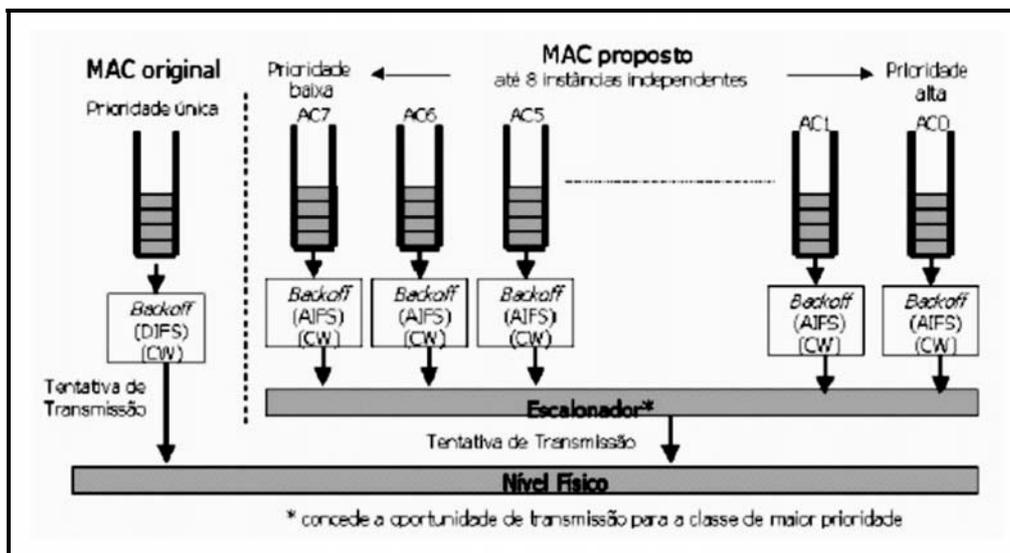


Figura 18 - MAC Proposto no EDCF

A diferenciação entre TCs pode ser obtida com o uso conjunto da variação da duração mínima de espera por meio livre, do tamanho mínimo da janela de contenção e pelo fator de prioridade (DIFS, CWmin do DCF). As categorias com prioridades mais altas usam valores menores de AIFS, enquanto que as categorias menos prioritárias utilizam maiores valores de AIFS. A Figura 19 [9] ilustra as relações dos valores de AIFS com os outros intervalos entre quadros já definidos.

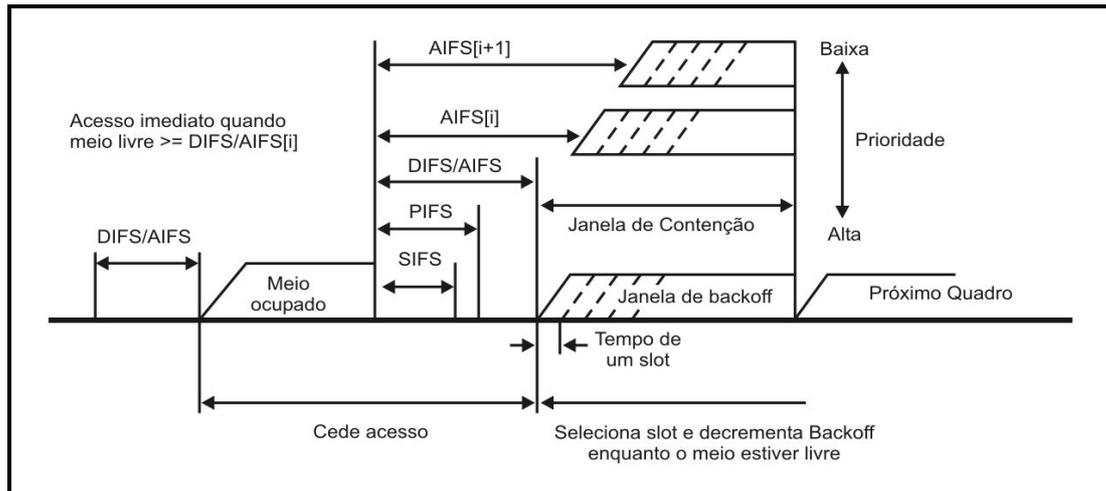


Figura 19 - Relações dos Intervalos Entre Quadros no 802.11e

O HC faz a determinação dos parâmetros de QoS que serão utilizados sempre com base em oito prioridades de usuários (*User Priorities – UPs*), onde um conjunto de parâmetros de QoS (*QoS Parameter Set ou EDCF Parameter Set*) é empregado para informar as QSTAs os parâmetros necessários para o estabelecimento da funcionalidade de QoS. O HC encapsula o conjunto em quadros de controle como os quadros de *Beacon* [1] e o transmite. Este conjunto fornece o valor de AIFS (i) e do CWmin (i) a ser usado para as prioridades de 0 a 7 e é formado por 5 campos, conforme mostra a Figura 20 [9]:

- Campo *Element ID*: utiliza 12 bits para identificar o *QoS Parameter Set*.
- Campo *Length*: emprega 8 bits para informar o seu comprimento.
- Campo *TxOp Limit*: representa a duração máxima das oportunidades de transmissão obtidas por contenção. Esse parâmetro é informado em um campo de 2 octetos que indica um número de períodos de $16 \mu s$ correspondente à duração máxima das TxOps. Ao contrário do AIFS (i) e do CWmin (i), esse valor é configurado para todo o QBSS, e não por prioridade de usuário.
- Campo CWmin: têm 8 octetos com a finalidade de carregar um inteiro sem sinal que indica o valor de CWmin de cada prioridade i .
- Campo AIFS: possui 8 octetos com a finalidade de carregar um inteiro sem sinal que indica o valor de AIFS.

Element ID (12 bits)	Length (8 bits)	CP TxOP Limit (2 octetos)	CWMin[UP] CWMin[0]...CWMin[7] (8 octetos)	AIFS[UP] AIFS[0]...AIFS[7] (8 octetos)
-------------------------	--------------------	------------------------------	---	--

Figura 20 - Conjunto de Parâmetros de QoS do EDCF

Além destes parâmetros, outros podem inclusos no *QoS Parameter Set*, como um tamanho máximo de janela de contenção (CWMax (i)), um fator de prioridade (PF (i)) e um limite da oportunidade de transmissão por categoria. Na fase atual da padronização, ainda não há consenso no Grupo de Tarefas “E” sobre a adição dos parâmetros citados.

Conforme descrito anteriormente, uma QSTA pode suportar de 2 a 8 categorias de acesso, então compete as QSTAs realizar um mapeamento das 8 prioridades de usuário definidas pelo HC para o número de categorias de acesso que ela suporta. Quando múltiplas UPs estão associadas a uma mesma TC, os parâmetros a serem utilizados são os correspondentes aos da UP de mais baixa prioridade associada à categoria.

4. METODOLOGIA E FERRAMENTAS UTILIZADAS

O objetivo deste capítulo consiste na descrição da metodologia adotada para desenvolver o trabalho e as ferramentas computacionais selecionadas para realizar as simulações e as análises estatísticas.

4.1. METODOLOGIA

O trabalho consiste na utilização de técnicas de diferenciação e na realização de análise de desempenho na função EDCF da camada MAC.

Para comprovar a validade das técnicas de diferenciação, são realizadas simulações para coletar dados das métricas de QoS: vazão, latência, *jitter*, descarte de pacotes. Por intermédio dos resultados das simulações é possível obter informações de desempenho das redes MANET e verificar se estas redes podem atender os requisitos de QoS exigidos pelas aplicações multimídia e de tempo real.

A metodologia aplicada para o desenvolvimento do trabalho é a simulação. Esta técnica é muito utilizada para a avaliação de sistemas em geral. A importância de realizar simulações em redes de computadores reside no fato de que avaliar o desempenho baseado em experimentos reais é uma atividade de grande complexidade e de alto custo, devido a grande heterogeneidade e dimensões das redes. Por este motivo a simulação é uma técnica utilizada com grande frequência, pela flexibilidade em testar cenários variados, incluindo o comportamento de protocolos, novas tecnologias e efeito de diferentes topologias [6], [30], [67].

4.2. TIPOS DE SIMULAÇÃO

Um fator que deve ser levado em consideração antes de iniciar uma simulação é o tipo de método de simulação adequado ao problema. Na literatura diversos tipos de

simulações podem ser encontrados, porém para o enfoque das redes de computadores, os métodos mais relevantes compreendem: o método de Monte Carlo, baseado em *traces* e o método fundamentado em eventos discretos [67], [68]. Dentre os três tipos de simulações, em função das características dos simuladores, o método baseado em *traces* é o que contempla as exigências dos modelos que serão simulados.

4.2.1. SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

A simulação de Monte Carlo é uma poderosa técnica para obtenção de soluções aproximadas para problemas complexos que envolvem componentes aleatórios. Este é um tipo de simulação que serve para modelar fenômenos probabilísticos invariantes no tempo. O comportamento de um sistema pode ser caracterizado por distribuições de probabilidades e seus parâmetros. No entanto, na maioria das vezes os parâmetros são desconhecidos e simulações de Monte Carlo podem ser aplicadas na obtenção de estimativas através da realização de várias replicações de um experimento. Por exemplo, suponha que o tamanho dos pacotes gerados por uma determinada aplicação segue uma distribuição qualquer $f_X(x)$. Para determinar o tamanho médio dos pacotes pode-se utilizar uma simulação de Monte Carlo para gerar várias ocorrências da variável X e depois calcular a média amostral que serve de estimativa para a média $E(X)$.

4.2.2. SIMULAÇÃO DISCRETA BASEADO EM EVENTOS

Uma simulação discreta baseada em eventos utiliza um modelo de estados discretos para o sistema. Diferente de um modelo contínuo, no qual os estados que o sistema pode assumir variam continuamente, em um modelo discreto o sistema só pode assumir um número discreto de valores. É importante notar que, mesmo em uma simulação discreta, o tempo da simulação pode assumir valores discretos ou contínuos. Qualquer simulação discreta, independente de aplicação, deve conter os seguintes componentes: um escalonador de eventos; um mecanismo de controle do tempo (*clock*);

variáveis globais que descrevem os estados do sistema; rotinas para simular os eventos; rotinas para entrada de parâmetros; rotinas para coletar resultados; rotinas de iniciação; rotinas para gerenciamento dinâmico de memória e um programa principal.

4.2.3. SIMULAÇÃO BASEADA EM TRACES

Uma simulação baseada em *traces* é a que tem como entrada um registro que contém eventos, ordenados no tempo, observados em um sistema real. Esses registros são chamados de *traces*. Este tipo de simulação é geralmente utilizado na análise de algoritmos de alocação de recursos. Neste caso, um *trace*, contendo a demanda por um determinado recurso, é utilizado como entrada da simulação, a qual pode incluir diferentes algoritmos para serem avaliados sob as mesmas condições de demanda. Uma característica importante é a credibilidade. Um *trace* contendo os acessos feitos a um determinado serviço na Internet, tem uma maior credibilidade do que informações geradas randomicamente através de alguma distribuição. Um dos principais problemas dos *traces* é o tamanho. Os *traces* são geralmente seqüências longas e exigem um considerável tempo computacional para serem processados. Outro problema é a dificuldade de variação da carga de trabalho aplicada.

4.3. NETWORK SIMULATOR – NS

Para a realização das simulações adotou-se o simulador *Network Simulator (NS)* [66], versão 2.1b9a. O NS foi desenvolvido no projeto VINT (*Virtual InterNetwork Testbed*) (netweb.usc.edu/vint). Com suporte da DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*), com a colaboração de pesquisadores de centros de pesquisa e Universidades como UCB (*University of California in Berkeley*), LBL (*Lawrence Berkeley National Laboratory*), USC/ISI (*University of Southern California / Information Science Institute*), e Xerox PARC (*Palo Alto Research Center*).

Atualmente seu desenvolvimento e distribuição são mantidos pelo ISI (*Information Sciences Institute* - www.isi.edu). A distribuição do NS é gratuita, inclusive o código fonte, que pode ser alterado para refletir a pesquisa que está sendo desenvolvida [70].

Existem versões do simulador para as plataformas *Windows* e *Linux*. No entanto, neste trabalho adotou-se a plataforma de desenvolvimento *FreeBSD/Linux*, na qual o simulador apresenta um funcionamento mais robusto, pelo fato de ser a plataforma nativa de desenvolvimento do NS.

4.3.1. CARACTERÍSTICAS DO SIMULADOR

O simulador NS é baseado em eventos discretos e orientado a objetos para a simulação de redes. O objetivo do NS é proporcionar um ambiente para o desenvolvimento de pesquisas em sistemas que utilizam a pilha de protocolos TCP/IP, tanto no contexto das redes fixas quanto móveis, com fio e sem fio (redes locais e de satélite).

A biblioteca de protocolos e mecanismos implementados no NS é bastante vasta, abrangendo implementação dos protocolos TCP, UDP, IP além de disciplinas de filas, como, WFQ (*Weight Fair Queueing*), protocolos para redes móveis, como o IP móvel, tecnologias de redes sem fio locais e de longa distância, como, 802.11, *Bluetooth* e GPRS (*General Packet Radio Service*). Alguns destes não são distribuídos diretamente no pacote do NS, sendo contribuições disponibilizadas como *patches* na página que hospeda as informações sobre o NS e que podem ser baixadas e adicionadas ao módulo básico através de recompilação do núcleo do simulador [78].

O simulador NS fornece bibliotecas de funções para a geração de alguns tipos de tráfego como: CBR (*Constant Bit Rate*) utilizado para simular tráfego constante e voz, ON-OFF para tráfego em rajada e voz comprimida, FTP para gerar tráfego correspondente a aplicações de transferência de arquivos e VBR (*Variable Bit Rate*) para tráfego com taxa de dados variável. Além das bibliotecas com os módulos

específicos de protocolos, tecnologias e geração de tráfego, o NS possui funções específicas de simulação e geração de números aleatórios.

4.3.2. O MODELO DE PROGRAMAÇÃO DO NS

O simulador é escrito em C++. Uma linguagem orientada a objetos denominada OTCL (*Object Tool Control Language*) é utilizada para estabelecer uma interface de comando e configuração. Essa linguagem auxiliar é interpretada, permitindo que os *scripts* de simulação sejam escritos e modificados sem a necessidade de recompilar todo o código do simulador.

A implementação de novos mecanismos e protocolos em C++ é possível porque praticamente todo objeto C++ tem um correspondente Otcl [77] e vice-versa. Pode-se implementar um novo protocolo através de herança de classes existentes em C++ e depois ligar o novo objeto C++ a um objeto Otcl correspondente. O novo objeto Otcl, resultado da ligação citada anteriormente, poderá então ser invocado a partir de *scripts* Otcl. Assim, será possível executar as novas funções implementadas em C++ através do desenvolvimento de *scripts* de simulação em Otcl. Estes *scripts* conterão uma chamada a um objeto Otcl ligado a um objeto C++ incluído pelo usuário no núcleo simulador. Além da possibilidade de chamar funções em C++ a partir do Otcl pode-se também chamar funções definidas em Otcl no C++.

O código do MAC 802.11 é originário do Projeto *Monarch* [78], desenvolvido na CMU (*Carnegie Mellon University*). Esse projeto incorpora uma extensão às versões mais recentes do NS, introduzindo o suporte às redes sem fio e à mobilidade.

4.3.3. FASES NO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA UTILIZANDO O NS

Para o desenvolvimento das pesquisas com o NS, inicialmente, deve ser implementado o modelo de simulação utilizando Otcl a partir dos objetos (ex:

protocolos, aplicações) existentes na biblioteca NS. Existindo a necessidade de implementar novos protocolos ou estender os já existentes na biblioteca do NS, deve-se utilizar C++ e, posteriormente, usar as novas funções chamadas através de *scripts* Otcl.

O programa de simulação desenvolvido alimentará um interpretador Otcl e serão gerados arquivos de traces que conterão os resultados da simulação. Comandos e métricas a serem coletadas para a geração da saída da simulação deverão ser explicitamente incluídos no *script* Otcl. Outras saídas da simulação também são possíveis. Pode-se enviar os dados coletados em arquivos de trace diretamente para as ferramentas que geram gráficos como o *xgraph*. Além disso, pode-se gerar um tipo de arquivo de trace para o animador de redes *nam* (*Network Animator*) que é uma ferramenta importante para a visualização da dinâmica da simulação e para a depuração.

4.3.4. COMPONENTES BÁSICOS

Para realizar a criação de uma simulação usando o simulador NS, os seguintes elementos básicos devem ser definidos:

- Nó (*node*): são os elementos que implementam a lógica associada a *hosts* e roteadores em uma topologia.
- Agente (*agent*): são os elementos que correspondem aos protocolos TCP e UDP. O simulador suporta vários outros agentes. Além disso, novos protocolos presentes em várias camadas da arquitetura de rede podem ser implementados a partir da definição da classe *agent* do NS.
- Enlace (*link*): é o elemento que interconecta dois nós. Estes elementos servem como abstração da interface física para enlaces ponto a ponto, meios de difusão e enlaces sem fio.
- Aplicação (*application*): este elemento é responsável por gerar o tráfego de dados para o simulador.

Além dos elementos básicos citados acima, outros elementos de fundamental importância para a simulação de redes sem fio devem ser considerados, os quais serão descritos a seguir.

Um nó móvel consiste em componentes tais como: o tipo de canal, o tipo de camada de ligação, o tipo de camada de acesso ao meio, o tipo de interface de rede, o tipo de antena, o modelo de propagação de rádio, o tipo de fila, o número máximo de pacotes na fila, o tipo de protocolo de roteamento, modelo de mobilidade entre outros que podem ser conferidos através do script apresentado na Figura 21.

```
# =====
# Definição dos Parâmetros de uma Rede Ad Hoc
# =====
set val(chan) Channel/WirelessChannel ;# Tipo de canal
set val(prop) Propagation/TwoRayGround ;# Modelo de Propagação de Rádio
set val(netif) Phy/WirelessPhy ;# Tipo de Interface de Rede
set val(mac) Mac/802_11 ;# Tipo de Camada de Acesso ao Meio
set val(ifq) Queue/DropTail/PriQueue ;# Tipo de Interface de Fila
set (ll) LL ;# Tipo de Camada de Ligação
set (ant) Antenna/OmniAntenna ;# Modelo de Antena
set val(ifqlen) 10 ;# Número Máximo de Pacotes na Fila
set val(nn) 2 ;# Número de Estações Móveis
set val(rp) DSR ;# Tipo de Protocolo de Roteamento Ad Hoc
set opt(x) 100 ;# Dimensão da Topologia para x
set opt(y) 100 ;# Dimensão da Topologia para y
set opt(cp) "../mobility/scene/cbr-3-test" ;# Define Movimentos Aleatórios para os Nós
set opt(sc) "../mobility/scene/scen-3-test" ;# Define Fluxos Aleatórios CBR e FTP
set opt(stop) 300 ;# Tempo de Simulação
# =====
```

Figura 21 – Parâmetros de uma Rede Ad Hoc

4.4. STATISTICA

Para realizar a análise estatística dos dados obtidos (Anexo I) utilizou-se o *software* STATISTICA. A versão utilizada foi a 6.0 [75]. Este programa foi selecionado pelo fato de apresentar uma plataforma interativa com o usuário e, também, por ser um dos programas mais completos da área existente na atualidade.

O STATISTICA é um programa integrado de análise estatística, gráficos, gerenciamento de base de dados, caracterizando um ampla seleção do processo

analítico, do básico ao avançado utilizado por qualquer área do conhecimento como, por exemplo, Ciências, Engenharia e Mineração de Dados [76].

O sistema não inclui somente procedimentos estatísticos e gráficos gerais, mas, também, módulos especializados (ciências biomédicas, biológicas, engenharias, ciências sociais, agrárias, entre outras). Dificilmente, o usuário necessitará de todos os módulos oferecidos pelo STATISTICA para a análise do seu trabalho, e será, a partir de sua criatividade e conhecimento teórico, que chegarão as respostas dos seus objetivos.

O STATISTICA trabalha com variáveis categorizadas, qualitativas e quantitativas, para formar grupos que serão analisados, ou seja, utiliza uma técnica mais apropriada para resumir as informações, adaptando qualquer tipo de variável ao caso estudado. Ele armazena as variáveis mediante notação dupla, isto é, utiliza os valores da variável de forma categorizada (texto) e na forma de números, que são os valores codificados (numéricos) [74], [76].

Feita a coleta de dados, através de censos, de levantamentos por amostragem ou de experimentos, geralmente estes dados se apresentam de maneira desorganizada, ainda sem valor informativo sobre o fenômeno em estudo. Portanto, os mesmos devem ser organizados para possibilitarem a análise. A matriz de dados pode ser criada ou importada.

5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo serão descritos detalhes da implementação dos *scripts*; alterações no código MAC 802.11; os modelos simulados; análise de desempenho dos resultados obtidos para as métricas de QoS em função da utilização dos mecanismos de diferenciação.

5.1. OBJETIVO E CONTEXTO DA SIMULAÇÃO

Para prover alguma diferenciação de serviços entre as aplicações contidas nas estações das redes *Ad Hoc*, serão empregadas de técnicas de diferenciação no método de acesso da função EDCF da camada MAC.

A diferenciação de serviços consiste no emprego de três métodos para privilegiar o acesso ao meio entre fontes de áudio, vídeo e dados. As técnicas de diferenciação utilizadas compreendem: - alterações do AIFS; alterações no processo de *Backoff* Exponencial Binário e alterações no tamanho dos quadros (seção 3.2). Inicialmente as simulações serão realizadas com apenas um tipo de tráfego: dados. Posteriormente serão simulados aplicações de áudio, vídeo e dados.

Na análise de desempenho é realizada uma verificação estatística (Anexo I) da influência de cada fator utilizado nas técnicas de diferenciação (AIFS, CWmin e tamanho de quadros) sobre as métricas de QoS: vazão, latência, *jitter* e descarte de pacotes. Os resultados adquiridos em função das alterações no sub nível MAC são comparados com os resultados obtidos quando o sub nível MAC permanece no seu padrão original.

5.2. PREPARAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

As simulações foram realizadas usando o simulador NS, na sua versão ns-2.1b9a, em função de esta ser a extensão mais atualizada para redes móveis. Foram utilizadas as funcionalidades oferecidas na distribuição padrão do simulador, com algumas alterações locais e na camada MAC.

O código do MAC 802.11 contido na extensão Monarch [78] foi modificado, a fim de prover as funcionalidades do EDCF. A implementação foi realizada tendo como base o código implementado por [10] e [79], disponíveis respectivamente em [80], [81]. Estes códigos são derivados do código desenvolvido na *University of Califórnia in Berkeley*, que por sua vez derivam do código original do Monarch. Os arquivos disponibilizados em [80] e [81] foram importados e adicionados ao módulo básico através de recompilação do núcleo do simulador. Estes *scripts* foram adaptados de acordo com os modelos simulados nesta dissertação (Figura 22 e Figura 23).

A partir dos objetos contidos na biblioteca do simulador, inicialmente foi implementado um modelo de simulação utilizando *scripts* Otcl. Para simular a topologia do modelo da Figura 22 foi desenvolvido um código que permite a alteração dos parâmetros (AIFS, CWmin e RTStreshold) do MAC para realizar a diferenciação utilizando uma única fila em cada nó. Posteriormente, para o estudo da diferenciação por categorias de acesso, que é o caso da topologia do modelo da Figura 23 foi implementado o conceito de múltiplas filas.

Para simular valores dinâmicos de N, que afetam o tamanho do intervalo entre quadros (AIFS) das estações, foi necessário alterar o código da camada MAC no simulador. No código original, DIFS (AIFS) é igual a SIFS + 2* Slottime. Neste caso para substituir o valor “2” por “N”, criou-se um comando no objeto do MAC para permitir que o valor de “N” fosse determinado durante o tempo de simulação (330 segundos). O *script* Otcl foi configurado para que o valor do fator de multiplicação (N) sofresse variações ao longo do tempo. Ou seja, no intervalo de tempo 0 – 30 segundos recebeu valor 2. No tempo 30 – 60 segundos foi alterado para 5. Posteriormente foi incrementado de 5 a cada 30 segundos, até um limite de 50.

Na camada MAC do 802.11, inicialmente o tamanho mínimo da janela de contenção (CW_{min}) é igual a 31, onde as estações recebem valores aleatórios, utilizando uma distribuição uniforme $[0,31]$. Para atribuir valores dinâmicos para CW_{min} , criou-se um comando na camada MAC do simulador, de forma que os valores de CW_{min} pudessem evoluir em tempo de simulação (330 segundos) assumindo periodicamente valores que são potência de 2 subtraídas de 1 unidade, ou seja, $CW_{novo} = (CW_{antigo} * 2) + 1$. O script *Otcl* foi configurado para que a cada 40 segundos CW_{min} assumisse os seguintes valores: 31, 63, 127, 255, 511, 1023, 2047, 4095.

Para verificar a influência do tamanho do quadro de dados nas métricas de QoS foram adotados pacotes com tamanhos diversificados: 64, 160, 256, 512, 1024, 1500, 2048, 2304 bytes. Nos scripts *Otcl* o tamanho dos quadros, permaneceu do mesmo tamanho dos pacotes. Para isso o limiar de fragmentação configurável ($Fragmentation_{threshold}$) foi estabelecido, de forma que um quadro seja fragmentado somente quando for maior que 2304 bytes. Fato este que nunca ocorre nestes experimentos, pois o maior tamanho de pacote adotado nos cenários simulados é 2304 bytes.

5.3.MODELO DE MOBILIDADE

As estações movem-se numa região de acordo com modelo de mobilidade individual de *Way Point* [39]. Pelo fato do modelo de mobilidade individual *Way Point* dividir o percurso de uma estação em períodos de movimentação e pausa, determinou-se que o mesmo seria utilizado. Neste modelo, a estação fica num local por um determinado intervalo de tempo e depois se move para um novo local escolhido aleatoriamente com uma velocidade que segue uma distribuição uniforme entre $[minspeed, maxspeed]$. As posições iniciais das estações são obtidas por intermédio de uma distribuição uniforme, coordenadas X e Y.

Os arquivos de movimentação são caracterizados por períodos de pausa, este intervalo é denominado de tempo de pausa. Cada nó inicia em uma determinada posição e mantém-se nela pelo período de pausa estabelecido. Terminado o tempo de pausa, a

estação escolhe um ponto aleatório entre a área e movimenta-se para o ponto com uma velocidade média entre 0 e um valor máximo determinado. Assim que a STA chega ao local escolhido, permanece fixa durante o tempo de pausa, volta a escolher outra posição e assim sucessivamente até que o tempo de simulação chega ao fim.

5.4. PARÂMETROS, FATORES E NÍVEIS

Para modelar um cenário *wireless*, os seguintes parâmetros devem ser considerados: nós, enlace, agente, aplicação, o tipo de canal, o modelo de propagação de rádio, tipo de interface de rede, a camada MAC, o tipo de fila, a camada da ligação, o modelo de antena, o número máximo de pacotes na fila, o número de nós móveis, o protocolo de roteamento *Ad Hoc*, tempo de simulação, etc.

Para facilitar a visualização dos parâmetros, fatores e níveis, optou-se por explicá-los separadamente. A lista dos parâmetros do modelo simulado e seus respectivos níveis é composta de parâmetros fixos e parâmetros variáveis. Os parâmetros variáveis são chamados de fatores e seus possíveis valores são chamados de níveis. Os fatores foram escolhidos entre os parâmetros que exercem um maior impacto sobre o desempenho do sistema.

5.4.1. PARÂMETROS FIXOS

Esta seção tem por objetivo documentar a lista dos parâmetros fixos utilizados nos modelos simulados.

- **Parâmetros aceitos como *default* das redes sem fio:** tipo de canal: *Wireless Channel*; modelo de propagação de rádio: *Two Ray Ground*; modelo de antena: *Omni Antenna*; camada da ligação: *LL*; tipo de interface de rede: *Wireless Phy*; camada de acesso ao meio: *802.11*.

- **Interface de Fila:** optou-se pela interface *DropTail* espécie de fila do simulador que implementa o algoritmo de escalonamento FIFO. Conforme apresentado em [72], não existe uma melhora significativa entre os esquemas de filas FIFO, SFQ, FQ, DRR.
- **Número de Pacotes na Fila:** o número máximo de pacotes na fila foi pré-determinado que seria 10, isto porque quanto maior o número de pacotes que a fila é capaz de suportar, maior será o tempo computado para a latência [72]. Nos *scripts* das simulações este parâmetro foi configurado com valor 10, no entanto, o mesmo pode ser alterado para simular novos experimentos.
- **Protocolo de Roteamento:** não existe um consenso sobre qual melhor protocolo de roteamento *Ad Hoc*. Cada protocolo possui vantagens e desvantagens de acordo com situações específicas. Para realizar as simulações selecionou-se o protocolo DSR (*Dynamic Source Routing*). Em função de o protocolo ser reativo, o terminal de origem é quem define quais nós intermediários farão parte da rota até o destino. Em [42], [73] são descritos vários tipos de protocolos de roteamento *Ad Hoc*, suas características, qualidades e problemas.
- **Modelo de Mobilidade:** o modelo de mobilidade mais utilizado em redes *Ad Hoc* é o de mobilidade individual [39]. Neste modelo, cada estação escolhe um destino e uma velocidade aleatórios dentro de uma área pré-determinada e, percorre até o destino anteriormente escalado. Quando a estação chega na posição selecionada, espera por um tempo (tempo de pausa), busca outra posição de deslocamento e percorre até o destino. Pelo fato do modelo de mobilidade individual *Way Point* dividir o percurso de uma estação em períodos de movimentação e pausa, determinou-se que o mesmo seria utilizado.
- **Localização das estações móveis:** as estações movem-se na região pré-definida, neste caso 100m x 100m, de acordo com o modelo aleatório de mobilidade *Way Point*. Neste modelo a STA fica numa posição por um determinado intervalo de tempo e depois se desloca para um novo ponto escolhido aleatoriamente com uma velocidade que segue uma distribuição uniforme entre [*minspeed*, *maxspeed*].

- **Topografia:** a rede é formada dinamicamente por m estações, sendo que todas as Qsta's pertencem a uma única iBSS e encontram-se no mesmo ambiente físico. Neste sentido convencionou-se que uma abrangência máxima de 100m x 100m seria o suficiente para simular um ambiente *indoor*, como por exemplo, uma sala de reuniões, escritório etc.
- **Largura de Banda:** nos experimentos, utilizou uma largura de banda de 11Mbps, conforme a padronização do IEEE 802.11b. Este padrão consegue trabalhar com taxas de transmissões de 5 e 11 Mbps.
- **Tipo de Tráfego:** para o cenário dos modelos simulados (Capítulo 5), o tipo de tráfego utilizado nas simulações é composto por aplicações de áudio, vídeo e dados. As Qstas's geram fluxos representados pelas aplicações **CBR**, no qual fez se uso do protocolo **UDP**.
- **Taxa de Transmissão:** a taxa de geração de cada fonte é tal que a soma das taxas de todas as fontes pertencentes ao conjunto seja igual à capacidade máxima do canal. Ou seja, se a capacidade máxima do canal é de 11Mbps, as N fontes geram uma taxa de 11 Mbps cada uma, totalizando 11 Mbps no canal. Buscou-se saturar o canal com o conjunto de fontes, para verificar a capacidade máxima de transmissão nesse experimento.
- **Tempo de Simulação:** nos primeiros experimentos cada execução da simulação teve a duração de 330 segundos (seção 5.6.1, 5.7.1). Nos últimos experimentos o tempo total das simulações corresponde a 130 segundos (seção 5.8.1). Em função da modelagem das fontes este tempo foi considerado suficiente para obter resultados expressivos das métricas de QoS [10], [67].
- **Número de Replicações:** cada execução da simulação foi replicada 10 vezes para garantir confiabilidade estatística aos resultados [10], [67].

5.4.2. PARÂMETROS VARIÁVEIS

Esta seção apresenta os parâmetros variáveis utilizados nos cenários dos modelos simulados.

- **Número de Estações 802.11e (Qsta):** o número de estações inicia em 2 seguindo uma progressão aritmética de $i+1$, até o limite de m .
- **Número de Fontes:** o número de fontes é dependente do número de estações. Ou seja, o número de fontes sempre será menor ou igual ao número de estações móveis.
- **Tamanho dos Quadros:** nos experimentos, o tamanho dos quadros permaneceu do mesmo tamanho dos pacotes. Para o experimento da Figura 22 o tamanho dos pacotes utilizados compreende: 64, 160, 256, 512, 1024, 1500, 2048, 2304 bytes. E para o experimento da Figura 23 utilizou-se pacotes de 160, 256 e 1500 bytes.
- **Valor de N:** para simular valores dinâmicos de N , que afetam o tamanho do intervalo entre quadros (AIFS) das estações, foi necessário alterar o código da camada MAC no simulador. No código original, $DIFS(AIFS)$ é igual a $SIFS + 2 * Slottime$. Neste caso para substituir o valor “2” por “N”, criou-se um comando no objeto do MAC para permitir que o valor de “N” fosse determinado durante a simulação. Nas simulações os seguintes valores foram atribuídos para N : 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50. Nos experimentos onde está sendo estudada a influência do tamanho mínimo da janela de contenção (CW_{min}), o valor de N permanece fixo.
- **AIFS, SIFS, Slottime:** os valores atribuídos para SIFS e *Slottime* permaneceram igual a 10 μs e 20 μs , respectivamente. Enquanto que AIFS assumiu valores de 50, 110, 210, 310, 410, 510, 610, 710, 810, 910 e 1010 μs . Nos experimentos onde está sendo estudada a influência do tamanho mínimo da janela de contenção (CW_{min}), o valor de AIFS permanece fixo.
- **Valor de CW_{min} :** os valores de CW_{min} evoluem de 31 a 4095, fazendo-se $CW_{novo} = (CW_{antigo} * 2) + 1$ periodicamente, ou seja 31, 63, 127, 255, 511, 1023, 2047, 4095. Nos experimentos onde está sendo estudado a influência do

intervalo entre quadros (AIFS), o CWmin segue o valor padrão do 802.11b, usando valores aleatórios a partir de uma distribuição uniforme entre [0,31].

5.5.EXECUÇÃO DAS SIMULAÇÕES E COLETA DOS DADOS

Para coletar informações relativas às métricas de QoS, rotinas foram implementadas e inclusas no *script*. O programa de simulação desenvolvido alimentou um interpretador Otcl e foram gerados arquivos de *traces* que contém os resultados das simulações.

Para o processo de simulação e análise dos dados gerados pelo simulador, necessitou-se de uma máquina com recursos de hardware mais sofisticados. De forma a facilitar o processo de análise dos arquivos de *trace*, os dados relevantes destes arquivos foram exportados para um editor gráfico e para um *software* estatístico (Statistica) permitindo desta forma a apresentação das métricas de forma gráfica, bem como facilitar os cálculos estatísticos.

Para a obtenção de resultados confiáveis, em função da mobilidade das estações, cada execução da simulação foi replicada 10 vezes. Inicialmente calculou-se a média das métricas em cada replicação, posteriormente calculou-se a média de todas as replicações.

5.6. SIMULAÇÕES EM FUNÇÃO DO AIFS E DO TAMANHO DO QUADRO DE DADOS

Esta seção descreve as configurações e os resultados obtidos em função da variação do intervalo entre quadros (AIFS) e do tamanho do quadro de dados sobre as métricas de QoS.

5.6.1. CENÁRIO DAS SIMULAÇÕES E CONFIGURAÇÕES DO AMBIENTE

O cenário apresentado na Figura 22 simula redes MANET formadas dinamicamente através de comunicações *peer-to-peer* entre as Qsta's, com topologias *multihop*.

A topologia apresentada na Figura 22 é composta por m estações 802.11e, esta rede originou 4 cenários distintos, ou seja, cenários cujo número de estações varia de 2, 4, 8 e 16. A Qsta i envia dados para a Qsta $i+1$, a Qsta m envia dados para a Qsta 1.

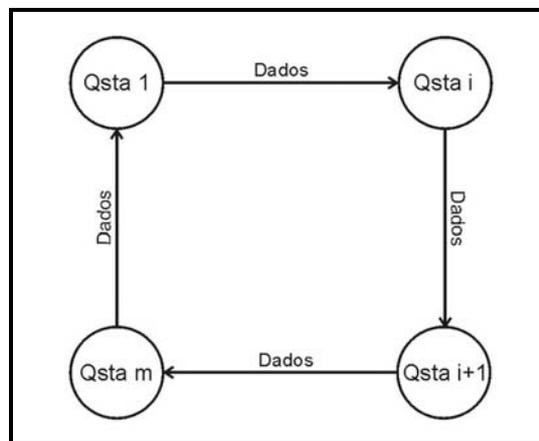


Figura 22 – Modelo Simulado: Dados

Todas as Qsta's estão localizadas numa área de abrangência - 100m x 100m e pertencem a uma mesma iBSS. As estações movem-se nesta região de acordo com modelo de mobilidade individual de *Way Point* [39]. O enlace sem fio tem largura de banda de 11 Mbps. A taxa de dados utilizada é de 11 Mbps e a taxa básica é de 1 Mbps.

As simulações são realizadas sem o uso de RTS/CTS, ou seja, utilizando o esquema de acesso básico do 802.11. O acesso com RTS/CTS não foi utilizado uma vez que o benefício decorrente do uso desse esquema não é suficiente para compensar o custo de transmissão dos quadros RTS e CTS [9].

Os parâmetros fixos e variáveis foram descritos na seção 5.4. Porém, em função de que nestas simulações estão sendo consideradas apenas as variações do AIFS, o valor

mínimo da janela de contenção permanece inalterado, ou seja, o valor de CWmin é fixo e segue o padrão 802.11b, igual a 31. As estações usam valores aleatórios a partir de uma distribuição uniforme entre [0,31].

O AIFS através do fator de multiplicação “N” sofre variações. Os valores dinâmicos de N variam de 2 a 50 e foram alcançados ao longo do período de simulação – 330 segundos. Nos primeiros 30 segundos, o valor definido para N é 2, no tempo 30 – 60 segundos, N recebe o valor de 5. A partir deste tempo, N é acrescido de 5 a cada 30 segundos.

5.6.2. MODELO DE TRÁFEGO

As fontes pertencem a uma mesma categoria de acesso e geram dados a uma taxa de bits constante (*Constant Bit Rate* – CBR). Em cada experimento é utilizado um determinado tamanho de pacote. Os pacotes gerados pelas fontes possuem tamanhos diversificados: 64, 160, 256, 512, 1024, 1500, 2048, 2304 bytes, simulando tráfego de dados.

A taxa de geração de cada fonte é tal que a soma das taxas de todas as fontes pertencentes ao conjunto seja igual à capacidade máxima do canal. Ou seja, se a capacidade máxima do canal é de 11Mbps, as N fontes geram uma taxa de 11 Mbps cada uma, totalizando 11 Mbps no canal. Buscou-se saturar o canal com o conjunto de fontes, para verificar a capacidade máxima de transmissão nos experimento.

O protocolo de transporte utilizado é o UDP, com tamanho de pacotes iguais ao utilizado pelas fontes, para evitar fragmentação e remontagem na camada de transporte.

5.6.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta seção demonstra os resultados obtidos pelas técnicas de diferenciação do AIFS e pelo tamanho dos quadros de dados. De forma a obter uma diferenciação mais elaborada, estas duas técnicas foram empregadas em conjunto.

Os gráficos apresentados a seguir mostram o efeito da alteração do número de *slots* usados no AIFS sobre as métricas de QoS: vazão, latência, *jitter* e descarte de pacotes, obtidas por conjunto de 1, 2, 4, 8 e 16 fontes, que utilizam pacotes de tamanhos variados.

Para verificar a influência do tamanho dos quadros de dados e a variação do AIFS com as métricas de QoS, várias simulações foram realizadas, variando o tamanho de cada pacote e o número de *Slots*.

5.6.3.1 Vazão (Throughput)

Através dos gráficos (1, 2, 3, 4, 5) é possível avaliar a média da vazão obtida por cada estação ao longo do tempo da simulação. Todas as estações estão programadas para iniciar as transmissões dos quadros de dados no t_0 e prosseguirem até o término da simulação. Cada curva dos gráficos apresenta respectivamente a média das vazões obtidas quando o número de fontes é igual a um, dois, quatro, oito e dezesseis.

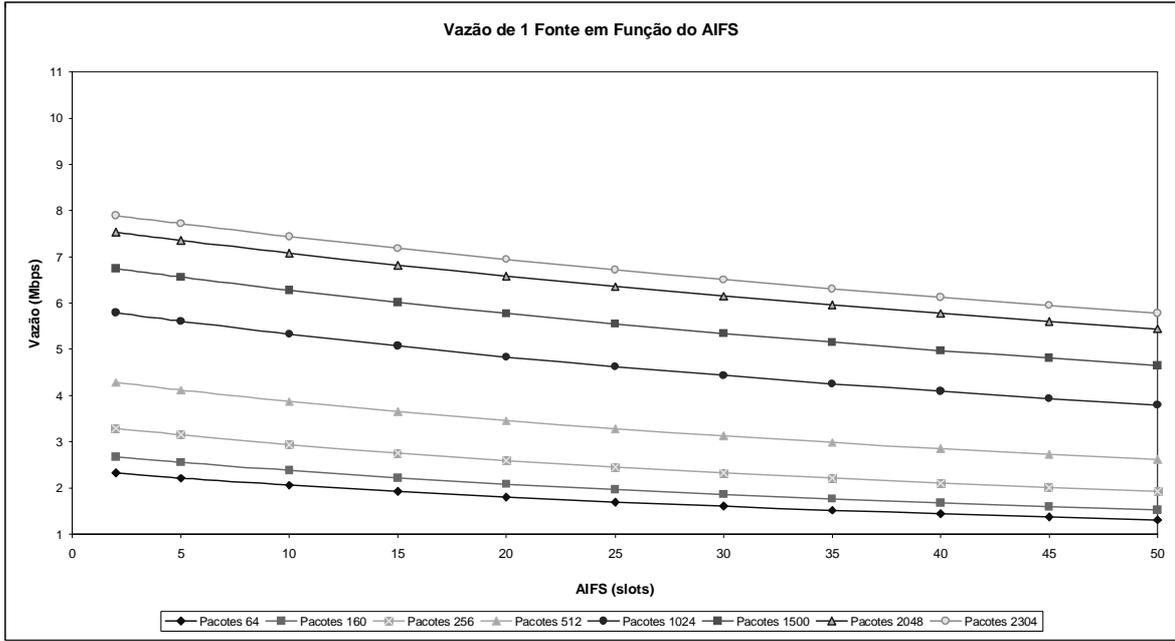


Gráfico 1 – Vazão Média de 1 Fonte CBR em Função do AIFS

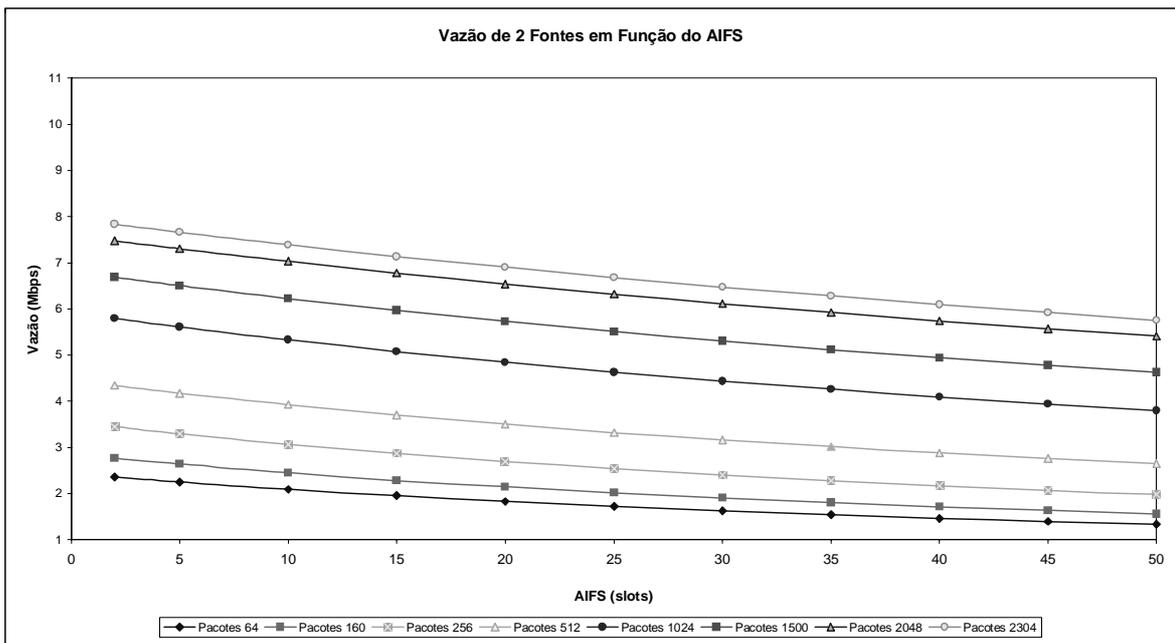


Gráfico 2 – Vazão Média de 2 Fontes CBR em Função do AIFS

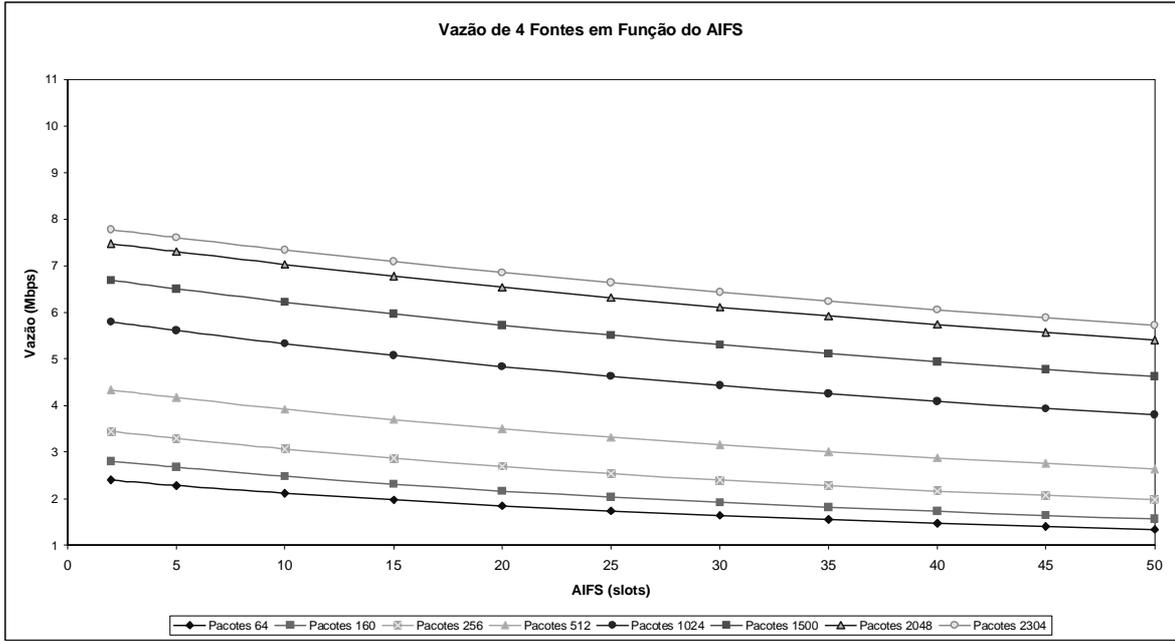


Gráfico 3 – Vazão Média de 4 Fontes CBR em Função do AIFS

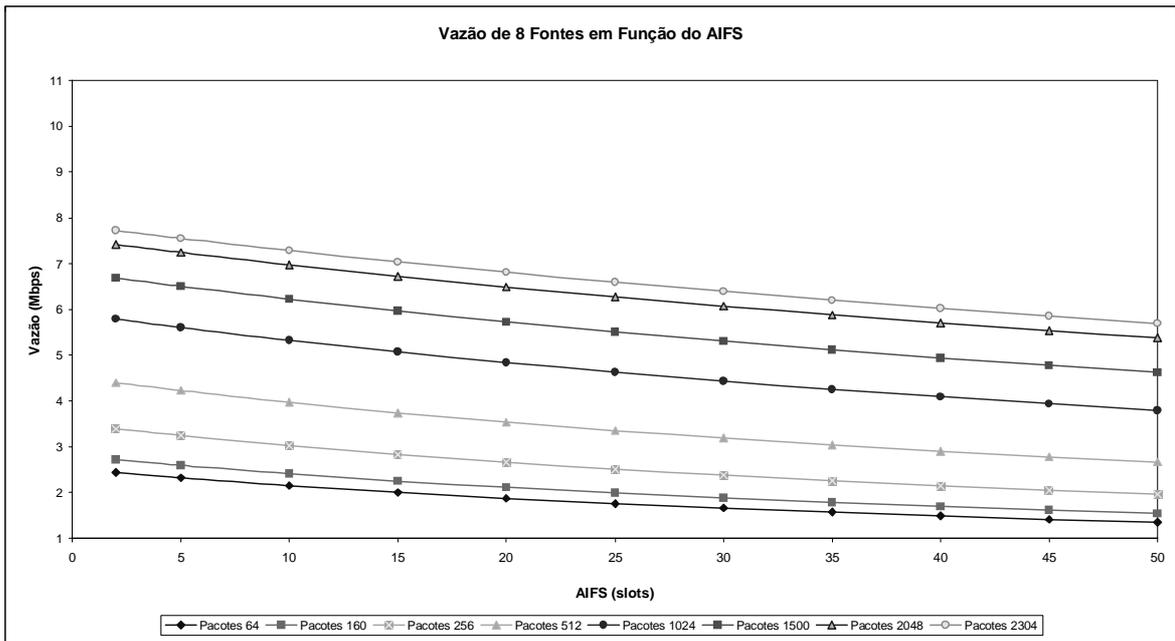


Gráfico 4 – Vazão Média de 8 Fontes CBR em Função do AIFS

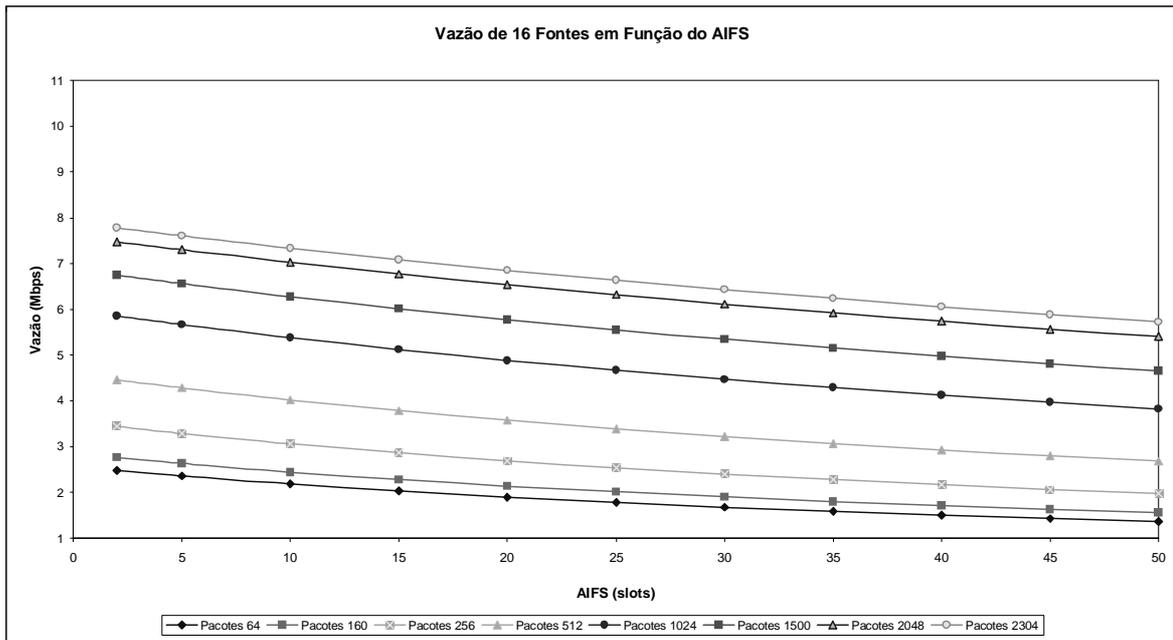


Gráfico 5 – Vazão Média de 16 Fontes CBR em Função do AIFS

A largura de banda máxima definida para a rede IEEE 802.11b é de 11Mbps. Conforme a equação 1 (descrita na seção 3.2.1) a vazão máxima obtida para uma fonte CBR utilizando pacotes de tamanho máximo (2304 bytes) é de 8,079 Mbps. Esta banda útil diminui à medida que são empregados quadros de dados de tamanhos menores.

Nos experimentos realizados, o Gráfico 1 ilustra que para uma fonte CBR, utilizando pacotes de 2304 bytes, a maior vazão alcançada foi de 7,89 Mbps. Esta banda útil diminui à medida que são empregados pacotes de tamanho menores, o que evidencia que a vazão máxima obtida é dependente do tamanho dos pacotes adotados. Este fato pode ser analisado através dos Gráficos 1, 2, 3, 4, 5.

Por intermédio dos gráficos percebe-se que o aumento do número de *slots* utilizados no AIFS provoca uma redução quase linear na vazão agregada de cada conjunto, independente do número de fontes presentes na IBSS. Isto se deve ao fato de que, a cada *slot* adicionado a $AIFS(i)$, há um acréscimo do tempo exato de um *slot* (no caso, 20 μ s) ao tempo de espera de todas as instâncias do EDCF que competem pela categoria *i*.

5.6.3.2 Latência (atraso fim-a-fim)

Um dos principais parâmetros de desempenho da rede é o atraso. O atraso pode ser considerado como o principal fator de QoS. Em aplicações tempo real, como, por exemplo, para o tráfego de voz quando o atraso é alto, ocorre a perda de qualidade, ocasionando eco e sobreposição de conversação. Já para o tráfego de dados a sensibilidade ao atraso é baixa. Independente do grau de sensibilidade do atraso para as aplicações é imprescindível estabelecer limites e configurar a rede para que a mesma possa atender as solicitações nos tempos estipulados, evitando com isto a perda dos pacotes.

Os gráficos (6, 7, 8, 9,10) apresentam respectivamente a latência média obtida quando o número de fontes é 1, 2, 4, 8 e 16, por cada estação ao longo do tempo da simulação.

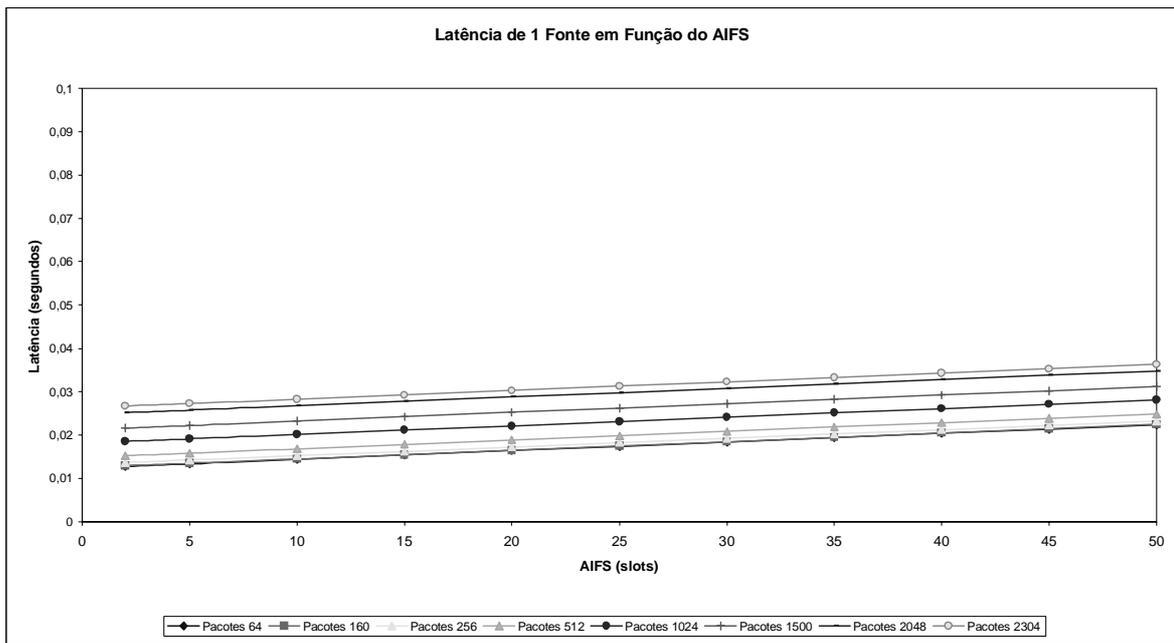


Gráfico 6 – Latência Média de 1 Fonte CBR em Função do AIFS

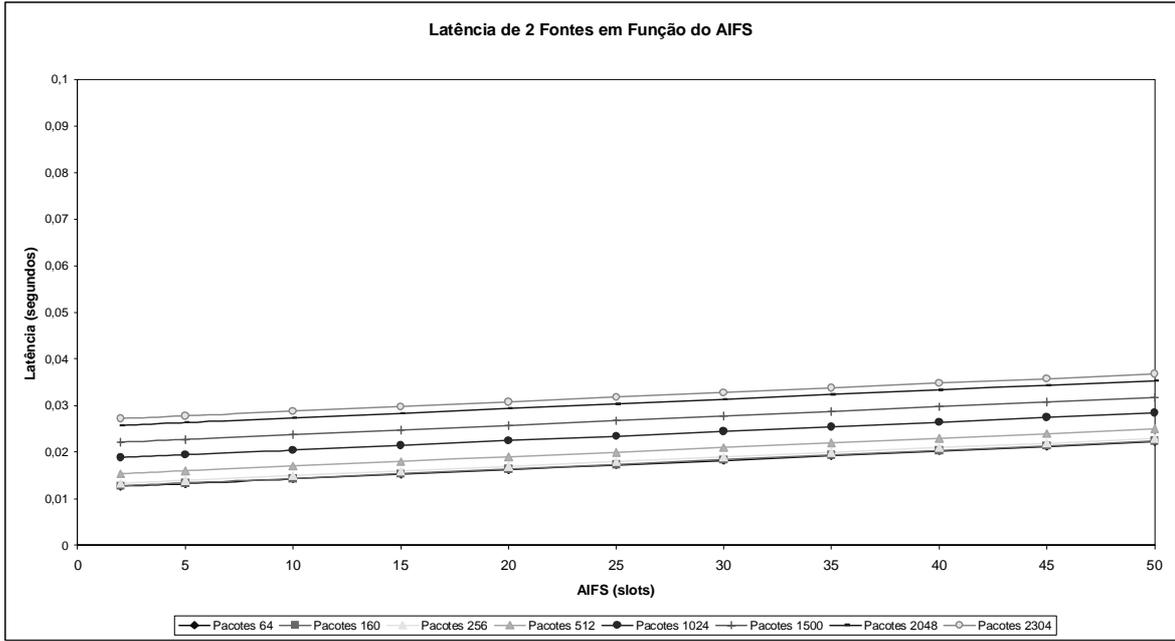


Gráfico 7 – Latência Média de 2 Fontes CBR em Função do AIFS

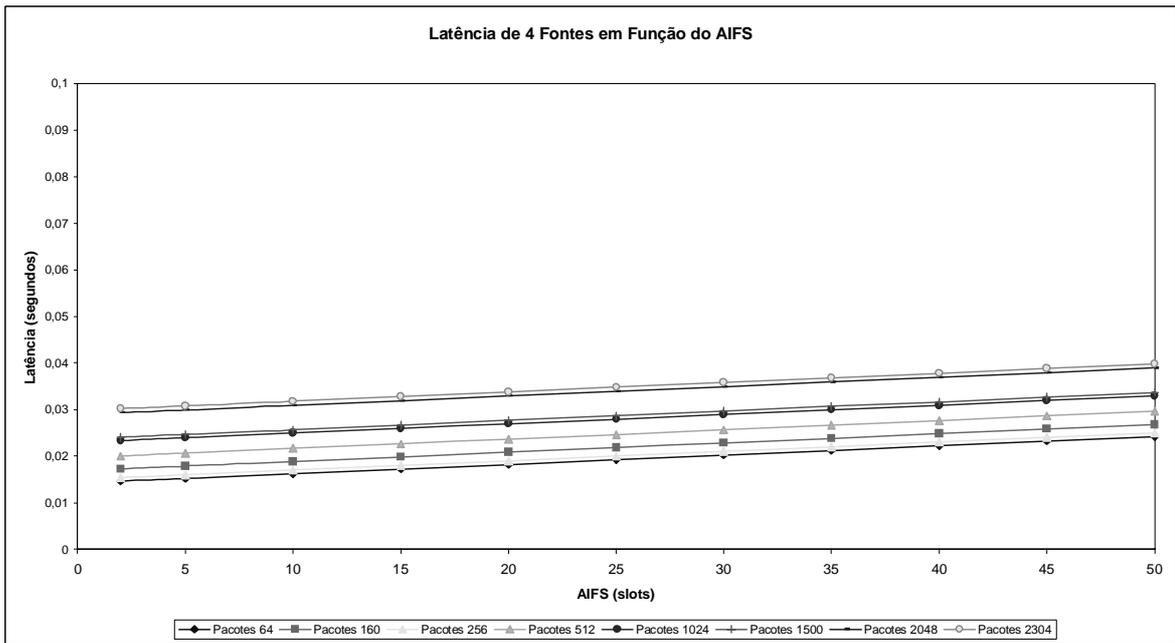


Gráfico 8 – Latência Média de 4 Fontes CBR em Função do AIFS

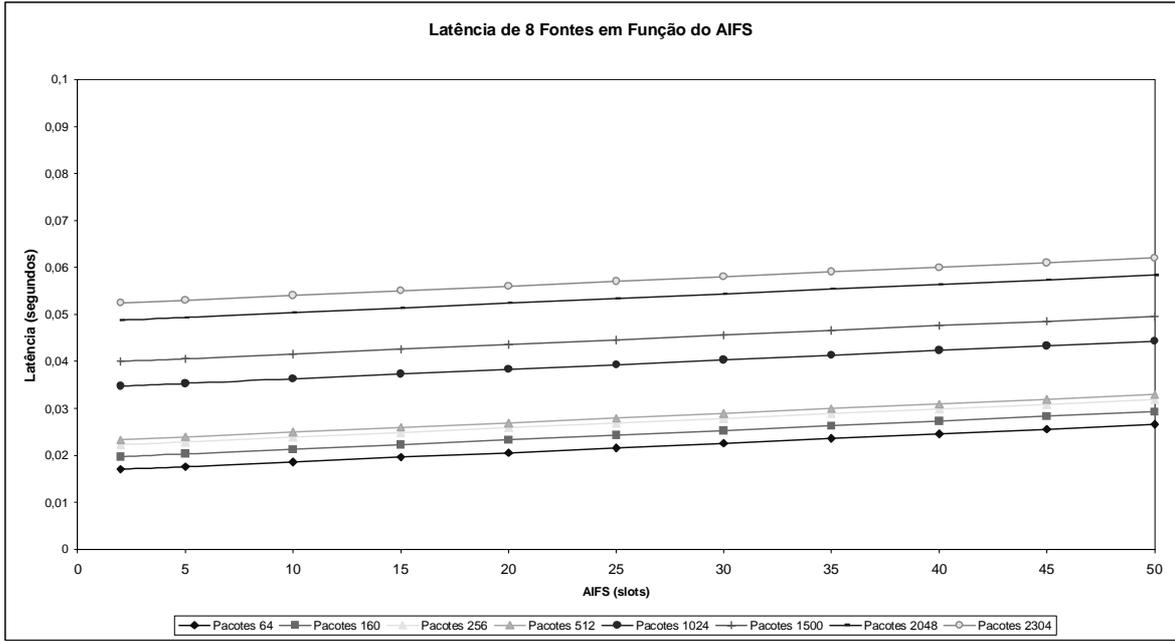


Gráfico 9 – Latência Média de 8 Fontes CBR em Função do AIFS

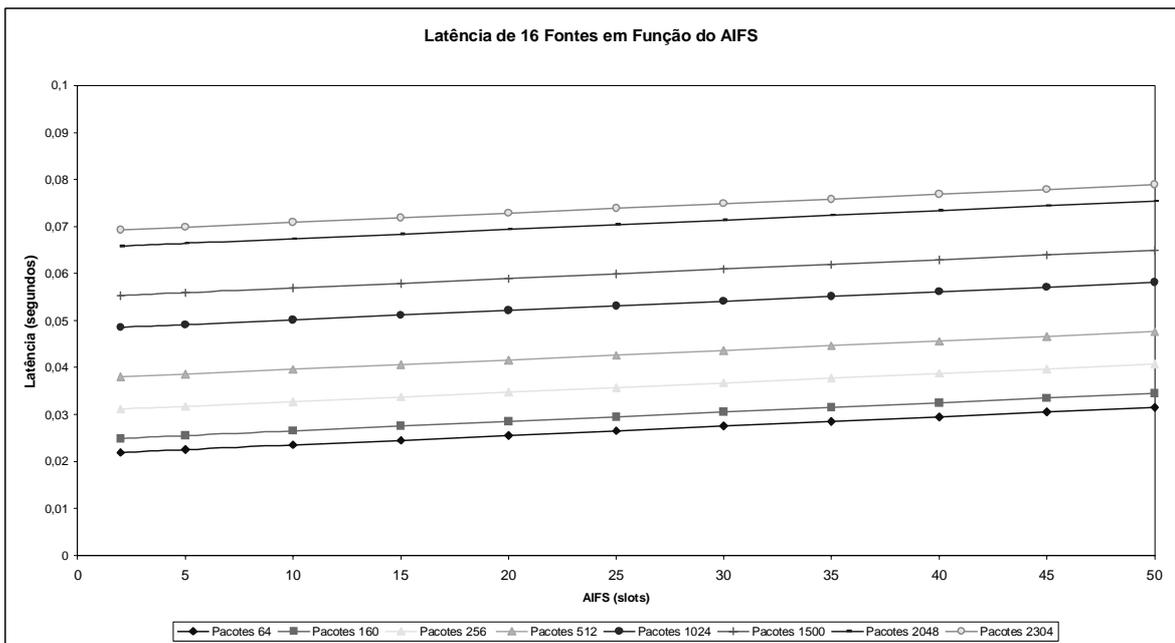


Gráfico 10 Latência Média de 16 Fontes CBR em Função do AIFS

Na análise das amostras da métrica latência, verificou-se a influencia de dois fatores: o tamanho da fila e o retardo de acesso que a categoria observa na disputa pelo meio físico. O primeiro fator é função da carga imposta pela categoria de acesso que a implementa e o segundo é função da carga total presente na rede.

Neste experimento adotou-se o tipo de fila: - *DropTail*, sendo que cada fila de uma Qsta foi configurada para comportar 10 pacotes. Evidenciou-se que quando os pacotes de maior tamanho eram enviados e posteriormente enfileirados para serem servidos, maiores eram os tempos de latência.

Nos cenários simulados, procurou saturar o máximo a utilização do canal, de forma que a soma das taxas de todas as fontes fosse igual a 11Mbps. Através dos gráficos (6, 7, 8, 9,10), percebe-se que quando AIFS = 50 μ s e o tamanho dos pacote é igual a 2304 bytes, a maior média para a latência¹¹ analisada é de 0,069 segundos. Ou seja, o tamanho do AIFS e do pacote possuem influência direta no atraso.

Conforme ilustração dos gráficos, observa-se que quanto maior o valor de AIFS e dos pacotes, maiores são os tempos computados para a latência. Conclui-se então que os tempos de latência são dependentes do tamanho dos pacotes e do valor do AIFS.

Para diferenciar as aplicações por categorias de tráfego, pode-se atribuir valores menores para AIFS, bem como adotar pacotes de menor tamanho para as aplicações multimídia, dependendo dos requisitos de QoS que cada aplicação necessita.

5.6.3.3 Variação de Atraso (Jitter)

Os gráficos (11, 12, 13, 14, 15) apresentam respectivamente a média da variação de atraso obtida quando o número de fontes é igual a 1, 2, 4, 8 e 16, por cada estação ao longo do tempo da simulação.

¹¹ Os tempos computados para a latência compreendem: processamentos nos nós finais e intermediários, disputa pelo acesso ao meio no enlace compartilhado e o tempo de propagação no meio físico.

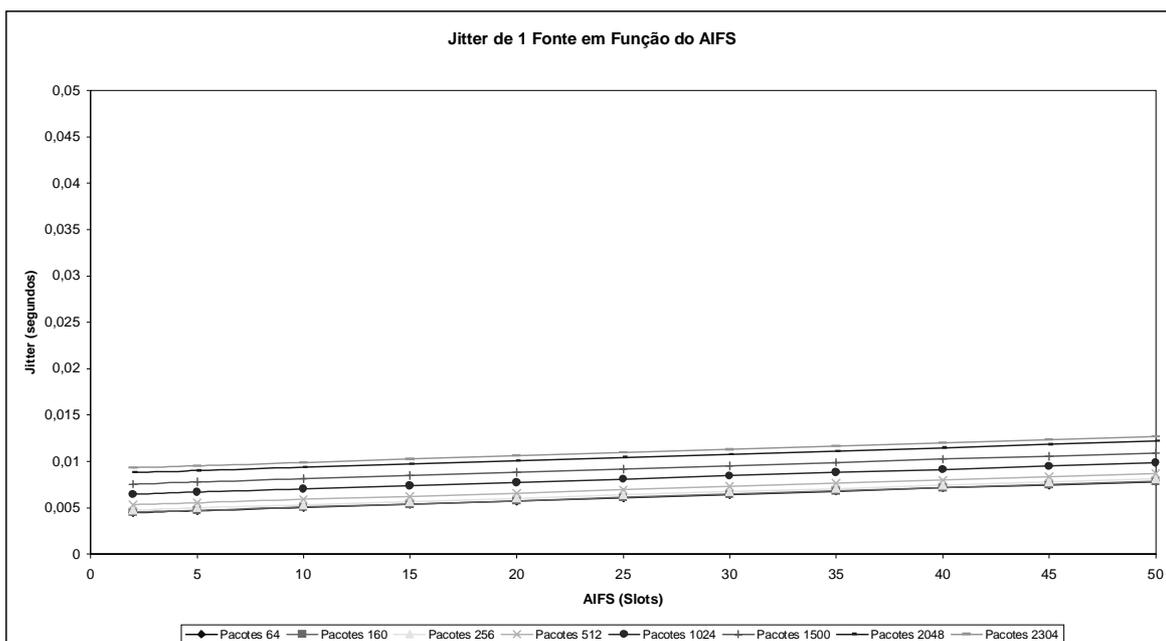


Gráfico 11 – Jitter Médio de 1 Fonte CBR em Função do AIFS

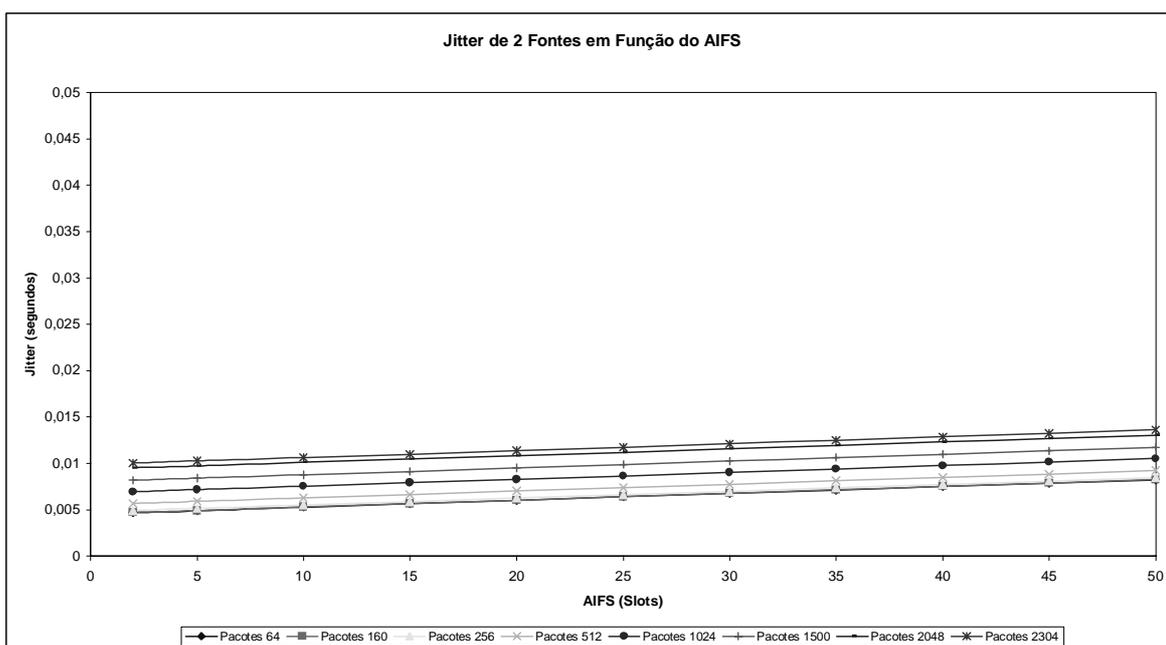


Gráfico 12 – Jitter Médio de 2 Fontes CBR em Função do AIFS

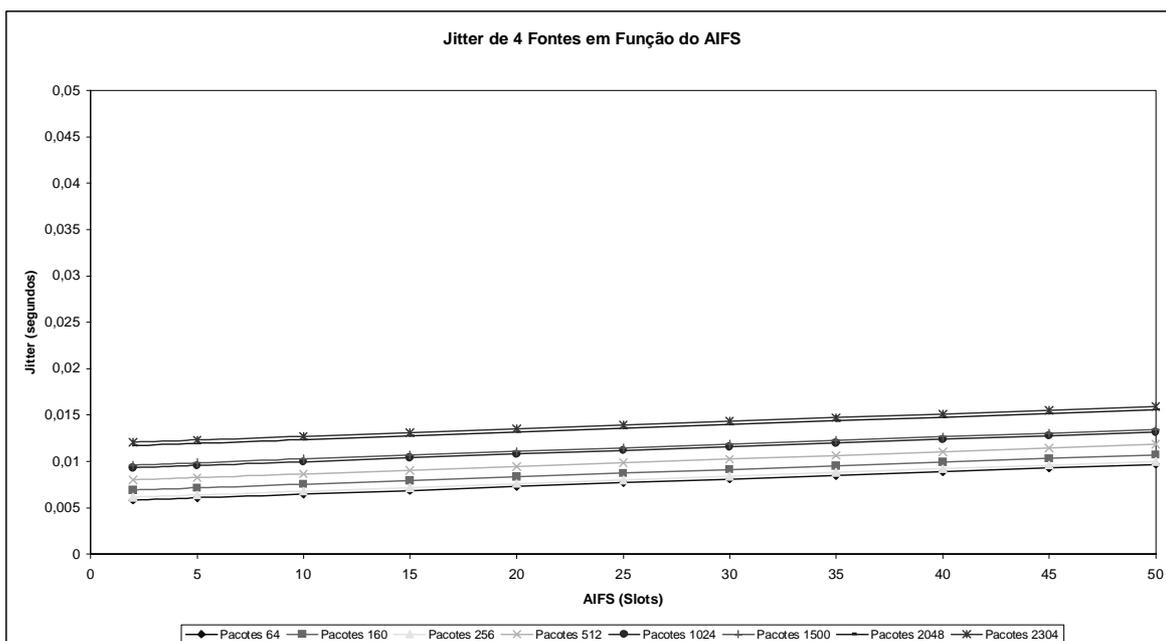


Gráfico 13 – Jitter Médio de 4 Fontes CBR em Função do AIFS

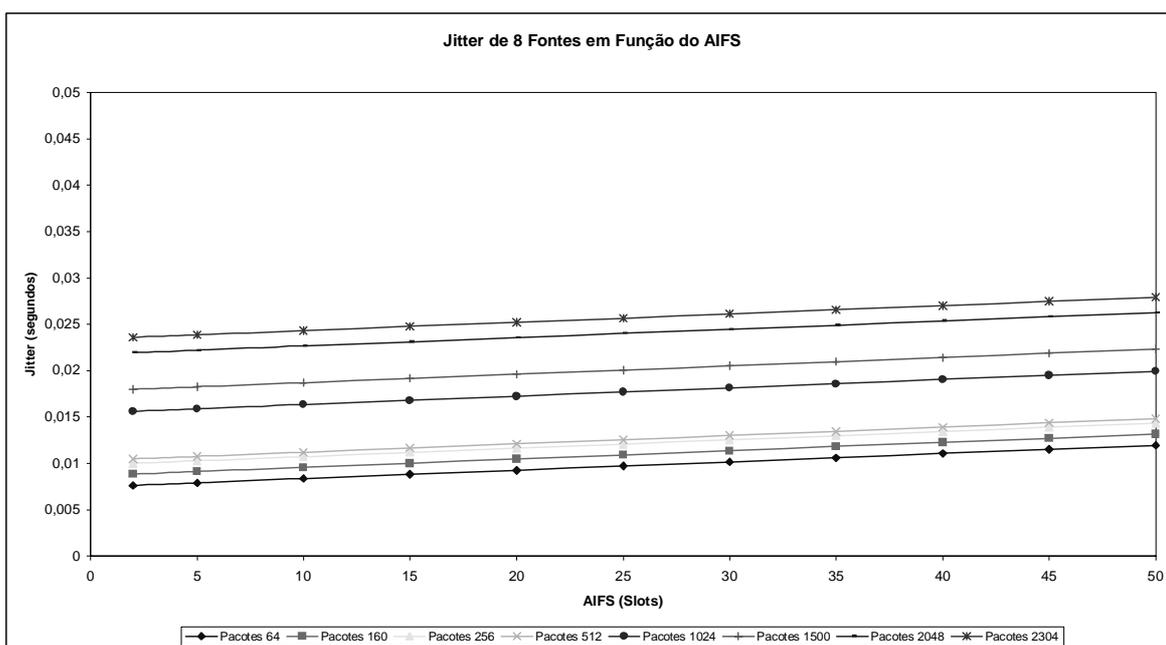


Gráfico 14 – Jitter Médio de 8 Fontes CBR em Função do AIFS

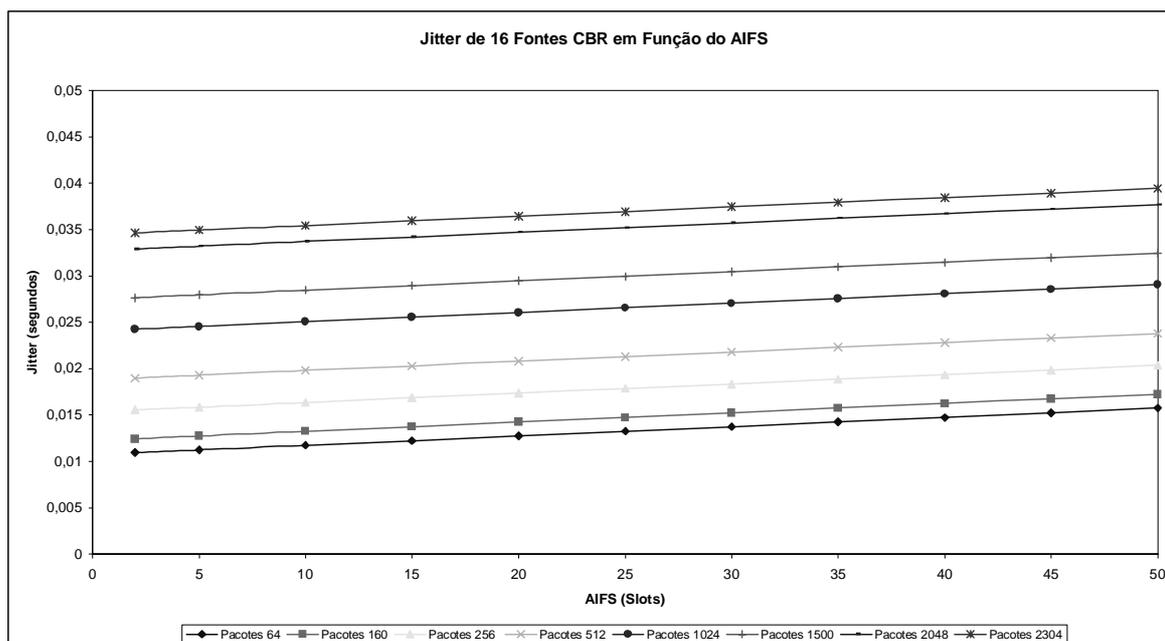


Gráfico 15 – Jitter Médio de 16 Fontes CBR em Função do AIFS

A variação do atraso segue a mesma tendência da latência, ou seja, a diversificação do tamanho dos pacotes, afeta diretamente o *jitter*. Através dos Gráficos (11, 12, 13, 14, 15) percebe-se que quando os pacotes de maior tamanho são transferidos, existe um aumento no valor do *jitter*. O processo inverso ocorre quando os pacotes de menor tamanho são encaminhados ao meio físico.

5.6.3.4 Taxa de Perda de Pacotes

As taxas de perdas de pacotes em um único sentido são calculadas no lado do receptor como a razão entre a quantidade de pacotes descartados pela quantidade de pacotes transmitidos, em cada intervalo de tempo considerado [RFC 2680].

Em redes sem fio é difícil definir a razão porque um pacote foi perdido. Porém, neste estudo observou-se que os pacotes eram perdidos devido ao congestionamento, o tamanho dos pacotes, capacidade da fila e devido à mobilidade das Qsta's.

Os gráficos (16, 17, 18, 19, 20) dispostos a seguir ilustram a taxa média de descarte de pacotes para 1, 2, 4, 8 e 16 fontes CBR.

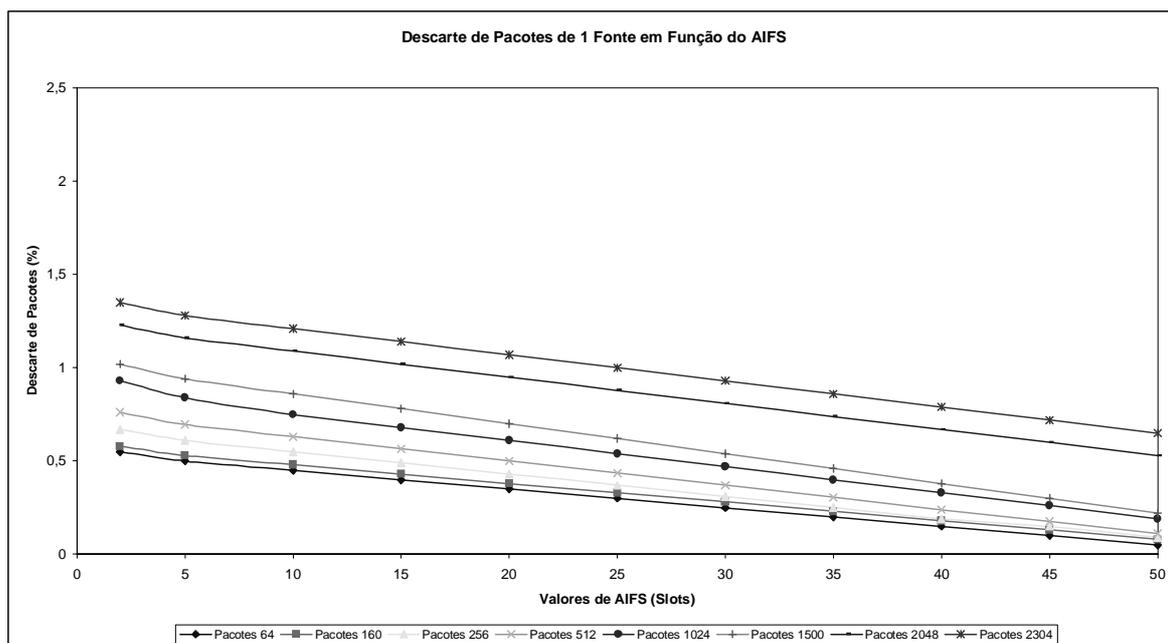


Gráfico 16 – Taxa de Descarte de Pacotes de 1 Fonte CBR em Função AIFS

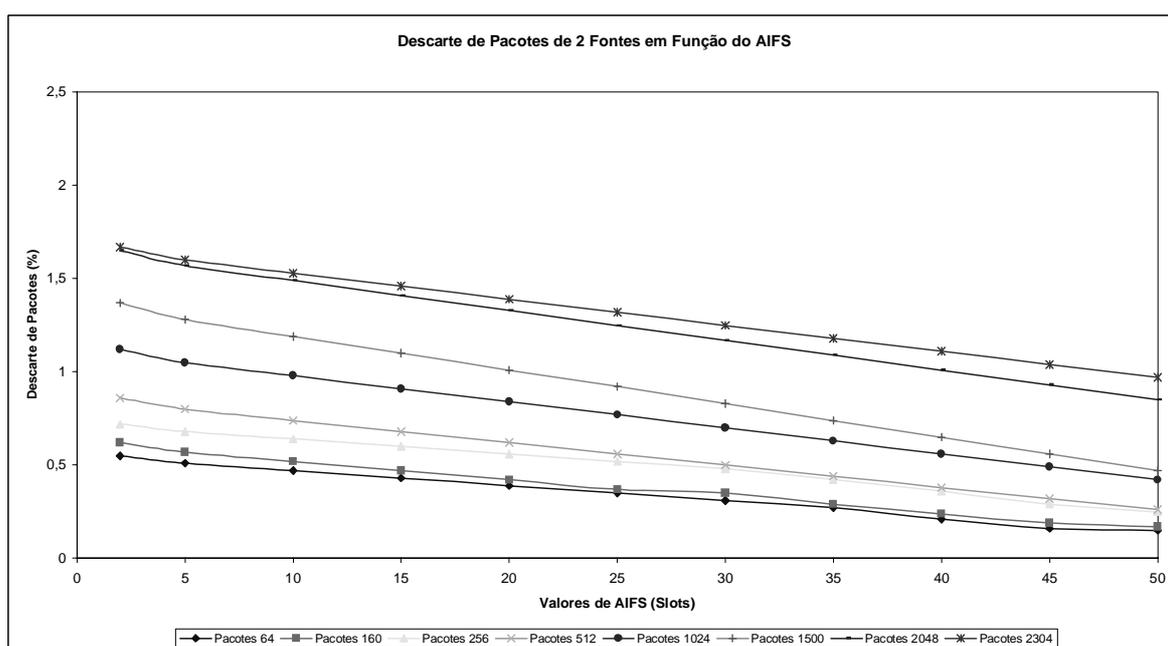


Gráfico 17 – Taxa de Descarte de Pacotes de 2 Fontes CBR em Função AIFS

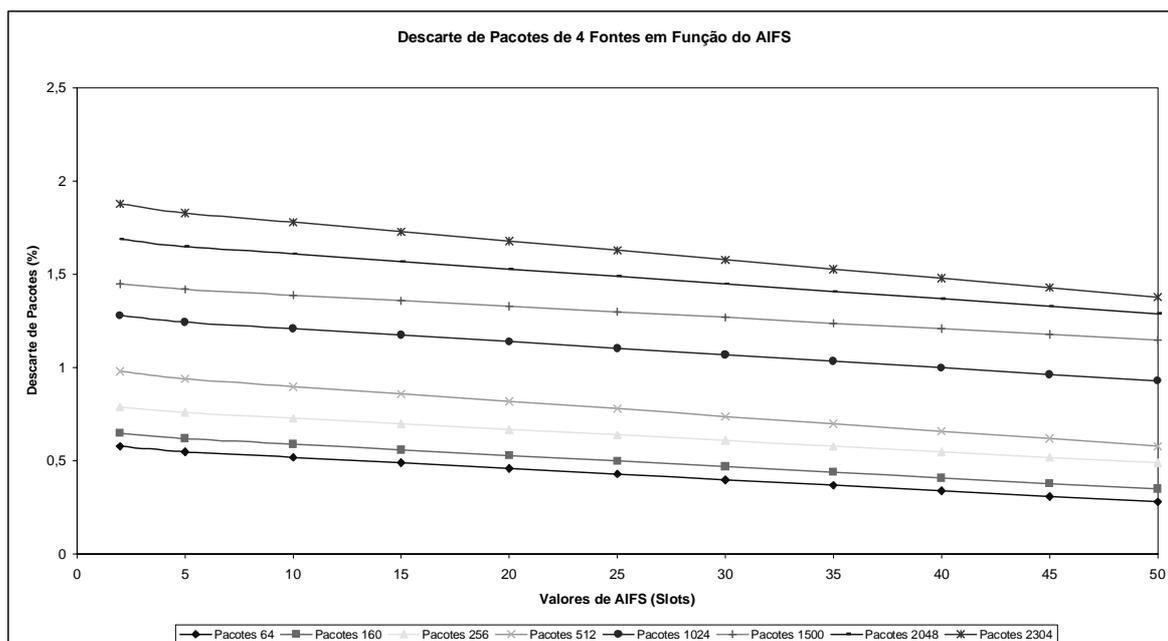


Gráfico 18 – Taxa de Descarte de Pacotes de 4 Fontes CBR em Função do AIFS

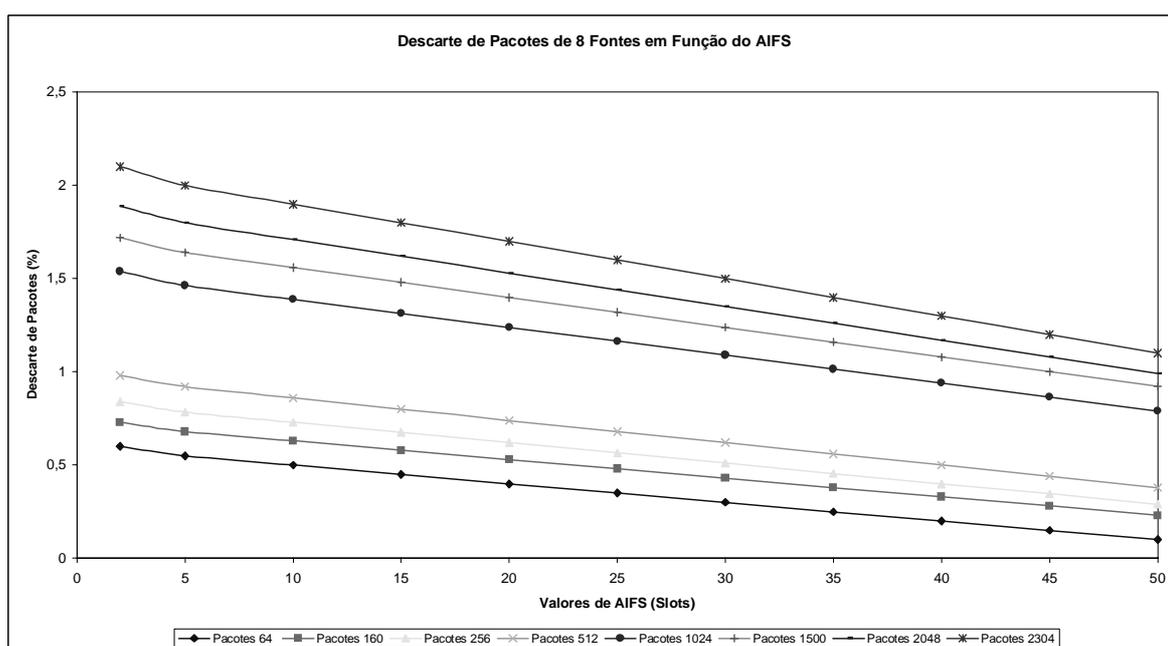


Gráfico 19 – Taxa de Descarte de Pacotes de 8 Fontes CBR em Função do AIFS

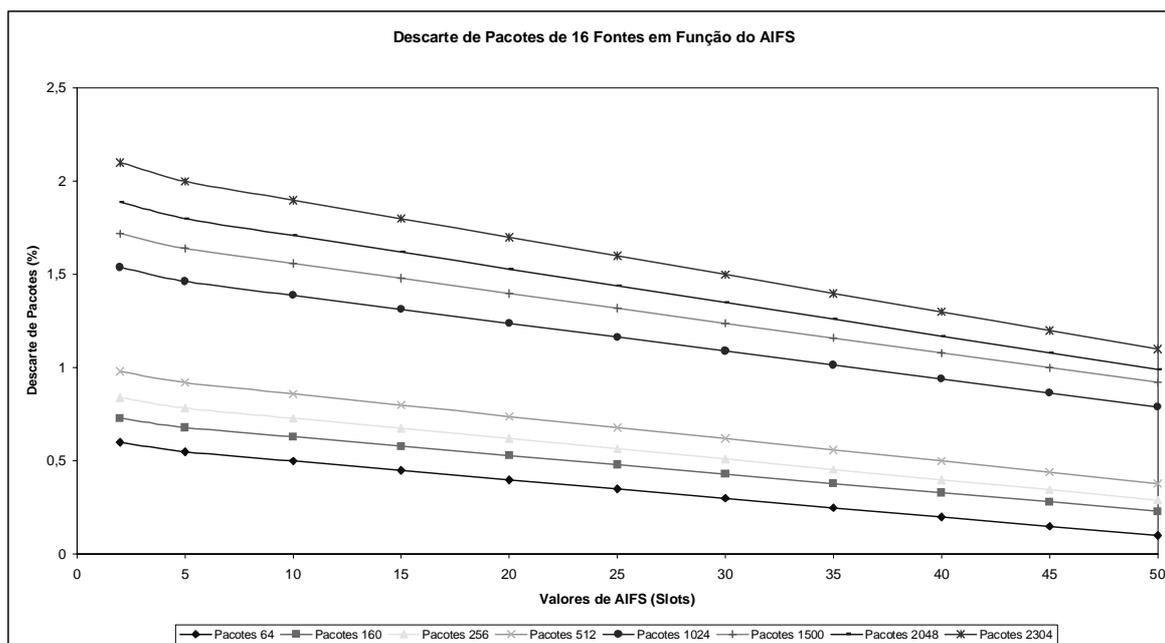


Gráfico 20 – Taxa de Descarte de Pacotes de 16 Fontes CBR em Função do AIFS

Durante e no término do processo de simulação, foi possível evidenciar que a perda de pacotes se sucedia principalmente pela grande quantidade de dados que era injetado na rede, pois as estações foram configuradas no NS para gerar dados desde o instante inicial até o tempo final das simulações.

Tendo em vista que a capacidade da fila das Qstas foi configurada para comportar no máximo 10 pacotes, e as fontes CBR gerarem dados constantemente, quando a fila das Qsta estava no seu limite, os pacotes começavam a ser descartados.

Analisou-se que o tamanho dos pacotes influencia no descarte e que as perdas são equivalentes às taxas de entrada quando a fila está próxima ao seu limite, ou seja, quanto maior a taxa de entrada de um fluxo, maior a taxa de perda de pacotes daquele fluxo. Observou-se que quanto maior o número de pacotes de maior tamanho nas filas das Qsta's, maior é o tempo de atendimento e permanência na fila, impossibilitando a entrada de outros fluxos, ocasionando o descarte.

A transferência de pacotes de maior tamanho consome mais tempo o canal de comunicação, forçando o enfileiramento e a perda de pacotes. À medida que os pacotes de menor tamanho são encaminhados ao meio físico, o nível de enfileiramento diminui, pois estes pacotes são servidos mais rapidamente que os pacotes de maior tamanho.

Outro fator observado na perda dos pacotes foi à movimentação constante e o afastamento entre os nós. À medida que as Qsta's se movimentavam, distanciando-se umas das outras, os pacotes eram descartados.

Quando os valores de N são incrementados, as Qstas geram uma menor vazão (gráficos 1, 2, 3, 4, 5); isto ocorreu em função de que, a cada *Slot* adicionado a AIFS(i), há um acréscimo do tempo exato de um *Slot* ($20 \mu\text{s}$) ao tempo de espera de todas as instâncias do EDCF que competem pela categoria i . Este fator contribui para a ocorrência de uma pequena redução na taxa de descarte de pacotes. Estas informações podem ser analisadas por intermédio dos gráficos (16, 17, 18, 19, 20).

5.7.SIMULAÇÕES EM FUNÇÃO DO BACKOFF EXPONENCIAL BINÁRIO E DO TAMANHO DO QUADRO DE DADOS

Esta seção descreve as configurações e os resultados obtidos em função da variação do tamanho mínimo da janela de contenção (CW_{\min}) e do tamanho do quadro de dados sobre as métricas de QoS.

5.7.1. CENÁRIO DAS SIMULAÇÕES E CONFIGURAÇÕES DO AMBIENTE

O cenário utilizado nestes experimentos é idêntico ao apresentado na Figura 22. As configurações são as mesmas apresentadas na seção 5.6.1.

Os parâmetros fixos e variáveis foram descritos na seção 5.4. Porém, em função de que nestas simulações estão sendo consideradas apenas as variações do tamanho mínimo da janela de contenção (CW_{\min}), o valor do AIFS permanece inalterado, ou seja, igual $50 \mu\text{s}$.

Na camada MAC do 802.11 no seu padrão original, o tamanho do CW_{\min} é fixo igual a 31, onde as estações utilizando uma distribuição uniforme $[0,31]$, recebem valores aleatórios para CW_{\min} . Neste cenário, ao longo do tempo da simulação, o valor

da janela de contenção sofreu variações, assumindo os seguintes valores: 31, 63, 127, 255, 511, 1023, 2047, 4095. Os valores de CW_{min} são incrementados a cada 40 segundos.

5.7.2. MODELO DE TRÁFEGO

O modelo de tráfego, a taxa de geração e o protocolo de transporte utilizado são mantidos conforme apresentado na seção 5.6.2.

5.7.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta seção demonstra os resultados obtidos pelas técnicas de diferenciação do *Backoff* Exponencial Binário e pelo tamanho do quadro de dados. De forma a obter uma diferenciação mais elaborada, estas duas técnicas foram empregadas em conjunto.

Os gráficos apresentados a seguir mostram o efeito da variação do tamanho da janela de contenção sobre as métricas de QoS: vazão, latência, *jitter* e descarte de pacotes, obtidas por conjunto de 1, 2, 4, 8 e 16 fontes, que utilizam pacotes de tamanhos variados.

Para verificar a influência do tamanho dos pacotes e variação da janela de contenção com as métricas de QoS, várias simulações foram realizadas, variando o tamanho de cada pacote e o valor do CW_{min} .

5.7.3.1 Vazão (Throughput)

Os Gráficos (11, 12, 13, 14, 15) ilustram a média da vazão obtida por cada estação ao longo do tempo da simulação. Todas as estações estão programadas para iniciar as transmissões dos quadros de dados no t_0 e prosseguirem até o término da

simulação. Cada curva dos gráficos apresenta respectivamente a média das vazões obtidas quando o número de fontes é 1, 2, 4, 8 e 16.

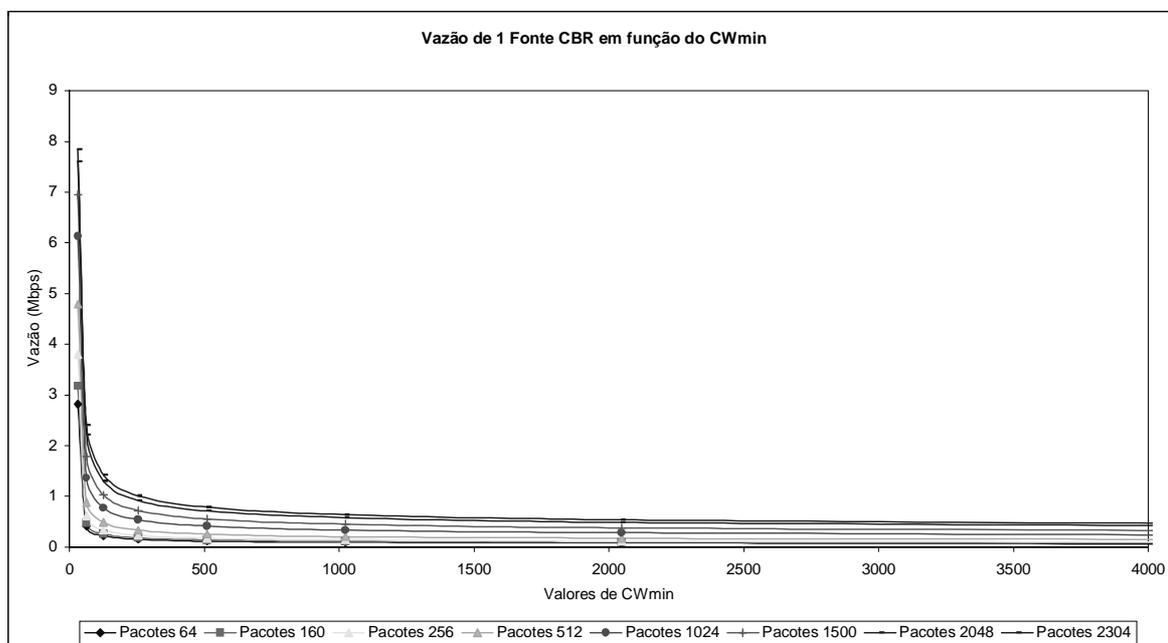


Gráfico 21 – Vazão de 1 Fonte CBR em Função do CWmin

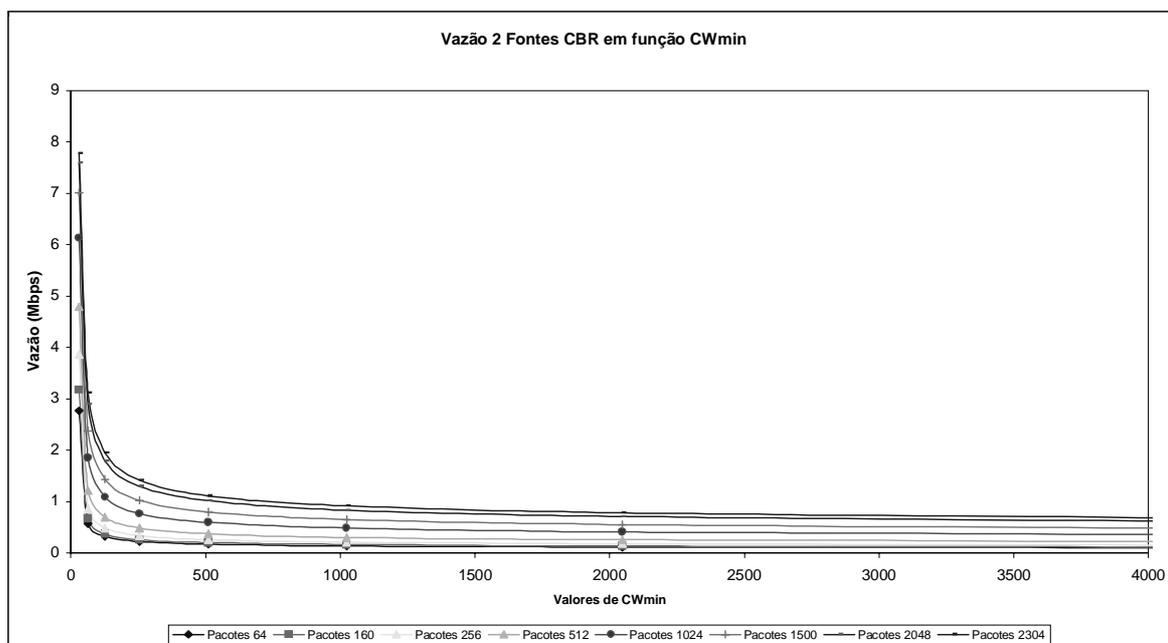


Gráfico 22 – Vazão de 2 Fontes CBR em Função CWmin

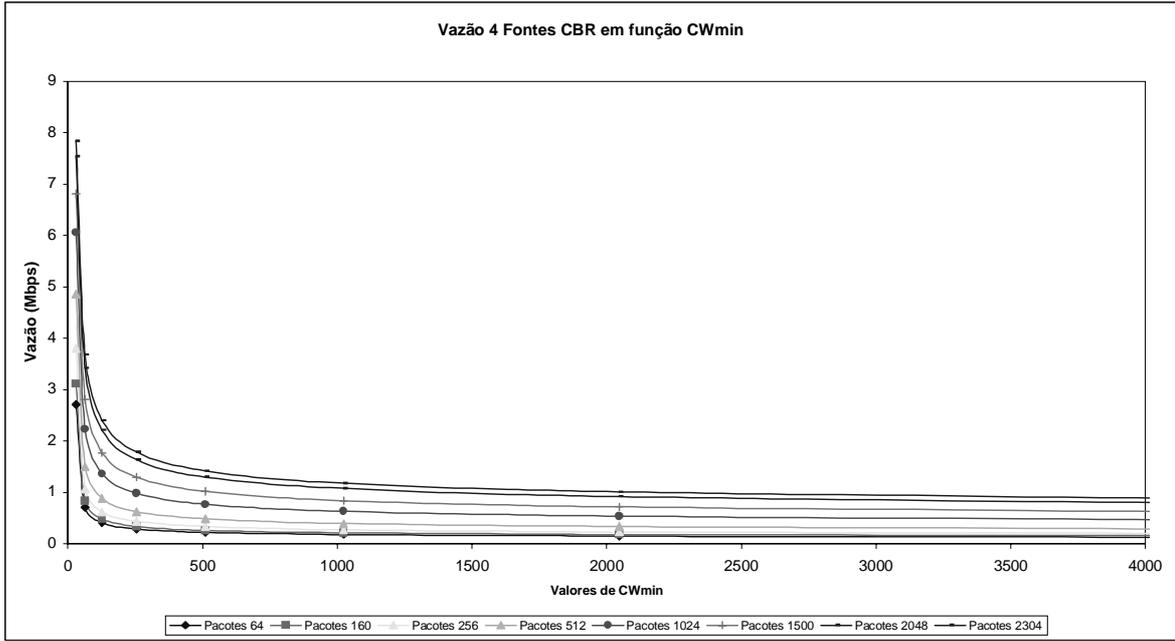


Gráfico 23 – Vazão de 4 Fontes CBR em Função AIFS

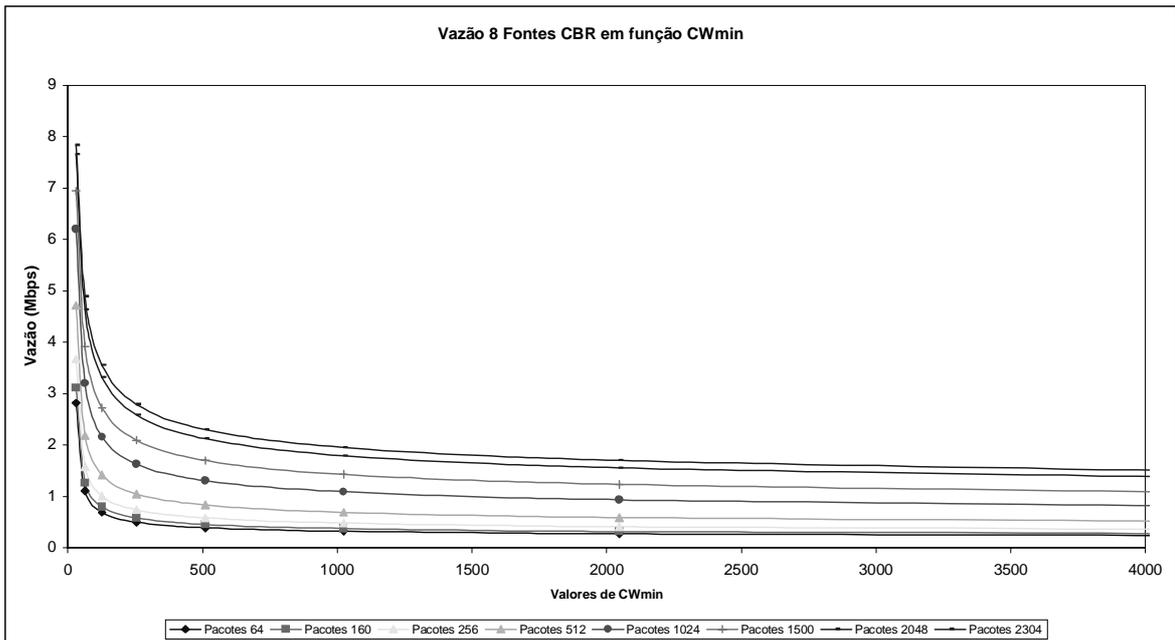


Gráfico 24 – Vazão de 8 Fontes CBR em Função do CWmin

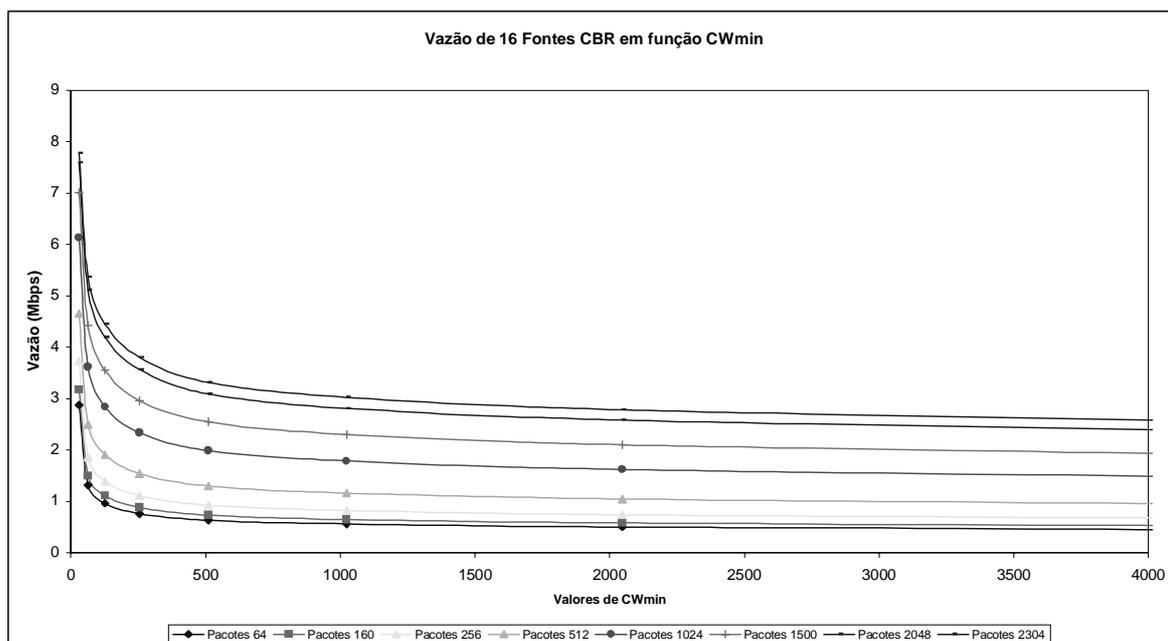


Gráfico 25 – Vazão de 16 Fontes CBR em Função do CWmin

Por intermédio dos gráficos (21, 22, 23, 24, 25), verifica-se que o efeito do aumento do CWmin sobre a vazão máxima não é tão previsível quanto o do aumento do AIFS. Para uma única fonte, no caso do Gráfico 21, percebe-se que o aumento linear do tempo de espera provoca uma redução inversamente proporcional na vazão máxima.

À medida que ocorre um aumento no número de fontes, observa-se que a curva da vazão fica mais imune às variações de CWmin. Este fato pode ser explicado considerando-se a importância que o tamanho da janela de contenção tem na prevenção de colisão do CSMA/CA. Em situações de sobrecarga, como é o caso destes experimentos, a probabilidade de colisão aumenta com o número de instâncias do MAC que competem pelo meio. Cada instância que perde uma oportunidade de transmissão é obrigada a entrar em *backoff* usando um valor maior de CW.

Quando o número de CWmin é acrescido, reduz-se a probabilidade de que duas instâncias escolham o mesmo *slot*, aumentando a chance de transmissão na primeira tentativa e nas subsequentes. Por este motivo, quando o valor de CWmin é dobrado, ocorre uma elevação da vazão agregada. Diante de tais circunstâncias, a vazão agregada só começa a cair quando o CWmin assume valores excessivos em relação ao valor ideal para a prevenção de colisão.

Por intermédio dos gráficos (21, 22, 23, 24, 25) percebe-se que quanto maior o tamanho dos quadros utilizados pelas estações, maior é a vazão obtida pela fonte proprietária daquele pacote. Neste caso, observa-se que na eventualidade de diferenciar uma categoria de tráfego, um cuidado especial deve ser adotado em relação ao tamanho dos quadros.

5.7.3.2 Latência

Os gráficos (26, 27, 28, 29,30) ilustram a média da latência obtida em função da variação do valor de CWmin e do tamanho dos quadros de dados. Os gráficos apresentam o atraso quando o número de fontes é respectivamente igual a 1, 2, 4, 8 e 16, por cada estação ao longo do tempo da simulação.

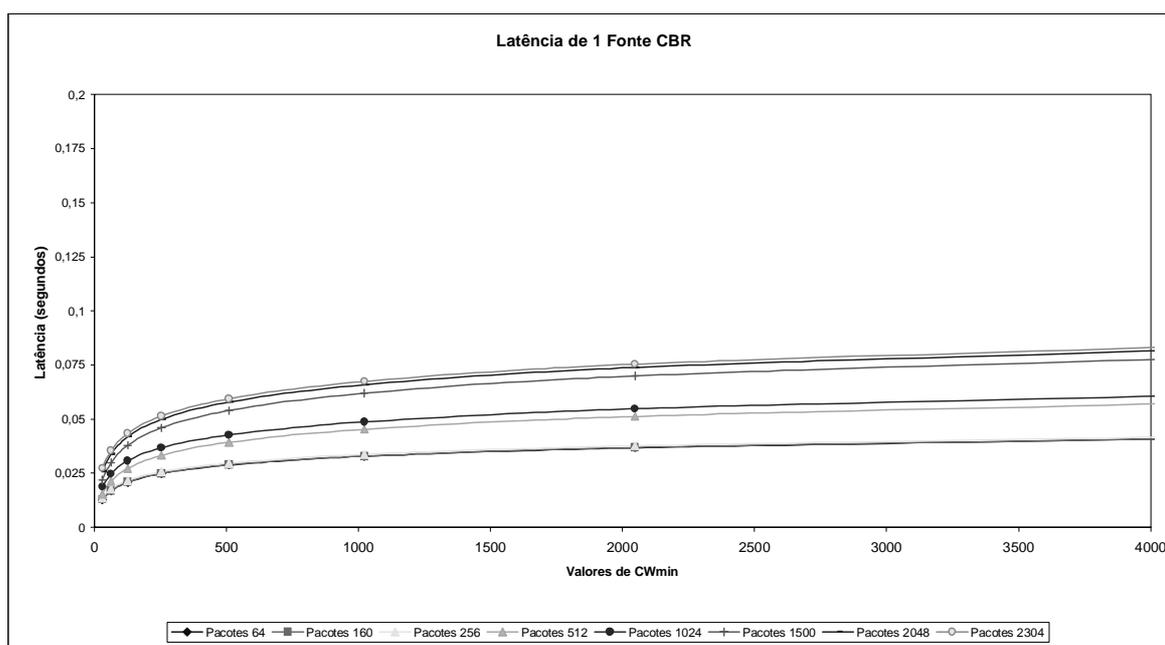


Gráfico 26 – Latência de 1 Fonte CBR em Função do CWmin

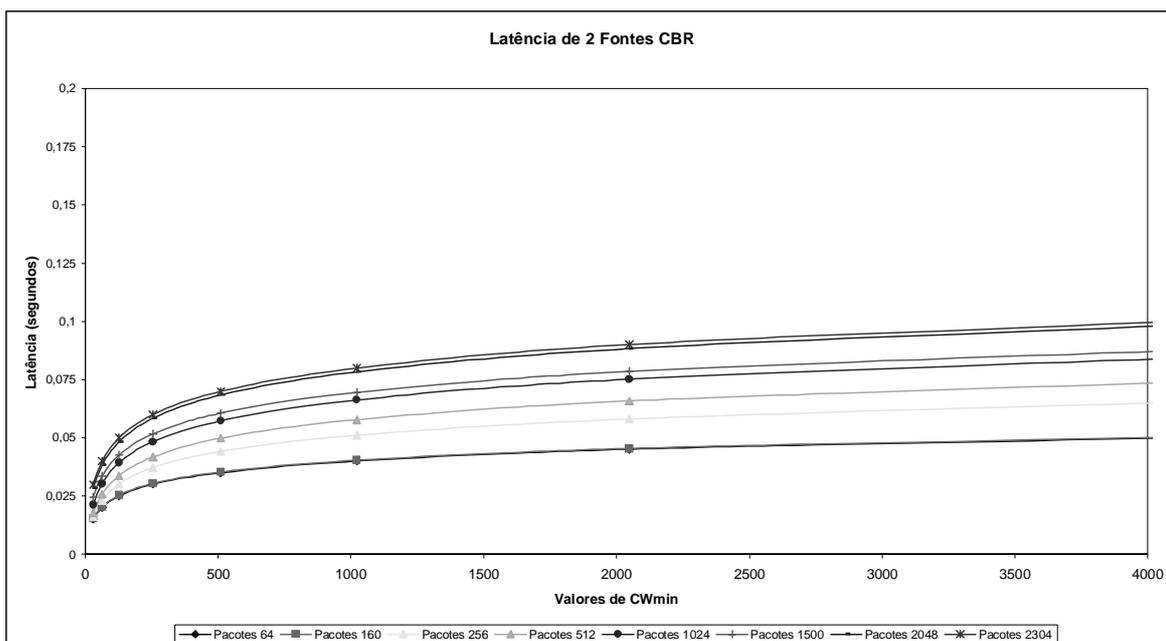


Gráfico 27 – Latência de 2 Fontes CBR em Função do CWmin

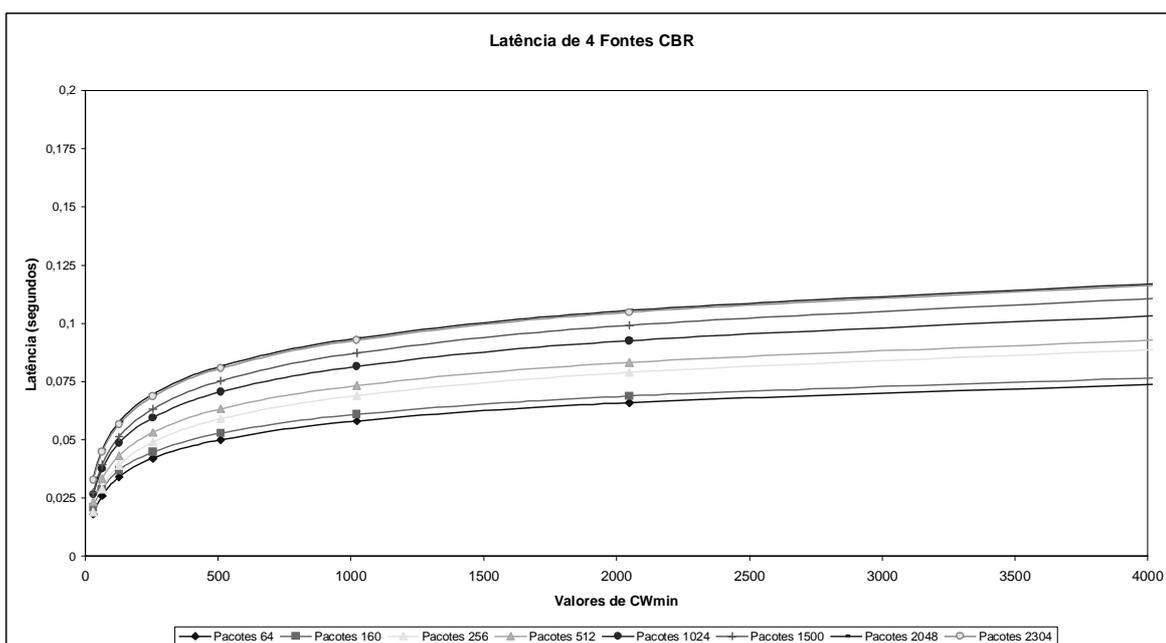


Gráfico 28 – Latência de 4 Fontes CBR em Função do CWmin

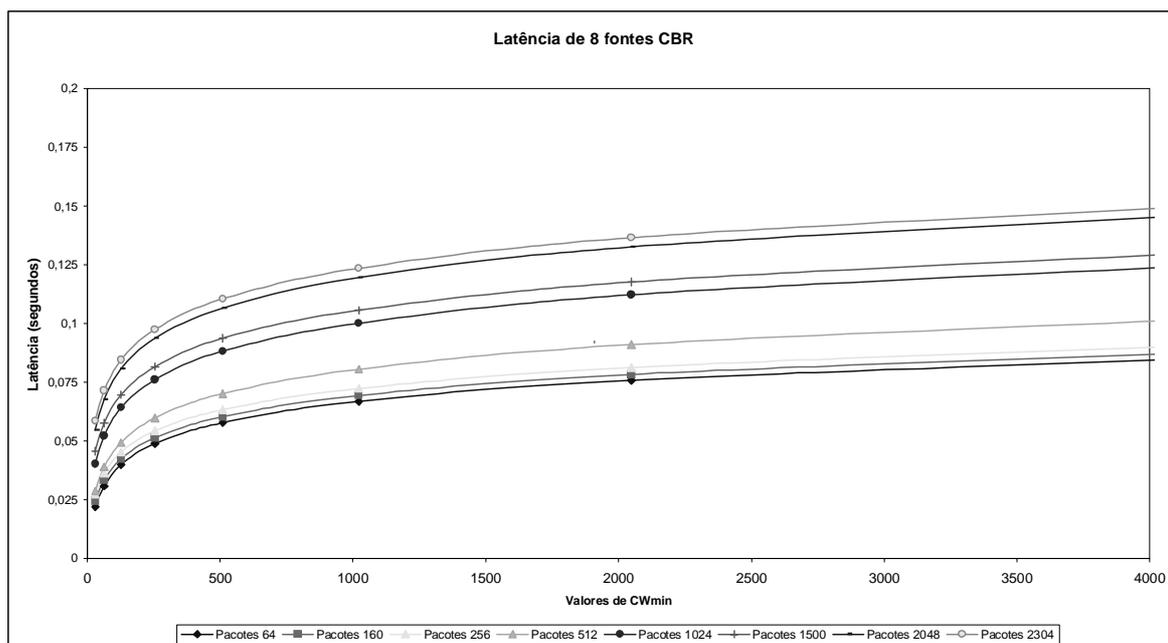


Gráfico 29 – Latência de 8 Fontes CBR em Função do CWmin

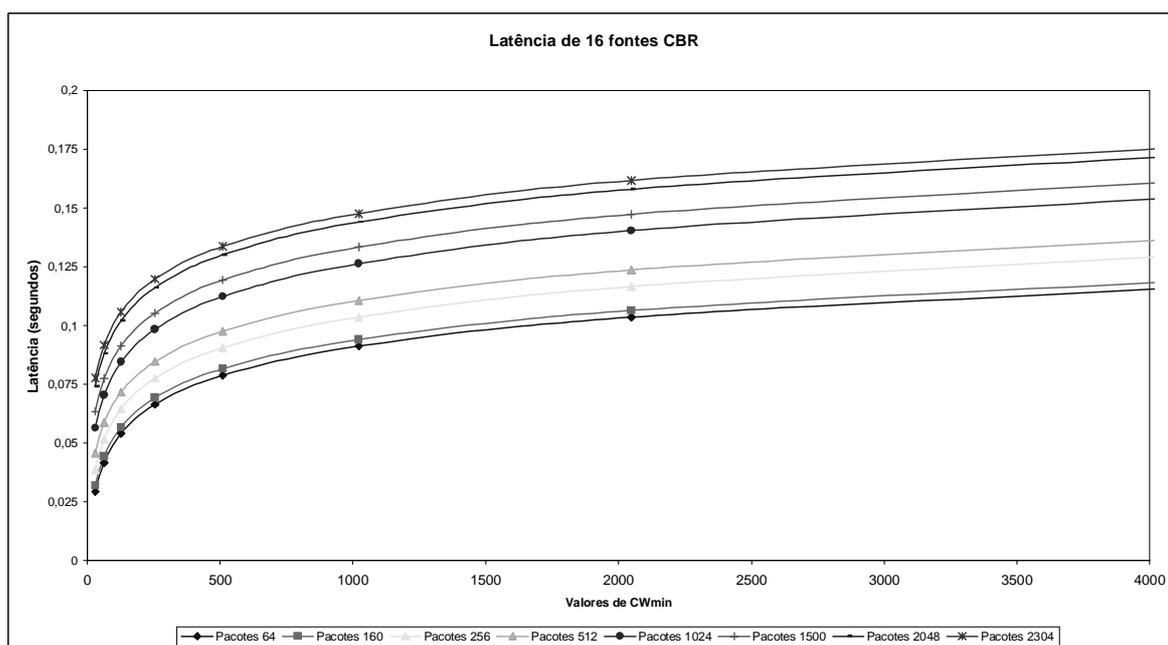


Gráfico 30 – Latência de 16 Fontes CBR em Função do CWmin

À medida que cresce o número de estações transmitindo simultaneamente, cresce a probabilidade de uma estação encontrar o meio ocupado, acarretando um aumento do tamanho da janela de contenção das estações e de $t_{backoff}$ e conseqüentemente contribuindo para o acréscimo dos tempos computados para a

latência. Através dos gráficos (31, 32, 33, 34 35) é possível analisar que quando o número de estações é acrescido de 1 para 2, 4, 8 e 16, maiores acabam sendo os atrasos. Estes mesmos gráficos demonstram que o tamanho do valor de CWmin e do pacote, possuem influência direta sobre a latência.

5.7.3.3 Jitter

Os gráficos (31, 32, 33, 34, 35) apresentam a média do *jitter* obtido em função da variação dos valores de CWmin e do tamanho dos quadros de dados quando o número de fontes é respectivamente igual a 1, 2, 4, 8 e 16 por cada estação ao longo do tempo da simulação.

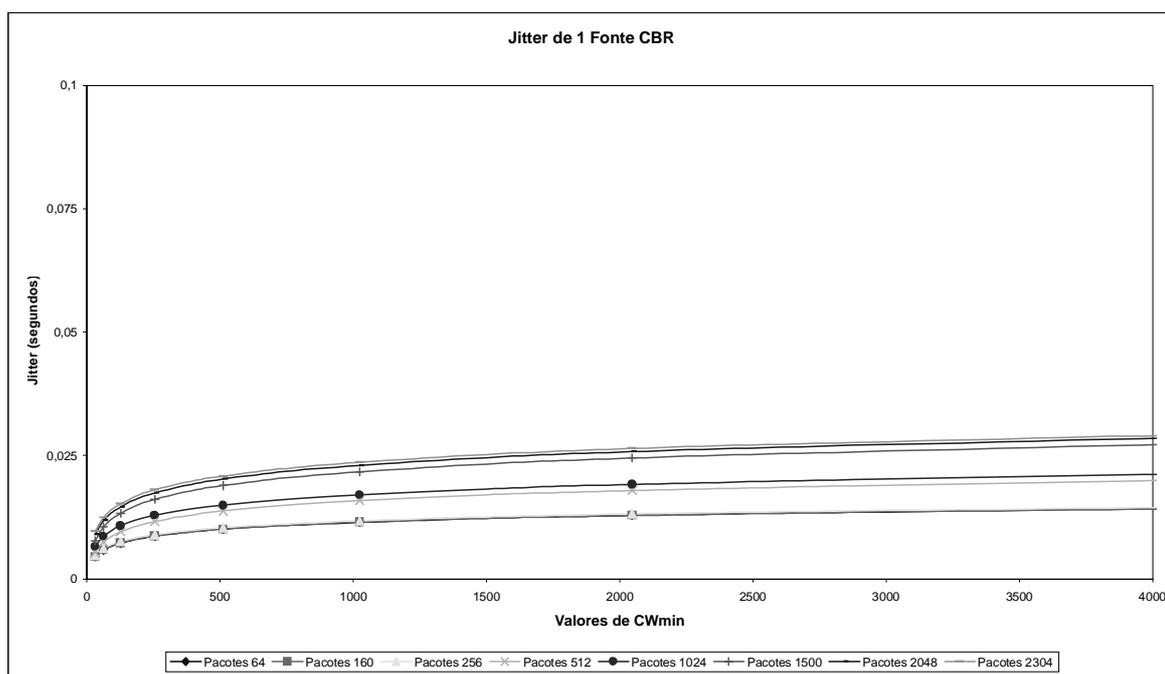


Gráfico 31 – Jitter de 1 Fonte CBR em Função do CWmin

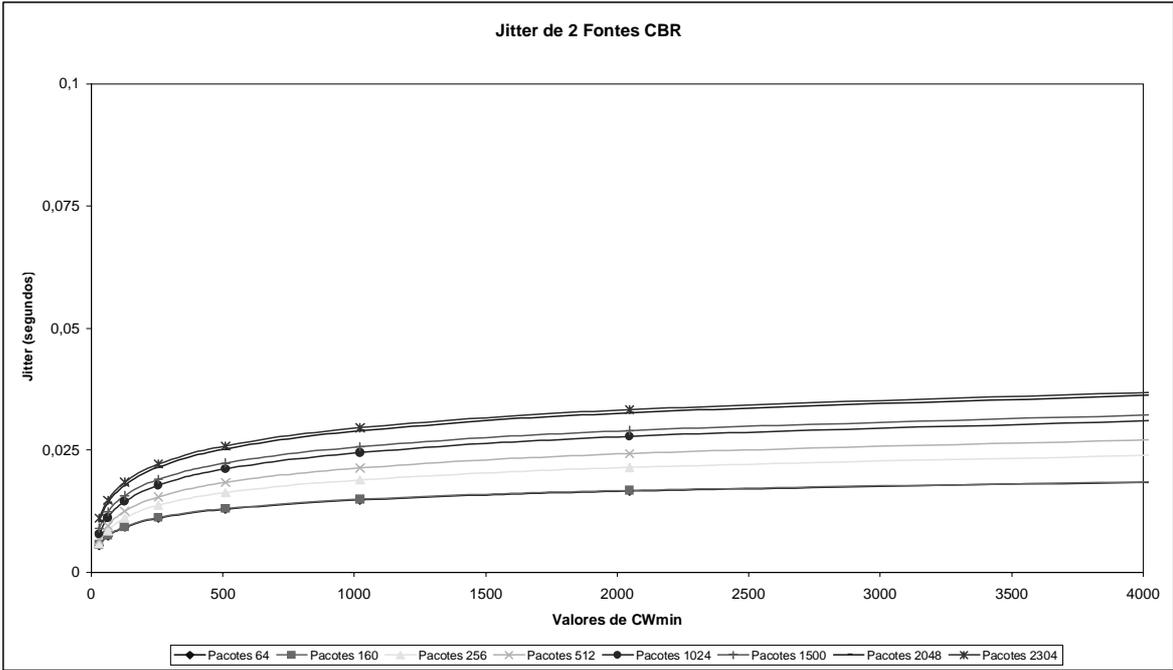


Gráfico 32 – Jitter de 2 Fontes CBR em Função do CWmin

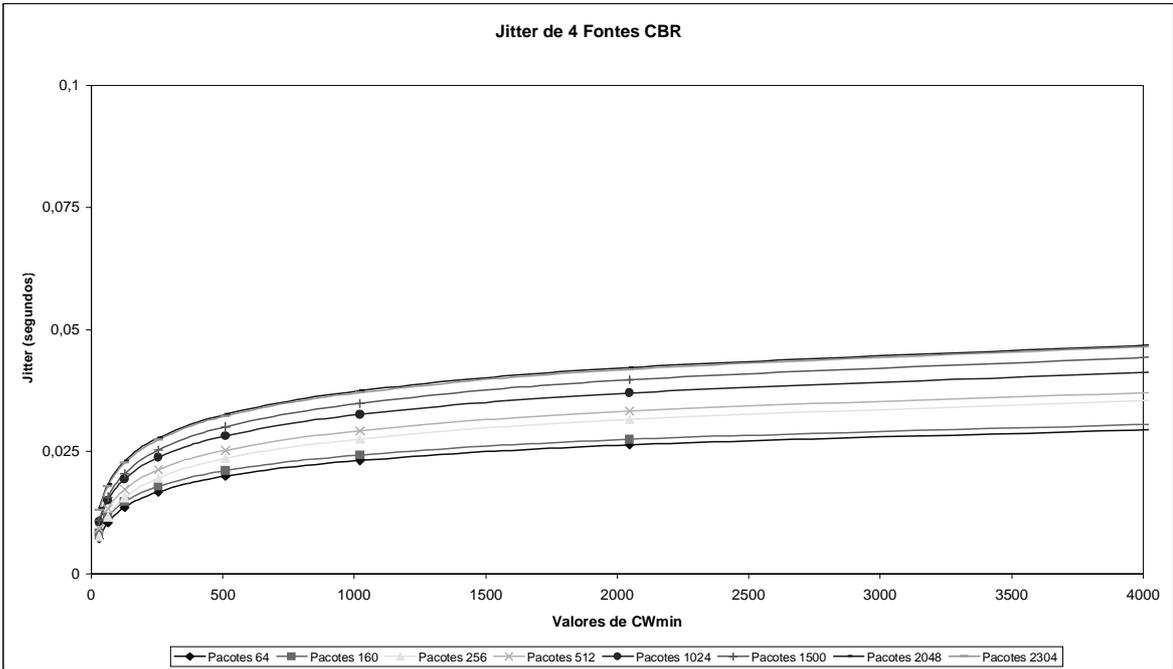


Gráfico 33- Jitter de 4 Fontes CBR em Função do CWmin

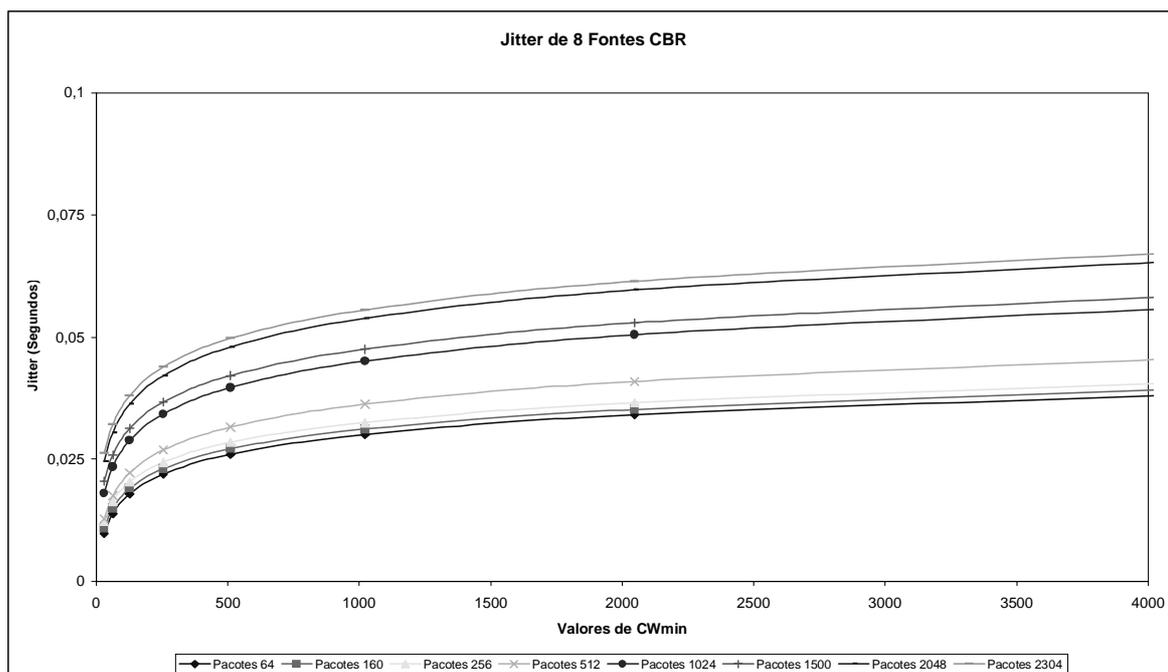


Gráfico 34 – Jitter de 8 Fontes CBR em Função do CWmin

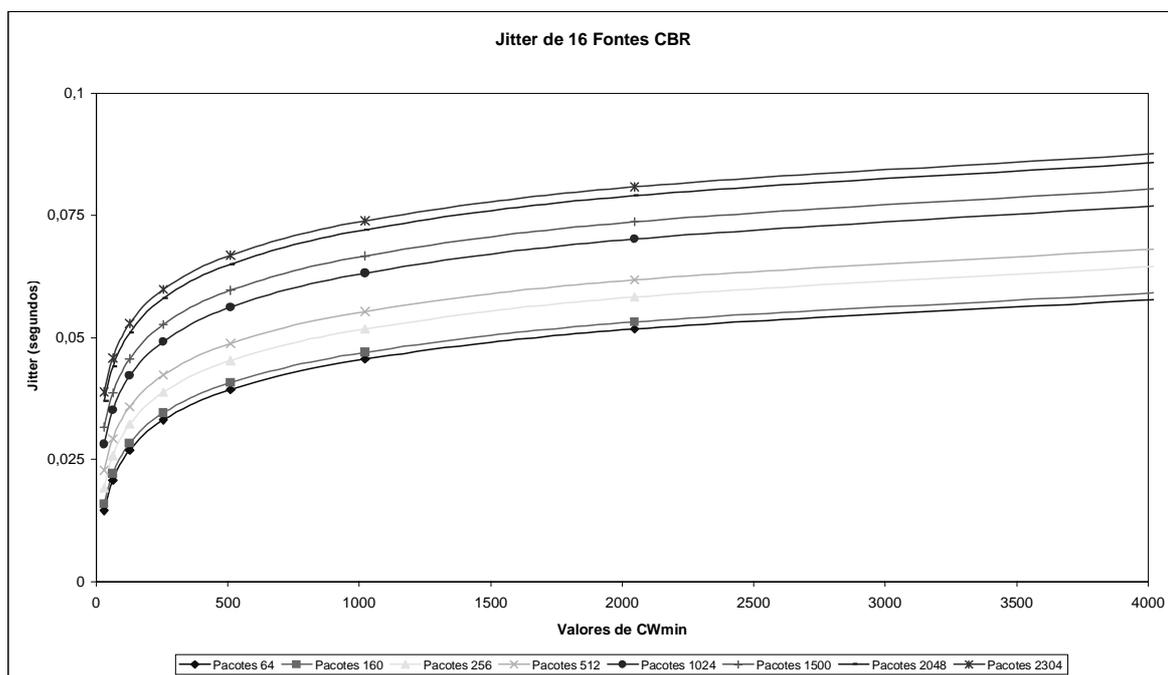


Gráfico 35 – Jitter de 16 Fontes CBR em Função do CWmin

Através da análise dos gráficos (31, 32, 33, 34, 35) percebe-se que assim como o atraso, a variação do atraso também é dependente do número de instâncias do MAC que

competem pelo meio compartilhado; do tamanho do quadro e do valor de CWmin. Ou seja, quanto maior for: - o tamanho do quadro de dados; - o valor de CWmin; - o número de estações competindo pelo meio *wireless*; maiores serão os atrasos e conseqüentemente a variação do atraso.

5.7.3.4 Descarte de Pacotes

Conforme observado nos experimento anteriores, neste estudo chegou-se a conclusão de que o descarte se sucedia em função do congestionamento, do tamanho dos pacotes, da capacidade da fila e devido à mobilidade das STAs. Os gráficos dispostos a seguir apresentam a taxa média de descarte de pacotes para 1, 2, 4, 8 e 16 fontes CBR, respectivamente.

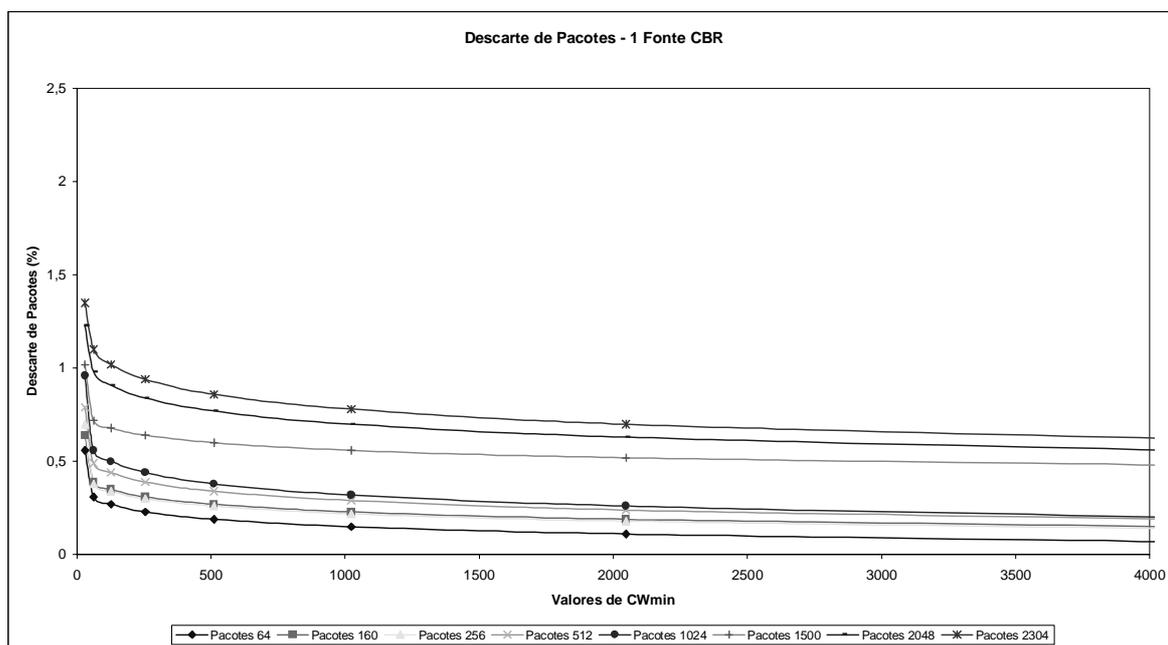


Gráfico 36 – Taxa de Descarte de Pacotes de 1 Fonte CBR em Função CWmin

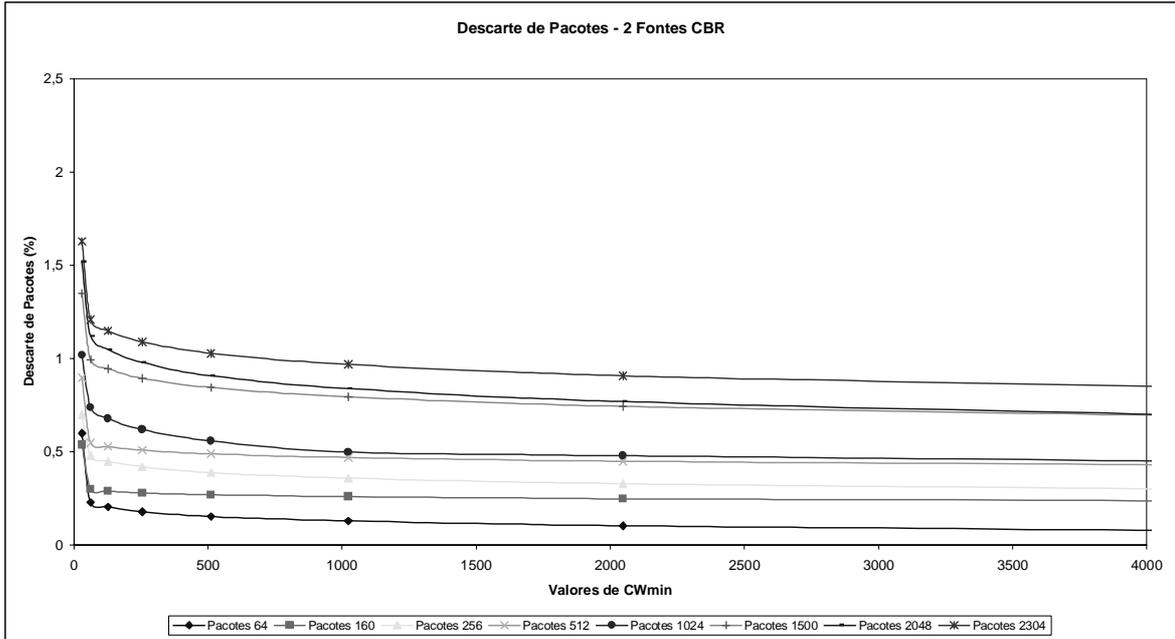


Gráfico 37 – Taxa de Descarte de Pacotes de 2 Fontes CBR em Função de CWmin

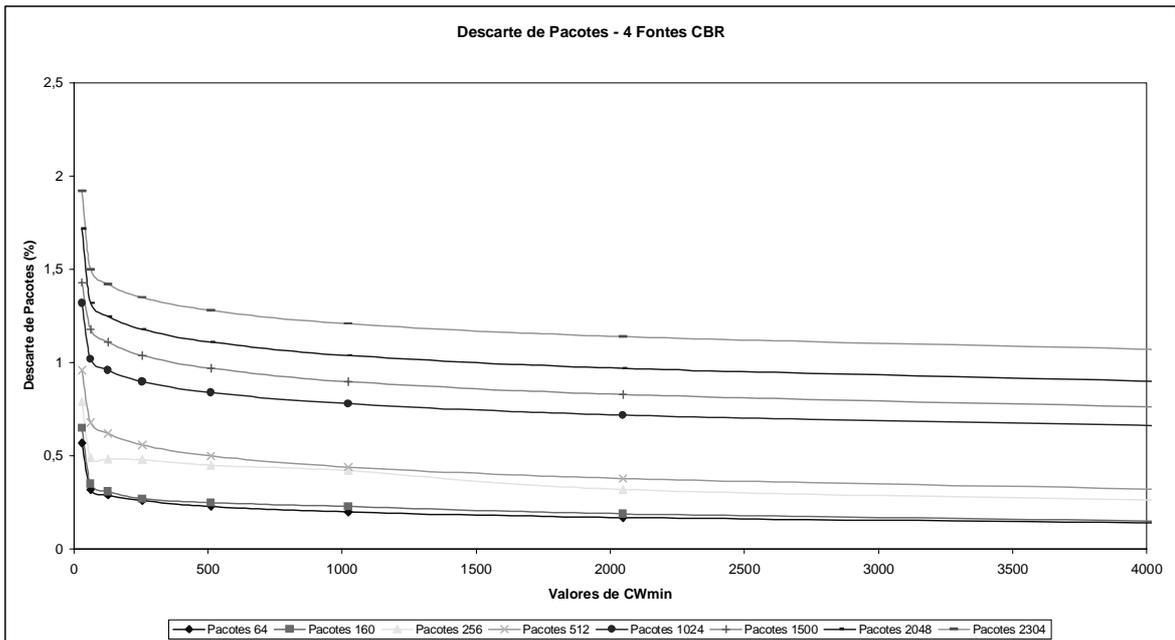


Gráfico 38 – Taxa de Descarte de Pacotes de 4 Fontes CBR em Função de CWmin

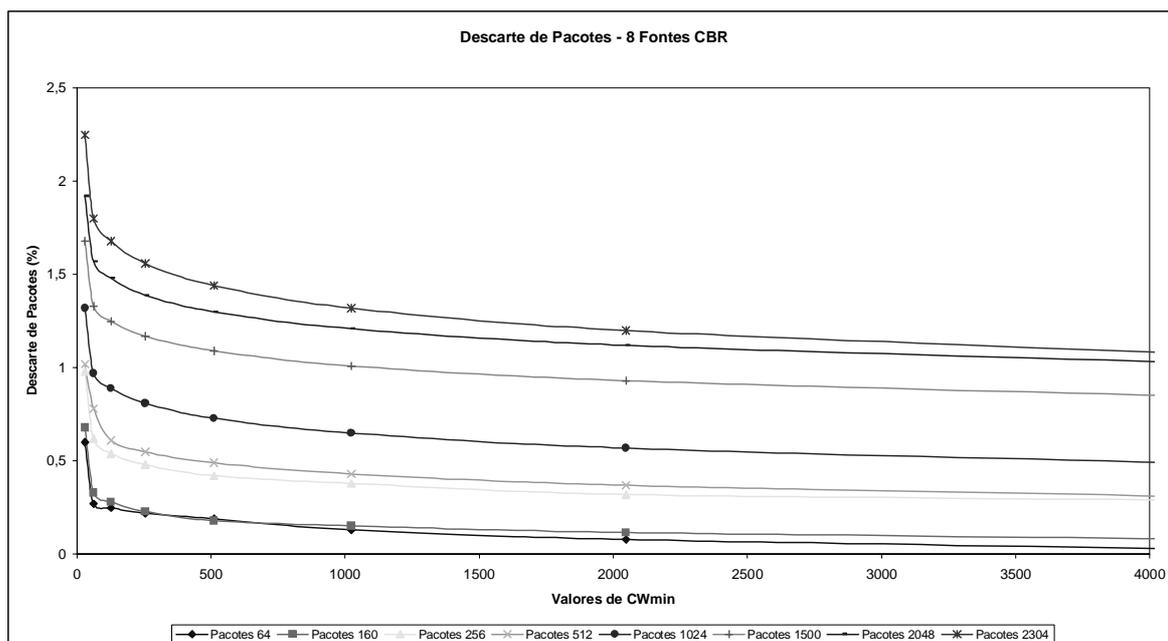


Gráfico 39 – Taxa de Descarte de Pacotes de 8 Fontes CBR em Função do CWmin

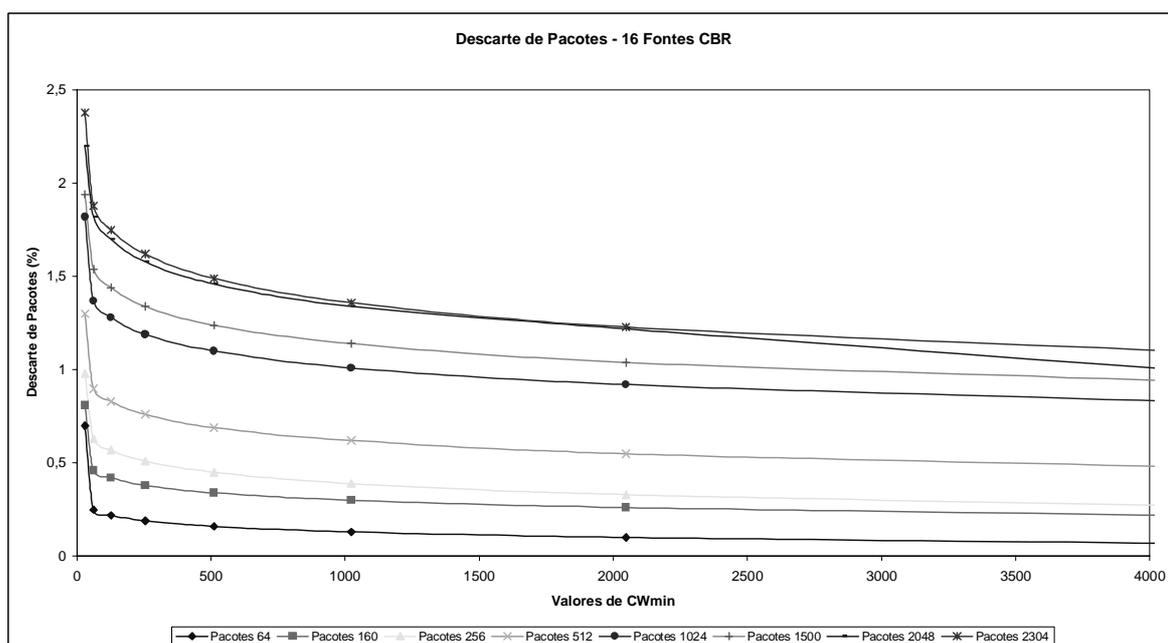


Gráfico 40 – Taxa de Descarte de Pacotes de 16 Fontes CBR em Função de CWmin

Através dos gráficos (36, 37, 38, 39, 40) percebe-se que a taxa de descarte é proporcional ao tamanho dos pacotes. Ou seja, quanto maior o valor do pacote, maior torna-se a taxa de descarte.

Quando o valor de CWmin é alterado, as taxas de descarte de pacotes não são tão previsíveis como ocorre na variação do AIFS. Porém observa-se que à medida que os valores de CWmin são acrescidos, existe uma redução quase que linear na taxa de descarte de pacotes.

5.8.SIMULAÇÕES EM FUNÇÃO DO AIFS, BACKOFF EXPONENCIAL BINÁRIO E TAMANHO DO QUADRO DE DADOS

Os experimentos realizados anteriormente foram necessários para evidenciar que o tamanho do quadro de dados e o tempo de espera antes de uma estação iniciar a transmissão, possuem influência direta sobre as métricas: vazão, latência, *jitter* e descarte de pacotes. Baseado nesta análise, outras simulações serão realizadas, com o objetivo de estabelecer prioridades para as estações de acordo com a categoria de tráfego, bem como analisar o desempenho das redes no instante em que as estações devem prover não apenas fluxo de dados, mas também áudio e vídeo.

5.8.1. CENÁRIO DAS SIMULAÇÕES E CONFIGURAÇÕES DO AMBIENTE

A topologia apresentada na Figura 23 simula algumas redes *Ad Hoc* formadas por m estações 802.11e. O número de Qstas foi incrementado durante o período das simulações (130 segundos). Inicialmente a iBSS foi configurada para iniciar com duas estações, sendo que a cada 15 segundos o número de Qstas foi multiplicado por dois, resultando em 16 Qstas. A Qsta i envia dados para a Qsta $i+1$, a Qsta m envia dados para a Qsta 1.

Todas as Qstas estão localizadas numa área de abrangência - 100m x 100m e pertencem a uma mesma iBSS. O enlace sem fio tem largura de banda de 11 Mbps. A taxa de dados utilizada é de 11 Mbps e a taxa básica é de 1 Mbps. As estações movem-se numa região de acordo com modelo de mobilidade *Way Point*.

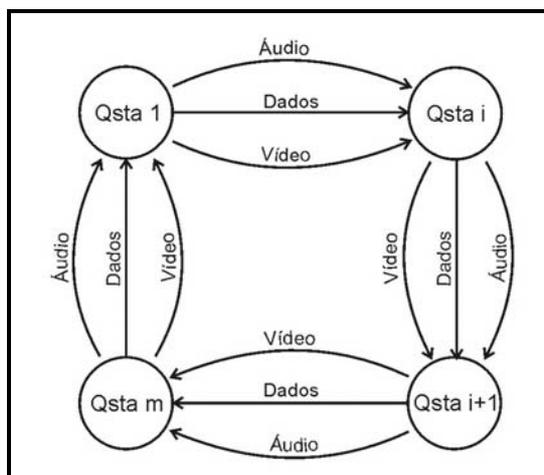


Figura 23 - Modelo Simulado: Áudio, Vídeo e Dados

As estações da rede *Ad Hoc* executam três tipos aplicações: áudio, vídeo e dados, sendo que cada aplicação possui uma prioridade distinta para acessar o meio. Ou seja, as aplicações de áudio, vídeo e dados possuem respectivamente as seguintes prioridades: maior prioridade, prioridade intermediária, baixa prioridade.

Os mesmos parâmetros descritos na seção 5.4, foram adotados para a topologia da Figura 23, exceto os que estão discriminados no Quadro III.

Parâmetros	Alta Prioridade	Média Prioridade	Baixa Prioridade
AIFS	50	70	90
CWmin	7	15	31
PF	2	3	4
Tamanho Pacote (bytes)	160	1500	256
Intervalo Pacotes (ms)	16	10	8
Taxa Geração Tráfego (Kbit/s)	80	1200	256

Quadro III– Parâmetros das Qstas em função da Prioridade

Em cada Qsta são empregadas três filas com diferentes prioridades. A fonte de áudio pertencente à fila de maior prioridade gera pacotes de 160 bytes, com intervalos de 16ms, a uma taxa de 80 Kbps. Com essa configuração, o tráfego gerado pelas fontes de voz equivale ao tráfego gerado por um codificador G.711 PCM (*Pulse Code Modulation*) sem supressão de silêncio. A fonte de vídeo que está associada com a fila

de prioridade intermediária gera pacotes de 1500 bytes a cada 10ms, com taxa de 1200 Kbps. A fonte de dados que está relacionada com a fila de menor prioridade gera pacotes de 256 bytes a cada 8ms, com taxa de transmissão de 256 Kbps.

As três classes do serviço implementadas possuem prioridades distintas para acessar o meio. Uma classe de prioridade elevada (áudio), uma classe de prioridade intermediária (vídeo) e uma classe de baixa prioridade (dados). Quando os pacotes chegam no sub nível MAC os mesmos precisam ser encaminhados para as suas respectivas filas, ou seja, cada fluxo (áudio, vídeo, dados) deve ser posicionado na fila de acordo com a classe de serviço/nível de prioridade. Desta forma uma marcação de pacotes e um mapeamento entre as classes dos níveis de rede e de enlace devem ser efetuados.

Para realizar a marcação dos pacotes no simulador pode-se utilizar campos do cabeçalho IP com uma informação de prioridade ou classe de serviço (CoS); assim, quando esses pacotes chegarem no LLC ou no próprio MAC, eles podem ser encaminhados para a fila correta. Nestes experimentos a marcação dos pacotes foi realizada no campo ToS do Ipv4.

Quando a camada de rede passar o pacote para a camada de enlace para ser transmitido, ela passará também o nível de prioridade, ou classe de serviço. A sub camada LLC realiza então a marcação do quadro no cabeçalho de nível 2 (o 802.11e define 3 bits no cabeçalho de nível 2 para esta marcação), definindo os diferentes níveis de prioridade de cada quadro. O classificador da sub camada MAC recebe os quadros da sub camada LLC e posiciona-os nas suas respectivas filas, de acordo com a prioridade de cada quadro.

Nestes experimentos utilizou-se o comando “set class” no script Otcl para criar as diferentes fontes (áudio, vídeo e dados) e a maço “map_plevel()” para realizar o mapeamento das classes de serviço da camada de rede (IP) para os mecanismos da camada de enlace. Para isso criou-se três classes onde foi variado o valor do AIFS e do CWmin de acordo com a prioridade das aplicações.

As simulações são realizadas sem o uso de RTS/CTS, ou seja, utilizando o esquema de acesso básico do 802.11. O acesso com RTS/CTS não foi utilizado uma vez que o benefício decorrente do uso desse esquema não é suficiente para compensar o custo de transmissão dos quadros RTS e CTS [9].

Para a obtenção de resultados confiáveis, cada execução da simulação foi replicada 10 vezes. Ou seja, foram realizadas 10 replicações da simulação, com a duração de 130 segundos.

5.8.2. MODELO DE TRÁFEGO

As fontes pertencem a diferentes categorias de acesso, sendo que cada fonte gera dados a uma taxa de bits constante com valores de 80, 1200 e 256 Kbps para as classes de áudio, vídeo e dados.

No mesmo experimento são utilizados três tamanhos de pacotes. Os pacotes gerados pelas fontes possuem tamanhos diversificados: 160, 256, 1500 bytes, simulando respectivamente tráfego de áudio, dados e vídeo.

Para simular as mídias de áudio, vídeo, dados utilizou-se aplicações CBR. O protocolo de transporte utilizado foi o UDP, com tamanho de pacotes iguais ao utilizado pelas fontes, para evitar fragmentação e remontagem na camada de transporte.

5.8.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta seção demonstra os resultados obtidos pelo emprego das técnicas de diferenciação do AIFS, alterações do CWmin e pelo tamanho dos quadros de dados. De forma a obter uma diferenciação mais elaborada, estas técnicas foram empregadas em conjunto.

As técnicas apresentadas podem ser utilizadas para estabelecer diferenciação tanto para fluxo individual quanto por categoria de tráfego e não apenas por estação. No caso dos cenários simulados (Figura 22) as técnicas de diferenciação estão sendo analisadas por estação e por fluxo individual, tendo em vista que a modelagem daquele sistema é constituída por apenas um tipo de tráfego: dados. Contudo neste momento ocorreu uma extensão nos experimentos para realizar simulações por categoria de tráfego, com aplicações de dados, áudio e vídeo (Figura 23).

A seguir serão apresentados os resultados em função da alteração *do AIFS*; do *CWmin* e do tamanho dos pacotes sobre a vazão, latência, *jitter* e descarte de pacotes. Os gráficos 41, 42, 43 e 44 ilustram a média dos valores obtidos para as métricas de QoS por um conjunto de 2, 4, 6, 8, 12, 14 e 16 fontes, que utilizam pacotes de tamanhos variados.

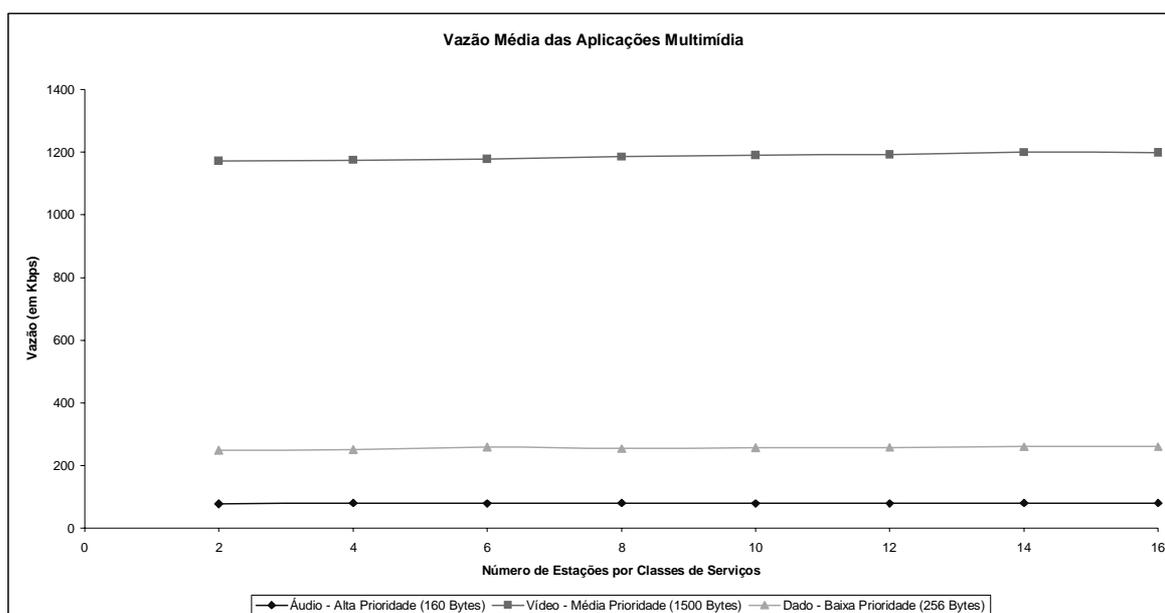


Gráfico 41 – Média da Vazão em Função da Variação do AIFS, CWmin, Pacote

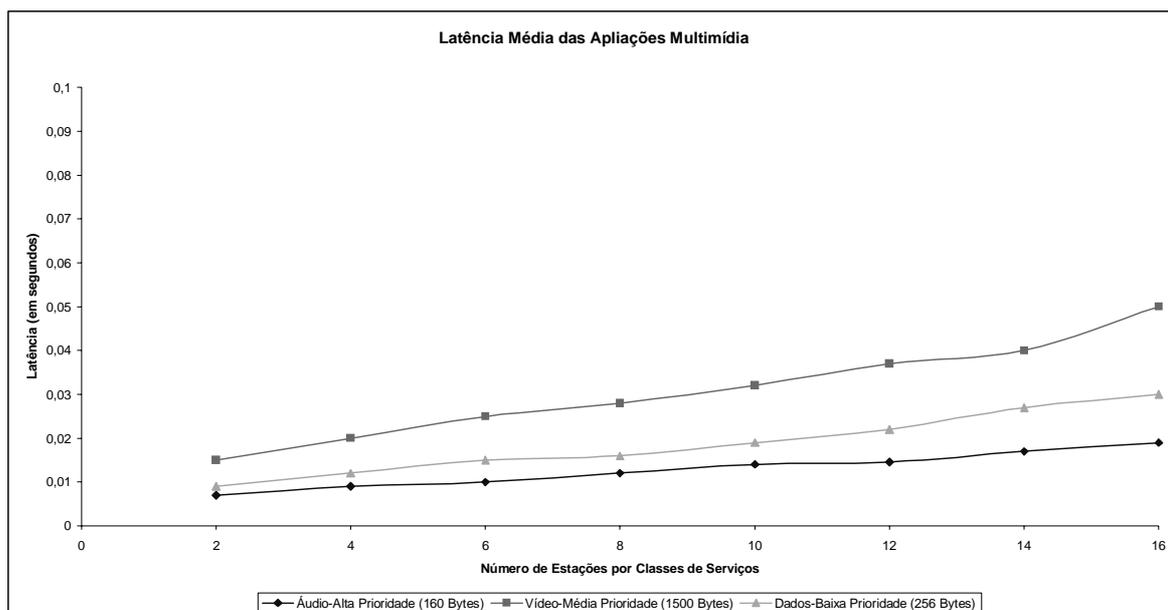


Gráfico 42 - Média da Latência em Função da Variação do AIFS, CWmin, Pacote

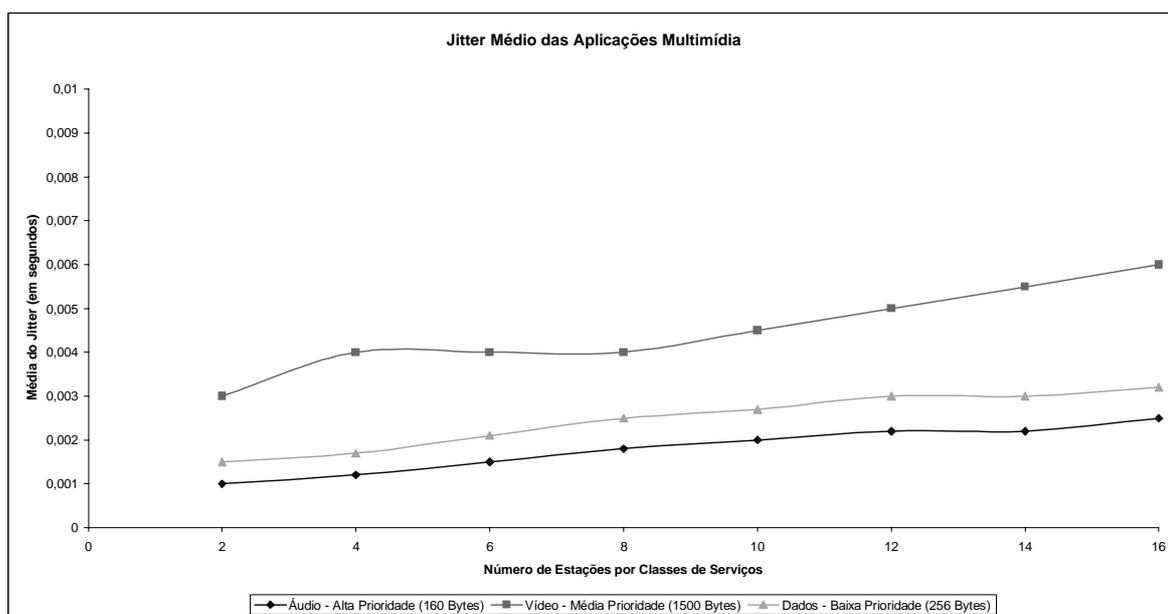


Gráfico 43 - Média do Jitter em Função da Variação do AIFS, CWmin, Pacote

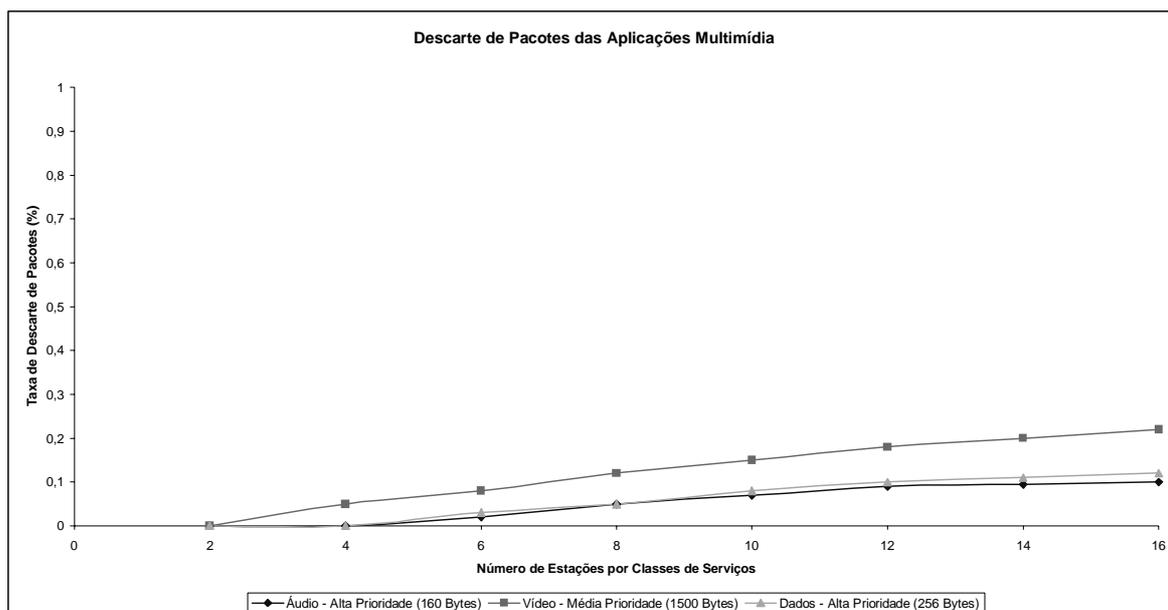


Gráfico 44 – Taxa de Descarte em Função da Variação do AIFS, CWmin, Pacote

Através dos gráficos 41, 42, 43 e 44 percebe-se que é possível diferenciar as fontes conforme o tipo de mídia existente em cada estação. Quando os valores de AIFS, CWmin são empregados de forma coerente, consegue-se diferenciar os fluxos de dados de acordo com a categoria de tráfego e com isto obter ganhos como por exemplo, aumentar a vazão de uma determinada classe, diminuir o atraso e a variação de atraso, bem como reduzir de maneira significativa a taxa de descarte dos pacotes.

Uma análise de estatística foi realizada (Anexo I), nos quarenta primeiros gráficos, para verificar a influência dos fatores: tamanho dos quadros de dados, valor de AIFS, CWmin e número de fontes sobre as métricas de QoS: vazão, latência, *jitter* e descarte de pacotes. Através da análise de estatística percebe-se que um cuidado especial deve ser tomado na atribuição dos valores para os fatores (quadro, AIFS, CWmin). Pois estes possuem influência no desempenho das métricas de QoS.

Com base nos resultados obtidos, percebe-se que a utilização das técnicas da variação do tamanho do AIFS, CWmin e do tamanho dos quadros de dados podem ser utilizadas para priorizar as aplicações multimídia por categoria de tráfego (dados, áudio, vídeo), de acordo com os requisitos de qualidade de serviço de cada aplicação. Nestas circunstâncias, estações de baixa prioridade, podem utilizar um tamanho de AIFS maior,

diminuindo a probabilidade de encontrar o meio livre em uma disputa com outra, de alta prioridade, que esteja usando AIFS menor. Para tráfego de baixa prioridade, um fator importante que deve ser evitado é o de atribuir valores excessivamente altos para N , isto pode fazer com que esse tráfego nunca transmita na presença de outro de alta prioridade.

6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

As redes de comunicação sem fio, a exemplo da própria Internet, são *best-effort*. Todos os usuários e/ou aplicações possuem o mesmo tratamento, ou seja, não existem garantias quanto aos parâmetros de QoS. Para prover suporte a Qualidade de Serviço para as aplicações multimídia e de tempo real, o IEEE está desenvolvendo o IEEE 802.11e.

A extensão 802.11e cria uma nova funcionalidade de QoS, mas o gerenciamento da qualidade de serviços está fora do escopo da especificação. Neste sentido, evidencia-se que um dos desafios das redes *wireless* consiste em dotar a camada MAC, de forma que a mesma propicie alguma diferenciação de acesso ao meio para privilegiar algum grupo de estações.

A função principal da camada MAC num protocolo de múltiplo acesso é coordenar o acesso ao meio entre as diversas estações que desejam utilizá-lo. A idéia de diferenciar na camada MAC consiste em utilizar esta coordenação de forma a privilegiar algum grupo de estações, e o tipo de diferenciação que pode ser feito está extremamente relacionado ao protocolo de múltiplo acesso utilizado nas redes *wireless*.

Os protocolos de acesso aleatório, como CSMA, são baseados em contenção pelo meio, ou seja, em geral a forma de diferenciá-lo consiste na atribuição de vantagens na contenção pelo meio a estações que possuem tráfego de maior prioridade, o que implica na possibilidade de favorecer classes de tráfego, e não estações fixas.

A especificação do IEEE 802.11e inclui novos mecanismos para suporte de QoS, nomeadamente *Enhanced Distributed Coordination Function* (EDCF) e *Hybrid Coordination Function* (HCF).

Este trabalho abordou três técnicas de diferenciação no EDCF para que as aplicações obtenham alguma prioridade no acesso ao meio. As técnicas empregadas compreendem: variação do tamanho dos quadros de dados; variação do tamanho do AIFS e alteração no procedimento de *backoff* exponencial binário. Estas técnicas podem

ser utilizadas para estabelecer diferenciação tanto por fluxo individual quanto por categoria de tráfego e não apenas por estação.

A metodologia utilizada para desenvolver a pesquisa foi à simulação. Foram realizadas simulações na função EDCF variando alguns parâmetros para privilegiar o acesso ao meio entre as aplicações multimídia. Foram simuladas redes *Ad Hoc* com algumas estações, sendo que cada estação possui diferentes tipos de aplicação. Foram implementadas três classes de serviços. Cada classe de serviço combinou essencialmente dois parâmetros para fornecer diferenciação: o valor mínimo da janela de contenção (CW_{min}) e o AIFS. Como a disputa pelo acesso ao meio é realizada quadro a quadro, logo a variação do tamanho dos quadros de dados também possibilita diferenciação. Desta forma utilizou-se diferentes tamanhos de quadros.

Uma análise de desempenho foi realizada para verificar a influência dos fatores: tamanho de quadros, valor de AIFS, CW_{min} e número de fontes sobre as métricas de QoS: vazão, latência, *jitter* e descarte de pacotes. Através da análise de desempenho percebe-se que um cuidado especial deve ser tomado na atribuição dos valores para os fatores (quadro, AIFS, CW_{min}). Pois estes possuem influência no desempenho das métricas de QoS.

Por intermédio dos resultados obtidos com o emprego das técnicas de diferenciação, ilustrados nos gráficos, apresentados no quinto capítulo, verifica-se que a prioridade no acesso ao meio pode ser realizada diferentemente, atribuindo menores valores para o quadro, AIFS e CW_{min} para as aplicações que possuem maior prioridade e, valores maiores para as aplicações de menor prioridade.

Os gráficos demonstram que à medida que os valores de AIFS, CW_{min} e o tamanho dos quadros são aumentados, a rede apresenta desempenho pouco desejável. O que implica dizer que para priorizar o acesso ao meio e manter um desempenho desejável, valores menores devem ser atribuídos para as categorias de tráfego.

Para avaliar as interações entre os fatores fez-se necessário descrever um projeto fatorial completo. Foram empregadas todas as combinações possíveis entre os fatores e seus diferentes níveis. Estas combinações foram realizadas através das simulações e os

resultados obtidos foram sumarizados e transportados para um *software* de análise estatística.

A análise descritiva contém os valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão das métricas de qualidade de serviço. Desta análise podem ser extraídos limites de qualidade mínima tolerada e qualidade desejada. Estas informações podem ser utilizadas para compor acordos de níveis de serviços.

A análise de variância foi necessária para verificar a influência das variáveis independentes (AIFS, CWmin, tamanho do quadro, número de fonte) sobre as variáveis dependentes (vazão, latência, *jitter* e descarte de pacotes). Em função da verificação dos valores contidos nas tabelas, conclui-se que existe diferença significativa entre os tratamentos, o que significa dizer que os fatores possuem influência direta sobre as variáveis de resposta. E que as mesmas considerações realizadas na análise de desempenho (ilustradas por intermédio dos gráficos) são válidas para a análise estatística (Anexo I). Ou seja, para que as estações possam obter um melhor desempenho das redes *wireless*, valores menores devem ser atribuídos para o AIFS, CWmin e tamanho dos quadros.

As especificações 802.11e são recentes e muitas pesquisas para prover o gerenciamento de QoS devem ser realizadas. A pesquisa realizada nesta dissertação pode ser complementada com a utilização de diferentes fontes, protocolos de roteamento e esquemas de filas, ao invés de utilizar apenas CBR, DSR *DropTail*, pois estes fatores também possuem influência nas métricas de QoS em estudo.

A inclusão de múltiplas filas numa mesma estação introduz o conceito de colisão virtual. A colisão virtual, interna a uma estação, ocorre sempre que duas categorias de uma mesma estação têm seus temporizadores expirados simultaneamente. Neste contexto mecanismos devem ser implementados para solucionar o problema de colisões virtuais.

Um consideração de implementações futura de extrema importância na análise dos dados, consiste na criação de modelos de regressão múltipla, criando expressões matemáticas para estimar valores para as métricas de QoS. Uma vez que estas

expressões sejam elaboradas, nenhum experimento com os parâmetros, fatores e níveis descritos nas configurações dos modelos simulados, precisarão ser realizados novamente.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical (PHY) Specifications. IEEE Standard 802.11, 1999.
- [2] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical (PHY) Specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 Ghz Band. IEEE Standard 802.11b, 1999.
- [3] LEITE, Danilo, R. Isso Redes Locais sem fio que atendem ao Padrão IEEE 802.11. Página da World Wide Web. url: <http://sites.uol.com.br/helyr/drangel1.html>. Acesso em: 24 de Março de 2003.
- [4] TELETIME. Wi Fi por um Fio. Página da World Wide Web. url: <http://www.atriumtelecom.com.br/clipping/teletime-010802.htm>. Acesso em: 01 de Agosto de 2002.
- [5] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality Service (QoS). IEEE Draft for Standard 802.11e/D3.2, March, 2002.
- [6] WEINMILLER, J.; SCHLAGER, M.; FESTAG, A. and WOLISZ, A. Performance Study of Access Control in Wireless LANs IEEE 802.11 DFWMAC and ETSI RES 10 HIPERLAN, Mobile Networks and Applications, vol. 2, pp. 55-67, 1997.
- [7] CHHAYA, H. S. and GUPTA, S. Performance Modeling of Asynchronous Data Transfer Methods of IEEE 802.11 MAC Protocol, Wireless Networks, vol. 3, pp. 217-234, 1997.
- [8] TAY, Y. C. and CHUA, K. C. A Capacity Analysis for the IEEE 802.11 MAC Protocol, Wireless Networks, 7, 2001, pp. 159-171.

- [9] MELO FILHO, J. C. Mecanismo de Controle de Qualidade de Serviço em Redes IEEE 802.11. Dissertação de Mestrado. UFRJ. Janeiro, 2003.
- [10] LAMIA, R.; QIANG, N.; THIERRY, T. Enhanced Service Differentiation for IEEE 802.11 Wireless Ad-Hoc Networks. Wireless Communications and Network Conference (WCNC2003). New Orleans, USA, March, 2003.
- [11] HO, B T. S.; and CHEN, K. C. Performance Evaluation and Enhancement of the CSMA/CA MAC Protocol for 802.11 Wireless LAN's, Proceedings of IEEE PIMRC, Taipei, Taiwan, Oct. 1996, pp.392-396.
- [12] CALI, F.; CONTI, M.; GREGORI, E. IEEE 802.11 Wireless Lan: Capacity, Analysis and Protocol Enhancement. IEEE Joint Conference of Computer and Communications Societies (INFOCOM'1998) (San Francisco, USA, March , 1998).
- [13] BIANCHI, G.; FRATTA, L. and OLIVERI, M. Performance Analysis of IEEE 802.11 CSMA/CA Medium Access Control Protocol, Proceedings of IEEE PIMRC, Taipei, Taiwan, Oct. 1996, pp. 407-411.
- [14] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks. Página da World Wide Web. url: <http://www.ieee802.org/11/>. Acesso em: Dezembro de 2002.
- [15] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical (PHY) Specifications: Higher-Speed Physical Layer in the 5 Ghz Band. IEEE Standard 802.11a, 1999.
- [16] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks. Página da World Wide Web. url: <http://www.ieee802.org/15/>. Acesso em: Dezembro de 2002.

- [17] THE OFFICIAL BLUETOOTH WEBSITE. Bluetooth Special Interest Group. Página da World Wide Web. url: <http://www.bluetooth.com>. Acesso em: Março de 2003.
- [18] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards. Página da World Wide Web. url: <http://www.ieee802.org/16/>. Acesso em: Dezembro de 2002.
- [19] TELECOM STANDARDS. European Telecommunications Standard Institute. Página da World Wide Web. url: <http://www.etsi.org/>. Acesso em: Janeiro de 2003.
- [20] ATM TECHNOLOGY. The ATM Forum. Página da World Wide Web. url: <http://www.atmforum.org/>. Acesso em: Janeiro de 2003.
- [21] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. Itu-t Special Study Group Imt-2000 and Beyond. Página da World Wide Web. url: <http://itu.int/ITU-T/studygroups/ssg/index.asp>. Acesso em: Janeiro de 2003.
- [22] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE. Universal Mobile Communications System (UMTS); General UMTS Architecture. ETSI Technical Specification 123.101 v.4.0.0 release 4, April, 2001.
- [23] BETTISTETTER, C.; VOGEL, H. and EBERSPACHER, J. GSM Phase 2+ General Packet Radio Service GPRS: Architecture, Protocols and Air Interface. IEEE Communications Surveys 2,3 (1999), 2-14.
- [24] SCHRAMM, P.; JAVERBRING, S.; EDVARDSSON, N.; HOOCK, M.; EDHOLM, C.; ANDREASSON, H., MULLER, F. and SKOLD, J. Radio Interference Performance of EDGE, a Proposal for Enhanced Data Rates in Existing Digital Cellular Systems. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC' 1998). Ottawa, Canada, May, 1998.

- [25] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Página da World Wide Web. url: <http://www.iso.org/>. Acesso em: Janeiro de 2003.
- [26] O'HARA, Bob; PETRICK, Al. 802.11 Handbook – A Designer's Companion. IEEE, 1999.
- [27] BREEZE WIRELESS COMMUNICATIONS LTD. IEEE 802.11 Technical Tutorial. Estados Unidos, 1999.
- [28] SOARES, L. F. G.; LEMOS G.; COLCHER, S. Redes de Computadores – Das LANs, MANs e WANs às Redes ATM. Editora Campus Ltda, Rio de Janeiro, 1997.
- [29] DORNAN, Andy. Wireless Communication. O guia Essencial de Comunicação. Campus, 2001.
- [30] PRANCE, Cristian R; ROCHOL, J. Análise de Desempenho por simulação da Subcamada MAC do padrão IEEE 802.11 para Redes Locais sem fio. Anais do XVII SBRC. Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, Maio, 1998.
- [31] RIBAS, Júlio César da Costa. Perfil de Link Sem Fio em Ambiente Aberto: Avaliação através de Medições. Dissertação de Mestrado. UFSC. Julho, 2002.
- [32] CORSON, S.; MACKER, J. Mobile Ad Hoc Network (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations. IETF RFC 2501, November, 1999.
- [33] HÄNNIKÄINEN, M.; HÄMÄLÄINEN, T. D.; NIEMI, M.; SAARINEN, J. Trends in Personal Wireless Data Communications. Elsevier Computer Communications 25, pp. 84-99, 2002.
- [34] LIMA, A. R.; SALES, A.B.; Transmissão de Dados em Redes de Computadores Sem Fio. Departamento de Informática e Estatística – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.

- [35] PRANCE, Cristian R. Estudo Comparativo de Tecnologias de Redes Locais sem Fio. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Informática, TI No. 579, Dezembro, 1996.
- [36] CROW, B. P.; WIDJAJA, I.; KIM, J. G and SAKAI, P. T. IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks. IEEE Communications Magazine 35,9, pp. 116-126, September, 1997.
- [37] SILVA, Adailton J. S. As Tecnologias de Redes Wireless. RNP News Generation, Vol 2, No. 5, Maio, 1998.
- [38] TANENBAUM, Andrew S. Redes de Computadores. Tradução da 3ª Edição. Editora Campus, 1997.
- [39] CAMARA. D. Um Novo Algoritmo de Roteamento para Redes Móveis Ad Hoc. 2000.
- [40] BUDDRIUS, Duane. BreezeACCESS and BreezeNET: A Robust Wireless Access Solution for Unlicensed Band ISP Services. Breeze Wireless Communications Ltd., November, 2001.
- [41] BIANCHI, G. Performance Analysis of The IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. IEEE Journal on Selected Areas in Communications – Wireless Series 18, 3 (2000).
- [42] COSTA, L.; AMORIM, M.; FDIDA, S. Reduzindo a Frequência de Inundações em Protocolos de Roteamento Ad Hoc Sob Demanda. SBRC 2003.
- [43] SCHILLER, J.; ESLEY, A. Mobile Communications. ISBN 021398362, 1st ed., 2000.
- [44] SOBRINHO, J. L. and KRISHNAKUMAR, A. S. Distributed Multiple Access Procedures to Provide Voice Communications Over IEEE 802.11 Wireless Networks, Proceedings GLOBECOM 1996, pp. 1689-1694.

- [45] DENG, J. and Chang, R.S. A priority scheme for IEEE 802.11 DCF Access Method, IEICE Transactions in Communications, vol. 82-B, no. 1, January 1999, pp. 96-102.
- [46] VERES, A.; Campbell A. T.; BARRY, M. and SUN, L. H. Supporting Service Differentiation in Wireless Packet Networks Using Distributed Control, IEEE Journal on Selected Areas In Communications, vol. 19, no. 10, October 2001, pp. 2081-2093.
- [47] AAD, I.; CASTELLUCCIA, C. Differentiation Mechanisms For IEEE 802.11. IEEE Joint Conference of Computer and Communications Societies (INFO-COM'2001) (anchorage, Alasca, April, 2001).
- [48] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Quality of Service Basic Framework – outline. ISO / IEC JTC1 / SC21 / WG1 N1145, 1994.
- [49] NAHRSTEDT, K.; STEINMERTZ, R. Resource Management in Networking: ATM Networks, the Internet, and the Telephone Network. Addison-Wesley, 1997. ISBN 020163422.
- [50] CHALMERS, D.; SLOMAN, M. A Survey of Quality in Mobile Computing Environments. IEEE Communications Surveys 2, 2 (1999), 2-10.
- [51] WILLRICH. R. Tutorial: Sistemas Multimídia Distribuídos. Página da World Wide Web. url: <http://www.iso.org/>. Acesso em: Julho de 2002.
- [52] MARTINS, J. Qualidade de Serviço em Redes IP: Princípios Básicos, Parâmetros e Mecanismos. ITELCON, 1999.
- [53] RUBINSTEIN, M.; REZENDE, J. Qualidade de Serviço em Redes 802.11. SBRC, 2001.
- [54] TANG, K.; GERLA, M. Fair Sharing of MAC under TCP in Wireless Ad Hoc Networks. IEEE Multiaccess, Mobility and Teletraffic for Personal Communications (MMT'99) (Veneza, Itália, October, 1999).

- [55] VAIDYA, N. H.; BAHL, P.; GUPTA, S. Distributed fair Scheduling in a Wireless LAN. ACM The Sixth Annual Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00) (Boston, EUA, August, 2000).
- [56] BENSAOU, B.; WANG, Y.; Ko, C. C. Fair Médium Access in 802.11 Based Wireless Ad Hoc Networks. IEEE/ACM The First Annual Workshop on Mobile Ad hoc Networking e Computing (MobiHoc'00) (Boston, EUA, August, 2000).
- [57] GUOJUN, Lu. Communication and Computing for Distributed Multimedia Systems. Artech House Inc., 1996.
- [58] XU, S.; SAADAWI, T. Does The IEEE 802.11 MAC Protocol Work Well in Multihop Wireless Ad Hoc Networks? IEEE Communications Magazine 39, 6 (June, 2001), 130-137
- [59] KANODIA, V.; Li, C.; SABHARWAL, A.; SADEGHI, B.; KNIGHTLY, E. Distributed Multi-Hop Scheduling and Medium Access with Delay and Throughput Constraints. ACM the Seventh Annual Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'01) (Roma, Italia, July, 2001).
- [60] MANGOLD, S.; CHOI, S.; MAY, P.; KLEN, O.; HIERTZ, G.; STIBOR, L. IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service. European Wireless (EW'2002) (Florence, Italy, February, 2001).
- [61] HAITAO, W.; SHIDUAN, C.; YONG, P.; KEPING, L.; and JIAN, M. "IEEE 802.11 Distributed Coordination Function (DCF): Analysis and Enhancement," Proceedings of ICC 2002, pp. 605-609.
- [62] CALI, F.; CONTI, M.; GREGORI, E. Dynamic Tuning of the IEEE 802.11 Protocol to Achieve a Theoretical Throughput Limit. IEEE/ACM Transactions on Networking 8,6 (December, 2000), 785-799.

- [63] BATTITI, Roberto; LI, Bo. Supporting Service Differentiation With Enhancements of the IEEE 802.11 Mac Protocol: Models And Analysis. Technical Report # DIT-03-024. May, 2003
- [64] CHESSON, G.; DIEPSTRATEN, W.; KITCHIN, D.; TEUNISSEN, H.; WENTINK, M. Baseline D-QoS Proposal – IEEE document 802.11-00/399. Technical Report, IEEE 802.11 Tge, 2000.
- [65] CHESSON, G.; DIEPSTRATEN, W.; HOEBEN, M.; SINGLA, A.; TEUNISSEN, H.; WENTINK, M. VDCF Presentation – IEEE document 802.11-01/132. Technical Report, IEEE Tge, March, 2001.
- [66] Network Simulator (versão 2.1b9a). Página da World Wide Web. url: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acesso em: Agosto de 2002.
- [67] KAMIENSKI, Carlos Alberto; Sadok, Djamel; Cavalcanti, Dave A. T.; Sousa, Dênio M. T. de; Dias, Kelvin Lopes. Simulando a Internet: Aplicações na Pesquisa e no Ensino. Anais do XII Congresso do SBC. Julho, 2002.
- [68] ROCHA, R. Uma Arquitetura para Simulação Flexível de Protocolos para Computação Móvel. USP. Dissertação de Mestrado, 2001.
- [69] KESHAV , S., REAL 5.0 Overview. Página da World Wide Web. url: <http://www.cs.cornell.edu/skeshav/real/overview.html> August 2002.
- [70] FALL, K.; VARADHAN, K., The ns manual. The VINT Project, February, 2003.
- [71] ESTRIN, D. Network Visualization with Nam, the VINT Network Animator. IEEE Computer, November, 2000.
- [72] HORSTMANN, G. Avaliação de Esquemas de Fila para o Host Controller Interface do Bluetooth. Dissertação de Mestrado. UFSC. Outubro, 2002.
- [73] AMORIM, G. F. Análise de Desempenho de Protocolos de Roteamento com Diferenciação de Serviços em Redes de Comunicação Móvel *Ad Hoc*. Instituto Militar de Engenharia. 2002.

- [74] VIRGILLITO, Salvatore Benito. Estatística Aplicada com o uso do Software Statistica. Editora Alfa-Omega Ltda, 2002.
- [75] STATSOFT. . Statistica: Data Analysis, Data Mining, Quality Control, Web Based Analytics. Página da World Wide Web. url: <http://www.statsoft.com/>. Acesso em: Dezembro 2003.
- [76] OGLIORI, Paulo Jose. Análise Estatística Usando o STATISTICA. Página da World Wide Web. url: http://www.inf.ufsc.br/~ogliari/analise_estatistica_usando_o_statistica.html. Acesso em: Dezembro de 2002.
- [77] MASSACHUSSETS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. Otcl – Object tcl: The faq manual. Página da WorLd Wide Web. url: <ftp://ftp.tns.lcs.mit.edu/pub/otcl/README.html>. Acesso em Março de 2003.
- [78] MONARCH PROJECT. Wireless and Mobility Extensions to ns-2. Página da World Wide Web. url: <http://www.monarch.cs.cmu.edu/cmu-ns.html>. Acesso em Abril de 2003.
- [79] GARG, Priyank; DOSHI, Rushabh; GREENE, Russel; BAKER, Mary; MALEK, Majid; CHENG, Xiaoyan. 22nd IEEE Using IEEE 802.11e MAC for QoS over Wireless. International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC 2003) (Phoenix, Arizona, April 2003).
- [80] PLANETE. Página da World Wide Web. url: <http://www-sop.inria.fr/planete/software/index.html>. Acesso em Abril de 2003.
- [81] MOSQUITONET. The Mobile Computing Group at Stanford University. Página da World Wide Web. url: <http://mosquitonet.stanford.edu/software/802.11e/>. Acesso em Maio de 2003.

- [82] TUKEY, J. W. Exploratory data analysis. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1971.
- [83] GAST, Matthew S. 802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide (O'Reilly Networking). Paperback: 464 pages, 1st edition, (April 2002).
- [84] ROSS, John. The Book of Wi-Fi: Install, Configure, and Use 802.11b Wireless Networking. Paperback: 288 pages, (February 2003).
- [85] HEISKALA, Juha. OFDM Wireless LANs: A Theoretical and Practical Guide. Paperback: 336 pages, 1st edition, (December 2001).
- [86] MORROW, Robert. Bluetooth: Operation and Use. Paperback: 567 pages, 1st edition, (June 2002).
- [87] HEIJDEN, Marcel V. D., Understanding Wap: Wireless Applications, Devices, and Services. Hardcover: 276 pages, (June 2000).

ANEXO I - Análise Estatística

Sabe-se que a obtenção de valores médios em determinadas situações não é o suficiente. Na realidade a média não contém nenhuma informação sobre o espalhamento dos dados, ou seja, quão distante as amostras estão do valor médio. A média dos dois conjuntos $M = \{5, 10, 15\}$ e $N = \{0, 10, 20\}$ é a mesma, mas o espalhamento é diferente. No caso de aplicações multimídia em redes *wireless*, por exemplo, medir o atraso médio em uma conexão não é o suficiente para avaliar a qualidade do serviço, pois um valor médio razoável pode ser resultado da combinação de atrasos bastante elevados e atrasos pequeno. Neste sentido foi necessário realizar cálculos para mediar a dispersão dos dados em relação à média, o parâmetro adotado foi à variância e o desvio padrão.

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados da análise estatística realizada sobre a influência dos fatores: tamanho dos pacotes, valores de AIFS e valores de CWmin sobre as métricas de qualidade de serviço: vazão, latência, *jitter* e descarte de Pacotes. As amostras das métricas de QoS coletadas após o término das simulações, foram organizados e exportadas para o *software* de análise estatística: - *STATISTICA* [74], [76].

1. ANÁLISE DESCRITIVA EM FUNÇÃO DO TAMANHO PACOTE E DO AIFS

Toda análise estatística inicia-se com uma análise descritiva, a análise descritiva pode ser composta por tabelas ou gráficos. As tabelas listadas abaixo sumarizam as estatísticas descritivas das variáveis dependentes em função das variáveis independentes. As variáveis dependentes são as métricas de QoS e as independentes compreendem o tamanho do pacote e o valor de AIFS. Cada tabela descreve o número de amostras (N), o valor mínimo, máximo, médio e desvio padrão da variável de resposta.

Tabela 1 – Estatísticas Descritivas para a Vazão em Mbps

Tamanho do Pacote	AIFS	N	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
64	2	62	2,22	2,34	2,54	0,08
64	5	60	2,12	2,20	2,34	0,06
64	10	60	1,82	2,09	2,22	0,07
64	15	60	1,68	1,92	2,12	0,11
64	20	60	1,58	1,81	1,98	0,10
64	25	60	1,54	1,65	1,78	0,07
64	30	60	1,49	1,60	1,71	0,05
64	35	60	1,42	1,51	1,62	0,05
64	40	60	1,32	1,43	1,54	0,05
64	45	60	1,31	1,37	1,44	0,04
64	50	60	1,27	1,31	1,34	0,02
160	2	62	2,64	2,76	2,85	0,05
160	5	60	2,58	2,63	2,68	0,03
160	10	60	2,40	2,45	2,49	0,03
160	15	60	2,24	2,28	2,32	0,02
160	20	60	2,01	2,14	2,22	0,04
160	25	60	1,95	2,00	2,05	0,03
160	30	60	1,76	1,90	2,00	0,07
160	35	60	1,58	1,79	1,98	0,09
160	40	60	1,60	1,70	1,81	0,06
160	45	60	1,54	1,65	1,72	0,05
160	50	60	1,50	1,55	1,62	0,04
256	2	62	3,40	3,46	3,53	0,04
256	5	60	3,22	3,29	3,35	0,04
256	10	60	3,01	3,06	3,12	0,03
256	15	60	2,80	2,86	2,94	0,04
256	20	60	2,64	2,68	2,72	0,02
256	25	60	2,50	2,55	2,62	0,04
256	30	60	2,35	2,39	2,43	0,02
256	35	60	2,24	2,27	2,31	0,02
256	40	60	2,13	2,18	2,22	0,03
256	45	60	2,02	2,06	2,09	0,02
256	50	60	1,92	1,98	2,05	0,04
512	2	62	4,28	4,34	4,39	0,03
512	5	60	4,13	4,18	4,23	0,03
512	10	60	3,85	3,91	3,95	0,03
512	15	60	3,65	3,69	3,72	0,02
512	20	60	3,45	3,51	3,59	0,05
512	25	60	3,24	3,30	3,35	0,03
512	30	60	3,12	3,17	3,23	0,03
512	35	60	2,95	3,00	3,05	0,03
512	40	60	2,80	2,86	2,94	0,04
512	45	60	2,72	2,76	2,79	0,02
512	50	60	2,62	2,66	2,69	0,02
1024	2	62	5,72	5,79	5,85	0,03

1024	5	60	5,56	5,61	5,78	0,05
1024	10	60	5,27	5,32	5,36	0,03
1024	15	60	5,00	5,07	5,14	0,04
1024	20	60	4,80	4,85	4,89	0,03
1024	25	60	4,58	4,62	4,67	0,03
1024	30	60	4,35	4,43	4,48	0,04
1024	35	60	4,24	4,27	4,32	0,02
1024	40	60	4,04	4,09	4,15	0,03
1024	45	60	3,90	3,93	3,97	0,02
1024	50	60	3,74	3,78	3,82	0,02
1500	2	62	6,70	6,75	6,79	0,03
1500	5	60	6,51	6,56	6,62	0,04
1500	10	60	6,24	6,29	6,34	0,03
1500	15	60	6,00	6,07	6,14	0,04
1500	20	60	5,68	5,76	5,82	0,04
1500	25	60	5,50	5,56	5,60	0,03
1500	30	60	5,28	5,33	5,37	0,02
1500	35	60	5,15	5,18	5,22	0,02
1500	40	60	4,90	4,95	4,99	0,03
1500	45	60	4,79	4,85	4,89	0,03
1500	50	60	4,52	4,63	4,78	0,06
2048	2	62	7,51	7,55	7,59	0,03
2048	5	60	7,31	7,36	7,40	0,03
2048	10	60	7,00	7,06	7,10	0,03
2048	15	60	6,71	6,83	6,89	0,03
2048	20	60	6,51	6,56	6,62	0,04
2048	25	60	6,30	6,40	6,49	0,07
2048	30	60	6,10	6,14	6,19	0,03
2048	35	60	5,80	5,95	5,99	0,06
2048	40	60	5,68	5,76	5,82	0,04
2048	45	60	5,51	5,60	5,68	0,05
2048	50	60	5,40	5,47	5,59	0,05
2304	2	62	7,80	7,88	7,95	0,05
2304	5	60	7,68	7,75	7,79	0,03
2304	10	60	7,41	7,45	7,49	0,03
2304	15	60	7,14	7,18	7,27	0,04
2304	20	60	6,85	6,93	6,99	0,04
2304	25	60	6,66	6,73	6,79	0,04
2304	30	60	6,46	6,51	6,55	0,03
2304	35	60	6,30	6,35	6,39	0,03
2304	40	60	6,08	6,12	6,15	0,02
2304	45	60	5,90	5,94	5,98	0,02
2304	50	60	5,68	5,76	5,82	0,04

Tabela 2 - Estatísticas Descritivas para a Latência em ms

Tamanho do Pacote	AIFS	N	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
64	2	62	12,50	12,70	12,90	0,12
64	5	60	13,00	13,39	13,90	0,19
64	10	60	14,00	14,39	14,80	0,22
64	15	60	15,00	15,38	15,70	0,20
64	20	60	16,20	16,39	16,70	0,14
64	25	60	17,10	17,38	17,60	0,17
64	30	60	18,10	18,39	18,60	0,15
64	35	60	19,10	19,32	19,50	0,16
64	40	60	20,10	20,38	20,80	0,22
64	45	60	21,10	21,38	21,60	0,18
64	50	60	22,00	22,38	22,80	0,20
160	2	62	12,50	12,89	13,50	0,31
160	5	60	13,10	13,53	14,30	0,30
160	10	60	14,10	14,45	15,00	0,24
160	15	60	15,20	15,54	16,00	0,25
160	20	60	16,20	16,43	16,70	0,14
160	25	60	17,20	17,50	17,90	0,22
160	30	60	18,20	18,48	18,90	0,19
160	35	60	19,20	19,57	19,90	0,23
160	40	60	20,10	20,51	20,90	0,25
160	45	60	21,20	21,54	21,90	0,21
160	50	60	22,00	22,48	22,90	0,23
256	2	62	13,30	13,60	14,30	0,26
256	5	60	14,10	14,40	15,00	0,21
256	10	60	15,00	15,35	15,70	0,19
256	15	60	16,00	16,33	16,70	0,15
256	20	60	17,00	17,28	17,60	0,19
256	25	60	18,00	18,33	18,60	0,17
256	30	60	18,90	19,30	19,80	0,24
256	35	60	20,00	20,28	20,70	0,17
256	40	60	21,00	21,19	21,50	0,14
256	45	60	22,00	22,31	22,60	0,16
256	50	60	22,50	23,25	23,70	0,38
512	2	62	15,00	15,25	15,70	0,17
512	5	60	15,30	15,89	16,50	0,39
512	10	60	16,00	16,78	17,30	0,33
512	15	60	17,20	17,87	18,30	0,35
512	20	60	18,60	18,78	19,10	0,17
512	25	60	18,90	19,58	19,90	0,26
512	30	60	20,40	20,76	21,20	0,28
512	35	60	21,20	21,69	22,00	0,27
512	40	60	22,10	22,83	23,30	0,27
512	45	60	22,00	23,04	23,70	0,62
512	50	60	24,30	24,59	24,90	0,17
1024	2	62	18,00	18,52	18,90	0,27

1024	5	60	18,70	19,17	19,70	0,29
1024	10	60	19,60	20,14	21,20	0,38
1024	15	60	21,00	21,23	22,00	0,20
1024	20	60	21,80	22,13	22,40	0,17
1024	25	60	22,80	23,09	23,30	0,18
1024	30	60	23,60	24,10	24,80	0,36
1024	35	60	24,80	25,13	25,80	0,23
1024	40	60	25,80	26,14	26,50	0,20
1024	45	60	26,80	27,13	27,80	0,23
1024	50	60	28,00	28,34	28,80	0,27
1500	2	62	21,20	21,62	22,10	0,28
1500	5	60	21,90	22,16	22,50	0,21
1500	10	60	22,80	23,26	23,50	0,19
1500	15	60	23,40	24,25	24,90	0,45
1500	20	60	25,00	25,35	25,80	0,29
1500	25	60	26,00	26,28	26,60	0,20
1500	30	60	27,00	27,30	27,70	0,24
1500	35	60	27,00	27,30	27,70	0,24
1500	40	60	22,80	28,12	28,90	1,63
1500	45	60	29,00	29,23	29,50	0,16
1500	50	60	30,00	30,26	30,50	0,16
2048	2	62	24,80	25,25	25,70	0,28
2048	5	60	25,20	25,83	26,40	0,31
2048	10	60	26,00	26,74	27,10	0,26
2048	15	60	27,50	27,88	28,20	0,19
2048	20	60	28,00	28,87	29,40	0,44
2048	25	60	29,20	29,76	30,20	0,34
2048	30	60	30,00	30,82	31,50	0,41
2048	35	60	31,30	31,76	32,20	0,29
2048	40	60	32,30	32,74	33,20	0,24
2048	45	60	33,40	33,76	34,20	0,22
2048	50	60	34,20	34,77	35,10	0,24
2304	2	62	26,00	26,49	26,90	0,28
2304	5	60	26,80	27,29	27,90	0,37
2304	10	60	28,10	28,48	28,90	0,28
2304	15	60	28,90	29,38	29,90	0,46
2304	20	60	30,00	30,25	30,50	0,16
2304	25	60	31,00	31,20	31,40	0,14
2304	30	60	32,00	32,22	32,40	0,13
2304	35	60	33,00	33,24	33,40	0,13
2304	40	60	33,40	34,26	34,50	0,29
2304	45	60	35,00	35,26	35,50	0,16
2304	50	60	36,00	36,32	36,80	0,24

Tabela 3 - Estatísticas Descritivas para o Jitter em ms

Tamanho do Pacote	AIFS	N	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
64	2	62	4,45	4,47	4,50	0,02
64	5	60	4,68	4,68	4,69	0,00
64	10	60	5,07	5,08	5,09	0,01
64	15	60	5,38	5,38	5,39	0,00
64	20	60	5,73	5,74	5,74	0,00
64	25	60	6,08	6,08	6,09	0,00
64	30	60	6,43	6,43	6,44	0,00
64	35	60	6,78	6,78	6,79	0,00
64	40	60	7,13	7,14	7,15	0,01
64	45	60	7,48	7,49	7,49	0,00
64	50	60	7,83	7,84	7,84	0,00
160	2	62	4,46	4,51	4,58	0,04
160	5	60	4,78	4,78	4,79	0,00
160	10	60	5,07	5,08	5,09	0,01
160	15	60	5,48	5,48	5,49	0,00
160	20	60	5,77	5,78	5,78	0,00
160	25	60	6,13	6,13	6,14	0,00
160	30	60	6,47	6,47	6,48	0,00
160	35	60	6,88	6,88	6,89	0,00
160	40	60	7,14	7,16	7,18	0,02
160	45	60	7,58	7,59	7,60	0,00
160	50	60	7,87	7,88	7,88	0,00
256	2	62	4,78	4,78	4,79	0,00
256	5	60	4,98	4,98	4,99	0,00
256	10	60	5,38	5,38	5,39	0,00
256	15	60	5,68	5,68	5,69	0,00
256	20	60	6,03	6,03	6,04	0,00
256	25	60	6,33	6,33	6,34	0,00
256	30	60	6,77	6,78	6,78	0,00
256	35	60	7,03	7,09	7,16	0,04
256	40	60	7,17	7,46	7,48	0,04
256	45	60	7,78	7,79	7,80	0,00
256	50	60	8,18	8,19	8,19	0,00
512	2	62	5,38	5,38	5,39	0,00
512	5	60	5,54	5,54	5,55	0,00
512	10	60	5,88	5,89	5,89	0,00
512	15	60	6,24	6,24	6,25	0,00
512	20	60	6,55	6,56	6,56	0,00
512	25	60	6,52	6,93	7,02	0,12
512	30	60	7,22	7,25	7,28	0,03
512	35	60	7,60	7,65	7,70	0,03
512	40	60	7,97	7,99	8,00	0,01
512	45	60	8,38	8,39	8,39	0,00
512	50	60	8,68	8,69	8,69	0,00
1024	2	62	6,10	6,48	6,98	0,27

1024	5	60	6,00	6,70	9,00	0,44
1024	10	60	7,00	7,04	7,10	0,03
1024	15	60	7,34	7,39	7,46	0,03
1024	20	60	7,60	7,74	7,90	0,08
1024	25	60	8,00	8,10	8,21	0,05
1024	30	60	8,33	8,44	8,69	0,10
1024	35	60	8,71	8,76	8,79	0,03
1024	40	60	9,10	9,15	9,20	0,03
1024	45	60	9,43	9,48	9,50	0,02
1024	50	60	9,85	9,88	9,90	0,01
1500	2	62	7,10	7,51	7,98	0,26
1500	5	60	7,10	7,73	7,90	0,15
1500	10	60	8,11	8,14	8,18	0,03
1500	15	60	8,41	8,46	8,49	0,03
1500	20	60	8,80	8,87	8,90	0,03
1500	25	60	9,10	9,16	9,70	0,11
1500	30	60	9,50	9,56	9,70	0,04
1500	35	60	9,70	9,86	9,89	0,04
1500	40	60	10,00	10,33	11,00	0,30
1500	45	60	10,10	10,69	11,00	0,24
1500	50	60	10,00	10,98	12,00	0,55
2048	2	62	8,81	8,85	8,90	0,03
2048	5	60	9,02	9,03	9,05	0,01
2048	10	60	9,35	9,38	9,40	0,01
2048	15	60	9,75	9,78	9,80	0,01
2048	20	60	9,70	10,08	11,00	0,44
2048	25	60	10,10	10,40	10,90	0,23
2048	30	60	10,20	10,62	10,99	0,29
2048	35	60	11,00	11,21	11,50	0,18
2048	40	60	11,00	11,39	11,90	0,34
2048	45	60	11,10	11,73	12,20	0,34
2048	50	60	11,70	12,12	12,60	0,32
2304	2	62	9,30	9,34	9,39	0,03
2304	5	60	9,50	9,54	9,59	0,03
2304	10	60	9,76	9,82	9,89	0,03
2304	15	60	9,70	10,23	11,00	0,50
2304	20	60	10,15	10,48	10,98	0,27
2304	25	60	10,60	10,82	10,99	0,14
2304	30	60	11,00	11,19	11,50	0,17
2304	35	60	11,10	11,61	12,00	0,29
2304	40	60	11,60	11,94	12,20	0,22
2304	45	60	12,00	12,33	12,60	0,21
2304	50	60	12,20	12,61	12,90	0,22

Tabela 4 – Estatísticas Descritivas para o Descarte em percentagem

Tamanho do Pacote	AIFS	N	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
64	2	62	0,5%	0,6%	0,6%	0,0%
64	5	60	0,5%	0,5%	0,5%	0,0%
64	10	60	0,4%	0,5%	0,5%	0,0%
64	15	60	0,4%	0,4%	0,5%	0,0%
64	20	60	0,3%	0,4%	0,4%	0,0%
64	25	60	0,3%	0,3%	0,3%	0,0%
64	30	60	0,2%	0,2%	0,3%	0,0%
64	35	60	0,2%	0,2%	0,2%	0,0%
64	40	60	0,1%	0,2%	0,2%	0,0%
64	45	60	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%
64	50	60	0,0%	0,1%	0,1%	0,0%
160	2	62	0,6%	0,6%	0,6%	0,0%
160	5	60	0,5%	0,5%	0,6%	0,0%
160	10	60	0,4%	0,5%	0,5%	0,0%
160	15	60	0,4%	0,4%	0,5%	0,0%
160	20	60	0,3%	0,4%	0,4%	0,0%
160	25	60	0,3%	0,3%	0,4%	0,0%
160	30	60	0,3%	0,3%	0,3%	0,0%
160	35	60	0,2%	0,2%	0,3%	0,0%
160	40	60	0,2%	0,2%	0,2%	0,0%
160	45	60	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%
160	50	60	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%
256	2	62	0,6%	0,6%	0,6%	0,0%
256	5	60	0,5%	0,6%	0,6%	0,0%
256	10	60	0,5%	0,5%	0,5%	0,0%
256	15	60	0,4%	0,4%	0,5%	0,0%
256	20	60	0,3%	0,4%	0,4%	0,0%
256	25	60	0,3%	0,3%	0,4%	0,0%
256	30	60	0,2%	0,3%	0,3%	0,0%
256	35	60	0,2%	0,2%	0,2%	0,0%
256	40	60	0,1%	0,1%	0,2%	0,0%
256	45	60	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%
256	50	60	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
512	2	62	0,7%	0,8%	0,8%	0,0%
512	5	60	0,7%	0,7%	0,7%	0,0%
512	10	60	0,6%	0,6%	0,6%	0,0%
512	15	60	0,5%	0,6%	0,6%	0,0%
512	20	60	0,5%	0,5%	0,5%	0,0%
512	25	60	0,4%	0,4%	0,5%	0,0%
512	30	60	0,3%	0,4%	0,4%	0,0%
512	35	60	0,3%	0,3%	0,3%	0,0%
512	40	60	0,2%	0,2%	0,3%	0,0%
512	45	60	0,2%	0,2%	0,2%	0,0%
512	50	60	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%
1024	2	62	0,9%	0,9%	0,9%	0,0%

1024	5	60	0,8%	0,8%	0,9%	0,0%
1024	10	60	0,7%	0,8%	0,8%	0,0%
1024	15	60	0,6%	0,7%	0,7%	0,0%
1024	20	60	0,6%	0,6%	0,6%	0,0%
1024	25	60	0,4%	0,5%	0,5%	0,0%
1024	30	60	0,4%	0,4%	0,5%	0,0%
1024	35	60	0,3%	0,3%	0,3%	0,0%
1024	40	60	0,2%	0,2%	0,2%	0,0%
1024	45	60	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%
1024	50	60	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1500	2	62	1,0%	1,0%	1,0%	0,0%
1500	5	60	0,9%	0,9%	1,0%	0,0%
1500	10	60	0,8%	0,9%	0,9%	0,0%
1500	15	60	0,7%	0,8%	0,8%	0,0%
1500	20	60	0,7%	0,7%	0,7%	0,0%
1500	25	60	0,6%	0,6%	0,7%	0,0%
1500	30	60	0,5%	0,5%	0,6%	0,0%
1500	35	60	0,4%	0,5%	0,5%	0,0%
1500	40	60	0,3%	0,4%	0,4%	0,0%
1500	45	60	0,3%	0,3%	0,3%	0,0%
1500	50	60	0,2%	0,2%	0,3%	0,0%
2048	2	62	1,2%	1,2%	1,2%	0,0%
2048	5	60	1,1%	1,2%	1,2%	0,0%
2048	10	60	1,0%	1,1%	1,2%	0,0%
2048	15	60	1,0%	1,0%	1,1%	0,0%
2048	20	60	0,9%	1,0%	1,0%	0,0%
2048	25	60	0,8%	0,9%	0,9%	0,0%
2048	30	60	0,8%	0,8%	0,8%	0,0%
2048	35	60	0,7%	0,7%	0,8%	0,0%
2048	40	60	0,6%	0,7%	0,7%	0,0%
2048	45	60	0,4%	0,6%	0,8%	0,1%
2048	50	60	0,5%	0,5%	0,6%	0,0%
2304	2	62	1,3%	1,3%	1,4%	0,0%
2304	5	60	1,2%	1,3%	1,3%	0,0%
2304	10	60	1,1%	1,2%	1,3%	0,1%
2304	15	60	1,1%	1,1%	1,2%	0,0%
2304	20	60	1,0%	1,1%	1,2%	0,0%
2304	25	60	1,0%	1,0%	1,1%	0,0%
2304	30	60	0,9%	0,9%	1,0%	0,0%
2304	35	60	0,8%	0,9%	0,9%	0,0%
2304	40	60	0,7%	0,8%	0,8%	0,0%
2304	45	60	0,7%	0,7%	0,8%	0,0%
2304	50	60	0,6%	0,7%	0,7%	0,0%

2. ANÁLISE INFERENCIAL EM FUNÇÃO DO TAMANHO DO PACOTE E DO VALOR DO AIFS

As Tabelas 5 a 8 apresentam a Análise de Variância (ANOVA) das quatro variáveis de resposta em função da variação do tamanho dos pacotes e do valor de AIFS.

Tabela 5 – Resultado da ANOVA para a Variável de Resposta Vazão

Causas de Variação	Soma de quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F	Valor p
TAM_PAC	18252,1	7	2607,4	1425010,5	0,0000
AIFS	1646,5	10	164,7	89986,8	0,0000
TAM_PAC*AIFS	96,1	70	1,4	750,6	0,0000
Erro	9,5	5208	0,0		
Total Corrigido	20004,3	5295			

Tabela 6 - Resultado da ANOVA para a Variável de Resposta Latência

Causas de Variação	Soma de quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F	Valor p
TAM_PAC	0,1442	7	0,0206	214824,7	0,0000
AIFS	0,0490	10	0,0049	51128,2	0,0000
TAM_PAC*AIFS	0,0002	70	0,0000	26,1	0,0000
Erro	0,0005	5208	0,0000		
Total Corrigido	0,1939	5295			

Tabela 7 - Resultado da ANOVA para a Variável de Resposta Jitter

Causas de Variação	Soma de quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F	Valor p
TAM_PAC	0,0174	7	0,0025	101254,6	0,0000
AIFS	0,0063	10	0,0006	25530,0	0,0000
TAM_PAC*AIFS	0,0000	70	0,0000	4,2	0,0000
Erro	0,0001	5208	0,0000		
Total Corrigido	0,0238	5295			

Tabela 8 - Resultado da ANOVA para a Variável de Resposta Descarte de Pacotes

Causas de Variação	Soma de quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F	Valor p
TAM_PAC	326,9	7	46,7	86488,8	0,0000
AIFS	237,5	10	23,7	43977,6	0,0000
TAM_PAC*AIFS	8,7	70	0,1	231,0	0,0000
Erro	2,8	5208	0,0		
Total Corrigido	576,0	5295			

Pela Análise de Variância (ANOVA) verifica-se que a interação entre os fatores tamanho do pacote e AIFS é estatisticamente significativa ($p < 0,0001$), juntamente a esta, os dois fatores, também, são estatisticamente significativos ($p < 0,0001$ e $p < 0,0001$, respectivamente para o Tamanho do Pacote e AIFS com relação ao valor médio da variável resposta. Isto significa que pelo menos entre duas médias há uma diferença significativa com relação ao valor médio da variável resposta.

Para a estimativa dos valores médios da variável resposta e identificação das médias que são diferentes estatisticamente utilizou-se o Teste de *Tukey* [82]. O teste de *Tukey* organiza as médias em ordem decrescente, gerando agrupamentos que são representados pelas letras que são atribuídas para cada média. Sendo que letras iguais representam que as médias não possuem diferenças estatísticas significativas. Em função da grande quantidade de páginas geradas na comparação das médias, quando aplicado o teste de *Tukey*, tornou-se inviável apresentar as tabelas.

3. ANÁLISE DESCRITIVA EM FUNÇÃO DO TAMANHO PACOTE E DO CWMIN

As Tabelas 9 a 12 resumem as estatísticas descritivas das variáveis dependentes em função das variáveis independentes. As variáveis dependentes são as métricas de QoS e as independentes compreendem o tamanho do pacote e o valor de CWmin. Cada tabela descreve o número de amostras (N), o valor mínimo, máximo, médio e desvio padrão.

Tabela 9 - Estatísticas Descritivas para a Vazão em Mbps

Tamanho do Pacote	CWmin	N	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
64	31	62	2,68	2,85	3,22	0,09
64	63	60	0,34	0,41	0,47	0,03
64	127	60	0,19	0,24	0,28	0,02
64	255	60	0,13	0,16	0,19	0,02
64	511	60	0,11	0,12	0,14	0,01
64	1023	60	0,07	0,09	0,11	0,01
64	2047	60	0,06	0,08	0,09	0,01
64	4095	60	0,05	0,07	0,09	0,01
160	31	62	3,11	3,16	3,20	0,03
160	63	60	0,45	0,48	0,52	0,02
160	127	60	0,23	0,26	0,29	0,02
160	255	60	0,14	0,17	0,20	0,02
160	511	60	0,12	0,14	0,15	0,01
160	1023	60	0,08	0,10	0,12	0,01
160	2047	60	0,09	0,09	0,10	0,00
160	4095	60	0,07	0,08	0,08	0,00
256	31	62	3,74	3,79	3,84	0,02
256	63	60	0,56	0,61	0,65	0,03
256	127	60	0,31	0,35	0,38	0,02
256	255	60	0,20	0,24	0,27	0,03
256	511	60	0,16	0,18	0,19	0,01
256	1023	60	0,11	0,14	0,16	0,01
256	2047	60	0,08	0,11	0,14	0,02
256	4095	60	0,08	0,10	0,13	0,02
512	31	62	4,74	4,79	4,82	0,02
512	63	60	0,80	0,88	0,99	0,05
512	127	60	0,45	0,49	0,54	0,02
512	255	60	0,30	0,34	0,37	0,03
512	511	60	0,23	0,26	0,29	0,02
512	1023	60	0,16	0,20	0,23	0,02
512	2047	60	0,14	0,18	0,20	0,02
512	4095	60	0,11	0,14	0,17	0,02
1024	31	62	6,09	6,12	6,15	0,02
1024	63	60	1,34	1,36	1,39	0,02
1024	127	60	0,71	0,77	0,82	0,03
1024	255	60	0,50	0,54	0,57	0,03
1024	511	60	0,37	0,41	0,45	0,02
1024	1023	60	0,30	0,33	0,36	0,02
1024	2047	60	0,24	0,28	0,32	0,02
1024	4095	60	0,20	0,24	0,27	0,02
1500	31	62	6,89	6,93	6,99	0,03
1500	63	60	1,75	1,78	1,80	0,02
1500	127	60	0,94	1,02	1,10	0,04
1500	255	60	0,70	0,73	0,77	0,02
1500	511	60	0,51	0,55	0,59	0,02

1500	1023	60	0,40	0,43	0,46	0,02
1500	2047	60	0,34	0,37	0,41	0,02
1500	4095	60	0,30	0,34	0,36	0,02
2048	31	62	7,56	7,59	7,62	0,02
2048	63	60	2,17	2,21	2,27	0,03
2048	127	60	1,27	1,29	1,32	0,02
2048	255	60	0,90	0,92	0,95	0,01
2048	511	60	0,66	0,70	0,73	0,02
2048	1023	60	0,55	0,58	0,62	0,02
2048	2047	60	0,45	0,48	0,52	0,02
2048	4095	60	0,40	0,44	0,46	0,02
2304	31	62	7,80	7,84	7,88	0,03
2304	63	60	2,30	2,42	2,49	0,07
2304	127	60	1,37	1,42	1,45	0,02
2304	255	60	0,96	1,02	1,09	0,04
2304	511	60	0,75	0,78	0,82	0,02
2304	1023	60	0,60	0,63	0,66	0,03
2304	2047	60	0,40	0,54	0,59	0,06
2304	4095	60	0,43	0,46	0,50	0,02

Tabela 10 - Estatísticas Descritivas para a Latência em ms

Tamanho do Pacote	CWmin	N	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
64	31	62	9,00	12,48	15,00	1,53
64	63	60	14,00	16,48	19,00	1,44
64	127	60	19,00	21,45	23,00	1,36
64	255	60	23,00	25,07	27,00	1,30
64	511	60	27,00	29,22	31,00	1,06
64	1023	60	30,00	32,00	34,00	1,16
64	2047	60	34,00	36,52	38,00	1,24
64	4095	60	37,00	40,08	43,00	1,71
160	31	62	9,00	12,45	15,00	1,47
160	63	60	14,00	16,45	19,00	1,49
160	127	60	19,00	21,48	23,00	1,31
160	255	60	23,00	24,72	27,00	1,28
160	511	60	27,00	29,35	31,00	0,95
160	1023	60	30,00	32,07	34,00	1,18
160	2047	60	34,00	36,53	38,00	1,23
160	4095	60	37,00	40,08	43,00	1,71
256	31	62	10,00	12,73	15,00	1,38
256	63	60	14,00	16,67	19,00	1,49
256	127	60	19,00	22,03	24,00	1,31
256	255	60	23,00	25,10	27,00	1,27
256	511	60	27,00	29,15	31,00	1,10
256	1023	60	31,00	32,67	35,00	1,39
256	2047	60	34,00	36,52	38,00	1,24

256	4095	60	38,00	40,58	43,00	1,52
512	31	62	12,00	15,42	19,00	1,91
512	63	60	16,00	20,60	25,00	2,53
512	127	60	24,00	27,02	30,00	2,03
512	255	60	31,00	32,50	35,00	1,31
512	511	60	37,00	39,20	43,00	1,87
512	1023	60	41,00	44,92	49,00	2,50
512	2047	60	47,00	50,75	54,00	2,09
512	4095	60	54,00	57,15	61,00	2,50
1024	31	62	15,00	18,05	21,00	2,13
1024	63	60	21,00	23,92	28,00	2,05
1024	127	60	25,00	29,78	33,00	2,23
1024	255	60	33,00	35,72	38,00	1,72
1024	511	60	38,00	42,12	45,00	2,44
1024	1023	60	45,00	48,50	52,00	2,26
1024	2047	60	51,00	54,08	59,00	2,41
1024	4095	60	56,00	59,55	63,00	2,19
1500	31	62	19,00	21,60	25,00	2,04
1500	63	60	27,00	29,83	33,00	1,82
1500	127	60	35,00	38,22	42,00	2,19
1500	255	60	44,00	45,83	48,00	1,55
1500	511	60	50,00	54,02	57,00	2,21
1500	1023	60	58,00	61,58	66,00	2,12
1500	2047	60	67,00	69,75	73,00	1,90
1500	4095	60	75,00	78,25	82,00	2,01
2048	31	62	21,00	24,84	29,00	2,07
2048	63	60	30,00	32,57	35,00	1,47
2048	127	60	38,00	40,55	44,00	1,83
2048	255	60	46,00	49,13	52,00	2,03
2048	511	60	53,00	57,17	61,00	2,26
2048	1023	60	62,00	65,70	69,00	2,19
2048	2047	60	69,00	72,53	76,00	1,95
2048	4095	60	77,00	80,52	84,00	1,83
2304	31	62	24,00	26,85	31,00	1,82
2304	63	60	31,00	34,67	39,00	2,50
2304	127	60	40,00	42,47	49,00	2,31
2304	255	60	47,00	50,62	55,00	2,14
2304	511	60	55,00	58,83	62,00	2,25
2304	1023	60	64,00	67,43	70,00	1,80
2304	2047	60	71,00	74,70	80,00	2,66
2304	4095	60	80,00	83,48	88,00	2,40

Tabela 11 - Estatísticas Descritivas para o Jitter em ms

Tamanho do Pacote	CWmin	N	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
64	31	62	4,20	4,50	4,70	0,16
64	63	60	5,30	5,82	6,20	0,20
64	127	60	6,70	7,20	7,60	0,25
64	255	60	8,40	8,66	8,90	0,17
64	511	60	8,90	10,28	12,00	0,93
64	1023	60	9,90	11,46	15,00	1,34
64	2047	60	10,00	12,87	16,00	1,64
64	4095	60	12,00	14,82	18,00	1,77
160	31	62	4,20	4,51	4,70	0,15
160	63	60	5,30	5,82	6,20	0,20
160	127	60	6,70	7,21	7,60	0,26
160	255	60	8,40	8,68	8,90	0,17
160	511	60	8,90	10,32	12,00	0,91
160	1023	60	9,90	11,46	15,00	1,34
160	2047	60	10,00	12,90	16,00	1,56
160	4095	60	12,00	14,82	18,00	1,77
256	31	62	4,20	4,50	4,70	0,16
256	63	60	5,60	5,97	6,30	0,20
256	127	60	6,70	7,20	7,60	0,25
256	255	60	8,40	8,66	8,90	0,18
256	511	60	8,90	10,26	12,00	0,88
256	1023	60	9,90	11,43	15,00	1,28
256	2047	60	10,00	12,87	16,00	1,64
256	4095	60	12,00	14,82	18,00	1,77
512	31	62	5,20	5,50	5,70	0,16
512	63	60	7,00	7,60	7,90	0,34
512	127	60	9,00	9,43	9,90	0,32
512	255	60	9,90	11,46	15,00	1,34
512	511	60	11,00	13,30	16,00	1,44
512	1023	60	13,00	15,58	19,00	1,95
512	2047	60	15,00	17,43	19,00	1,27
512	4095	60	18,00	20,92	24,00	1,75
1024	31	62	5,00	6,60	8,00	0,84
1024	63	60	8,00	8,29	8,60	0,20
1024	127	60	9,00	10,53	13,00	1,05
1024	255	60	10,00	12,47	15,00	1,35
1024	511	60	11,00	14,02	17,00	1,80
1024	1023	60	14,00	17,72	21,00	2,56
1024	2047	60	16,00	19,58	23,00	1,91
1024	4095	60	18,00	21,27	24,00	1,83
1500	31	62	4,50	7,05	9,00	1,27
1500	63	60	9,00	10,78	12,50	1,12
1500	127	60	10,00	13,00	16,00	1,79
1500	255	60	14,00	16,75	19,00	1,68
1500	511	60	15,00	18,65	22,00	2,08

1500	1023	60	18,00	21,18	24,00	1,96
1500	2047	60	20,00	24,23	27,00	2,07
1500	4095	60	24,00	27,02	29,00	1,57
2048	31	62	7,00	9,52	12,00	1,28
2048	63	60	10,00	11,17	11,80	0,59
2048	127	60	13,00	14,67	16,00	1,01
2048	255	60	16,00	17,68	19,00	0,93
2048	511	60	18,50	19,99	21,50	0,92
2048	1023	60	20,00	23,13	27,00	2,30
2048	2047	60	22,00	25,03	28,00	1,54
2048	4095	60	27,00	28,80	31,00	1,37
2304	31	62	7,00	9,57	13,00	1,27
2304	63	60	10,90	12,25	12,80	0,50
2304	127	60	13,00	15,17	17,50	1,11
2304	255	60	16,50	18,20	19,50	0,66
2304	511	60	18,50	20,21	22,00	1,02
2304	1023	60	20,00	23,93	27,00	2,19
2304	2047	60	24,00	26,39	29,50	1,56
2304	4095	60	27,00	29,09	32,00	1,68

Tabela 12 - Estatísticas Descritivas para o Descarte em percentagem

Tamanho do Pacote	CWmin	N	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
64	31	62	0,51%	0,56%	0,62%	0,03%
64	63	60	0,28%	0,31%	0,34%	0,02%
64	127	60	0,22%	0,27%	0,33%	0,04%
64	255	60	0,19%	0,23%	0,27%	0,03%
64	511	60	0,17%	0,20%	0,23%	0,02%
64	1023	60	0,13%	0,16%	0,18%	0,02%
64	2047	60	0,07%	0,11%	0,14%	0,02%
64	4095	60	0,05%	0,08%	0,10%	0,01%
160	31	62	0,61%	0,65%	0,68%	0,02%
160	63	60	0,35%	0,39%	0,45%	0,03%
160	127	60	0,30%	0,35%	0,39%	0,03%
160	255	60	0,28%	0,31%	0,34%	0,02%
160	511	60	0,22%	0,27%	0,33%	0,04%
160	1023	60	0,19%	0,24%	0,27%	0,03%
160	2047	60	0,17%	0,20%	0,23%	0,02%
160	4095	60	0,13%	0,16%	0,18%	0,02%
256	31	62	0,67%	0,70%	0,74%	0,02%
256	63	60	0,34%	0,39%	0,45%	0,03%
256	127	60	0,30%	0,34%	0,38%	0,03%
256	255	60	0,28%	0,30%	0,33%	0,01%
256	511	60	0,22%	0,26%	0,31%	0,03%
256	1023	60	0,19%	0,23%	0,26%	0,02%
256	2047	60	0,15%	0,18%	0,20%	0,02%

256	4095	60	0,12%	0,14%	0,18%	0,02%
512	31	62	0,74%	0,79%	0,85%	0,04%
512	63	60	0,45%	0,49%	0,53%	0,03%
512	127	60	0,40%	0,44%	0,48%	0,03%
512	255	60	0,35%	0,39%	0,43%	0,02%
512	511	60	0,30%	0,34%	0,38%	0,03%
512	1023	60	0,26%	0,30%	0,33%	0,02%
512	2047	60	0,22%	0,24%	0,27%	0,01%
512	4095	60	0,17%	0,19%	0,22%	0,01%
1024	31	62	0,94%	0,97%	1,00%	0,02%
1024	63	60	0,54%	0,56%	0,59%	0,01%
1024	127	60	0,46%	0,50%	0,54%	0,02%
1024	255	60	0,41%	0,45%	0,48%	0,02%
1024	511	60	0,33%	0,39%	0,44%	0,02%
1024	1023	60	0,30%	0,32%	0,35%	0,02%
1024	2047	60	0,24%	0,27%	0,29%	0,02%
1024	4095	60	0,12%	0,20%	0,23%	0,02%
1500	31	62	0,96%	1,04%	1,12%	0,05%
1500	63	60	0,68%	0,72%	0,75%	0,02%
1500	127	60	0,65%	0,68%	0,71%	0,02%
1500	255	60	0,61%	0,65%	0,68%	0,02%
1500	511	60	0,55%	0,60%	0,64%	0,03%
1500	1023	60	0,54%	0,56%	0,59%	0,02%
1500	2047	60	0,48%	0,52%	0,55%	0,02%
1500	4095	60	0,44%	0,49%	0,52%	0,03%
2048	31	62	1,20%	1,23%	1,27%	0,02%
2048	63	60	0,94%	0,99%	1,05%	0,03%
2048	127	60	0,86%	0,91%	0,95%	0,03%
2048	255	60	0,81%	0,85%	0,88%	0,02%
2048	511	60	0,75%	0,78%	0,81%	0,02%
2048	1023	60	0,66%	0,70%	0,74%	0,02%
2048	2047	60	0,61%	0,64%	0,68%	0,02%
2048	4095	60	0,53%	0,56%	0,59%	0,02%
2304	31	62	1,32%	1,36%	1,39%	0,02%
2304	63	60	1,02%	1,10%	1,15%	0,04%
2304	127	60	0,97%	1,03%	1,09%	0,03%
2304	255	60	0,91%	0,96%	0,99%	0,03%
2304	511	60	0,80%	0,85%	0,89%	0,03%
2304	1023	60	0,75%	0,78%	0,82%	0,02%
2304	2047	60	0,66%	0,70%	0,74%	0,02%
2304	4095	60	0,59%	0,62%	0,65%	0,02%

3.1 ANÁLISE INFERENCIAL EM FUNÇÃO DO TAMANHO DO PACOTE E DO VALOR DO CWMIN

As tabelas listadas abaixo apresentam a Análise de Variância (ANOVA) das quatro variáveis de resposta em função da variação do tamanho dos pacotes e do valor do CWmin

Tabela 13 - Resultado da ANOVA para a Variável de Resposta Vazão

Causas de Variação	Soma de quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F	Valor p
TAM_PAC	1023,0	7	146,1	196271,2	0,0000
CWmin	10565,5	7	1509,4	2027159,8	0,0000
TAM_PAC*CWmin	1175,4	49	24,0	32217,1	0,0000
Erro	2,8	3792	0,0		
Total Corrigido	12766,7	3855			

Tabela 14 - Resultado da ANOVA para a Variável de Resposta Latência

Causas de Variação	Soma de quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F	Valor p
TAM_PAC	0,4931	7	0,0704	20350,9	0,0000
CWmin	0,7300	7	0,1043	30129,4	0,0000
TAM_PAC*CWmin	0,0651	49	0,0013	383,6	0,0000
Erro	0,0131	3792	0,0000		
Total Corrigido	1,3013	3855			

Tabela 15 - Resultado da ANOVA para a Variável de Resposta Jitter

Causas de Variação	Soma de quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F	Valor p
TAM_PAC	0,0606	7	0,0087	4992,8	0,0000
CWmin	0,0916	7	0,0131	7554,4	0,0000
TAM_PAC*CWmin	0,0071	49	0,0001	84,0	0,0000
Erro	0,0066	3792	0,0000		
Total Corrigido	0,1659	3855			

Tabela 16 - Resultado da ANOVA para a Variável de Resposta Descarte

Causas de Variação	Soma de quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F	Valor p
TAM_PAC	221,3	7	31,6	51586,7	0,0000
CWmin	125,2	7	17,9	29180,9	0,0000
TAM_PAC*CWmin	5,0	49	0,1	166,5	0,0000
Erro	2,3	3792	0,0		
Total Corrigido	353,7	3855			

Pela Análise de Variância (ANOVA) verifica-se que a interação entre os fatores Tamanho do Pacote e CWmin é estatisticamente significativa ($p < 0,0001$), juntamente a esta, os dois fatores, também, são estatisticamente significativos ($p < 0,0001$ e $p < 0,0001$, respectivamente para o Tamanho do Pacote e CWmin com relação ao valor médio da variável resposta. Isto significa que pelo menos entre duas médias há uma diferença significativa com relação ao valor médio da variável resposta.

Para a estimação dos valores médios da variável resposta e identificação das médias que são diferentes estatisticamente utilizou-se o Teste de *Tukey*. Em função da grande quantidade de páginas geradas na comparação das médias, quando aplicado o teste de *Tukey*, tornou-se inviável apresentar as tabelas.

4. ANÁLISE DESCRITIVA EM FUNÇÃO DO TAMANHO DO PACOTE E DO NÚMERO DE FONTES

As Tabelas 17 a 20 resumam as estatísticas descritivas das variáveis dependentes em função das variáveis independentes. As variáveis dependentes são as métricas de QoS e as independentes compreendem o número de fontes e o tamanho dos pacotes. Cada tabela descreve o número de amostras (N), o valor mínimo, máximo, médio e desvio padrão.

Tabela 17 – Estatísticas Descritivas para a Vazão em Mbps

Número de Fontes	Tamanho dos Pacotes	N	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
2	160	30	2,82	2,89	2,96	0,04
2	256	30	3,20	3,25	3,29	0,03
2	1500	30	5,84	5,95	6,00	0,04
4	160	30	2,96	3,03	3,15	0,06
4	256	30	3,32	3,36	3,39	0,02
4	1500	30	6,24	6,28	6,32	0,02
6	160	30	3,16	3,23	3,30	0,04
6	256	30	3,35	3,45	3,49	0,03
6	1500	30	6,20	6,48	6,80	0,14
8	160	30	3,42	3,51	3,60	0,05
8	256	30	3,50	3,54	3,59	0,03
8	1500	30	6,30	6,60	6,90	0,19
10	160	30	3,60	3,68	3,72	0,04
10	256	30	3,61	3,67	3,71	0,03
10	1500	30	6,70	6,92	7,20	0,18
12	160	30	3,75	3,82	3,86	0,03
12	256	30	3,72	3,74	3,77	0,02
12	1500	30	6,70	7,04	7,30	0,20
14	160	30	3,92	3,98	4,05	0,04
14	256	30	3,78	3,81	3,86	0,02
14	1500	30	6,80	7,16	7,40	0,18
16	160	30	4,00	4,05	4,12	0,04
16	256	30	3,82	3,86	3,89	0,02
16	1500	30	7,10	7,31	7,60	0,16

Tabela 18 - Estatísticas Descritivas para a Latência em ms

Número de Fontes	Tamanho dos Pacotes	N	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
2	160	30	10,00	13,00	15,00	1,31
2	256	30	15,00	17,00	19,00	1,31
2	1500	30	20,00	22,90	26,00	1,95
4	160	30	12,00	15,00	17,00	1,39
4	256	30	17,00	19,10	22,00	1,58
4	1500	30	22,00	24,70	27,00	1,49
6	160	30	14,00	18,17	22,00	2,00
6	256	30	21,00	23,13	25,00	1,31
6	1500	30	25,00	27,37	29,00	1,33
8	160	30	18,00	20,00	22,00	1,36
8	256	30	22,00	25,23	29,00	2,11
8	1500	30	30,00	32,13	35,00	1,50
10	160	30	22,00	24,00	27,00	1,46
10	256	30	25,00	27,70	31,00	1,53

10	1500	30	35,00	38,13	41,00	1,78
12	160	30	25,00	28,17	32,00	1,60
12	256	30	27,00	30,17	33,00	2,15
12	1500	30	42,00	45,00	47,00	1,51
14	160	30	27,00	30,40	34,00	1,69
14	256	30	29,00	32,53	36,00	1,89
14	1500	30	47,00	52,70	57,00	2,68
16	160	30	28,00	30,87	36,00	1,96
16	256	30	32,00	36,10	39,00	1,86
16	1500	30	54,00	58,47	63,00	2,78

Tabela 19 - Estatísticas Descritivas para a Jitter em ms

Número de Fontes	Tamanho dos Pacotes	N	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
2	160	30	3,00	5,20	7,00	1,22
2	256	30	3,00	4,47	6,00	1,22
2	1500	30	4,00	6,10	9,00	1,32
4	160	30	5,00	8,00	10,00	1,49
4	256	30	3,00	5,20	7,00	1,22
4	1500	30	6,00	8,53	11,00	1,38
6	160	30	9,00	11,47	14,00	1,31
6	256	30	6,00	9,07	12,00	1,64
6	1500	30	10,00	12,10	14,00	1,24
8	160	30	11,00	12,55	15,00	0,89
8	256	30	10,00	12,70	15,00	1,56
8	1500	30	13,00	15,20	18,00	1,61
10	160	30	11,00	13,20	15,00	1,24
10	256	30	13,00	15,83	19,00	1,58
10	1500	30	17,00	19,53	22,00	1,48
12	160	30	12,00	14,60	18,00	2,01
12	256	30	15,00	18,43	22,00	2,05
12	1500	30	21,00	24,27	27,00	1,82
14	160	30	14,00	15,90	19,00	1,49
14	256	30	16,00	19,27	22,00	1,55
14	1500	30	24,00	26,13	28,00	1,20
16	160	30	18,00	21,13	23,00	1,63
16	256	30	17,00	20,00	22,00	1,58
16	1500	30	27,00	30,00	33,00	1,80

Tabela 20 - Estatísticas Descritivas para o Descarte em percentagem

Número de Fontes	Tamanho dos Pacotes	N	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
2	160	30	0,00	0,00	0,00	0,00
2	256	30	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1500	30	0,00	0,00	0,00	0,00
4	160	30	0,00	0,00	0,00	0,00
4	256	30	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1500	30	0,00	0,00	0,00	0,00
6	160	30	0,00	0,00	0,00	0,00
6	256	30	0,00	0,00	0,00	0,00
6	1500	30	0,00	0,00	0,00	0,00
8	160	30	0,00	0,00	0,00	0,00
8	256	30	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1500	30	0,01	0,01	0,01	0,00
10	160	30	0,00	0,00	0,00	0,00
10	256	30	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1500	30	0,01	0,01	0,01	0,00
12	160	30	0,00	0,00	0,00	0,00
12	256	30	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1500	30	0,01	0,01	0,01	0,00
14	160	30	0,00	0,00	0,00	0,00
14	256	30	0,00	0,00	0,00	0,00
14	1500	30	0,01	0,01	0,01	0,00
16	160	30	0,00	0,00	0,01	0,00
16	256	30	0,00	0,01	0,01	0,00
16	1500	30	0,01	0,01	0,01	0,00

4.1 ANÁLISE INFERENCIAL EM FUNÇÃO DO TAMANHO DO PACOTE E DO VALOR DO CWMIN

As tabelas listadas abaixo apresentam a Análise de Variância (ANOVA) das quatro variáveis de resposta em função da variação do tamanho dos pacotes e do número de fontes.

Tabela 21 – Resultado da ANOVA para a Variável de Resposta Vazão

Causas de Variação	Soma de quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F	Valor p
NUM_FONTES	88,3548	7	12,6221	1448,4	0,0000
TAM_PAC	1602,8765	2	801,4382	91968,9	0,0000
NUM_FONTES*TAM_PAC	8,1357	14	0,5811	66,7	0,0000
Erro	6,0651	696	0,0087		
Total Corrigido	1705,4	719			

Tabela 22 - Resultado da ANOVA para a Variável de Resposta Latência

Causas de Variação	Soma de quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F	Valor p
NUM_FONTES	0,0496	7	0,0071	2244,4	0,0000
TAM_PAC	0,0300	2	0,0150	4753,9	0,0000
NUM_FONTES*TAM_PAC	0,0067	14	0,0005	151,3	0,0000
Erro	0,0022	696	0,0000		
Total Corrigido	0,0884	719			

Tabela 23 - Resultado da ANOVA para a Variável de Resposta Jitter

Causas de Variação	Soma de quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F	Valor p
NUM_FONTES	0,0267	7	0,0038	1684,9	0,0000
TAM_PAC	0,0037	2	0,0018	817,0	0,0000
NUM_FONTES*TAM_PAC	0,0023	14	0,0002	72,2	0,0000
Erro	0,0016	696	0,0000		
Total Corrigido	0,0342	719			

Tabela 24 - Resultado da ANOVA para a Variável de Resposta Descarte de Pacotes

Causas de Variação	Soma de quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F	Valor p
NUM_FONTES	30,3	7	4,3	8134,4	0,0000
TAM_PAC	25,6	2	12,8	24042,0	0,0000
NUM_FONTES*TAM_PAC	6,3	14	0,4	841,1	0,0000
Erro	0,4	696	0,0		
Total Corrigido	62,6	719			

Pela Análise de Variância (ANOVA) verifica-se que a interação entre os fatores tamanho do pacote e número de fontes é estatisticamente significativa ($p < 0,0001$), juntamente a esta, os dois fatores, também, são estatisticamente significativos ($p < 0,0001$ e $p < 0,0001$, respectivamente para o Tamanho do Pacote e número de fontes com relação ao valor médio da variável resposta. Isto significa que pelo menos entre duas médias há uma diferença significativa com relação ao valor médio da variável resposta.

Para a estimativa dos valores médios da variável resposta e identificação das médias que são diferentes estatisticamente utilizou-se o Teste de *Tukey*. As tabelas 25 a 28 discriminam os resultados obtidos em função da interação dos dois fatores (tamanho do pacote e número de fontes) em função da variável de resposta. A interpretação da tabela é feita da seguinte forma: - cada linha corresponde à média de uma combinação dos dois fatores (Tamanhos dos Pacotes e números de fontes); cada coluna, onde existir “****” comuns, representam médias que não são diferentes estatisticamente.

Por exemplo, nas primeiras linhas da Tabela 25, as duas primeiras médias (linhas) possuem diferença estatística. A terceira e a quarta média (linhas) não possuem diferença estatística. A primeira e a segunda média (linhas) são diferentes estatisticamente da terceira e da quarta média (linhas). E assim sucessivamente.

Tabela 25 – Resultados do Teste de Tukey para a Variável de Resposta Vazão

Ordem	Fontes	Pkt	Média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2	160	2,89	****																	
4	4	160	3,03		****																
7	6	160	3,23			****															
2	2	256	3,25			****															
5	4	256	3,36				****														
8	6	256	3,45					****													
10	8	160	3,51					****	****												
11	8	256	3,54						****												
14	10	256	3,67							****											
13	10	160	3,68							****											
17	12	256	3,74							****	****										
20	14	256	3,81								****	****									
16	12	160	3,82								****	****									
23	16	256	3,86									****									
19	14	160	3,98										****								
22	16	160	4,05										****								
3	2	1500	5,95											****							
6	4	1500	6,28												****						
9	6	1500	6,48													****					
12	8	1500	6,60														****				
15	10	1500	6,92															****			
18	12	1500	7,04																****		
21	14	1500	7,16																	****	
24	16	1500	7,31																		****

Tabela 26 - Resultados do Teste de Tukey para a Variável de Resposta Latência

Ordem	Fontes	Pkt	Média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	2	160	0,01	****																
4	4	160	0,02		****															
2	2	256	0,02			****														
7	6	160	0,02			****	****													
5	4	256	0,02				****	****												
10	8	160	0,02					****												
3	2	1500	0,02						****											
8	6	256	0,02						****	****										
13	10	160	0,02						****	****	****									
6	4	1500	0,02							****	****									
11	8	256	0,03								****									
9	6	1500	0,03									****								
14	10	256	0,03									****								
16	12	160	0,03									****								
17	12	256	0,03										****							
19	14	160	0,03										****							
22	16	160	0,03										****	****						
12	8	1500	0,03											****						

