

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO

GUILHERME MARSHALL

**Estudo da Influência das Redes Locais Sem-  
Fio IEEE 802.11g na Qualidade de Voz  
Estimada pelo Modelo E**

Dissertação apresentada como requisito  
parcial para a obtenção do grau de Mestre  
em Ciência da Computação

Prof. Dr. João César Netto  
Orientador

Porto Alegre, agosto de 2006.

## CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Marshall, Guilherme

Estudo da Influência das Redes Locais Sem-Fio IEEE 802.11g na Qualidade de Voz Estimada pelo Modelo E / Guilherme Marshall – Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Computação, 2006.

117 f.:il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Computação. Porto Alegre, BR – RS, 2006. Orientador: João César Netto.

1.IEEE 802.11. 2.WLAN. 3.PCF. 4.DCF. 5.Qualidade de voz. 6.VoIP. 7.Modelo E. I.Netto, João César. II. Título

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. José Carlos Ferraz Hennemann

Vice-Reitor: Prof. Pedro Cezar Dutra Fonseca

Pró-Reitora de Pós-Graduação: Profa. Valquíria Linck Bassani

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Flávio Rech Wagner

Coordenador do PPGC: Prof. Carlos Alberto Heuser

Bibliotecária-Chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

*“... Pois bem, se mexeram comigo, com a velha e fiel fé do meu povo sofrido, então agora eu vou sacanear: mais honesta ainda vou ficar. Só de sacanagem! Dirão: ‘Deixa de ser boba, desde Cabral que aqui todo mundo rouba’ e vou dizer: ‘Não importa, será esse o meu carnaval, vou confiar mais e outra vez. Eu, meu irmão, meu filho e meus amigos, vamos pagar limpo a quem a gente deve e receber limpo do nosso freguês. Com o tempo a gente consegue ser livre, ético e o escambau.’ Dirão: ‘É inútil, todo o mundo aqui é corrupto, desde o primeiro homem que veio de Portugal’. Eu direi: Não admito, minha esperança é imortal. Eu repito, ouviram? Imortal! Sei que não dá para mudar o começo mas, se a gente quiser, vai dar para mudar o final!”*

(Elisa Lucinda em ‘Só de Sacanagem’)

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço à minha mãe e à minha avó Noêmia (*in memoriam*) pelo carinho, pelas lições de vida e pela instrução recebida. Dedico esta vitória também ao meu pai e à minha querida tia-avó Dadada, apoio e confiança incondicionais, assim como aos meus irmãos Ricardo, Clarice e Karen (*in memoriam*).

Sigo agradecendo à Digitel Indústria Eletrônica, que permitiu que eu pudesse continuar buscando um contínuo aperfeiçoamento técnico através deste curso de Mestrado em Ciência da Computação. Dentre os vários colegas que sempre me apoiaram, agradeço especialmente aos integrantes da equipe de Redes e ao colega, superior e amigo Vandersílvio.

Não poderia deixar de agradecer também àquelas pessoas que escolhemos ao longo da vida para tornar nossa passagem mais alegre. À todos meus amigos, de coração, meu muito obrigado! Em especial, ao 'irmão' Alexandre e sua família, ao grande parceiro de todas as horas Alemão Ronaldo.

Por último, faço um agradecimento especial à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, na figura do Instituto de Informática, pela oportunidade e ao prof. Dr. João Netto, pela confiança, paciência e orientação.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>12</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>13</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>14</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 Visão Geral.....	15
1.2 Motivação .....	17
1.3 Objetivos.....	17
1.4 Estrutura do Texto.....	19
<b>2 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE VOZ .....</b>	<b>21</b>
2.1 MOS.....	21
2.2 Modelos de Percepção .....	22
2.3 Modelo E.....	23
2.3.1 $R_0$ – Fator Relação Sinal-Ruído Básico .....	24
2.3.2 $I_s$ – Fator de Falhas Simultâneas .....	25
2.3.3 $I_d$ – Fator de Falhas com Atraso.....	25
2.3.4 $I_{e-eff}$ – Fator Efetivo de Falhas do Equipamento .....	37
2.3.5 A – Fator de Vantagem .....	40
<b>3 WLAN IEEE 802.11 .....</b>	<b>42</b>
3.1 O padrão IEEE 802.11 .....	42
3.2 Arquitetura.....	43
3.2.1 <i>Basic Service Set</i> (BSS).....	43
3.2.2 <i>Extended Service Set</i> (ESS) .....	45
3.2.3 <i>Distribution System</i> (DS).....	45
3.2.4 <i>Services</i> .....	45
3.3 MAC .....	46
3.3.1 Protocolo MAC.....	47
3.3.2 Mecanismo Básico de Acesso.....	49
3.3.3 Distributed Coordination Function (DCF) .....	50
3.3.4 Point Coordination Function (PCF) .....	50
3.4 PHY .....	52
3.4.1 PHY 802.11g .....	53
3.5 Formato dos Quadros .....	53

3.5.1 Camada MAC .....	54
3.5.2 Camada PHY .....	56
<b>4 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....</b>	<b>59</b>
<b>4.1 Simulação .....</b>	<b>59</b>
4.1.1 Ferramentas Utilizadas .....	59
4.1.2 Modelo Utilizado .....	64
4.1.3 Validação do Modelo .....	68
<b>4.2 Análise dos Dados da Simulação .....</b>	<b>73</b>
4.2.1 Taxa de Perda de Pacotes .....	73
4.2.2 Atraso Fim-a-Fim.....	75
4.2.3 Taxa de Transmissão de Pacotes.....	77
<b>4.3 Complemento Analítico Para Obtenção do Fator R.....</b>	<b>77</b>
4.3.1 Fator $I_d$ .....	78
4.3.2 Fator $I_{e-eff}$ .....	79
<b>4.4 Cenários Simulados.....</b>	<b>80</b>
4.4.1 Variação do Intervalo entre CFPs .....	80
4.4.2 Coexistência com Estações de Dados .....	82
4.4.3 PCF x DCF .....	82
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>84</b>
<b>5.1 Variação do Intervalo entre CFPs.....</b>	<b>84</b>
5.1.1 Resultados Parciais.....	84
5.1.2 Fator R - G.711 .....	90
5.1.3 Fator R – G.711 Anexo I (PLC).....	92
<b>5.2 Coexistência com Estações de Dados.....</b>	<b>93</b>
5.2.1 Respostas sob Diferentes Cargas de Dados.....	93
5.2.2 Comparação Entre Codificadores .....	96
<b>5.3 PCF x DCF .....</b>	<b>98</b>
5.3.1 Sem Estações de Dados .....	98
5.3.2 Com Estações de Dados .....	100
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>102</b>
<b>6.1 Conclusões .....</b>	<b>102</b>
<b>6.2 Próximos Trabalhos .....</b>	<b>103</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE A SCRIPT DE SIMULAÇÃO.....</b>	<b>111</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BSS	Basic Service Set
CFP	Contention-free Period
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access (Collision Avoidance)
CTS	Clear To Send
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	Distributed Interframe Space
DSP	Digital Signal Processing
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EIFS	Extended Interframe Space
ERP-OFDM	Extended Rate PLCP OFDM
FCS	Frame Check Sequence
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GPS	Global Positioning System
HRDSSS	High Rate Direct Sequence Spread Spectrum
IBSS	Independent Basic Service Set
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IP	Internet Protocol
ISP	Internet Service Provider
LLC	Logical Link Control
MAC	Medium Access Control
MIB	Management Information Base
MOS	Mean Opinion Score
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MSDU	MAC Service Data Unit
NAV	Network Allocation Vector

NIC	Network Interface Card
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PC	Point Coordinator
PCF	Point Coordination Function
PDA	Personal Digital Assistant
PHY	Physical Layer
PIFS	Priority Interframe Space
PLC	Packet Loss Concealment
PLCP	Physical Layer Convergence Procedure
PMD	Physical Medium Dependent
PSTN	Public Switched Telephony Network
RTCP	Real-time Control Protocol
RTP	Real-time Protocol
RTS	Request To Send
RTT	Round Trip Time
SIFS	Short Interframe Space
SIP	Session Initiation Protocol
SLA	Service Level Agreement
SSID	Service Set Identity
TCL	Tool Command Language
TDM	Time Division Multiplexing
VAD	Voice Activity Detection
VoIP	Voice over IP
VoWLAN	Voice over WLAN
WLAN	Wireless Local Area Network

## LISTA DE SÍMBOLOS

R	Fator R - resultado do Modelo E.
$R_0$	Fator de relação sinal-ruído básica do Modelo E.
$I_s$	Fator de falhas simultâneas do Modelo E.
$I_d$	Fator de falhas com atraso do Modelo E.
$I_{e\text{-eff}}$	Fator efetivo de falhas do equipamento do Modelo E.
A	Fator de vantagem de Modelo E.
SLR	Send Loudness Rating. Valor sugerido na norma G.107 = +8dB.
$N_0$	Soma das potências das fontes de ruído.
$I_{dte}$	Degradação pelo eco no lado transmissor.
$I_{dle}$	Degradação pelo eco no lado receptor.
$I_{dd}$	Degradação pelo atraso fim-a-fim demasiado.
RLR	Receive Loudness Rating. Valor sugerido na norma G.107 = +2dB.
TELR	Talker Echo Loudness Rating. Valor sugerido na norma G.107 = +65dB.
T	Atraso médio no caminho do eco.
$T_a$	Atraso absoluto fim-a-fim em conexões livres de eco.
$T_r$	Atraso de ida-e-volta dentro do circuito a 4 fios.
WEPL	Weighted Echo Path Loss, Valor sugerido na norma G.107 = 110dB.
$v_{cu}$	Velocidade de propagação do sinal no par de cobre.
d	Distância entre a híbrida (ou ponto central) e terminal do assinante.
t	Tempo de propagação do sinal entre a híbrida e o terminal do assinante. Diferença estimada entre $T_a$ e T.
$I_e$	Fator de falhas do equipamento. Definido no anexo I da norma G.113.
Ppl	Probabilidade de perda de pacotes.
Bpl	Fator de robustez à perda de pacotes.
BurstR	Taxa de rajada de pacotes.
$T_{snp}$	Atraso dos pacotes entre os níveis de aplicação do Access Point e terminal receptor considerando-se 'n'% de perda de pacotes.
BCN	Quadro de Beacon IEEE 802.11.
CFEND	Quadro de fim do período livre de contenção (PCF) IEEE 802.11.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Relação MOS x Fator R .....	24
Figura 2.2: Definição das variáveis relativas ao atraso na transmissão .....	26
Figura 2.3: $I_{dte}$ vs. T (ms) .....	27
Figura 2.4: $I_{dle}$ vs. $T_r$ (ms) .....	28
Figura 2.5: $I_{dd}$ vs. $T_a$ (ms).....	29
Figura 2.6: Modelo de Terminal VoIP (SIP).....	31
Figura 2.7: Diagrama dos atrasos no sistema de comunicação .....	35
Figura 2.8: $I_{e-eff}$ x Ppl (%), para perdas aleatórias. ....	39
Figura 2.9: Curva de difusão da inovação.....	41
Figura 2.10: Classes de usuários pelo momento da adoção da inovação.....	41
Figura 3.1: <i>Independent</i> BSS (IBSS).....	44
Figura 3.2: <i>Infrastructure</i> BSS (BSS).....	45
Figura 3.3: Extended Service Set (ESS) .....	45
Figura 3.4: Problema do nodo oculto.....	48
Figura 3.5: Funcionamento dos quadros CTS e RTS .....	48
Figura 3.6: Mecanismo Básico de Acesso .....	50
Figura 3.7: Mecanismo de acesso PCF .....	52
Figura 3.8: Formato geral do quadro MAC IEEE 802.11.....	54
Figura 3.9: Formato do Quadro ACK.....	55
Figura 3.10: Formato dos Quadros CF-End e CF-End+ACK.....	55
Figura 3.11: Formato dos Quadros de Dados.....	55
Figura 3.12: Formato dos Quadros de Gerenciamento .....	56
Figura 3.13: Elementos de Informação utilizados no <i>Beacon</i> .....	56
Figura 3.14: Formato dos Quadros PPDU .....	57
Figura 4.1: Modo PCF de Lindgren e Almquist.....	62
Figura 4.2: Modo PCF implementado .....	62
Figura 4.3: <i>Trace</i> da geração do Quadro de <i>Beacon</i> .....	70
Figura 4.4: <i>Trace</i> para verificação do intervalo do CFP .....	71
Figura 4.5: <i>Trace</i> dos quadros em PCF.....	72
Figura 4.6: Relatório de Informações da Simulação.....	74
Figura 4.8: Distribuição de Frequência do Atraso Fim-a-Fim .....	75
Figura 4.9: Descrição Textual do Histograma em 4.8 .....	76
Figura 5.1: Taxa de Perda dos Pacotes com Variação no Período CFP .....	84
Figura 5.2: Atraso Máximo dos Pacotes RTP para Diferentes <i>Superframes</i> .....	87
Figura 5.3: Atraso Máximo dos Pacotes RTP Admitindo 2% de Perdas.....	88
Figura 5.4: Histograma de Atrasos para <i>Superframe</i> = 19 TU.....	89
Figura 5.5: Histograma de Atrasos para <i>Superframe</i> = 20 TU.....	89

Figura 5.6: Fator R de cenários PCF, sem estações de dados e sem atraso externo.....	91
Figura 5.7: Fator R de cenários PCF sem estações de dados e com atraso externo .....	92
Figura 5.8: Fator R de cenários PCF, sem dados, sem atraso externo e com PLC.....	93
Figura 5.9: Fator R de cenários PCF, sem dados, com atraso externo e com PLC .....	93
Figura 5.10: Taxa de perda dos pacotes RTP G.711 .....	94
Figura 5.11: Taxa de perda dos pacotes EXP.....	94
Figura 5.12: Atraso dos Pacotes RTP Recebidos .....	95
Figura 5.13: Atraso dos pacotes para 2% de perdas. ....	96
Figuras 5.14 e 5.15: Fator R para o codificador G.711, com estações de dados.....	96
Figura 5.16: Fator R de diferentes codificadores com 20 estações de dados.....	97
Figura 5.17: Fator R de diferentes codificadores com 20 estações de dados e atraso adicional .....	98
Figura 5.18: Fator R DCF v. PCF, G.711 sem PLC .....	99
Figura 5.19: Fator R DCF v. PCF, G.711 sem PLC, 100 ms de atraso externo.....	99
Figura 5.20: Fator R DCF, G.711 sem PLC, com tráfego de dados.....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Receita de sistemas de telefonia tradicionais x híbridos x IP na América do Norte .....	17
Tabela 2.1: Codificadores de voz e suas características .....	22
Tabela 2.2: Relação entre a escala MOS e o fator R com a opinião subjetiva dos usuários .....	24
Tabela 2.3: Atrasos típicos de alguns codificadores de voz (ms).....	32
Tabela 2.4: Efeito da multiplexação de quadros de voz proposta .....	33
Tabela 2.5: Valores de Atraso Boca-Orelha Recomendados pela G.114 .....	36
Tabela 2.6: Valor de $I_e$ para alguns codificadores de voz na ausência de falhas .....	38
Tabela 2.7: Exemplos provisórios para o fator de vantagem 'A' .....	40
Tabela 3.1: Padrão IEEE 802.11 e suas extensões .....	42
Tabela 3.2: Tipos de PHY das WLAN 802.11 .....	52
Tabela 3.3: Comparação entre os modos 802.11g e 802.11g retro-compatível.....	53
Tabela 3.4: Relação entre taxa de transmissão e o número de bits de dados por símbolo OFDM .....	58
Tabela 4.1: Comparação entre a implementação PCF original e a proposta .....	63
Tabela 4.2: Fluxo de Pacotes de Voz Modelado .....	66
Tabela 4.3: Fluxos de Pacotes de Dados Modelados.....	67
Tabela 4.4: Parâmetros 802.11g ERP-OFDM.....	68
Tabela 4.5: Parâmetros 802.11 MAC .....	68
Tabela 4.6: Transmissão dos Quadros MAC 802.11 .....	71
Tabela 4.7: Atrasos do Sistema Modelado.....	78
Tabela 4.8: Valores de $I_{e-eff}$ utilizados.....	80
Tabela 4.9: Cenários Utilizados no Estudo do Impacto do Intervalo entre CFPs .....	81
Tabela 4.10: Cenários Utilizados no Estudo da Coexistência com Estações de Dados ..	82
Tabela 4.11: Cenários Utilizados na Comparação PCF x DCF.....	83
Tabela 5.1: Pontos das Curvas da Figura 5.1 .....	85
Tabela 5.2: Pontos das Curvas das Figuras 5.2 e 5.3.....	88
Tabela 5.3: Taxa de perda de pacotes RTP G.711 em DCF.....	100

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise completa da qualidade de voz esperada em serviços de VoIP quando prestados sobre a plataforma WLAN IEEE 802.11g. Diferentemente da maior parte da literatura, este estudo complementa as informações de atraso, variação do atraso e taxa de perda dos pacotes, com um modelo analítico de avaliação de qualidade de voz proposto pela ITU-T, o Modelo E. Desta forma, todos os fatores modelados como perceptíveis pelos usuários do serviço telefônico são considerados simultaneamente, gerando, por fim, resultados correspondentes à escala de avaliação subjetiva da qualidade de voz MOS, que qualifica a opinião média em: “muito satisfeitos”, “satisfeitos”, “alguns insatisfeitos”, “muitos insatisfeitos”, “quase todos insatisfeitos” e “não recomendado”.

O código do simulador NS-2 foi expandido para prover todas as funcionalidades requeridas neste trabalho. Com ele, diferentes cenários de aplicação foram simulados utilizando três dos codificadores de voz mais utilizados atualmente, o G.723.1, o G.729a e o G.711 (com e sem PLC). A funcionalidade centralizada da camada MAC IEEE 802.11, o PCF, também foi estudada, tendo os parâmetros referentes ao período entre repetições do CFP e à máxima duração do mesmo analisados e ajustados de modo a prover o melhor desempenho. Experimentos similares foram realizados para a função DCF, permitindo então uma comparação direta entre os dois modos de operação do nível MAC. Além disso, ensaios considerando outros tráfegos menos prioritários (estações de dados) foram realizados com o intuito de caracterizar a capacidade dos sistemas em diferenciar ambos os tráfegos.

**Palavras-Chave:** IEEE 802.11, WLAN, PCF, DCF, qualidade de voz, VoIP, modelo E.

# **A Study of the Influence of IEEE 802.11g Wireless Local Networks on the Voice Quality Estimated by the E-Model**

## **ABSTRACT**

This work is intended to provide a complete evaluation of the voice quality obtained in IEEE 802.11g WLAN environments. In contrast to the major literature, this dissertation complements the traditional network metrics, as delay, jitter and loss rate, with an analytical model for voice quality evaluation created by ITU-T, named E Model. With this model, all factors able of affecting the user's perception of quality in a telephony service are simultaneously considered to reflect the subjective voice quality scale MOS, which rates the mean opinion as follow: "very satisfied", "satisfied", "some user satisfied", "many users dissatisfied", "nearly all user dissatisfied" and, "not recommended".

An extension to the NS-2 simulator source code has been developed to provide all the features required by this study. With this 'customized simulator', several scenarios have been analyzed considering three of the most important vocoders in the market today, G.723.1, G.729a, and G.711 (with and without PLC). Moreover, the centralized scheme for the IEEE 802.11 MAC, called PCF, has been studied to show the effect of the CFP repetition interval and the CFP maximum duration on its upper bound limit of simultaneous voice calls. Similar experiments have been carried out for the DCF MAC functionality, allowing these medium access modes to have their performance directly compared against each other. Finally, scenarios with low priority traffic (data traffic) have been created to help describing the ability of both MAC functions to deal with traffic differentiation.

**Keywords:** IEEE 802.11, WLAN, PCF, DCF, voice quality, VoIP, E model.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Visão Geral

Durante muitos anos os principais fabricantes mundiais de equipamentos eletrônicos buscaram soluções que atendessem a crescente demanda por uma tecnologia de rede que provesse mobilidade, taxa de transmissão compatível com a das redes *Ethernet* (IEEE 802.3), segurança e baixo custo. Muitos deles chegaram a desenvolver soluções proprietárias, que acabaram sendo rejeitadas pelo mercado por não atingirem algum dos objetivos citados ou, principalmente, por não garantirem interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes. Mas, num esforço conjunto da indústria e do meio acadêmico, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) lançou em 1997 o padrão 802.11 (IEEE, 1997), para ser utilizado em equipamentos de acesso a redes locais sem-fio (WLAN).

Inicialmente, o padrão foi visto por muitos como apenas mais uma tentativa infrutífera de criação de um tipo de rede local sem-fio que se tornasse popular. Mas em 1999, com a aprovação das extensões 802.11a (IEEE, 1999-b) e 802.11b (IEEE, 1999-c) a indústria viu mais claramente a possibilidade de permear no mercado estes dispositivos. Mais baratos e com taxas de transmissão que poderiam chegar a 54 Mbit/s no primeiro caso e 11 Mbit/s no segundo, a aceitação pelos usuários seria questão de tempo. E foi o que aconteceu realmente. Nos dias atuais, o padrão sugerido pela IEEE é majoritariamente adotado e se tornou um padrão de fato com ampla utilização em computadores pessoais móveis, PDAs, *media centres* e outros dispositivos eletrônicos que necessitem de mobilidade ou sejam utilizados em locais de difícil acesso.

Por outro lado, a disseminação das redes de computadores nos ambientes corporativo, doméstico e acadêmico continuava num ritmo a cada ano mais intenso, impulsionado por novas aplicações e pela maior abrangência dos serviços eletrônicos oferecidos. Esta demanda fez com que as taxas de transmissão de dados aumentassem e as redes passassem a requerer maiores investimentos em manutenção e segurança. Diante deste cenário de crescimento do volume de tráfego de dados e de estagnação (e, por vezes, até diminuição) do uso da infra-estrutura telefônica, alguns fabricantes passaram a apostar em tecnologias de transmissão de voz e vídeo sobre redes de pacotes, as quais até então só eram usadas para dados. Dessa forma, os usuários teriam uma redução dos gastos com telefonia, dispunham de novos recursos (integrados com sua rede de dados) e ainda teriam a possibilidade de utilizar parte da capacidade ociosa de suas redes. Mas, assim como as tecnologias iniciais empregadas em WLAN, os equipamentos precursores apresentavam soluções proprietárias, limitadas na sua integração com a rede pública de telefonia comutada (PSTN), de custo muito elevado e com qualidade insuficiente na maioria dos ambientes de usuário.

Apenas com o amadurecimento de duas outras tecnologias, processadores para DSP e QoS, é que a transmissão de áudio (e vídeo) sob redes de pacotes tornou-se uma

alternativa boa, econômica e tecnicamente. Pois mesmo com o mercado já ampliando a capacidade de transmissão de dados de suas redes, não seria razoável, na primeira metade da década de 90, pensarmos em ocupar 64 kbit/s<sup>1</sup> apenas com a informação de voz. Assim, a utilização de codificadores de voz como o G.723.1 (ITU, 1996-a), que pode transmitir a uma taxa média menor que 5,3 kbit/s, se tornou fundamental. Todavia, um codificador com alta taxa de compressão nominal requer alto desempenho no processador de sinais. Daí a importância da evolução dos processadores para DSP, que durante a década de 90 ficaram menores, mais baratos e com desempenho cada vez maior. Isto permitiu que, além de comprimir e descomprimir o áudio, os processadores executassem as várias outras funções essenciais a um dispositivo de transmissão de voz sobre pacotes, como cancelar eco, gerar/detectar tons de sinalização, detectar atividade de voz, etc.

No entanto, mesmo garantindo que a transmissão da voz não exceda a banda disponível, a qualidade da conversação depende de outros fatores extremamente suscetíveis às variações típicas das redes de pacotes, como o atraso fim-a-fim (ou simplesmente atraso, como será referido a partir deste ponto), a variação de atraso e a taxa de perda de pacotes. Sozinhas estas características da rede podem inviabilizar o transporte de chamadas de voz, e por isto foi tão importante o avanço das ferramentas de QoS na consolidação da telefonia IP como uma alternativa real de comunicação. O real impacto destas características será visto com maiores detalhes mais adiante, no capítulo referente ao estudo das métricas de qualidade de voz. É importante agora, no entanto, saber que hoje as redes privadas já permitem ao cliente contratar, com o chamado SLA, parâmetros de qualidade de serviço pré-determinados. Nestes contratos o provedor de serviço de rede (ISP) se compromete a garantir as características de rede exigidas pela aplicação do cliente.

Mas, enquanto o mercado trabalhava para fornecer a estrutura técnica e comercial necessária para a adoção em massa de produtos com tecnologia de VoIP, restava ainda aos desenvolvedores apresentarem soluções práticas de padronização da telefonia IP, incluindo a interconexão com as redes legadas. Com a evolução de iniciativas independentes acabaram se criando vários padrões e recomendações para o transporte de comunicação multimídia sobre redes de pacotes, dos quais dois dominam o mercado atualmente: a norma guarda-chuva (assim chamada porque engloba várias outras normas) H.323 (ITU, 1998-a), lançada pela *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T), e o conjunto de protocolos encabeçado pelo SIP (HANDLEY, M. et al, 1999), criado pela *Internet Engineering Task Force* (IETF). Novamente, assim como aconteceu com as WLANs, a partir do momento em que padronizações foram sendo adotadas pela indústria, o mercado passou a experimentar uma taxa de crescimento maior na adoção da tecnologia de transporte de voz sobre pacotes.

Hoje, como mostram os dados da Tabela 1.1, a comercialização de sistemas baseados em VoIP já atingiu um volume significativo no mercado de telefonia mundial, e tende a crescer ainda mais nos próximos anos. Segundo pesquisa feita no início de 2005 (YANKEE GROUP, 2005), já em 2006 a receita dos sistemas IP deverá ultrapassar a dos sistemas de telefonia comutada.

---

<sup>1</sup>Taxa de transmissão referente à norma ITU-T G.711 (ITU, 1988), empregada na telefonia digital. Cabe ressaltar que a esta taxa somar-se-ia um valor não desprezível, relativo aos cabeçalhos dos protocolos dos vários níveis (exemplo: físico+enlace+rede+transporte).

Tabela 1.1: Receita de sistemas de telefonia tradicionais x híbridos x IP na América do Norte

<i>Ano</i>	<i>Tradicionais</i>	<i>Híbridos</i>	<i>IP</i>
2004	1.400	1.500	686
2005 (previsão)	1.000	2.000	903

**Obs.:** Valores em milhões de dólares americanos (MUSD)

Fonte: Gartner research, HAMBLEN, 2005.

## 1.2 Motivação

Confirmadas as apostas da indústria nas duas tecnologias, WLAN e VoIP, e notada a crescente aceitação das mesmas pelo consumidor, não é difícil vislumbrar que elas juntas formem uma aplicação chave para equipamentos portáteis. Hoje tanto PDAs, quanto laptops já saem, em sua maioria, equipados com interfaces 802.11. Em breve, teremos no mercado aparelhos telefônicos puramente IP sem-fio ou com o adicional de interface celular, *media receivers*, acessos condominiais compartilhados e muitos outros produtos onde a mobilidade e praticidade da tecnologia de VoWLAN (voz sobre WLAN) possa ser um diferencial.

A WLAN IEEE 802.11 foi projetada para trabalhar de forma transparente para as aplicações, provendo os mesmos serviços das redes IEEE 802.3 para as camadas superiores (O'HARA; PETRICK, 1999), e assim garantindo que as mesmas aplicações de comunicação usadas em redes *Ethernet* sejam executadas corretamente, sem a necessidade de adaptações. Entretanto, a camada de acesso ao meio (MAC) dessas redes sem-fio implementa um protocolo que originalmente não permite diferenciação de serviços. Com isso, aplicações críticas, como a telefonia IP, tendem a ter seu desempenho comprometido pelo fato de disputarem isonomicamente o acesso ao meio físico com todos os outros tráfegos, pois isso gera imprevisibilidade do atraso médio e de variação do atraso dos pacotes nesta camada.

Até quase a conclusão desta dissertação, a IEEE ainda trabalhava no anexo 'e' (IEEE, 2005-a), que disponibiliza às redes um mecanismo de diferenciação de serviço no nível de acesso. A menos de três meses da entrega deste texto, em novembro de 2005, finalmente a recomendação foi publicada. Mas enquanto os fabricantes incluem esta nova funcionalidade em seus equipamentos, são vendidos milhões de dispositivos equipados com interfaces WLAN IEEE 802.11 que não possuem suporte nativo à priorização de tráfego na camada MAC. É de se esperar então, mantendo-se a tendência de crescimento na utilização da tecnologia VoIP, que grande parte destes usuários que possuem interfaces "pré-802.11e" venham a utilizar seus acessos WLAN para transportar aplicações deste tipo, justificando um estudo de caso.

## 1.3 Objetivos

Dentro deste contexto, este trabalho visa avaliar o impacto das redes WLAN IEEE 802.11 no desempenho das aplicações de VoIP, com o intuito de caracterizar sua influência na qualidade de voz das chamadas telefônicas IP sob diferentes cenários. Todos os estudos serão realizados por meio de simulação, utilizando a ferramenta NS-2 (NS, 2005-a) com algumas contribuições externas e código próprio, e complementados

por um modelo analítico de avaliação da qualidade da voz. A rede estudada consiste num *Access Point*, mais um variado número de estações realizando chamadas de voz sobre IP ou trafegando dados genéricos. Nesta topologia, chamada de estruturada, todas as estações comunicam-se diretamente com o AP a fim de enviar seus pacotes para algum ponto hipotético fora da WLAN. O modo de operação da camada MAC 802.11 conhecido como PCF receberá o foco principal do estudo, visto que este serviço é oferecido na recomendação da IEEE como “*near-isochronous*” (quase isócrono), condição que é necessária para o bom funcionamento de aplicações de tempo-real. Serão estudados parâmetros de configuração da camada MAC cujas variações podem influenciar do desempenho dos serviços de voz, como o período de repetição do CFP e sua duração máxima, explicados detalhadamente no capítulo 3.

Não faz parte do objetivo deste trabalho, estudar a influência do uso quadros de controle de fluxo (RTS/CTS) por parte da camada MAC, nem tampouco verificar questões referentes à distribuição espacial e mobilidade dos terminais, por serem pontos bastante estudados e que não se enquadram nos cenários de aplicação mais comuns. Entre outros trabalhos, a variação da eficiência na utilização do meio físico foi objeto de estudo, como em (BRUNO, CONTI e GREGORI, 2002) e (CHATZIMISIOS, BOUCOUVALAS e VITSAS, 2004), para as extensões 802.11a e 802.11b respectivamente. Quanto à distribuição espacial dos terminais, diversos efeitos também já foram estudados anteriormente, especialmente os originados pela variação na taxa de transmissão, como, por exemplo, nos trabalhos de Garg e Kappes (2003), Köpsel e Wolisz (2001) e Smavatkul, Chen e Emeott (2003).

Como será visto ao longo desta dissertação, a qualidade na voz é afetada basicamente por três métricas oriundas do nível de engenharia de redes: o atraso dos pacotes e sua variação, além da taxa de perdas. De forma direta, métricas como a vazão, foco do estudo na maioria dos trabalhos encontrados que abordam o desempenho de redes IEEE 802.11, não trazem nenhuma informação relevante ao estudo aqui apresentado. No entanto, estudos específicos de atraso dos pacotes, como os realizados por Jayaparvathy et al. (2003), também não são capazes de gerar uma estimativa da qualidade de voz porque faltam informações de perdas, tamanhos e latências específicas dos quadros de voz e, principalmente, por não aplicar nenhum modelo de avaliação.

Apenas um trabalho apresentando uma análise completa do desempenho de serviços de voz sobre WLAN 802.11, da rede ao modelo de qualidade de voz, foi encontrado. Realizado por Coupechoux, Kumar e Brignol, em 2004, ele caracteriza, em termos de qualidade de voz, a capacidade das redes IEEE 802.11b. Mas, dentre as principais diferenças entre o trabalho citado e o realizado, além da camada física, estão os fatos de Coupechoux, Kumar e Brignol não estudarem o impacto da coexistência entre voz e dados e ainda omitirem a análise do modo PCF, que como será visto ao final do trabalho, provê quase 100% a mais de capacidade de chamadas de voz simultâneas se corretamente configurado. Omissão, por sinal, que se reflete na maioria dos trabalhos que, mesmo de forma incompleta, se propõem a estimar uma capacidade máxima para comunicações de voz em redes 802.11, como (MEDEPALLI et al., 2004) e (GARG e KAPPES, 2003), considerando apenas o modo de operação distribuído (DCF).

Até no próprio simulador NS-2 a capacidade de operar em modo PCF foi subtraída. Globalmente, todas as referências que utilizam este simulador para avaliar o funcionamento do modo centralizado (PCF) indicam a contribuição dos suecos Lindgren e Almquist (2001-a) como sendo a única extensão disponível. Porém, ao longo deste trabalho foi verificada a limitação na funcionalidade desta extensão ao código fonte do simulador, colocando em dúvidas a abrangência dos trabalhos realizados a

partir do mesmo, como fazem os próprios autores em sua dissertação de mestrado (LINDGREN e ALMQUIST, 2001-b). Assim sendo, uma atualização e complementação do referido trabalho foi implementada, também em linguagem C++, para ser utilizada nesta dissertação e, posteriormente, compartilhada com a comunidade em código aberto (MARSHALL, 2006).

Sobre a camada física da WLAN modelada, corresponde à extensão 802.11g, num modo que a incompatibiliza com estações legadas, como 802.11b. Esta escolha permite que as estações 802.11g atinjam o seu máximo de eficiência, transmitindo a até 54 Mbit/s com curtos intervalos entre os quadros. Desta forma, a aplicação deste estudo se restringe as redes 802.11g no modo ERP-OFDM e, consideradas as poucas diferenças apresentadas ao longo do texto, também a extensão 802.11a.

Das características de rede extraídas a partir de simulações, são calculados de forma independente cada um dos fatores de formação da equação do Modelo E (ITU, 2005) para avaliação da qualidade da voz num dado cenário. Esta recomendação da ITU-T para estimativa analítica da qualidade da voz, apresentada em detalhes no próximo capítulo, será simplificada para o caso específico de aplicações de voz sobre redes de pacotes. Trabalho semelhante ao apresentado por Cole e Rosenbluth (2001) e por Lustosa et al. (2004), que reduziram o modelo com simplificações, para posteriormente aplicá-lo em cenários de monitoração de qualidade de voz em tempo real.

Os cenários propostos consideram o uso de diferentes codificadores de voz, para abranger grande parte das aplicações de voz reais. São considerados no estudo os codificadores de baixa vazão G.723.1 (ITU, 1996-a) e G.729a (ITU, 1996-d), além do tradicional G.711 (ITU, 1988), usado na telefonia digital convencional, com suas versão com e sem algoritmo de recuperação de perda de quadros.

Ao final, levando-se em consideração os cenários propostos, serão apresentados resultados que ajudarão engenheiros e administradores a configurar e dimensionar adequadamente suas redes IEEE 802.11 para prover serviços de telefonia IP com qualidade controlada, além de colaborar para o entendimento da sensibilidade da voz percebida em relação às variações nos parâmetros da camada MAC e sua capacidade máxima de chamadas simultâneas. Além disso, embora o trabalho seja focado na aplicação da tecnologia VoIP, os métodos aqui apresentados poderão ser aproveitados em projetos de redes com outros tipos de tráfego, diferentes topologias e até outros padrões de rede, uma vez que a metodologia de análise dos experimentos é apresentada em camadas, separando as métricas de rede dos modelos de avaliação da qualidade de voz.

## **1.4 Estrutura do Texto**

Seguem a introdução do trabalho, feita neste capítulo, dois capítulos contendo o embasamento teórico essencial para desenvolvimento da dissertação. No capítulo 2 são apresentados conceitos fundamentais utilizados neste texto para definir a avaliação da qualidade de voz e os fatores que a influenciam. É feita também uma simplificação do Modelo E para que as únicas variáveis restantes possam ser representadas por métricas da rede, neste caso o atraso dos pacotes e a taxa de perda nos mesmos. O capítulo seguinte, capítulo 3, contém um resumo do funcionamento das redes WLAN IEEE 802.11, em especial da sua metodologia de acesso ao meio de transmissão, dentro da camada MAC. Também são apresentadas características específicas da camada física escolhida para a modelagem do sistema, determinada pela extensão 802.11g.

No quarto capítulo, então, é apresentado o modelo desenvolvido e sua validação, as ferramentas utilizadas e a descrição dos cenários escolhidos. Neste ponto também são descritas as modificações feitas no código fonte do simulador NS-2 e os problemas encontrados com a distribuição original e com a contribuição de Lindgren e Almquist (2001-a).

O capítulo 5 é estruturado conforme os cenários propostos e apresenta, em cada seção, os resultados obtidos para os respectivos casos de estudo. Dando maior enfoque ao resultado final, a qualidade de voz estimada pelo Modelo E, o capítulo também apresenta os resultados parciais obtidos, como as métricas de rede. Comparações e análises entre cenários e com outros trabalhos também são realizados neste ponto do texto.

Por fim, apresenta-se um sexto e último capítulo contendo as conclusões, sugestões e as propostas para trabalhos futuros.

## 2 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE VOZ

Para se analisar o desempenho de um sistema qualquer, antes de tudo, é necessário que se tenha uma ou mais métricas significativas e pré-determinadas para efeito de comparação e avaliação. Nesta dissertação, onde se deseja conhecer a capacidade das WLANs IEEE 802.11 no transporte de fluxos de VoIP, é natural que se faça a opção por uma métrica oriunda dos sistemas de telefonia. Nestes sistemas o objetivo principal é garantir que o assinante não possua uma percepção negativa dos serviços contratados, e para isto, as empresas deste mercado se aplicam em monitorar constantemente vários parâmetros que poderiam levar seus clientes a rescindirem seus contratos (ORTIZ, 2001):

- Terminar chamadas precocemente devido à inaceitável qualidade instantânea
- Aumentar a percepção de má qualidade nos serviços ao final de cada chamada
- Não tolerar o alto custo do serviço imposto pelo sobre-dimensionamento da estrutura, apesar da excelência na qualidade do serviço

Então, para avaliar a qualidade de um sistema de telefonia existem muitas métricas, como por exemplo, a taxa de ligações terminadas precocemente, o tempo de estabelecimento da chamada e a taxa conexões bem sucedidas (GLAPA, HOUCK e YANG, 2004). Mas a principal delas, e a mais significativa para este estudo, é a qualidade da voz. A avaliação desta métrica, porém, é uma tarefa muito complicada, pois deve corresponder à mesma percepção que seres humanos teriam sob determinado estímulo. E modelar o comportamento humano é sempre um desafio para todas as áreas de conhecimento, não sendo diferente no caso da telefonia. Por exemplo, uma mesma amostra de áudio pode receber classificação diferente de um mesmo grupo de pessoas, quando sob diferentes aspectos externos. Da mesma forma, a percepção de uma melhora abrupta no áudio é mais lenta (constante de tempo de aproximadamente 15 s) do que quando existe um piora instantânea (constante de tempo de aproximadamente 5s) (ORTIZ, 2001). Outra característica muito peculiar na avaliação feita por pessoas é o fator *'recency'*, que mostra que uma mesma falha no áudio recebe diferentes classificações quando inserida no início ou mais para o fim da *'chamada'*.

Percebendo a dificuldade de padronização na avaliação na qualidade da voz provida por diferentes empresas é que a ITU-T criou a recomendação P.800 (ITU, 1996-b), mais conhecida por MOS (do inglês *Mean Opinion Score*), que ainda hoje é a maior referência em termos de avaliação de qualidade de voz.

### 2.1 MOS

MOS é uma pontuação atribuída por um diverso grupo de pessoas, submetido a escutar vários trechos de fala obedecendo às regras definidas na recomendação supracitada, classificando-os numa escala de 1 a 5 segundo a qualidade percebida, onde

1 equivale a Ruim e 5 a Excelente. É importante notar que o teste pode ser realizado tanto em sistemas de comunicação completos, com linhas de transmissão, como apenas com a unidade audível, para se testar, por exemplo, a qualidade intrínseca dos codificadores de voz.

Embora este método subjetivo de avaliação traga os melhores resultados, pois apresenta a percepção real dos usuários, é impensável que as operadoras de telefonia fiquem continuamente refazendo estes testes devido ao seu alto custo. Também, estes testes são intrusivos, e, portanto, não permitem que a qualidade seja monitorada em tempo-real. Por estas razões, muito se tem investido no desenvolvimento dos testes classificados como Objetivos, onde a qualidade da voz pode ser determinada através de cálculos.

A tabela 2.1 apresenta características de alguns dos codificadores de voz (*vocoders*) mais utilizados no mercado de telefonia IP. Com exceção do G.729 (ITU, 1996-c), que será substituído por sua evolução de menor complexidade computacional, o G.729A (ITU, 1996-d), os *vocoders* listados serão os mesmos utilizados nas análises realizadas nos próximos capítulos deste trabalho. Cabe ressaltar que o G.729A possui a mesma taxa, mesmo tamanho de quadro, mesmo *look ahead*, pouco mais de 50% da complexidade algorítmica e, apenas, em torno de 0,2 a menos na escala MOS que o G.729. Por isso, hoje, quando a indústria cita o codificador G.729, normalmente está se referindo ao G.729A, que se tornou muito mais popular que seu predecessor.

Tabela 2.1: Codificadores de voz e suas características

<i>Recomendação</i>	<i>Algoritmo</i>	<i>Taxa (Kbit/s)</i>	<i>Quadro (ms)</i>	<i>Look ahead (ms)</i>	<i>MOS</i>
G.711	PCM	64		0	4,43
G.723.1	ACELP	5.3	30	7,5	3,83
G.723.1	MP-MLQ	6.3	30	7,5	4,00
G.729	CS-ACELP	8	10	5	4,18

Fonte: MARCOPOULOU; TOBAGI; KARAM, 2003. pg. 750.

## 2.2 Modelos de Percepção

Os modelos de percepção (ou *Perceptual Models*) são testes objetivos, baseados na medição de sinais e criados para avaliar a qualidade da voz computacionalmente, sem a intervenção humana (ITU, 2004-a). Existem dois tipos de testes objetivos, intrusivo e passivo. O primeiro tipo se baseia na análise de uma forma de onda resultante, quando o sistema recebe a injeção de um padrão sonoro predeterminado. Já os testes passivos, ainda pouco utilizados, analisam a forma de onda em um ponto e, a partir dela, determinam uma classificação para a qualidade do áudio.

As recomendações da ITU-T P.861 (PSQM) (ITU, 1998-b) e P.862 (PESQ) (ITU, 2001-a) pertencem ao grupo dos testes intrusivos baseados em modelo de percepção. Embora relativamente recente, a segunda recomendação é bastante utilizada nos *gateways* das operadoras de telefonia e continua em evolução (WITTMANN, 2005). Sua conversão para a MOS já foi inclusive definida pela ITU-T para efeito de comparação. Mas ambas as recomendações definem testes que influenciam no comportamento da rede, podendo inclusive obter resultados mais negativos devido à sobrecarga causada pelo próprio teste.

Tipicamente aplicada em equipamentos de teste e *gateways* de operadoras, a recomendação P.563 (ITU, 2004-b) especifica um complexo algoritmo para efetuar

testes passivos de qualidade de voz. Resultado do trabalho colaborativo de três empresas européias (Opticom, SwissQual e Psytechnics), a P.563 estima a qualidade de voz de qualquer chamada em curso, mas segundo (WITTMANN, 2005), não é incomum este teste gerar um resultado mais negativo que o esperado se comparado ao MOS. Além disto, o algoritmo dificilmente consegue detectar eco e sua alta complexidade praticamente inviabiliza a utilização em terminais de usuário (telefones IP, por exemplo), pois traria um aumento significativo de custo.

Ainda existem no mercado vários outros testes baseados em modelos de percepção (na sua maioria proprietários). Mas estes testes, sejam intrusivos ou não, pecam principalmente pelo fato de analisarem o áudio em apenas uma direção, não levando em consideração importantes problemas de transmissão inseridos pela rede (como o atraso). Adicionalmente, estes testes funcionam com períodos de amostragem e não com monitoração constante, como seria desejado em redes com variações tão abruptas como a rede IP.

## 2.3 Modelo E

Diferentemente das ferramentas anteriores, este modelo, definido na recomendação G.107 (ITU, 2005), se propõe a estimar a satisfação do usuário analisando separadamente cada um dos fatores de degradação da qualidade de um sistema de comunicação. O Modelo E é oriundo, na realidade, de um relatório técnico da ETSI (ETR 250 (ETSI, 1996)), e foi desenvolvido para auxiliar no planejamento de redes de comunicação de voz (LUSTOSA et. al, 2004), incluindo nele aspectos até então não considerados, como o atraso. E é por isso, e também por causa de sua relativa simplicidade computacional, que hoje muito se investe na evolução deste modelo para aplicação na monitoração da qualidade da voz em sistemas telefonia sobre redes de pacotes.

O princípio básico do Modelo E, segundo (ETSI, 1996), é que fatores psicológicos são aditivos numa escala psicológica. Em outras palavras, isto quer dizer que se a escala de avaliação da qualidade de voz possui uma base psicológica, cada um dos fatores que influenciam na percepção dos usuários pode ter sua contribuição somada separadamente. Tal conceito é apresentado na equação 2.1, onde diversos fatores somados determinam o valor do chamado fator de classificação de transmissão (*transmission rating factor*), ou Fator R.

$$R = R_o - I_s - I_d - I_{e-eff} + A \quad (2.1)$$

O valor do escalar R parte da máxima qualidade medida pela escala, 100, e decresce à medida que são subtraídos os índices relativos aos fatores de degradação na comunicação, sendo 0 mínimo da escala. O fator R, resultante da análise dos parâmetros de uma conversação num determinado instante, pode ser relacionado com um valor esperado de MOS, e assim mais facilmente associado a uma avaliação subjetiva de qualidade. A relação exposta em 2.2 (ITU, 2005) demonstra a relação matemática entre o fator R e a escala MOS, exposta graficamente na figura 2.1. Já a tabela 2.2 relaciona estas duas escalas com a avaliação subjetiva esperada dos usuários.

Se  $R < 0$  :  $MOS = 1$

Se  $0 \leq R \leq 100$  :  $MOS = 1 + 0,035 \cdot R + 7 \cdot 10^{-6} \cdot R \cdot (R - 60) \cdot (100 - R)$  (2.2)

Se  $R > 100$  :  $MOS = 4,5$

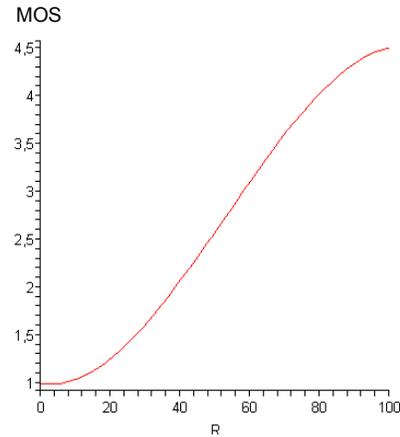


Figura 2.1: Relação MOS x Fator R

Tabela 2.2: Relação entre a escala MOS e o fator R com a opinião subjetiva dos usuários

<i>Fator R</i>	<i>Satisfação dos Usuários</i>	<i>MOS</i>
100		4,5
	Muito Satisfeitos	
90		4,3
	Satisfeitos	
80		4,0
	Alguns Insatisfeitos	
70		3,6
	Muitos Insatisfeitos	
60		3,1
	Quase Todos Insatisfeitos	
50		2,6
	Não Recomendado	
0		1,0

Fontes: ORTIZ, 2001. Figure 1; LUSTOSA et. al, 2004. Tabela 1.

Evidentemente, para que o Modelo E retratasse a percepção do usuário de forma fidedigna, todos os fatores considerados na equação de determinação do fator R foram modelados após muitos experimentos subjetivos. O resultado deste estudo, em resumo, será apresentado a seguir, nos itens que representam cada um dos fatores presentes na equação 2.1.

### 2.3.1 $R_0$ – Fator Relação Sinal-Ruído Básico

Basicamente,  $R_0$  representa a relação sinal-ruído da transmissão no ponto 0 dBr. Evidentemente, como mostra a equação abaixo (2.3), os parâmetros que modelam este fator são baseados na intensidade do sinal e do ruído total do sistema (por exemplo, ruídos no circuito e no ambiente).

$$R_0 = 15 - 1.5(SLR + N_0) \quad (2.3)$$

Onde SLR, ou *Send Loudness Rating* (classificação do volume de envio), diz respeito ao volume em dB do microfone em relação ao ponto 0 dBr. E o termo  $N_0$ , medido em dBm0p, refere-se à soma das potências de todas as fontes de ruído.

Em (ITU, 2005) encontra-se um detalhamento do cálculo do termo  $N_0$ . Todavia, como a infra-estrutura de telefonia não faz parte do objeto de análise deste trabalho, o valor de  $R_0$  resultante do cálculo executado com os valores padrões indicados na recomendação será utilizado, ou seja, 94,77.

### 2.3.2 $I_s$ – Fator de Falhas Simultâneas

A soma de todas as falhas que podem acontecer mais ou menos simultaneamente com a voz é representada pelo termo  $I_s$  do Modelo E (ITU, 2005). De acordo com a recomendação da ITU-T, o valor de  $I_s$  é determinado por três tipos de degradações: volume excessivo ( $I_{olr}$ ), retorno (*sidetone*) não-ótimo ( $I_{st}$ ) e distorção de quantização ( $I_q$ , não inclui distorções causadas por algoritmos de compressão de voz). Em (ITU, 2005) encontra-se as equações que relacionam as grandezas mensuráveis pela engenharia de telecomunicações com cada um destes fatores de falha. No entanto, nota-se que várias destas grandezas estão presentes também na determinação de outros termos da equação (2.1), o que afirma que, mesmo o Modelo E sendo formado por diferentes fatores de falhas, grandezas reais do sistema podem influir em mais de um dos termos.

Novamente, assim como o fator  $R_0$ ,  $I_s$  não possui nenhuma relação com as características da rede e, portanto, não é de interesse deste trabalho estudar sua influência na qualidade de um sistema de comunicação. Desta forma,  $I_s$  será substituído pela constante 1,41, obtida através de cálculo utilizando os valores padrões da recomendação e em concordância com (LUSTOSA et. al, 2004).

### 2.3.3 $I_d$ – Fator de Falhas com Atraso

Este termo modela a degradação na avaliação feita pelos usuários referente a falhas que ocorrem com atraso em relação ao sinal da voz. Três diferentes fontes de falha são somadas com igual peso na determinação do fator  $I_d$ : eco no transmissor ( $I_{dte}$ ), eco no receptor ( $I_{dle}$ ) e atraso fim-a-fim demasiado ( $I_{dd}$ ), como está exposto na expressão 2.4.

$$I_d = I_{dte} + I_{dle} + I_{dd} \quad (2.4)$$

A degradação percebida pelo eco no lado transmissor (falante) pode ser descrita segundo a equação 2.5 (ITU, 2005).

$$I_{dte} = \left[ \frac{R_{oe} - R_e}{2} + \sqrt{\frac{(R_{oe} - R_e)^2}{4} + 100} - 1 \right] (1 - e^{-T}) \quad (2.5)$$

Onde, substituindo as grandezas que não dizem respeito ao atraso da rede por seus valores padrões, sugeridos na recomendação, tem-se:

$$R_{oe} = -1.5(N_o - RLR) = 94,77 \quad (2.6)$$

$$R_e = 80 + 2.5(TERV - 14) \quad (2.7)$$

$$TERV = TELR - 40 \log \frac{1 + \frac{T}{10}}{1 + \frac{T}{150}} + 6e^{-0.37T^2} \quad (2.8)$$

Sendo que o termo TELR se refere à avaliação do volume do eco no lado transmissor e possui valor recomendado de 65 dB segundo (ITU, 2005). E T simboliza o atraso médio do sinal entre o lado receptor e o ponto do circuito onde ele é acoplado, criando uma fonte de eco (tipicamente este ponto é chamado de híbrida na telefonia convencional, onde é realizada a conversão de 2 para 4 fios). Abaixo, na figura 2.2, é possível visualizar as três variáveis diretamente relacionadas ao atraso na transmissão do sinal: T, T<sub>a</sub> e T<sub>r</sub>.

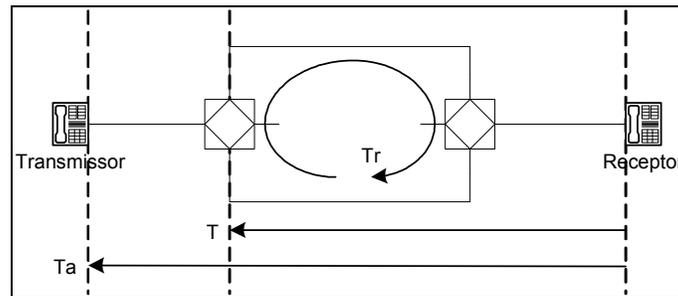


Figura 2.2: Definição das variáveis relativas ao atraso na transmissão

Desta forma, a equação determinante de  $R_e$  na análise realizada fica definida pela equação 2.9, onde T permanece como variável por se tratar de uma grandeza que será observada neste trabalho. E na figura 2.3, em seguida, visualiza-se a degradação gerada pelo tempo de transmissão do sinal no fator  $I_{dte}$  (relativo ao eco percebido pelo transmissor), quando a rede segue os parâmetros recomendados em (ITU, 2005).

$$R_e = 207,5 - 100 \log \frac{1 + \frac{T}{10}}{1 + \frac{T}{150}} + 6e^{-0.37T^2} \quad (2.9)$$

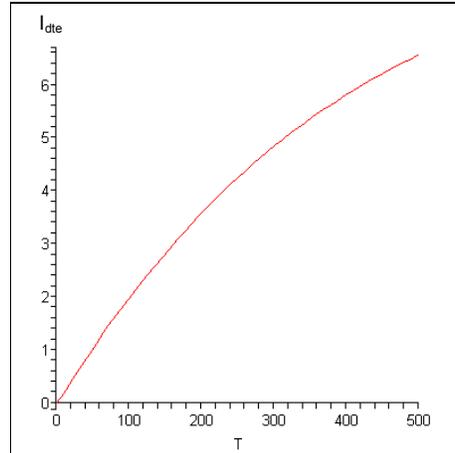


Figura 2.3:  $I_{dte}$  vs.  $T$  (ms)

Deve ser ressaltado que, no caso de  $T < 1$ ms, o eco no lado transmissor deve ser considerado *sidetone* e, assim,  $I_{dte}=0$ . Além disto, a análise feita para a obtenção da equação 2.9 só é válida enquanto o parâmetro STMR, referente à avaliação do *sidetone*, estiver dentro da faixa de 9 a 20 dB (neste caso, mais especificamente, é considerado 15 dB).

Ainda segundo (ITU, 2005), a parcela referente ao eco percebido no lado do receptor é descrita pela equação 2.10.

$$I_{dte} = \frac{R_o - R_{le}}{2} + \sqrt{\frac{(R_o - R_{le})^2}{4} + 169} \quad (2.10)$$

Onde:

$$R_{le} = 10.5(WEPL + 7)(T_r + 1)^{-0.25} \quad (2.11)$$

Sabendo que WEPL (*Weighted Echo Path Loss*) representa a atenuação do eco ao longo do caminho de ida e volta do sinal de voz, ou seja, se refere o eco percebido pelo receptor, e seu valor padrão é 110 dB segundo (ITU, 2005),  $R_{le}$  pode ser representado segundo a equação 2.12. E baseado nas mesmas suposições, o incremento de  $I_{dte}$  de acordo com o atraso  $T_r$  no circuito pode ser visto na figura 2.4. Nota-se que o fator  $I_{dte}$ , nestas condições, não apresenta grande impacto na qualidade da voz avaliada.

$$R_{le} = 1228,5(T_r + 1)^{-0.25} \quad (2.12)$$

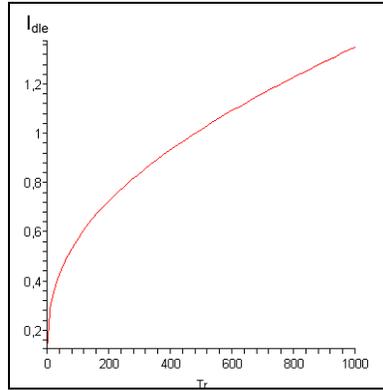


Figura 2.4:  $I_{dle}$  vs.  $T_r$  (ms)

O último dos três fatores de falha referente ao atraso no sistema de comunicação é o  $I_{dd}$ , que representa a degradação percebida pelos usuários, mesmo na ausência total de eco, por causa um atraso demasiado a transmissão do sinal de voz. Este parâmetro é dos mais importantes na análise feita neste trabalho, pois será diretamente afetado pelas características da rede usada na conexão.

O modelo do fator  $I_{dd}$  (atraso absoluto) é mostrado nas relações apresentadas em (2.13), a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Se } T_a \leq 100 \text{ ms, } I_{dd} &= 0 \\ \text{Se } T_a > 100 \text{ ms, } I_{dd} &= 25 \left\{ \left( 1 + X^6 \right)^{\frac{1}{6}} - 3 \left( 1 + \left[ \frac{X}{3} \right]^6 \right)^{\frac{1}{6}} + 2 \right\} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Onde:

$$X = \frac{\log\left(\frac{T_a}{100}\right)}{\log 2} \quad (2.14)$$

Sendo que  $T_a$  representa o atraso absoluto entre o transmissor e o receptor, pode-se observar na figura 2.5 o gráfico de  $I_{dd}$  em função deste atraso, já demonstrando a degradação causada na qualidade de voz se considerado apenas o atraso na transmissão. Neste gráfico já possível verificar o chamado “joelho” próximo ao ponto onde  $T_a$  é 175 ms (ou mais precisamente 177 ms, como mostrado em (COLE; ROSENBLUTH, 2001)).

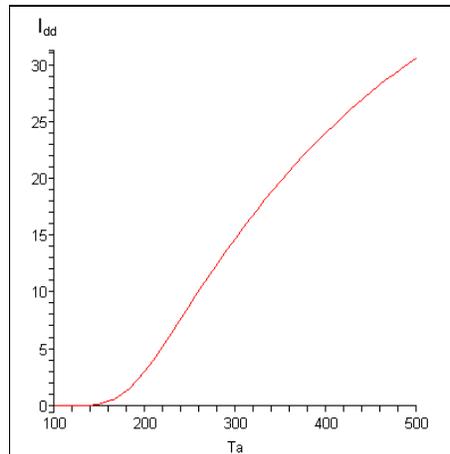


Figura 2.5:  $I_{dd}$  vs.  $T_a$  (ms)

Aspecto muito importante na monitoração da qualidade da voz, o parâmetro  $I_{dd}$  possui várias aproximações propostas para reduzir sua complexidade computacional (COLE; ROSENBLUTH, 2001 e CLARK, 2001), acelerando os cálculos realizados em tempo real. Mas, embora ambas as aproximações retornem ótimos resultados para baixos atrasos, elas apresentam diferenças significativas quando este ultrapassa 300 ms. E como o objetivo deste trabalho não é sugerir um método de avaliação *online*, a continuação será baseada no modelo matemático apresentado na equação 2.13.

Verifica-se então que o fator  $I_d$ , que modela a degradação sentida por usuários em relação à falhas com atraso relativo ao sinal de voz, pode ser descrito neste trabalho como dependente unicamente de  $T$ ,  $T_a$  e  $T_r$ . Mas o ideal, evidentemente, é que estas três variáveis também possam ser descritas uma em função da outra, simplificando ainda mais o cálculo do fator  $I_d$ . Tanto em (LUSTOSA et. al, 2004), como em (COLE; ROSENBLUTH, 2001) e (COUPECHOUX; KUMAR; BRIGNOL, 2004), isto é feito co-relacionando as variáveis como é feito em 2.15.

$$T = T_a = T_r / 2 \quad (2.15)$$

Analisando a afirmação anterior, se pode notar que para a maioria das aplicações de telefonia IP o valor da variável  $T$  é realmente muito próximo de  $T_a$ . Isto porque em circuitos puramente IP não existem híbridas (acoplamento entre circuitos 2 e 4 fios), fazendo com que estas duas variáveis tenham exatamente a mesma grandeza. Já em sistemas híbridos (onde existe conexão com a telefonia analógica convencional), o atraso usual entre o elemento conversor de 2 para 4 fios (dentro do próprio *gateway*) e o terminal (aparelho telefônico ou central), além de dificilmente mensurável, é relativamente pequeno. Assim, se o sistema estiver conectado diretamente na rede de telefonia ‘fim’ da chamada, o atraso adicionado pela transmissão do sinal sobre o fio de cobre torna-se desprezível frente aos outros atrasos inseridos no sistema. A exceção a esta regra encontra-se na utilização de um *gateway* VoIP interconectado a outra rede de comunicação com caminho extenso, como uma rede de telefonia móvel ou chamadas de longa distância dentro da rede convencional. Mas, para efeito de exemplificação, se o equipamento estiver conectado a uma central pública, com distância da ordem de alguns quilômetros, isso ainda assim não comporia parte relevante do atraso total de um sistema de telefonia IP, como é mostrado em 2.16.

$$\begin{aligned}
 v_{cu} &\approx 0,76 \times c = 227,84 \text{ (km/s)} \\
 d &= 5 \text{ (km)} \\
 t &= d / v \approx 22 \text{ (\mu s)}
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

Observa-se nos cálculos acima que, mesmo havendo uma distância de 5 km entre a híbrida do sistema e o terminal, a diferença de atraso de  $T_a$  para  $T$  é de apenas 22  $\mu$ s (considerando a velocidade de propagação do sinal no par metálico igual a 76% da velocidade da luz no vácuo (HUSTON, 2003)). Sendo assim, a aproximação  $T_a=T$  parece bastante razoável na maioria dos casos, e diferenças maiores devem ser programadas previamente pelo usuário. Neste caso, a ITU (2003-a) oferece uma tabela (A.1) com os atrasos típicos dos sinais em diversos elementos de transmissão para planejamento de redes.

Todavia, a mensuração passiva de atrasos numa única direção da rede é uma tarefa bastante complexa. A sincronização dos relógios, condição *sine qua non* para esta tarefa, ainda é objeto de vários estudos, e dependendo da precisão requerida exige o uso de dispositivos auxiliares para efetuar a medição de tempo, como GPS. Desta forma, a grandeza mensurável utilizada na obtenção de todos os atrasos na transmissão é o tempo de ida-e-volta, ou *round trip time* (RTT). Este tempo, que equivale exatamente a  $T_r$  considerando-se sistemas telefônicos convencionais, pode ser medido com base no atraso entre o sinal real e seu eco, gerado pela reflexão da híbrida do lado receptor (PSYTECHNICS, 2002). Nestes casos, a aproximação proposta em 2.15 para determinarmos  $T$  e  $T_a$  a partir de  $T_r$  é de boa precisão, pois tipicamente os caminhos físicos de ida e volta são os mesmos e a transmissão é do tipo TDM, o que garante que os atrasos nos dois sentidos sejam muito similares.

No entanto, pensando-se nos sistemas de telefonia puramente IP,  $T_r$  ganha outro significado físico, pois se sabe que nestes casos não existem circuitos de híbrida envolvidos. A medição do RTT nestes sistemas é feita por protocolos como o RTCP, onde o tempo medido corresponde ao atraso dos pacotes na rede mais a latência de chegada ao nível da interface RTP<sup>1</sup> (FRIEDMAN; CACERES; CLARK, 2003). Deste ponto para cima (níveis de abstração mais altos), o atraso é considerado como parte do sistema terminal, ou seja, está inserido na aplicação de voz do equipamento de telefonia IP. Para melhor situar esta interface dentro do contexto, é mostrado graficamente na figura 2.6 um modelo típico de equipamento habilitado para participar de chamadas multimídia (utilizando SIP como protocolo de sinalização), onde é possível visualizar-se as camadas usualmente envolvidas.

---

<sup>1</sup>Da definição feita na RFC 3611, tal interface pode ser considerada como o nível de comunicação entre as camadas UDP e RTP. Por exemplo, a multiplexação dos quadros de voz em um único quando RTP é considerada parte da camada de aplicação

Aplicações			
Áudio	Vídeo	Controle/chamada	
G.711 G723.1 G.729	H.261 H.263	SIP/SDP	SAP
RTP/RTCP			
Camada de Convergência TCP/UDP (TUCL)			
UDP		TCP	
IP			
Enlace			
Camada Física			

Figura 2.6: Modelo de Terminal VoIP (SIP)

Então, observando a figura anterior e tendo em mente a definição de RTT (também chamado RTD, *Round Trip Delay*) feita na RFC 3611 (FRIEDMAN; CACERES; CLARK, 2003), vê-se que este tempo engloba apenas o atraso de ida-e-volta dos pacotes na rede e em pequena parte do sistema dos equipamentos terminais. É verdade também, que diferentemente dos circuitos TDM, o caminho do áudio dentro das redes de pacotes pode ser bem assimétrico. Os pacotes podem ir para o receptor por um caminho e voltar por outro diferente. Ou ainda, podem ter atrasos variados de acordo com a intensidade dos outros fluxos que trafegam numa dada direção. Mesmo assim, a simplificação que considera a metade do valor de RTT como sendo o atraso unidirecional na rede continua sendo amplamente utilizada, por causa da dificuldade na sincronização dos relógios, citada anteriormente.

Contudo, além do RTD, estes equipamentos inserem uma série de outros atrasos significativos no caminho do áudio (boca-orelha), influenciando negativamente na avaliação do termo  $I_{dd}$  do modelo E. E como é de total interesse para esta pesquisa se conhecer o valor de  $I_{dd}$  para que seja estimada a qualidade da voz em diversas aplicações com redes IEEE 802.11, serão analisados a seguir os atrasos considerados relativos ao sistema terminal (*end system delay*) na RFC 3611 (RTCP XR (FRIEDMAN; CACERES; CLARK, 2003)).

### 2.3.3.1 Atraso Inserido pela Compressão de Voz

É a soma dos atrasos impostos ao sistema por efeito do codificador de voz usado na comunicação. Tipicamente, três diferentes características do sistema de compressão de áudio são consideradas na mensuração do atraso total:

- Largura do quadro: se refere ao tempo de informação de voz contido num único quadro/amostra;
- Atraso de processamento: se refere ao tempo gasto, após a coleta de todas as amostras de voz necessárias, para o sistema gerar um quadro. Também se refere ao tempo de decodificação do quadro de voz no equipamento receptor. Ambos são atrasos difíceis de se avaliar de forma generalizada, pois é dependente também do desempenho do hardware. É sugerido pela ITU

(2003-a), que este atraso (codificação + decodificação) seja considerado igual à largura de um quadro, que seria o pior caso. Mas, como pode ser visto na tabela 2.3, este trabalho usará como referência um guia da Cisco Systems (2005), que além de ser publicado pela fabricante majoritária de equipamentos para VoIP, se assemelha a experiência pessoal do autor na indústria;

- Atraso de *look ahead*: se refere ao tempo de amostragem extra que alguns codificadores necessitam após a amostragem do quadro.

Evidentemente, para cada codificador de voz os valores dos atrasos mudam. Desta forma, são apresentados na tabela 2.3 os valores típicos destes atrasos, mas apenas para os codificadores de interesse na pesquisa.

Tabela 2.3: Atrasos típicos de alguns codificadores de voz (ms)

<i>Codificador</i>	<i>Algorítmico</i>		<i>Processamento</i>		<i>TOTAL</i>
	<i>Quadro</i>	<i>Look ahead</i>	<i>Comp.</i>	<i>Descomp.</i>	
G.711	0,125 <sup>1</sup>	0	<1 <sup>2</sup>	<1 <sup>2</sup>	< 2
G.729A	10	5	10 <sup>3</sup>	1 <sup>4</sup>	26
G.723.1	30	7,5	20 <sup>3</sup>	2 <sup>4</sup>	59,5

Fonte: CISCO SYSTEMS, 2005.

### 2.3.3.2 Atraso Inserido pelo Buffer de Compensação do Jitter da Rede

Como sabemos, existem várias diferenças entre as redes IP e as redes TDM. Uma das principais é que as redes de pacotes não sincronizam os seus fluxos por divisão no tempo (*timeslots*). Isso significa que os pacotes de um mesmo fluxo não passarão pela rede de maneira perfeitamente cadenciada, como acontece nos equipamentos TDM, mas sim obedecerão as regras de QoS da rede e apresentarão mais ou menos atraso de acordo com o tráfego total naquele instante, ou ainda, de acordo com as diferentes rotas percorridas. Assim sendo, mesmo que o equipamento transmissor envie pacotes de voz com latência fixa (como por exemplo, 30 ms, no caso do codificador G.723.1), não existem garantias prévias de que estes chegarão com a mesma cadência no receptor. Por outro lado, o terminal receptor precisa reproduzir estes quadros de voz continuamente, sem interrupções, exatamente como eles foram amostrados pelo transmissor, no intuito de formar o mesmo som captado e enviado.

Para fazer isso, insere-se um componente compensador de *jitter* (*dejittering buffer*, ou ainda *jitter buffer*, como é comumente chamado) no dispositivo fim do caminho da mídia. Assim a variação do intervalo entre as chegadas dos pacotes pode ser “amortecida”, permitindo que a reprodução do áudio seja feita de forma contínua para o

<sup>1</sup>Indicou-se o valor de ‘Quadro’ para o codificador G.711 por conveniência na formatação da tabela. Na realidade ele trabalha baseado em amostras.

<sup>2</sup>Atraso da ordem de poucas dezenas de ciclo de máquina. Será desprezado nas análises feitas no decorrer do capítulo 5.

<sup>3</sup>Valor de referência para o pior caso, indicado em (CISCO SYSTEMS, 2005). O valor real é dependente da implementação de software, da capacidade de processamento de hardware e a condição de carga do equipamento.

<sup>4</sup>Como sugerido em (CISCO SYSTEMS, 2005), o tempo de descompressão pode ser considerado equivalente a 10% do tempo de compressão.

ouvinte. Mas o problema é que este compensador de *jitter* nada mais é que uma fila de pacotes (*buffer*) armazenados para posterior reprodução. E esse *buffer* acaba gerando ainda mais atraso no caminho boca-orelha e, por conseguinte, influenciando no fator  $I_{dd}$  de degradação da qualidade de voz.

Existem diversas implementações de *dejittering buffer*, e cada uma pode possuir muitas combinações de parâmetros de funcionamento. Mas em geral, estes *buffers* tendem a analisar um histórico recente do *jitter* da rede e buscar um estado de adaptação às condições atuais da transmissão. *Buffers* de profundidade fixa também podem ser utilizados, mas eles podem criar um atraso demasiado ou também não ser de tamanho suficiente para amortecer as variações numa dada condição da rede. Entretanto, mesmo a versão adaptativa deve receber limitações, como uma profundidade máxima e uma taxa de perda máxima aceitável. Isso se deve ao fato de não considerarmos válida uma chamada onde o atraso excede um valor aceitável, mesmo que esta esteja sem perda alguma de pacotes (exatamente a falha modelada pelo fato  $I_{dd}$  do modelo E). Outro ponto importante é o descarte, por parte do algoritmo de compensação, do percentual de pacotes que chegam com atraso muito acima da média (ou mesmo que nunca chegam, como é o caso de pacotes perdidos na rede). Tipicamente, muitos codificadores de voz têm boas respostas sob pequenas taxas de perdas (abaixo de 5%), como veremos no modelo do fator  $I_{e-eff}$ , e isso permite que o buffer não cresça demasiadamente quando “eventuais” pacotes têm sua chegada atrasada.

Todavia, nesta dissertação, a análise do atraso dos pacotes na rede de “transporte” será considerada uma constante com dois possíveis valores, 0ms ou 100 ms, para efeito de comparação dos resultados. Dessa forma, toda a variação do atraso na chegada dos pacotes aos terminais será consequência unicamente da camada de acesso (MAC) da rede IEEE 802.11g, explicitando sua influência na comunicação. E a profundidade do buffer de dejitter será fixa e calculada individualmente para cada cenário, levando em consideração os outros atrasos e a taxa de perda aceitável.

### 2.3.3.3 Atraso de Multiplexação

É chamado de atraso de multiplexação o tempo de acúmulo, numa dada camada de software, dos quadros recebidos de uma camada superior. Por exemplo, o agrupamento de quadros de voz (*frames* do codificador) dentro de um único quadro RTP.

Nenhum sistema de comunicação IP é obrigado a realizar multiplexação em nenhum nível, mas isso normalmente é oferecido aos usuários, como opção ou como padrão. Isto se dá porque o uso de multiplexação, especialmente com codificadores de baixa latência, diminui o gasto de banda com informações de cabeçalho dos protocolos, aumentando assim a eficiência no uso da rede.

Tipicamente, a multiplexação pode ocorrer em dois pontos dentro de um sistema VoIP: na camada RTP e/ou na camada UDP. Segundo (FRIEDMAN; CACERES; CLARK, 2003), o atraso gerado na camada RTP, quando esta agrupa quadros de voz codificada, é considerado como referente ao sistema terminal; e o atraso gerado dentro do nível UDP, enquanto são coletados quadros RTP, diz respeito ao atraso na rede (e por isso é incluído no RTT anunciado pelo protocolo RTCP). A experiência do autor demonstra que o primeiro tipo de multiplexação é o mais utilizado atualmente em equipamentos comerciais, e por isso será utilizado também neste trabalho. Na tabela 2.4 são apresentados os dados referentes à multiplexação a ser considerada nos ensaios realizados posteriormente.

Tabela 2.4: Efeito da multiplexação de quadros de voz proposta

<i>Codif.</i>	<i>Quadro (ms)</i>	<i>Quadro (byte)</i>	<i>Taxa<sup>1,2</sup> (kbit/s)</i>	<i>Ef.<sup>2</sup> (%)</i>	<i>Mult.</i>	<i>Taxa<sup>2</sup> Mult. (kbit/s)</i>	<i>Ef.<sup>2</sup> Mult.x (%)</i>	<i>Atraso Mult. (ms)</i>
G.711	0,125	1	384	2,44	160 amos.	80	88,89	19,875
G.729A	10	10	40	20	2 quad.	24	33,33	10
G.723.1	30	24	17	37,5	-	17	37,5	0

Fica claro, analisando a tabela anterior, que para que seja atingido um bom nível de eficiência na transmissão de voz sobre redes IP, é absolutamente necessário que exista multiplexação em algum nível, para vários dos codificadores. Mostrado apenas como um caso extremo, ninguém realmente deve pensar em enviar pacotes com apenas 1 byte de conteúdo, como no caso do G.711, sob pena obter ínfimos 2,44% de eficiência no uso da rede (descontando ainda a sobrecarga dos protocolos de enlace e físico). Mas por outro lado, a multiplexação de quadros G.723.1, por exemplo, pode inserir atraso desnecessário e muitas vezes inaceitável dependendo das condições da rede.

Assim sendo, os valores de multiplexação de quadros de voz constantes na tabela 2.4 foram escolhidos, refletindo tendências de mercado, por não privilegiar tanto a eficiência no uso da banda, mas sim a redução do atraso total da comunicação. Tudo porque, hoje em dia, a oferta de altas taxas na transmissão de dados não é mais empecilho técnico nem financeiro, mas dar garantia de baixos atrasos em algumas redes permanece sendo um desafio para muitos provedores de acesso.

#### 2.3.3.4 Somatório de Atrasos no Caminho da Voz

Na figura 2.7 é apresentado o caminho da voz em uma das direções da transmissão, explicitando os vários elementos somadores no computo do atraso absoluto do áudio. O termo  $T_{\text{term}}$  refere-se à soma dos atrasos no equipamento terminal transmissor, desde a captação analógica do sinal de voz até a multiplexação dos quadros de voz já codificados.  $T_{\text{term}}$ , por outro lado, refere-se ao mesmo caminho de  $T_{\text{term}}$ , porém do lado do equipamento terminal receptor. Ou seja, inclui todo o atraso desde a camada RTP até o alto-falante do ouvinte (quando for o caso). Todavia, nesse caso, a camada RTP inclui ainda o *dejittering buffer*, que normalmente é fonte significativa de atraso na comunicação. Já o atraso de rede,  $T_{\text{rede}}$ , inclui todos os demais atrasos, que ocorrem entre as camadas UDP do equipamento transmissor e esse mesmo nível do receptor. Nota-se que os atrasos inseridos pelos sistemas operacionais (SO) são específicos de cada equipamento e de sua condição instantânea de carga, mas apesar disso foram consideradas pequenas latências (25  $\mu\text{s}$ ) entre as camadas MAC e aplicação, por conta do funcionamento padrão do próprio simulador.

<sup>1</sup>Cabeçalho IP sem campos opcionais.

<sup>2</sup>Os cálculos de taxa e eficiência de transmissão consideram apenas até o nível de rede (IP). Para cálculo dessas grandezas no nível físico, devem-se adicionar os protocolos de enlace e físico na análise.

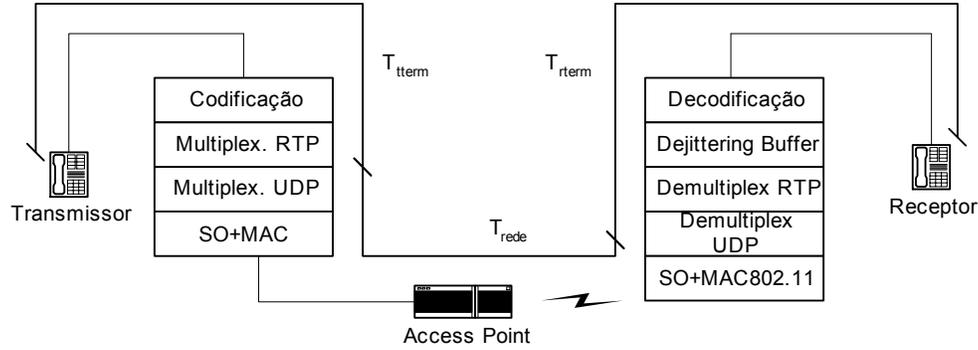


Figura 2.7: Diagrama dos atrasos no sistema de comunicação

Lembrando o termo  $T_a$ , do modelo E, verifica-se que:

$$T_a = T_{tterm} + T_{rede} + T_{rterm} \quad (2.17)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} T_{tterm} &= (\text{tempo de transmissão, no par metálico, do áudio captado}) + T_{\text{codec\_algoritmico}} + \\ &\quad + T_{\text{codec\_compressão}} + T_{\text{multiplex\_rtp}} \\ T_{rede} &= T_{\text{multiplex\_udp}} + (\text{latência no SO do transmissor}) + \\ &\quad + T_{\text{mac\_estação}} (\text{tempo de acesso ao meio no transmissor}) + \\ &\quad + (\text{tempo de transmissão na rede, até o access point}) + (\text{latência dentro do AP}) + \\ &\quad + T_{\text{propagacao}} + \\ &\quad + (\text{latência no SO do receptor}) + T_{\text{demultiplex\_udp}} \\ T_{rterm} &= T_{\text{demultiplex\_rtp}} + T_{\text{dejitter\_buffer}} + T_{\text{codec\_descompressão}} + \\ &\quad + (\text{tempo de transmissão no par metálico, até o alto - falante}) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Onde, de acordo com os pressupostos expostos anteriormente, tem-se as mesmas expressões de 2.18 simplificadas como:

$$\begin{aligned} T_{tterm} &= T_{\text{codec\_algoritmico}} + T_{\text{codec\_compressão}} + T_{\text{multiplex\_rtp}} \\ T_{rede} &= (\text{latência no SO do transmissor}) + \\ &\quad + T_{\text{mac\_estação}} (\text{apenas quando transmissor = estação móvel}) + \\ &\quad + (\text{tempo de transmissão na rede, até o access point}) \\ &\quad + (\text{latência no SO do receptor}) \\ T_{rterm} &= T_{\text{dejitter\_buffer}} + T_{\text{codec\_descompressão}} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Deve-se ressaltar, novamente, que os atrasos mais relevantes para este trabalho, dentro do termo  $T_{rede}$ , são os tempos de acesso ao meio impostos pelo protocolo MAC da norma IEEE 802.11, seja em transmissões a partir de uma estação ou do AP. Os demais atrasos também somam parte muito importante nos sistemas de voz sobre IP, mas são extremamente variáveis de acordo com a topologia da rede e com condição de carga instantânea. Desta forma, a supressão desses atrasos nos ensaios deste trabalho ajudará na interpretação da influência do protocolo MAC das WLANs na qualidade da voz transmitida. Mas, para aproximar os resultados daqueles esperados em cenários

reais, também foi considerado em alguns cenários um atraso de 100 ms, a ser creditado ao tempo dos pacotes em redes externas ao BSS. Entretanto, para a aplicação desta metodologia em outros cenários, deve-se somar ao resultado das simulações realizadas mais adiante, os valores de atraso correspondentes.

$T_{\text{mac\_estação}}$  é a variável de mais importância nas simulações propostas, pois seu estudo caracterizará a capacidade de utilizarmos essas WLANs em arquiteturas de comunicação IP *full-duplex*. Vale lembrar que, sendo VoIP uma comunicação bidirecional,  $T_{\text{mac\_estação}}$  pode corresponder tanto ao atraso no acesso ao meio físico da rede WLAN IEEE 802.11 de uma estação qualquer, quanto do próprio AP.

$T_{\text{codec\_algorítmico}}$ ,  $T_{\text{codec\_compressão}}$  e  $T_{\text{codec\_descompressão}}$  são dependentes do codificador de voz usado, e seus valores podem ser determinados pela tabela 2.3.  $T_{\text{multiplex\_rtp}}$  também é um atraso do codificador, e os valores arbitrados para esta variável estão tabulados na tabela 2.4.

$T_{\text{dejitteer\_buffer}}$  corresponde ao atraso no *buffer* de dejitter, e será arbitrado, em cada caso simulado, de acordo com a variação do atraso  $T_{\text{mac\_}}$  (seja  $T_{\text{mac\_estação}}$  ou  $T_{\text{mac\_ap}}$ ). Dois tamanhos de *buffer* serão utilizados em cada um dos cenários: o primeiro será suficiente para suprimir esta variação em 100% dos pacotes recebidos, enquanto o segundo será dimensionado para permitir uma taxa de perda de pacotes de 2%. Isto é interessante para quantificarmos a relação entre a taxa de perdas e o atraso fim-a-fim em relação à qualidade de voz percebida pelos usuários. Todavia, fica evidenciado que os *buffers* propostos são elementos idealizados, que na prática não existem devido ao desconhecimento prévio, por parte do receptor, da distribuição dos atrasos nos pacotes vindouros. Este modelo ideal é apresentado na equação 2.20, a seguir, onde ‘p’ representa o percentual de perdas aceito, ‘t(1-p)’ representa o tempo de transmissão de (1-p) % dos pacotes e ‘t’ se refere ao mínimo tempo de transmissão na rede. Moffaert e Vleeschauwer (2001), entre vários outros autores, apresentam diversos algoritmos de compensação de *jitter* adaptativos que tentam se aproximar deste modelo ideal.

$$T_{\text{jitter}} = t(1 - p) - t \quad (2.20)$$

### 2.3.3.5 Referencial de Atraso

Adicionalmente à escala subjetiva de avaliação da qualidade de voz, MOS, determinada indiretamente pelo Fator R, a ITU propõe a recomendação G.114 (2003-a e 2003-b) para orientar projetos de transmissão de voz em relação ao atraso boca-orelha (ou  $T_a$ , no modelo E). A tabela 2.5, a seguir, mostra as faixas de atraso recomendadas em cada caso.

Tabela 2.5: Valores de Atraso Boca-Orelha Recomendados pela G.114

<i>Faixa de Atraso (ms)</i>	<i>Descrição</i>
0 a 150	Embora algumas poucas aplicações possam ser levemente afetadas por atrasos dentro desta faixa, a vasta maioria será percebida como de “iteratividade transparente” no uso (o atraso não deve ser percebido pelo usuário). Chamadas intra-regionais e locais devem ficar neste intervalo, desde que as redes de acesso sejam bem projetadas (ITU, 2003-b)

150 a 400	Chamadas nesta faixa de atraso ainda são aceitáveis, mas alguns usuários e/ou aplicações podem ser mal avaliadas quanto à qualidade da experiência. Tipicamente, chamadas intercontinentais podem ser enquadradas nesta faixa, pois os usuários já esperam diferença em relação às chamadas locais. (Esta diferença na expectativa, no modelo E, é representada pelo Fator de Vantagem, mostrado mais adiante)
Acima de 400	Inaceitável para questões de planejamento de redes. Mas algumas aplicações de exceção podem ser aceitas nesta faixa de atraso, como por exemplo, em caminhos onde é inevitável a passagem do sinal por dois satélites (localidades muito remotas).

Fontes: ITU, 2003-a e 2003-b; Cisco Systems, 2005

### 2.3.4 $I_{e\text{-eff}}$ – Fator Efetivo de Falhas do Equipamento

Na determinação deste fator são levadas em consideração características intrínsecas dos codificadores de voz utilizados no sistema de comunicação e suas respectivas respostas sob diferentes taxas e tipos de perdas de pacotes. A equação 2.21 mostra a relação do fator  $I_{e\text{-eff}}$  com os parâmetros que constituem seu valor final.

$$I_{e\text{-eff}} = I_e + (95 - I_e) \cdot \frac{Ppl}{\frac{Ppl}{BurstR} + Bpl} \quad (2.21)$$

Em versões anteriores da recomendação G.107, o fator de falha do equipamento,  $I_e$ , era somado diretamente à equação de determinação do fator R (equação 2.1). O seu valor, apesar de baseado em avaliações de testes subjetivos, era variável apenas da taxa de perdas (aleatórias) e, é claro, do próprio codificador escolhido. Já em (ITU, 2005), o termo presente na equação do fator R é o  $I_{e\text{-eff}}$  (*Effective Equipment Impairment Factor*), que modela matematicamente a reação dos usuários, não só quanto a taxa de perda de pacotes, como também a diferentes tipos de perda (aleatórias ou rajadas). Isso garante ao fator  $I_{e\text{-eff}}$  maior fidelidade à natureza das falhas ocorridas em redes reais, pois a grande maioria delas possui probabilidade de perda de um pacote dependente da chegada (ou não) do pacote anterior (ou seja, maior probabilidade de perdas em rajadas).

Mas, o parâmetro  $I_e$  ainda está presente na determinação desse fator de falha, igualmente baseado em testes subjetivos realizados segundo a recomendação P.800 (MOS (ITU, 1996-b)). Seus valores, esperados pela equação 2.15, devem corresponder ao fator de falha do equipamento quando da não ocorrência de perdas de pacotes. Na tabela 2.6, a seguir, observa-se os valores para os três padrões de codificação de voz de interesse neste trabalho: G.711, G.729A e G.723.1 (6,3 kbit/s), além do G.729 e do G.723.1 (5,3 kbit/s), incluídos apenas para efeito de informação. Os valores de  $I_e$  para diversos outros codificadores podem ser encontrados no apêndice I da recomendação G.113 (ITU, 2002, Table I.1, pág. 1). Inclusive, observando-se essa tabela original, percebe-se que a degradação inserida unicamente pela compressão e descompressão da voz, desconsiderando todos os outros fatores de falha, já é significativamente grande em vários dos codificadores de baixa taxa transmissão. Isso quer dizer que, em alguns casos

(como do codificador ADPCM 24 kbit/s, cujo  $I_e$  é 25), existe pouca (ou nenhuma) margem para admissão outras fontes de degradação na qualidade da voz no sistema, como atraso, ruído, eco e perdas.

A variação do fator efetivo de falhas do equipamento,  $I_{e\text{-eff}}$ , de acordo com a taxa de perdas de pacotes é determinada pelo segundo termo do lado direito da equação 2.21, onde aparecem as variáveis Ppl, Bpl e BurstR. Nota-se que, caso a probabilidade de perda de pacote seja nula ( $Ppl = 0$ ),  $I_{e\text{-eff}} = I_e$ . Entretanto, para redes que apresentam uma probabilidade de perda de pacotes maior que 0% ( $Ppl > 0$ ), o valor final de  $I_{e\text{-eff}}$  será acrescido de acordo com a natureza das perdas (aleatórias ou rajadas) e com a habilidade do codificador em contornar situações de quadros faltantes.

Determinado por características próprias do codificador, como por exemplo, o tipo do algoritmo de compressão, a largura do quadro e a efetividade do algoritmo de recuperação de perda de pacotes (PLC), além da multiplexação de quadros de voz arbitrada, o termo Bpl representa a robustez do sistema a perdas de pacotes. Em (ITU, 2002, Table I.3, pág. 2), encontram-se alguns valores provisórios deste fator para quatro codificadores, para uso no planejamento de redes. A tabela 2.6 apresenta quatro desses valores, levando em consideração a multiplexação especificada em outra das colunas. Dos codificadores expostos, apenas o G.711 não conta com um algoritmo de PLC nativo, e por isso foi considerada também a variação do codificador especificada no apêndice I da recomendação G.711 (ITU, 1999), que aumenta mais de seis vezes a robustez do mesmo codificador sem PLC.

Tabela 2.6: Valor de  $I_e$  para alguns codificadores de voz na ausência de falhas

<i>Tipo de Codificador</i>	<i>Referência</i>	<i>Taxa (kbit/s)</i>	$I_e$	<i>quadros / pacote</i>	<i>Bpl</i>
PCM	G.711	64	0	80 (10 ms)	4,3
PCM	G.711 + PLC	64	0	80 (10 ms)	25,1
CS-ACELP	G.729	8	10		
CS-ACELP	G.729A + VAD	8	11	2	19
ACELP	G.723.1	6,3	15	1	16,1
MP-MLQ	G.723.1	5,3	19		

Fonte: ITU, 2002.

Entretanto, os fatores  $I_e$ , Ppl e Bpl, mencionados anteriormente, suficientes para caracterizar a percepção de qualidade dos usuários quanto às distorções do codificador e quanto a uma determinada probabilidade de perdas de pacotes, não são suficientes para modelar muitas das redes reais. É sabido que a suposição de independência na probabilidade de perda de pacotes (aleatoriedade) é insatisfatória (ITU, 2002), pois as perdas na maioria das redes costumam acontecer em rajadas (*bursts*). Por isso, o modelo E inclui no cálculo do fator  $I_{e\text{-eff}}$  a variável BurstR. Este termo é usado para caracterizar o tipo de perda de pacotes, quantificando o tamanho das séries (rajadas) de pacotes perdidos. Posteriores estudos do impacto das perdas em rajadas ainda estão sendo feitos pelo SG (*Study Group*) 12 da ITU, segundo o apêndice I da recomendação G.113 (ITU, 2002). Mas por enquanto, a melhor forma de se estimar a degradação causada por

perdas de pacotes em série é o uso do fator  $BurstR$ , que significa “taxa de rajada” (*Burst Ratio*), calculado conforme a expressão 2.22.

$$BurstR = \frac{\text{Tamanho médio das rajadas observadas nos pacotes recebidos}}{\text{Tamanho médio das rajadas esperadas para redes com perdas aleatórias}} \quad (2.22)$$

Dessa forma, quando a probabilidade de perda de um pacote é independente da probabilidade de perda de qualquer outro (perdas aleatórias),  $BurstR$  é igual a um. Por outro lado, quando a probabilidade de perda de pacotes em rajadas é maior,  $BurstR$  é maior que um ( $BurstR > 1$ ). Vale lembrar que estas perdas são sempre referentes à entrada do algoritmo decodificador, ou seja, após o *de jittering buffer*. Logo, a performance desse mecanismo de compensação de variação do atraso é peça preponderante na determinação da taxa e da natureza das perdas de pacotes. A seguir, na figura 2.8, pode-se verificar a variação do fator efetivo de falha do equipamento ( $I_{e-eff}$ ), para os codificadores de interesse, quando sob diferentes probabilidades de perda de pacotes de natureza aleatória. As equações correspondentes às curvas do gráfico estão expressas em 2.23, 2.24, 2.25 e 2.26, onde os valores de  $I_e$  e  $Bpl$  foram substituídos pelos correspondentes apresentados na tabela 2.6. Na mesma figura observa-se também, sobre as três curvas, os pontos  $[I_e, Ppl]$  apresentados em tabelas do apêndice I da recomendação G.113 (ITU, 2001-b) para efeito de validação das equações apresentadas, que são baseadas em valores providos pela versão mais atual do mesmo apêndice (ITU, 2002).

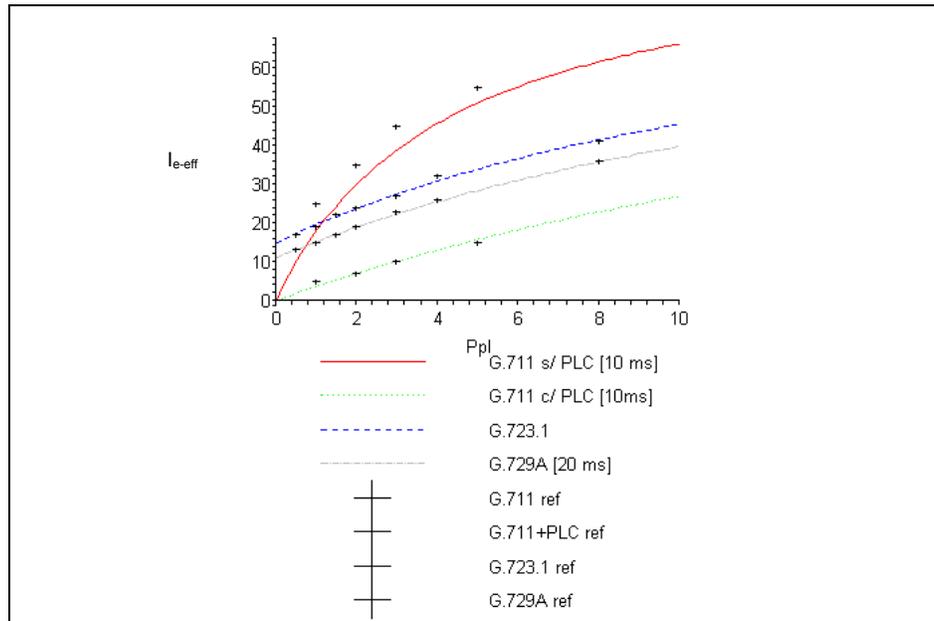


Figura 2.8:  $I_{e-eff}$  x  $Ppl$  (%), para perdas aleatórias.

$$I_{e-eff}(G.711@10ms) = \frac{95 \cdot Ppl}{Ppl + 4,3} \quad (2.23)$$

$$I_{e-eff}(G.711+PLC@10ms) = \frac{95 \cdot Ppl}{Ppl + 25,1} \quad (2.24)$$

$$I_{e\text{-eff}}(G.723.1) = 15 + \frac{80 \cdot P_{pl}}{P_{pl} + 16,1} \quad (2.25)$$

$$I_{e\text{-eff}}(G.729A@20ms) = 11 + \frac{84 \cdot P_{pl}}{P_{pl} + 19} \quad (2.26)$$

Pelo gráfico, fica evidente a equivalência das equações para  $I_{e\text{-eff}}$  propostas com os resultados dos testes subjetivos tabelados em (ITU, 2001-b), tanto para o codificador G.723.1 quanto para o G.729A e o G.711 com PLC. Apenas para o codificador G.711 sem PLC os pontos fornecidos na recomendação citada não se enquadram na curva gerada. Mas deve-se recordar que a tabela mencionada foi concebida em 2001, antes de a ITU-T recomendar um modelo matemático para cálculo do parâmetro  $I_{e\text{-eff}}$ , pois até então o fator de falha de equipamento utilizado no modelo E era o próprio  $I_e$  tabelado. Além disso, nos cálculos posteriores, o parâmetro  $B_{pl}$  considerado para o caso de uso de pacotes G.711 com 20 ms será o mesmo tabelado em (ITU, 2002, tb. I.3), recomendados para perdas redes com aleatórias.

### 2.3.5 A – Fator de Vantagem

O último dos parâmetros de formação do fator R, o fator de vantagem ‘A’, não se refere objetivamente a nenhum tipo de falha no sinal transmitido, mas apenas se propõe a refletir a variação na avaliação do sistema de acordo as diferentes expectativas dos usuários. Tipicamente, este fator representa a tolerância que os usuários têm a pioras na qualidade do serviço de comunicação em troca de alguma vantagem no acesso, como por exemplo, ter mobilidade ou oferta de serviço em regiões longínquas.

Möller (1991) aponta, no mínimo, três componentes que influenciam na expectativa dos usuários:

- As experiências prévias do usuário com sistemas telefônicos (memória);
- a expectativa gerada pelo preço do serviço (onde muitas vezes existe alguma equivalência do tipo “maior preço = maior qualidade de voz”);
- a conveniência para atingir a determinados objetivos com o serviço (por exemplo, a expectativa pode diferir de acordo com a motivação do uso, se particular ou profissional).

Então, como é citado na recomendação ITU G.114 (ITU, 2003-a), por exemplo, os usuários tendem a tolerar mais as degradações na qualidade de voz em chamadas “inter-regionais” (nesse caso, intercontinentais) do que se o mesmo acontecesse em chamadas locais. E é esse fator de vantagem no acesso, sentido pelo usuário e quantificado na tabela 2.7, que tenta modelar um atenuante na avaliação das falhas na transmissão da voz. Mas deve-se ressaltar que estes valores apresentados são provisórios, não foram objeto de estudo em testes subjetivos e, por conseguinte, devem ser utilizados com cautela, sendo considerados um limite máximo para uma dada vantagem (ITU, 2005).

Tabela 2.7: Exemplos provisórios para o fator de vantagem ‘A’

<i>Sistema de Comunicação</i>	<i>Máximo valor de A</i>
Convencional (fixo)	0
Mobilidade intra-prédio	5
Mobilidade em área geográfica ou veículos em movimento	10

Acesso a locais de difícil acesso (conexões com vários saltos de satélite)	20
--	----

Fonte: ITU, 2005, table 1, pág. 7.

Para chamadas VoIP, estritamente, não existe nenhum consenso para o valor do fator A. Lustosa et. al (2004, pág. 5) acredita que no Brasil, devido ao alto custo relativo da telefonia fixa convencional e sua baixa qualidade de serviço, o fator A pode ser considerado um valor positivo. Em (PSYTECHNICS, 2002) o valor recomendado é igual a zero, por considerar este um serviço equivalente ao da telefonia convencional. Ainda, pelo apêndice II da recomendação G.114 (ITU, 2003-a, pág. 12) podemos inferir que o valor de A deve assumir um valor relativo à distância da chamada e a localização dos geográfica dos terminais.

A tudo isso, podemos ainda somar o fato de existirem diferentes perfis de usuários, como sugerido por Wilkie (1994), e estes tendem a avaliar distintamente um mesmo serviço. Esse trabalho afirma que, quando falamos de um novo serviço/produto, se aplica a teoria da difusão na introdução da inovação para os consumidores. Isso quer dizer que a adoção de uma inovação por parte dos consumidores obedece a uma curva S, e de acordo com o momento em que o usuário faz essa adoção ele recai sob uma das 5 classes de usuários: os inovadores, os usuários precoces, a maioria precoce, a maioria atrasada e os retardatários. A seguir, as figuras 2.9 e 2.10 mostram estas curvas de adoção. Descrições mais detalhadas dos perfis de cada um dos grupos de usuários pode ser encontrada também em (ITU, 2003-b).

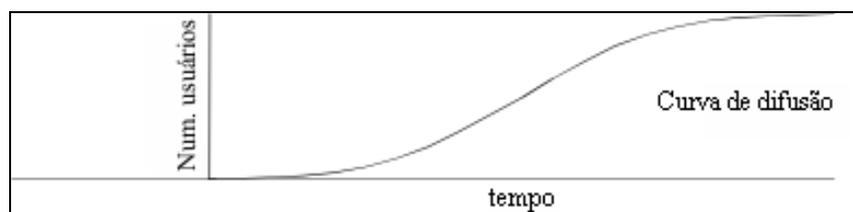


Figura 2.9: Curva de difusão da inovação

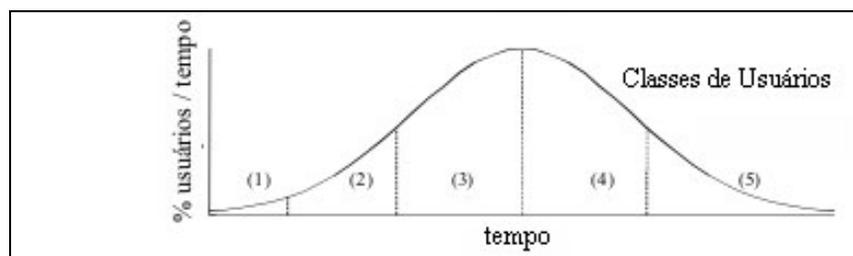


Figura 2.10: Classes de usuários pelo momento da adoção da inovação

Neste trabalho, então, o fator A será considerado nulo, para que posteriormente seja arbitrado de acordo com a conveniência do estudo de caso. Assim, cada tipo de chamada pode ter seu próprio fator de vantagem 'A', de acordo com o tipo de rede, distância geográfica dos terminais, acessibilidade, mobilidade, vantagem econômica, perfil dos usuários e grau de inovação.

### 3 WLAN IEEE 802.11

O padrão proposto pelo IEEE para WLANs é bastante extenso e abrangente, num escopo que vai desde a modulação e transmissão na interface física até a encriptação e gerenciamento dos dados transportados pela camada MAC. Não é pertinente a este trabalho, todavia, apresentar todo o padrão e suas extensões. Nosso interesse está voltado unicamente no estudo dos pontos que influenciam no desempenho de aplicações com características de tempo-real, como a telefonia IP. E estes pontos são basicamente dois: a natureza do protocolo MAC e algumas características da interface física, como a taxa de transmissão.

Por se tratar da apresentação de um padrão, este capítulo foi quase que integralmente baseado nos próprios documentos da IEEE e em seu *handbook* (IEEE, 1999). Por isso, a exceção de referências diferentes das mencionadas anteriormente, sendo estas então citadas no mesmo modelo usado ao longo do texto, as afirmações contidas neste capítulo não conterão nenhuma referência explícita.

#### 3.1 O padrão IEEE 802.11

Lançado em 1997, na sua primeira versão, o padrão 802.11 do IEEE (IEEE, 1997) veio ao encontro das necessidades de um mercado que ansiava por soluções de redes sem-fio com baixo custo e interoperabilidade entre fabricantes (O'HARA; PETRICK, 1999). A partir de então, a vasta maioria dos fornecedores deixou de apostar em soluções proprietárias e passou a desenvolver suas plataformas compatíveis com o padrão da IEEE. Logo em seguida, em 1999, foram lançadas duas extensões à camada física (PHY) inicial, o 802.11a (IEEE, 1999-b) e o 802.11b (IEEE, 1999-c), propiciando um aumento muito significativo na taxa de transmissão, dos originais 2 Mbit/s para até 54 Mbit/s no primeiro caso, e 11 Mbit/s no segundo. Desta forma, o padrão proposto pelo IEEE venceu as últimas reticências do mercado quanto a sua adesão e tornou-se um padrão de fato.

Para referência, a tabela 3.1 mostra todos os trabalhos do grupo 802.11 do IEEE, com seus anexos e extensões.

Tabela 3.1: Padrão IEEE 802.11 e suas extensões

<i>Nome</i>	<i>Descrição</i>	<i>Status</i>
802.11-1999 (R2003)	<i>Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications</i>	Pub.
802.11a-1999	<i>Amendment 1: High-speed Physical Layer in the 5 GHz band</i>	Pub.
802.11b-1999	<i>Supplement to 802.11-1999, Wireless LAN MAC and PHY specifications: Higher speed Physical Layer (PHY) extension in the 2.4 GHz band</i>	Pub.

802.11b-1999/Cor1-2001	<i>Amendment 2: Higher-speed Physical Layer (PHY) extension in the 2.4 GHz band—Corrigendum 1</i>	Pub.
802.11d-2001	<i>Amendment to IEEE 802.11-1999: Specification for Operation in Additional Regulatory Domains</i>	Pub.
802.11e	<i>Amendment to IEEE 802.11-1999: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS) Enhancements</i>	Pub.
802.11F-2003	<i>IEEE Recommended Practice for Multi-Vendor Access Point Interoperability via an Inter-Access Point Protocol Across Distribution Systems Supporting IEEE 802.11 Operation</i>	Pub.
802.11g-2003	<i>Amendment 4: Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band</i>	Pub.
802.11h-2003	<i>Spectrum and Transmit Power Management Extensions in the 5GHz band in Europe</i>	Pub.
802.11i-2004	<i>Amendment 6: Medium Access Control (MAC) Security Enhancements</i>	Pub.
802.11j	<i>Amendment to IEEE 802.11-1999: 4.9 GHz-5 GHz Operation in Japan</i>	Pub.
802.11k	<i>Amendment to IEEE 802.11-1999: Radio Resource Measurement of Wireless LANs</i>	Trab.
802.11m	<i>Amendment to IEEE 802.11-1999: Technical corrections and clarifications</i>	Subs.
802.11n	<i>Amendment to IEEE 802.11-1999: Enhancements for Higher Throughput</i>	Trab.
802.11p	<i>Amendment to IEEE 802.11-1999: Wireless Access in Vehicular Environments</i>	Trab.
802.11r	<i>Amendment to IEEE 802.11-1999: Fast BSS-Transition</i>	Trab.
802.11s	<i>Amendment to IEEE 802.11-1999: IEEE 802.11 ESS Mesh Networking</i>	Trab.
802.11T	<i>Amendment to IEEE 802.11-1999: Performance metrics, measurement methodologies, and test conditions.</i>	Trab.
802.11u	<i>Amendment to IEEE 802.11-1999: InterWorking with External Networks</i>	Trab.
802.11v	<i>Amendment to IEEE 802.11-1999: Wireless Network Management</i>	Trab.

Fonte: IEEE, 2006.

## 3.2 Arquitetura

Compondo uma WLAN IEEE 802.11 existem diversos tipos de componentes, como a estação, o *access point* (AP), o meio físico, o *basic service set* (BSS), o *distribution system* (DS) e o *extended service set* (ESS). A relativa complexidade na arquitetura destas redes é justificada pela robustez e flexibilidade de uso das mesmas.

### 3.2.1 Basic Service Set (BSS)

Toda a arquitetura das WLANs IEEE 802.11 é baseada no BSS. Um BSS é composto por um conjunto de estações (elementos que são conectados ao meio físico sem-fio, como Adaptadores de Rede ou NICs) que se comunicam com, pelo menos, uma outra estação.

Existem dois tipos de BSS, o *Independent BSS* (IBSS) e o *Infrastructure BSS* (ou simplesmente BSS). O primeiro, IBSS, é caracterizado pela inexistência de conexão com outras redes (tipicamente *wired*) e por que todos seus elementos são estações móveis. Neste tipo de configuração, também chamada de *Ad-Hoc*, as estações se comunicam diretamente com pelo menos mais uma estação, e como não existe retransmissão (*relay*), uma estação só conseguirá se comunicar com aquelas estações do IBSS que estiverem em seu alcance diretamente. A Figura 3.1 mostra um BSS em configuração independente (IBSS) e todas as possíveis interações dentro da rede.

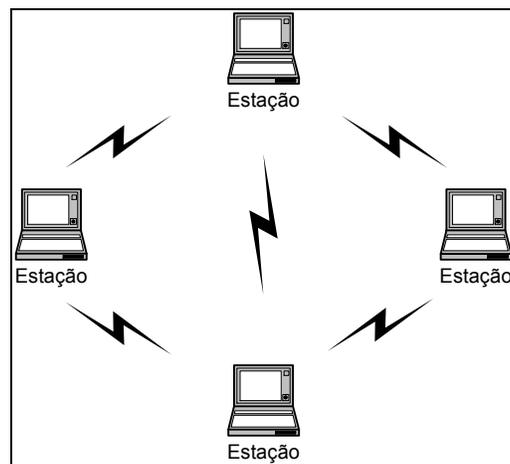


Figura 3.1: *Independent BSS* (IBSS)

O segundo tipo de BSS, o *Infrastructure BSS* ou apenas BSS, inclui em sua configuração um AP. Todas as estações móveis se comunicam com o AP, e é ele o responsável pela conexão com a rede *wired* e pela retransmissão dos pacotes para as outras estações contidas no mesmo BSS (Figura 3.2). Nota-se que, diferentemente de um IBSS, no BSS não existe a possibilidade de conexão direta entre as estações, devendo toda comunicação entre elas passar obrigatoriamente pelo AP. Isto, evidentemente, torna a configuração BSS menos eficiente no uso do meio físico, já que a mesma mensagem deve ser transmitida duas vezes para alcançar seu destino.

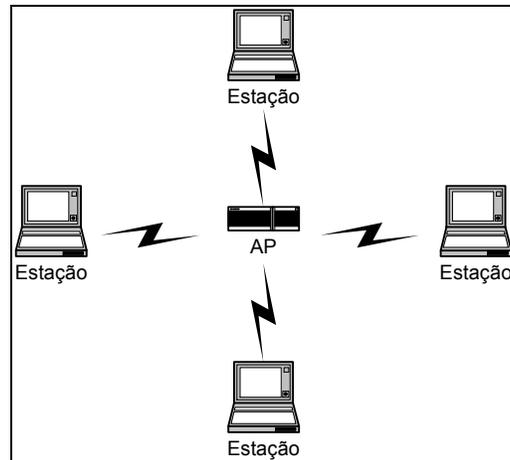


Figura 3.2: *Infrastructure BSS (BSS)*

### 3.2.2 *Extended Service Set (ESS)*

Para fornecer ao usuário mobilidade não apenas dentro do alcance de um AP, mas dentro de toda uma rede geograficamente distribuída, foi criado o ESS. Formado por um conjunto de BSSs (*infrastructure*) que possuem comunicação entre seus APs, o ESS define a área de cobertura da WLAN. A Figura 3.3 mostra um ESS formado por dois BSSs.

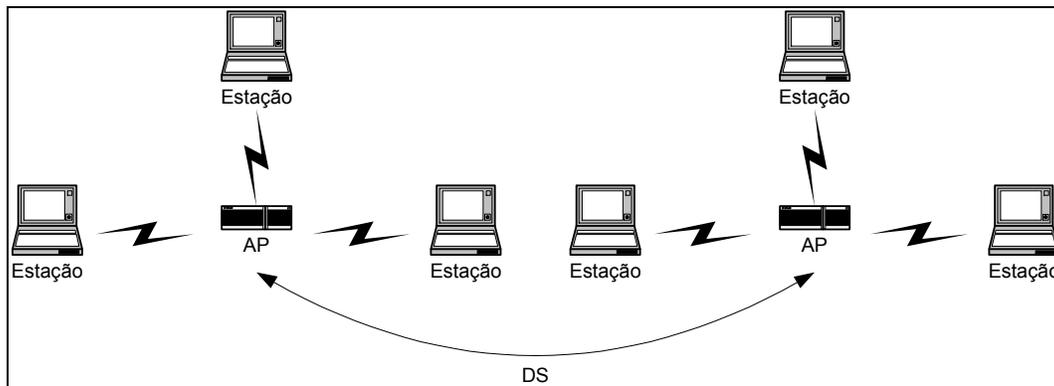


Figura 3.3: *Extended Service Set (ESS)*

### 3.2.3 *Distribution System (DS)*

O DS é a camada de comunicação inter-APs (como mostrado na Figura 3.3) utilizada nos ESS para estender a abrangência da WLAN e prover conectividade com a rede *wired*. Como esta se trata de uma camada abstrata, tal comunicação pode ser realizada independentemente do meio físico, podendo ser tanto *wired* quanto *wireless*.

### 3.2.4 *Services*

Os serviços definidos pela arquitetura IEEE 802.11 são nove e estão divididos em dois grupos: serviços de estação (*Station Services*) e serviços de distribuição (*Distribution Services*).

#### 3.2.4.1 *Station Services*

São quatro serviços, implementados com o intuito de prover a WLAN funcionalidade similar a uma rede *wired*. Os dois primeiros deles, Autenticação e ‘Desautenticação’ (*deauthentication*), são necessários, respectivamente, para provar a identidade de uma estação frente a outra e para coibir o acesso a rede por uma estação previamente autorizada. Privacidade, o terceiro serviço, fornece aos dados trafegados na WLAN segurança equivalente a de uma rede *wired* com acesso físico restrito. Por fim, o último serviço, a entrega dos dados, provê garantia de entrega dos pacotes do nível MAC de uma estação até o nível MAC da estação destino com o mínimo de duplicação nos mesmos.

#### 3.2.4.2 *Distribution Services*

São cinco serviços fornecidos pelos APs a fim de fornecer às estações mobilidade dentro do ESS e permitir conectividade entre a WLAN e a rede *wired*. Estes serviços são: associação, reassociação, desassociação, distribuição e integração. Juntos eles compõem uma camada que reside entre o MAC e o LLC usada para gerenciar o encaminhamento dos pacotes dentro da WLAN e também para aqueles com destinatários externos a rede IEEE 802.11.

Associação tipicamente ocorre apenas uma vez, quando uma estação está entrando (ou reentrando) na WLAN. Com este serviço o AP é capaz saber onde e como enviar os pacotes destinados a uma dada estação, além de alocar recursos e passar a aceitar os pacotes originados nela.

Cumprindo uma função semelhante à Associação, a Reassociação só difere no fato de conter também a informação do AP no qual a estação estava previamente associada. Isto permite que o novo AP contate o anterior e busque por pacotes que estejam esperando para serem entregues à estação ou ainda obtenha outras informação relevantes. Desta forma, é esperado então, que este serviço seja utilizado de acordo com a movimentação da estação dentro do ESS.

Sempre que um AP desejar forçar uma estação a se associar ou quiser que ela não mais utilize os recursos da rede, ele fará uso do serviço chamado ‘Desassociação’ (*disassociation*). Além disso, este serviço também será invocado quando uma estação não mais quiser fazer parte da WLAN.

O serviço de Distribuição, como pode se deduzir pelo nome, é o principal serviço dentre os cinco serviços de distribuição. Ele é o responsável por decidir o caminho que cada pacote recebido pelo AP deve seguir, seja dentro do mesmo BSS, do ESS ou fora rede WLAN.

Por último, o serviço de Integração funciona como um portal entre diferentes redes, formatando os pacotes adequadamente, de acordo a rede de destino. Este serviço pode ser implementado como uma camada existente dentro do AP ou ainda como um componente de rede independente.

### 3.3 MAC

A camada de controle de acesso ao meio (MAC) da norma IEEE 802.11 é a responsável por garantir às camadas superiores a entrega dos pacotes que atravessam o

meio físico altamente ruidoso das redes sem-fio. Além disso, a camada oferece outros serviços a rede, emprestando a WLAN IEEE 802.11 funcionalidade superior ou equivalente a outras LANs *wired*. É o caso das funções de proteção dos dados e de controle de acesso ao meio. No primeiro, a rede provê um serviço de privacidade chamado *Wired Equivalent Protocol* (WEP), que faz uso de um nível de criptografia que se equivale ao nível de proteção dos dados numa rede *wired* instalada num local com acesso restrito. Já a função de controle de acesso ao meio foi projetada de modo a fornecer justiça no compartilhamento do meio físico, com dois diferentes modos de funcionamento: o mecanismo básico, que é coordenado de forma distribuída, e o mecanismo controlado de forma centralizada. E é justamente neste nível que a rede IEEE 802.11 demonstra não ter sido planejada para fornecer diferenciação de serviço e/ou priorização no uso na ocupação do meio físico. Desta forma, serão apresentados neste capítulo detalhes do funcionamento desta camada, iniciando pelo protocolo de troca de quadros MAC (*MAC Frame Exchange Protocol*) e prosseguindo com a exposição do formato dos quadros de interesse neste estudo.

### 3.3.1 Protocolo MAC

Por causa da natureza não confiável do meio físico de comunicação utilizado pela WLAN IEEE 802.11, a camada MAC implementa um protocolo de troca de quadros que permite a fonte saber se sua transmissão chegou corretamente ao seu destino. Trata-se de um protocolo simples, com unidade atômica de duas mensagens (dado + confirmação de recebimento). Ou seja, enquanto as estações origem e destino trocam estes quadros, nenhuma outra transmissão pode ocorrer.

Outro ponto a ser notado, é que a necessidade da confirmação de recebimento adiciona uma sobrecarga na ocupação do meio, principalmente se compararmos este protocolo MAC a outros usados em redes *wired*. E mais do que isso, visando reduzir a taxa de erros inerente ao meio físico, a estação origem segue um mecanismo de retransmissão de quadros que será utilizado sempre que o quadro de confirmação de recebimento (ACK) não for recebido com sucesso.

Mais uma característica que difere a WLAN das LANs *wired* é a possibilidade de, numa mesma rede, haver duas estações incapazes de se perceber mutuamente, ou seja, uma estar fora do alcance de comunicação da outra. Isto, embora possa parecer natural, é mais um problema nada trivial que teve que ser solucionado no nível de controle do acesso ao meio. A Figura 3.4, abaixo, mostra um BSS onde as estações das extremidades só são capazes de se comunicar com a estação do centro, e por isso nenhuma delas tem conhecimento da presença da outra na rede. Isto, em conjunto com um protocolo onde a estação transmissora apenas “ouve” o meio para saber se existe alguma comunicação em andamento e logo já inicia a transmissão do seu dado, acarretará no chamado “problema do nodo oculto”.

Imaginando que a estação da esquerda na Figura 3.4 deseja transmitir uma mensagem para a estação do centro, e que para fazer isso ela apenas se certifique antes que não existe nenhuma outra transmissão sendo “captada” no meio físico. Mas, por outro lado, se a estação à direita na figura já estiver transmitindo para a estação do centro, esta transmissão não pode ser percebida pela estação da esquerda por que ela está fora do alcance de transmissão da estação da direita. Neste momento, ambas transmissões seriam corrompidas e a estação do centro forçaria a retransmissão dos quadros vindos das duas estações.

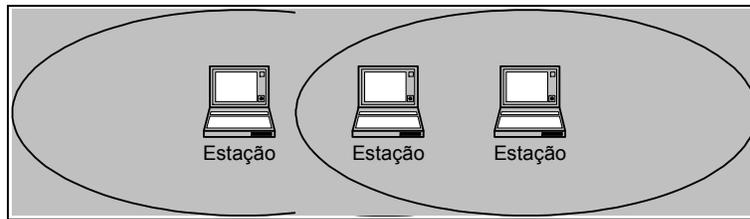


Figura 3.4: Problema do nó oculto

Para solucionar este problema foram adicionados mais dois quadros na unidade atômica do protocolo MAC da rede IEEE 802.11, *Request To Send* (RTS) e *Clear To Send* (CTS). Estes dois quadros são trocados entre a origem e o destino antes da transmissão do quadro de dados e sua confirmação de recebimento. O funcionamento é simples e obedece ao padrão já introduzido por redes mais antigas que faziam uso de sinais de RTS e CTS para fazer o controle de fluxo. Inicialmente, a fonte transmissora manda um quadro RTS para o destinatário, com o anúncio do quadro de dados que deseja transmitir. Assim, qualquer estação que esteja na vizinhança da fonte irá atrasar suas transmissões até que seja recebido o quadro anunciado ou expire o tempo para transmissão do mesmo. De forma similar, o destinatário responderá ao quadro RTS com um CTS, autorizando a origem a enviar o quadro anunciado. Assim, todas estações na vizinhança do destinatário também esperarão até receber o ACK do quadro de dados anunciado ou até passar um tempo adequado para iniciar suas transmissões. A Figura 3.5 mostra a atuação dos quadros CTS e RTS, informando todas as estações vizinhas às duas envolvidas na comunicação que o meio físico estará ocupado, evitando assim colisões, falhas no recebimento e retransmissão dos quadros.

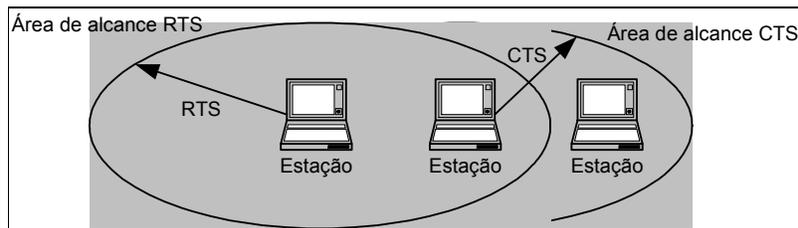


Figura 3.5: Funcionamento dos quadros CTS e RTS

Mesmo sendo um mecanismo de segurança do nível de controle de acesso ao meio, o uso dos quadros RTS e CTS é opcional e pode ser controlado pelo valor do atributo “.11RTSThreshold”, na MIB. Isto permite que, em ambientes onde as estações estejam geograficamente concentradas ou haja pouca demanda pelo uso do meio físico, a utilização dos quadros RTS e CTS seja desabilitada para aumentar a eficiência da rede. Para fazer isso, deve-se configurar o atributo com um valor maior que o tamanho máximo dos quadros da rede, pois só na transmissão dos quadros maiores que o valor programado é que serão utilizados todos os quatro quadros do protocolo. Costumeiramente, os equipamentos trazem como valor padrão para este atributo um número que iniba o uso dos quadros RTS e CTS. Mas este valor deve ser alterado na medida que a rede apresentar estações que não estejam no alcance de todas as outras, ou ainda no caso de uma rede com alta demanda por banda. Quando isso acontece, o novo

valor do atributo “.11RTSThreshold” deve ser calculado levando-se em consideração a taxa de transmissão e, claro, comparando-se a perda na banda ocupada pela adição dos quadros RTS+CTS em relação a perda pelas transmissões corrompidas.

Para a estação origem dos dados, a transmissão só é considerada concluída com êxito quando for recebido o ACK da estação destino. Em caso de corrompimento dos quadros em qualquer ponto do protocolo, a camada MAC se encarregará de fazer a retransmissão ou avisar o nível superior que os dados não puderam ser enviados. Para controlar a retransmissão dos dados, a fim de não permitir a monopolização do MAC por um único quadro, o protocolo prevê o uso de dois contadores de tentativas (retry counters) e de um ‘timer’. Os contadores, que são incrementados a cada nova tentativa de transmissão do quadro, têm seus limites programados por dois atributos da MIB, “.11ShortRetryLimit” e “.11LongRetryLimit”. “Cada um destes limites corresponde a número máximo de tentativas de retransmissão de quadros menores ou de mesmo comprimento que o valor do atributo “.11RTSThreshold”, no caso do primeiro limite, ou de quadros maiores que este nível, no segundo caso. Adicionalmente aos contadores, o MAC conta com um temporizador que o permite analisar se o envio do quadro continua sendo relevante depois de transcorrido determinado tempo.

### 3.3.2 Mecanismo Básico de Acesso

A IEEE 802.11 usa o CSMA/CA com *Binary Exponential Backoff* como mecanismo de acesso básico. Diferentemente do CSMA/CD, usado na IEEE 802.3, este mecanismo se adequa a incapacidade dos dispositivos *wireless* de simultaneamente enviar e receber dados. Neste tipo de acesso a estação sempre irá “escutar” o meio antes de iniciar sua transmissão, e, estando este ocupado, ela incrementará o respectivo contador de tentativas e retardará sua nova transmissão por um período correspondente ao tempo determinado pelo algoritmo *Binary Exponential Backoff* mais, eventualmente, o tempo restante de ocupação do meio, como mostra a Figura 3.6 entre os pontos 1 e 3. É importante ressaltar, no entanto, que o MAC IEEE 802.11 não baseia sua detecção de ocupação do meio unicamente nas informações de sua camada física (PHY), pois novamente o problema do nodo oculto poderia acarretar na corrupção das mensagens. Para contornar este problema o MAC implementa, adicionalmente, um Vetor de Alocação de Rede (NAV), como um sensor de portadora virtual. O NAV é um valor contido nos quadros MAC que indica às estações da rede o tempo de comunicação restante até que o meio físico seja liberado. Assim, fazendo uso destes dois mecanismos, o MAC consegue evitar as colisões, como é requisito do mecanismo de acesso CSMA/CA.

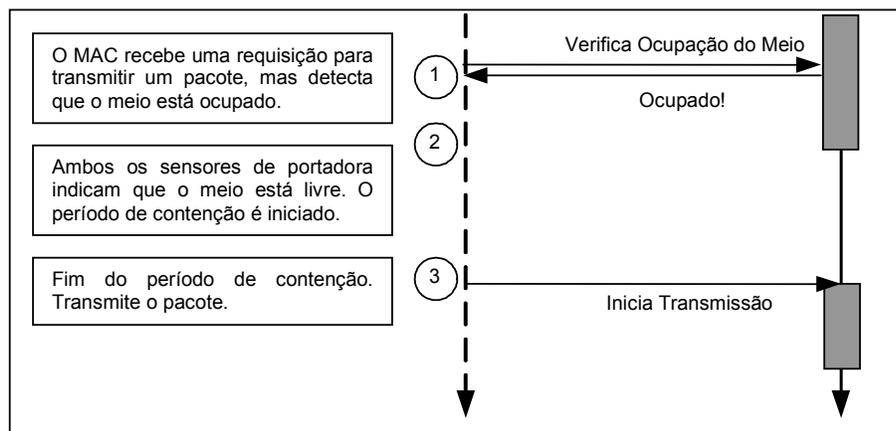


Figura 3.6: Mecanismo Básico de Acesso

Na figura, verifica-se que entre os pontos 1 e 2 a estação não decrementa seu valor de *backoff*. Na realidade, este decremento só ocorre quando o MAC detecta o meio como inativo pelo tempo de um *slot*. Neste caso, a cada *slot* ocorre o decréscimo de uma unidade. Quando o contador é zerado, uma nova transmissão é iniciada (como ocorre no ponto 3). Caso esta transmissão não seja bem sucedida, ou seja, a estação não recebe o pacote de confirmação, a janela de contenção é duplicada e o algoritmo escolhe aleatoriamente um novo valor para o contador de *backoff*. Ambos os valores mínimo (inicial) e máximo (final) da janela de contenção são fixados de acordo com a camada física da rede. Tão logo um quadro seja transmitido com êxito, o valor da janela retorna para o seu nível inicial.

### 3.3.3 Distributed Coordination Function (DCF)

O mecanismo de acesso distribuído é o mecanismo básico da WLAN IEEE 802.11. A operação do MAC neste modo é essencialmente a mesma descrita no item 3.3.1.1 (Mecanismo de Acesso Básico), e sempre estará presente em qualquer configuração de WLAN IEEE 802.11, mesmo que seja por um período mínimo.

Em DCF, quando o sensor de portadora (PHY+NAV) indicar que o meio está disponível para transmissão há pelo menos um DIFS (*Distributed Interframe Space*), ou um EIFS (*Extended Interframe Space*), se o último quadro recebido continha erros, o MAC poderá iniciar sua transmissão. Caso seja detectada alguma transmissão no decorrer do DIFS (EIFS) a estação aguardará um período determinado pelo algoritmo “*binary exponential backoff*”, dentro da janela de contenção inicial. Em seguida, uma nova tentativa de transmissão será realizada, e em caso de falha, a janela de contenção será duplicada seguindo a expressão  $[(2^r - 1) * (\text{comprimento da janela de contenção inicial})]$ , que determina o tamanho máximo da nova janela de contenção a partir do número de tentativas de transmissão ( $r$ ). Este processo prosseguirá até que a transmissão do quadro seja completada com êxito ou que seja considerada falha, por excesso de tentativas ou porque o tempo de vida do quadro expirou.

### 3.3.4 Point Coordination Function (PCF)

O PCF é um mecanismo de acesso centralizado, previsto na IEEE 802.11 como de uso opcional. Neste modo de operação, a entidade que centraliza o controle do acesso ao meio ganha a denominação de “Point Coordinator” (PC) e, na prática, esta função será sempre realizada por um AP. O PC é responsável por fazer periodicamente o “poll” das estações que solicitaram o serviço de acesso centralizado, para saber se estas possuem quadros para serem transmitidos. Mas uma questão importante é que o PC só pode iniciar este processo após ganhar o controle do meio usando o mecanismo de acesso DCF, ou seja, o início do período de operação da rede em modo PCF pode ser atrasado de forma não-determinística, sem garantia nenhuma de periodicidade. Sendo assim, o uso da WLAN IEEE 802.11 se torna inviável em alguns cenários de aplicações com características de tempo-real.

Mas uma vez que o PC obtém o controle do meio, a operação da rede passa a se dar em modo PCF. Neste período, chamado de *contention-free period* (CFP), o MAC utiliza um menor espaço entre os quadros, o PIFS (*Priority Interframe Space*), para evitar que alguma estação operando em DCF inicie uma transmissão e venha a “monopolizar” o meio físico antes do PC servir a todas as estações que solicitaram o serviço com controle centralizado (estações registradas na “*polling list*”). Todavia, pela razão citada

no parágrafo anterior, o PCF não pode oferecer à rede um serviço isócrono, e sim, dependendo do planejamento e da taxa utilização da WLAN, apenas algo muito próximo deste nível.

Após o término do CFP, a rede volta novamente a operar em DCF, por um período mínimo correspondente a transmissão de um quadro do tamanho máximo suportado pelo meio (incluindo fragmentação), mais sua confirmação de recebimento (ACK). Assim, a operação da WLAN IEEE 802.11 sempre será composta, mesmo que parcialmente, por um período de operação em DCF, e nunca será puramente PCF.

O mecanismo de operação da rede durante o CFP inicia pela transmissão de um quadro inicial, chamado *beacon frame*, pelo PC. Contida neste quadro está a informação do tempo máximo esperado para a conclusão do CFP, e com base neste valor todas as estações atualizarão seus NAVs, ficando assim impedidas de acessar o meio físico de forma independente durante o período. Isto significa também, que a utilização do PIFS como espaço entre quadros durante o CFP, como citado anteriormente, é apenas um mecanismo de segurança para o caso de alguma estação não ter recebido o *beacon*.

Após a transmissão do quadro de abertura, o PC inicia o envio dos quadros destinados às estações. Nestes quadros, a fim de tornar o uso do meio mais eficiente, também pode estar contida a autorização para que a estação transmita um de seus quadros de dados armazenados. Desta forma, o PC não é obrigado a fazer duas transmissões distintas para os quadros de dados e CF-Poll (como é chamado o quadro de autorização para transmissão, enviado às estações que previamente se registraram na *polling list* do PC), reduzindo o consumo de banda. Analogamente, as estações que recebem um quadro único contendo dados e CF-Poll não necessitam responder com dois quadros separados, mas sim podem integrar o quadro de confirmação de recebimento (ACK) e o quadro de dados (resposta ao CF-Poll) numa única mensagem.

A conclusão do CFP se dá no momento que o PC envia para as estações um quadro CF-End, permitindo que todas elas zerem seus NAVs e com isso passem a competir independentemente pelo meio, usando o mecanismo de acesso DCF. Todavia, como mencionado antes, existe um mecanismo de segurança para os casos em que o valor do NAV não esteja devidamente configurado. Nestes casos quem impede as estações de tentar utilizar a rede em modo DCF durante o CFP é espaço entre quadros. O CFP utiliza entre suas transmissões e ACKs um espaço de tempo chamado SIFS (Short Interframe Space). O SIFS é o menor tempo entre quadros das WLAN IEEE 802.11. Quando o PC envia um quadro CF-Poll para alguma estação, ele espera receber a confirmação do recebimento dentro do intervalo SIFS. Não acontecendo isto, o PC irá logo transmitir seu próximo quadro, dentro de um intervalo máximo igual a PIFS, caso contrário a rede retorna imediatamente ao serviço DCF. A figura 3.7 descreve o funcionamento básico do mecanismo de acesso PCF.

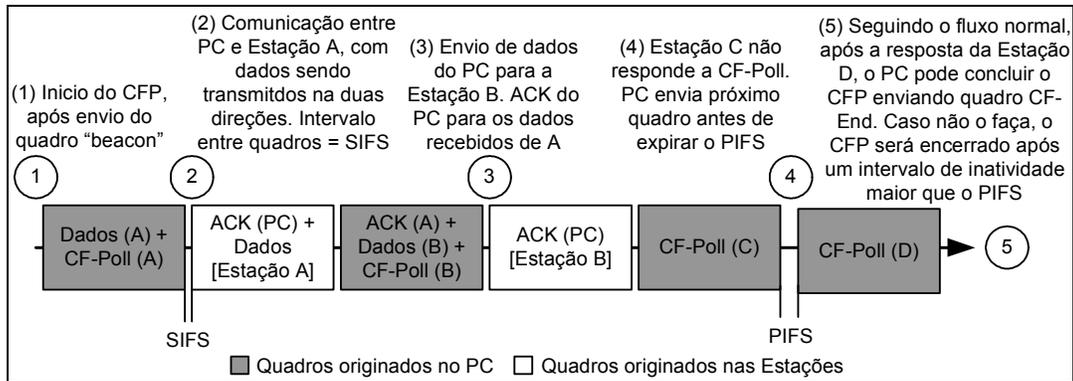


Figura 3.7: Mecanismo de acesso PCF

### 3.4 PHY

Situada na base do modelo OSI, a camada física, ou PHY, é a interface entre o nível MAC e o meio de transmissão sem-fio. Esta camada tem sido alvo de constante evolução por parte da IEEE, com o intuito de prover taxas de transmissão cada vez maiores e oferecer modulações em diferentes frequências por questões de performance e disponibilidade num maior número de países. Exemplo disso é o padrão 802.11j (IEEE, 2004), chamado "Amendment 7: 4.9 GHz – 5 GHz Operation in Japan", onde são abordados aspectos específicos do uso da modulação OFDM em 5 GHz no Japão.

A camada PHY é composta por três níveis de funcionalidades divididos em duas subcamadas: PLCP (*Physical Layer Convergence Procedure*) e PMD (*Physical Medium Dependent*). As funções atribuídas a PHY compreendem a troca de quadros com a camada MAC, sob responsabilidade do PLCP, a geração do sinal de portadora e a modulação de espectro espalhado (*spread spectrum*), controlado pela subcamada PMD, e, por fim, a detecção de portadora para sinalizar o MAC da atividade no meio.

O padrão 802.11 atualmente compreende cinco diferentes tipos de camadas físicas. Dentro de cada um destes tipos, uma ou mais frequências de transmissão e uma variedade de taxas de transmissão de dados são permitidas. Na Tabela 3.2, abaixo, estes cinco tipos são apresentados e relacionados a uma taxa de transmissão máxima, frequência(s) e extensão da norma, quando esta existir.

Tabela 3.2: Tipos de PHY das WLAN 802.11

PHY	Descrição	Taxa de transmissão (Mbit/s)	F (GHz)	Extensão à norma
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum	2	2.4	
FHSS	Frequency-Hopping Spread Spectrum	4.5	2.4	
HRDSSS	High Rate Direct Sequence Spread Spectrum	11	2.4	802.11b
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	54	2.4, 5	802.11a, 802.11g

IR	Infrared	2	Faixa de luz infravermelha
----	----------	---	----------------------------

Fontes: IEEE, 1999-a e IEEE, 2005-b.

### 3.4.1 PHY 802.11g

Por apresentar alta taxa de transmissão e retro-compatibilidade com todas as outras especificações de PHY que operam em 2.4 GHz, esta extensão é hoje o padrão de camada PHY nos dispositivos Wi-Fi (IEEE 802.11). Adicionalmente, a extensão 802.11a (IEEE 1999-b) representa uma alternativa para usuários que não pretendem operar equipamentos com outras especificações de PHY na mesma rede e/ou não desejem utilizar a sensível faixa de frequência dos 2.4 GHz.

Assim como a extensão ‘a’, a extensão 802.11g pode utilizar multiplexação por divisão ortogonal de frequência (OFDM) para atingir até 54 Mbit/s na transmissão dos quadros PSDU, onde 6 Mbit/s, 12 Mbit/s e 24 Mbit/s são as taxas obrigatórias. Todavia, para assegurar a coexistência e compatibilidade com equipamentos legados, a extensão também permite o acesso ao meio físico com outros tipos de PHY, como o HRDSSS. Porém, a contra-indicação em se utilizar uma rede 802.11g retro-compatível é o gasto de tempo causado pela transmissão de quadros de controle a taxas reduzidas, a fim de que todas as estações da rede sejam capazes de entendê-los. Por esta razão, neste trabalho, a operação da camada PHY se dará apenas no modo ERP-OFDM (Extended Rate PLCP OFDM), onde a extensão 802.11g não pode coexistir com outras mais antigas.

Para efeito de breve comparação, na tabela 3.3 são apresentados alguns parâmetros que diferenciam os modos ‘apenas 802.11g’ e ‘802.11b compatível’.

Tabela 3.3: Comparação entre os modos 802.11g e 802.11g retro-compatível

<i>Parâmetro</i>	<i>802.11g</i>	<i>802.11g + legado</i>
Slot time	9 $\mu$ s	20 $\mu$ s
DIFS	28 $\mu$ s	50 $\mu$ s
Min. Taxa Transmissão	6 Mbit/s	1 Mbit/s

Fonte: Medepalli et al., 2004.

Na próxima seção, ‘Formato dos Quadros’, serão apresentados detalhes do encapsulamento dos pacotes, incluindo os campos da subcamada PLCP e demais símbolos adicionados ao quadro no nível físico da rede.

## 3.5 Formato dos Quadros

Para serem transmitidos numa WLAN IEEE 802.11, os pacotes recebem algumas informações adicionais que servem tanto para a camada de enlace, quanto para a camada física. Estas informações são concatenadas ao MSDU (unidade de dados recebida pelo MAC, vinda das camadas superiores) em forma de cabeçalho e de *trailer*, criando assim o MPDU (unidade de dados do protocolo MAC). Neste ponto o MAC pode criar um ou mais MPDUs, de acordo com o tamanho limite de MPDU configurado na MIB, para aumentar as chances de sucesso na transmissão. Cada MPDU é passado para a camada física, que por sua vez insere mais dados com o intuito de sintonizar os parâmetros do PHY receptor, formando então o PPDU (unidade de dados do nível

PLCP). Este último é codificado e transformado em sinais de RF que são, por fim, transmitidos e se propagam pelo ar.

### 3.5.1 Camada MAC

No nível MAC existem quatro tipos de quadros: controle, dados, gerenciamento e um quarto tipo reservado para uso futuro. Cada um destes tipos possui a sua própria formatação, que ainda pode diferir nos vários subtipos especificados na norma. Entretanto, para não fugir do escopo do trabalho, apenas alguns destes serão apresentados a seguir. Também, o detalhamento de todos os campos dos formatos não será necessário para o atingimento do objetivo desta pesquisa. Ao invés, serão apresentados apenas os dados relevantes para o correto funcionamento e validação do modelo simulado.

O formato geral dos quadros MPDU é apresentado logo a seguir, na figura 3.8, com o tamanho dos campos representado em bytes. Vale ressaltar que, como será apresentado mais adiante, nem todos estes campos fazem parte de todos os quadros MAC, pois isso representaria menor eficiência no uso do meio físico.

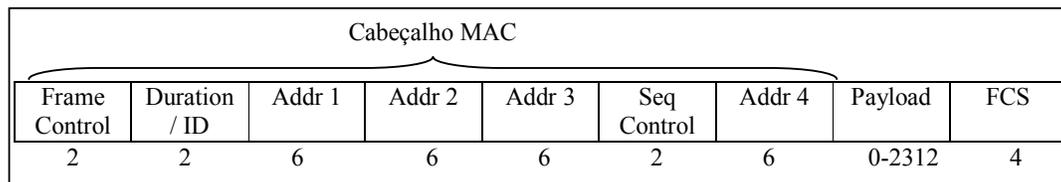


Figura 3.8: Formato geral do quadro MAC IEEE 802.11

*Frame Control:* (2 octetos) Campo presente em todos os quadros MAC. Carrega informações necessárias para que a camada MAC saiba interpretar corretamente os outros campos do quadro, como por exemplo, versão do protocolo, tipo e subtipo do quadro.

*Duration/ID:* (2 octetos) Campo presente em todos os quadros MAC. Apenas para quadros do tipo PS-Poll, usados no modo de economia de energia, contém um ID, também chamado *association ID*. Para todos os outros formatos de quadros este campo contém a informação de duração da transmissão, para que todas as estações atualizem seus NAVs.

*Address 1, 2, 3 e 4:* (6 octetos cada). Há pelo menos um campo deste tipo nos quadros MAC 802.11. Dependendo do tipo de quadro, estes campos podem carregar as informações de cinco diferentes tipos de endereços: origem (SA), destino (DA), transmissor (TA), receptor (RA) e BSS (BSSID). Este último, quando a rede operar no modo de infra-estrutura, contém o endereço do AP.

*Seq. Control:* (2 bytes). Não está presente em todos os tipos de quadros. Fornece ao MAC um número de seqüência para o quadro, a fim de evitar pacotes duplicados.

*Payload:* (de 0 a 2312). Não está presente em todos os tipos de quadros. Possui tamanho variado e, tipicamente, carrega MSDUs (quadros recebidos das camadas superiores) ou o conteúdo de quadros de gerenciamento.

*FCS:* (4 bytes). Campo presente em todos os quadros MAC. Contém o resultado do CCITT CRC-32 polinomial aplicado no cabeçalho e no corpo da mensagem (*payload*).

#### 3.5.1.1 Quadros de Controle

Ao total, o tipo é composto por seis subtipos, dos quais apenas três serão utilizados nos experimentos. Dentre os não utilizados estão os quadros RTS e CTS, pois o cenário proposto mais adiante não incluirá estações ocultas. Já os quadros de CF-ACK (confirmação de recebimento), CF-End (fim do período livre de contenção) e este último também sinalizando um CF-ACK (CF-End+CF-ACK) podem ser representados como segue:

Frame Control	Duration	RA	FCS
2	2	6	4

Figura 3.9: Formato do Quadro ACK

Frame Control	Duration	RA	BSSID	FCS
2	2	6	6	4

Figura 3.10: Formato dos Quadros CF-End e CF-End+ACK

### 3.5.1.2 Quadros de Dados

Os quadros do tipo Dados podem ser divididos em dois grupos, totalizando oito subtipos. No primeiro grupo estão aqueles quadros que realmente contêm um MSDU. São eles: *Data*, *Data*+CF-ACK, *Data*+CF-Poll, *Data*+CF-ACK+CF-Poll. No segundo estão quadros que, apesar de serem do tipo Dados, não carregam um quadro MSDU, ou seja, não possuem o campo de *payload*. Fazem parte deste grupo os quadros *Null Function*, CF-ACK, CF-Poll e CF-ACK+CF-Poll.

Frame Control	Duration / ID	Addr 1	Addr 2	Addr 3	Seq Control	Addr 4	Payload	FCS
2	2	6	6	6	2	6	0-2312	4

Figura 3.11: Formato dos Quadros de Dados

Como pode ser verificado na figura 3.11, os quadros de dados possuem tamanho variável, dependente da largura do MSDU e da infra-estrutura da rede 802.11. Neste segundo ponto a variação é na utilização ou não do quarto campo de endereço. Apenas quadros encaminhados entre APs, num DS sem-fio, utilizarão os quatro campos. Todas as demais aplicações dos quadros de dados (do primeiro tipo) farão uso apenas de três campos de endereços.

Deve ser ressaltado, então, que todos os quadros utilizados nos experimentos subsequentes utilizam apenas três campos de endereço nos seus cabeçalhos, e possuem o mesmo formato e tamanho cabeçalho. A única ressalva é o não aproveitamento dos quadros *Null* e CF-ACK, pois o primeiro serve para indicar o estado do gerenciador de energia e o segundo, por sua vez, é substituído na implementação proposta pelo quadro de controle ACK, já que este possui apenas 14 bytes contra os 28 bytes do CF-ACK (IEEE, 1999-a, p. 53).

### 3.5.1.3 Quadros de Gerenciamento

Uma das grandes diferenças do IEEE 802.11 para os outros padrões IEEE 802 é a extensa capacidade de gerenciamento definida no nível MAC. Ao todo são 11 subtipos de quadros de gerenciamento, e todos eles obedecem ao formato apresentado na figura 3.12. Onde no *Payload* (ou corpo do quadro), campo de tamanho variável, são encontrados subcampos de tamanho fixo e mais alguns de tamanho variável dentro de estruturas flexíveis chamadas Elementos de Informação (*Information Element*). Estas estruturas permitem que novas funcionalidades sejam facilmente adicionadas ao padrão mantendo a compatibilidade entre versões antigas e mais atuais.

Frame Control	Duration / ID	Addr 1	Addr 2	Addr 3	Seq. Control	Fixed Fields	Info. Elements	FCS
2	2	6	6	6	2	12	*	4

Figura 3.12: Formato dos Quadros de Gerenciamento

Todavia, nos cenários propostos neste trabalho, o único quadro deste tipo que será utilizado é o *beacon*. Ele é transmitido periodicamente e possui várias funcionalidades. No caso específico deste trabalho, o objetivo deste quadro é avisar a todas as estações do início de mais um período livre de contenção (CFP), fazendo com que elas ajustem seus NAVs, evitando assim possíveis ‘intromissões’ durante o modo PCF e assegurando o correto funcionamento do mesmo.

Os campos fixos de um quadro *beacon* são o *timestamp* (8 octetos), o intervalo entre *beacons* (2 octetos) e a informação de capacidades (2 octetos). Já os elementos de informação do quadro são o SSID, as taxas suportadas, um ou mais conjuntos de parâmetros de PHY, um conjunto de parâmetros CFP (opcional), um conjunto de parâmetros IBSS (opcional) e um mapa de indicação de tráfego (opcional). Destes, são utilizados nos experimentos propostos apenas alguns elementos de informação, cujo tamanho não varia ao longo das simulações. Desta forma, são apresentados na figura 3.13 os elementos de informação utilizados (com seus tamanhos em bytes), permitindo que o cálculo de utilização do meio físico por este tipo de quadro seja facilmente realizado.

Elem. ID	Len.	SSID	Elem. ID	Len.	Sup. Rates	Elem. ID	Len.	CF Set	Elem. ID	Len.	ERP Info.	Elem. ID	Len.	Ext. Rates
1	1	1	1	1	8	1	1	6	1	1	1	1	1	2

Figura 3.13: Elementos de Informação utilizados no *Beacon*

### 3.5.2 Camada PHY

Dentro da camada física novas informações são adicionadas ao PSDU (quadro recebido da camada MAC) antes que se efetive a transmissão. Assim como a extensão 802.11a (IEEE, 1999-b), a extensão 802.11g (IEEE, 2003) usa PHY tipo OFDM. Mais especificamente, neste trabalho, como não há interesse no modo ‘802.11b compatível’ do padrão 802.11g, a operação da PHY será considerada exclusivamente como sendo ERP-OFDM, o que a deixa com características muito semelhantes a da extensão 802.11a.

Como visto anteriormente na seção 3.4, a PHY pode ser subdivida em dois níveis de abstração: PLCP e PMD. No primeiro deles é que são adicionados o preâmbulo, o cabeçalho e os *trailers* ao PSDU, formando o PPDU, como mostra a figura 3.14. O

preâmbulo é adicionado a cada pacote com o intuito de treinar e sincronizar o receptor. Ele é composto de 12 símbolos, usa modulação BPSK-OFDM de 6 Mbit/s e consome 16  $\mu$ s.

Assim como o preâmbulo, também o cabeçalho é parcialmente transmitido em 6 Mbit/s. Dele, apenas o campo *Service*, que não faz parte do sinal OFDM (vide figura 3.14), será transmitido na taxa escolhida para a transmissão dos dados. Como veremos mais adiante, considerando-se quadros pequenos como os de voz, que têm tamanhos entre 24 e 160 bytes, o impacto do preâmbulo e do sinal na eficiência do uso do meio físico é muito negativo, praticamente anulando qualquer vantagem trazida pelas altas taxas de transmissão oferecidas na extensão de PHY 802.11g (ou 802.11a).

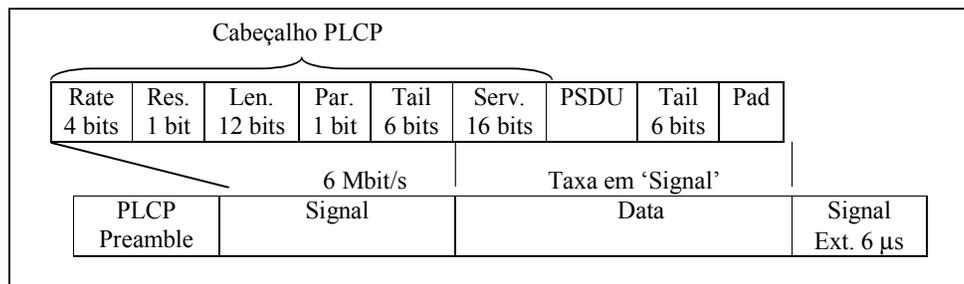


Figura 3.14: Formato dos Quadros PDU<sub>[GM1]</sub>

Adicionalmente ao cabeçalho e ao preâmbulo, são incluídos no PDU os campos *Tail*, *Pad* e *Signal Extension*. O primeiro visa retornar o codificador convolucional para o estado inicial (zero). O segundo, na realidade, só é usado para preencher os bits faltantes no campo *Data* a fim de completar um número inteiro de símbolos. E esta é outra questão que também deve ser considerada no cálculo de eficiência no uso do meio físico, especialmente quando é utilizada a máxima taxa transmissão com pacotes predominantemente pequenos. Isto porque, quanto maior a taxa de transmissão, maior o tamanho da representação do símbolo em bits, como mostra a tabela 3.4. Desta forma, pode acontecer de ser adicionado ao PDU, apenas no campo *Pad*, mais bits do que o próprio pacote gerado pelo usuário (vide tamanho dos quadros de voz na tabela 2.4). E por fim, o terceiro campo visa compatibilizar o tempo necessário para o processamento do quadro OFDM com o SIFS reduzido (10  $\mu$ s) usado no 802.11g (IEEE, 2003, *clause* 19.3.2.3). Assim, o uso desta modulação fica similar ao IEEE 802.11a, onde o SIFS vale 16  $\mu$ s.

Tabela 3.4: Relação entre taxa de transmissão e o número de bits de dados por símbolo OFDM

<i>Taxa de Transmissão (Mbit/s)</i>	<i>Modulação</i>	<i>Bits por Símbolo OFDM - <math>N_{DBPS}</math></i>
6	BPSK	24
9	BPSK	36
12	QPSK	48
18	QPSK	72
24	16-QAM	96
36	16-QAM	144
48	64-QAM	192
54	64-QAM	216

Fonte: IEEE, 1999-a, table 78, p. 9.

## 4 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Para que fosse possível alcançar os resultados desejados foi proposta uma metodologia híbrida, composta por simulações e desenvolvimento analítico do Modelo E. Na primeira etapa, após as definições dos objetivos finais e parciais do trabalho, foi realizada a simulação da topologia IEEE 802.11 de interesse. Para tanto foi utilizado um programa simulador de redes de código aberto chamado NS versão 2, ou NS-2 (NS, 2005-a), acrescido de diversas modificações específicas feitas pelo autor e por terceiros, como será descrito em detalhes mais adiante. Destas simulações, foram obtidos diversos arquivos que descrevem o comportamento da rede, pacote a pacote, em cada um dos cenários propostos. Evidentemente estes arquivos não trazem em si nenhuma métrica de rede, mas sim permitem que o usuário os analise da forma como for mais conveniente. Assim, visando a obtenção de dados relativos ao atraso, jitter, vazão e taxa de perda de pacotes em cada cenário, utilizou-se o programa Tracegraph<sup>1</sup> 2.02 (MALEK, 2003), escrito por Jaroslaw Malek, estudante da Wroclaw University of Technology . A partir de seus relatórios de análise, baseados na biblioteca matemática do programa Matlab<sup>2</sup> 6.5 incluída, foram extraídos os dados de entrada das equações de determinação do grau de satisfação do usuário do serviço de VoIP, segundo o modelo E, desenvolvidas ao longo do Capítulo 2.

No decorrer deste capítulo será apresentado detalhadamente cada um dos passos executados na realização dos experimentos, da simulação ao relacionamento do fator R calculado com o MOS estimado.

### 4.1 Simulação

#### 4.1.1 Ferramentas Utilizadas

Como citado anteriormente, todas as simulações realizadas neste trabalho foram executadas no simulador de redes NS-2, mais especificamente na versão 2.29, de outubro de 2005, que à época do início das simulações era a mais recente versão estável do programa.

Com o intuito de aproveitar uma construção prévia dos aplicativos de suporte ao simulador, a versão referida foi inserida numa estrutura 'ns-allinone-2.28', onde originalmente continha uma versão 2.28 do simulador. Mas isto não deve, de maneira alguma, diferir de uma instalação completa de um pacote 'ns-allinone-2.29', visto que as outras aplicações de suporte não interferem na estrutura lógica do simulador. Esta distribuição foi então compilada e executada exclusivamente a partir de computador portátil HP Compaq NX9005, com 768 MB de memória RAM DDR-266 MHz, processador AMD Athlon XP 2.4, sistema operacional Linux da distribuição RedHat 9<sup>3</sup> e kernel 2.4.22.

No entanto, embora o NS-2 seja o simulador de rede mais utilizado academicamente em todo o mundo, até hoje ele não oferece a opção de simulação do modo PCF do padrão IEEE 802.11. Todavia, esta limitação do programa já era conhecida, e para

---

<sup>1</sup>Trace Graph é uma marca registrada por Jaroslaw Malek.

<sup>2</sup>Matlab é uma marca registrada por The MathWorks Inc.

<sup>3</sup>RedHat 9 é uma marca registrada por Red Hat, Inc.

suplantar esta deficiência foi utilizada uma contribuição vinda da Luleå University of Technology, da Suécia, desenvolvida por Anders Lindgren e Andreas Almquist (LINDGREN e ALMQUIST, 2001-a). Mas o primeiro inconveniente encontrado foi o fato de a contribuição citada ter sido desenvolvida para a versão 2.1b8 do NS-2, que há muito tempo encontra-se obsoleta, sendo inclusive incompatível com as ferramentas de compilação C++ GNU, o GCC (FSF, 2006), lançadas a partir de 2003. Foi verificado também que, desde junho de 2001, quando a versão 2.1b8 foi lançada, muitas modificações e reparos foram feitos no código do simulador, especialmente no próprio módulo MAC 802.11. Assim sendo, havia grande possibilidade de um porte da contribuição para uma versão mais recente ser mais estável e constituir uma grata colaboração para a comunidade de usuários do NS-2.

Com várias alterações no código original do *patch* de suporte a PCF, criou-se uma versão da extensão proposta pelos então mestrandos suecos para adição nos atuais fontes do NS-2. Neste porte foram alteradas duas funcionalidades em relação à versão de 2001: foram criadas uma *flag* para a compilação condicional do suporte a PCF e uma nova interface do script com o objeto MAC802\_11, feita por meio de variáveis.

A primeira modificação simplesmente garantirá que o novo *patch* não influenciará na funcionalidade original provida na camada MAC 802.11 do simulador. A definição ou não da *flag* ‘PCF\_SUPPORT’, contida no arquivo ‘Makefile’ do diretório raiz do ns-2.29, determina se será utilizado o código original do simulador ou o novo, com suporte também ao modo PCF. Com estes dois modos de compilação, também foi facilmente validada a operação do modo DCF no novo código, pois uma simples comparação dos arquivos de *trace* gerados com e sem a definição da *flag* mostrou que ambos são idênticos.

A segunda alteração, que diz respeito à definição de variáveis do objeto MAC802\_11, reflete uma mudança estrutural acontecida entre os lançamentos das versões 2.1b8 e 2.29. Na versão mais recente vários parâmetros antes definidos em tempo de compilação passaram a ter ligação com variáveis definidas no script de simulação, e esta mudança foi estendida para diversas variáveis exclusivas da operação no modo PCF, como ‘CFPPeriod\_’, ‘CFPMaxDuration\_’ e ‘DTIMPeriod\_’. Além destas, também a variável ‘BeaconPeriod\_’ foi criada, substituindo assim a antiga interface do comando ‘beaconperiod’.

‘BeaconPeriod\_’ é a variável que define o intervalo entre sucessivos períodos livres de contenção (CFP), equivalendo a variável MIB dot11BeaconPeriod. Sua unidade é a TU (*time unit*), definida na norma (IEEE, 1999-b, p. 6) como sendo equivalente a 1024  $\mu$ s, e seu valor padrão arbitrado no simulador é 20. ‘CFPPeriod\_’ equivale a variável MIB dot11CFPPeriod, que define o tamanho do CFP em unidades DTIM. Seu valor padrão no simulador foi definido como sendo igual a 1. No simulador, ‘CFPMaxDuration\_’ é o equivalente a variável MIB dot11CFPMaxDuration da norma, cujo papel é limitar o período em que o PC pode controlar o acesso ao meio. Inicialmente, seu valor é definido como 18 TU, mas seu limite é 1000 TU. Por fim, ‘DTIMPeriod\_’ faz no simulador o papel da variável MIB dot11DTIMPeriod na definição do padrão 802.11, ou seja, define o número de quadros de beacons entre sucessivos DTIMs.

Concluídas as alterações citadas, foi possível executar o primeiro script de simulação que incluía o modo PCF na versão 2.29 do NS-2. Mas infelizmente, várias limitações na funcionalidade do modo PCF foram verificadas, a ponto de tornar a validade no uso da ferramenta questionável. O *patch* desenvolvido em Luleå oferecia algumas das funcionalidades principais do modo PCF, mas ao mesmo tempo omitia

várias outras, definidas na especificação do IEEE 802.11, que tornariam a camada MAC muito mais eficiente.

A principal dessas funcionalidades não implementadas é a possibilidade do AP enviar pacotes às estações durante o CFP. Esta falta invalida qualquer análise baseada nesta extensão do simulador quando os tráfegos são bidirecionais, como é o caso de aplicações de comunicação multimídia, como a telefonia IP. E se analisada com atenção, verifica-se na dissertação de mestrado de Lindgren e Almquist (2001-b) o cuidado ao mencionar o tipo de tráfego usado em suas simulações, embora também, em nenhum trecho do texto, seja mencionado o fato de inexistir tráfego no sentido PC-estações.

Fica evidente então, que uma análise completa de desempenho da IEEE 802.11 quando operando em PCF com aplicações iterativas, requereria mais adaptações no código fonte do simulador. De outra forma, a fila de pacotes para serem entregues às estações, contida dentro do PC, cresceria muito além do que seria o esperado num funcionamento compatível com a especificação do padrão IEEE 802.11. O PC, da maneira como o *patch* original implementa, só transmitiria os pacotes endereçados às estações durante os períodos de DCF, quando as chances de acesso ao meio seriam divididas igualmente entre todas as estações, inclusive as de baixa prioridade, que não são atendidas no CFP.

Com isso em vista, foi necessário iniciar um novo e longo período de codificação dentro da estrutura C++ do NS-2. Inclusive porque, junto com a implementação do tráfego bidirecional de quadros de dados no PCF, foram desenvolvidos e depurados outros pontos da extensão PCF que não supriam as necessidades deste trabalho. Nas figuras 4.1 e 4.2, a seguir, podem ser verificadas de maneira gráfica, respectivamente, as diferenças entre a implementação PCF original, escrita por Lindgren e Almquist, e a proposta neste trabalho, desenvolvida pelo autor.

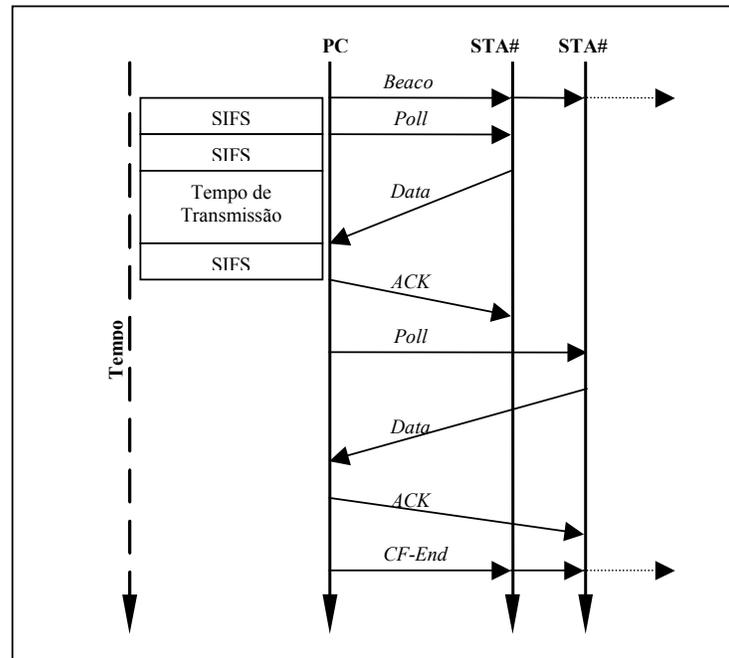


Figura 4.1: Modo PCF de Lindgren e Almquist

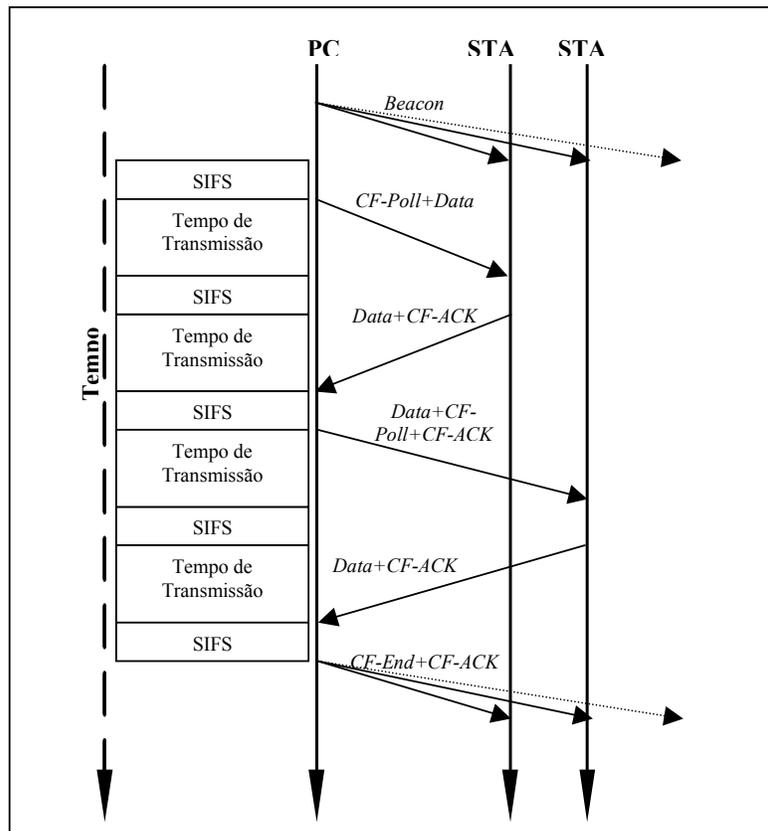


Figura 4.2: Modo PCF implementado

Verifica-se na implementação original, representada na figura 4.1, que os tempos de transmissão dos quadros Beacon, CF-Poll e CF-End são suprimidos, aumentando indevidamente a eficiência do modo PCF. Para exemplificar isto, na tabela 4.1, apresenta-se o tempo gasto em um CFP quando nenhuma das 100 estações do BSS (incluindo o PC) possui dados para transmitir. Vale ressaltar que o cálculo analítico dos tempos de transmissão dos quadros é apresentado na subseção 4.1.3 (Validação do Modelo), e que, em ambas as implementações, quando uma estação recebe um quadro CF-Poll mas não possui nenhum dado para transmitir, ela se omite e o PC envia o próximo CF-Poll após um intervalo PIFS.

Tabela 4.1: Comparação entre a implementação PCF original e a proposta

	<i>PCF 2.1b8</i>	<i>PCF 2.29</i>
Beacon	0	48 $\mu$ s
CF-Poll	0	28 $\mu$ s
CF-End	0	28 $\mu$ s
TOTAL	$(2*\text{SIFS}) + (98*\text{PIFS}) = 1,882 \text{ ms}$	$48\mu\text{s} + 28 \mu\text{s} + (99*28 \mu\text{s}) + (2*\text{SIFS}) + (98*\text{PIFS}) = 4,73 \text{ ms}$

Mas, embora a tabela anterior sugira uma maior eficiência no uso do meio físico por parte da implementação original, isso não se reflete na prática em todos os cenários. Quando o fluxo de dados entre as estações e o PC é aumentado, a implementação feita para a versão 2.1b8, embora não reflita a realidade física transmitindo alguns quadros instantaneamente, ainda possui menor eficiência. E isso não se deve unicamente ao fato de a extensão PCF desenvolvida para este trabalho permitir a transmissão de quadros de dados por parte do PC, mas também porque ela implementa os quadros ‘concatenados’, como CF-Poll+Data, Data+CF-ACK, CF-Poll+ACK, CF-Poll+Data+CF-ACK e CF-End+CF-ACK. Isto reduz o uso do meio físico, permitindo que, por exemplo, após receber dados de uma estação, o PC envie um ACK e um CF-Poll (ou CF-End) no mesmo pacote, como pode ser visto na figura 4.2. O suporte a estes tipos de quadros também foi adicionado na geração dos arquivos de *trace* tipo “*old wireless format*”, onde qualquer quadro de dados será representado unicamente pelo tipo do dado (omitindo suas funcionalidades de CF-ACK ou CF-Poll), quadros CF-End+CF-ACK são representados pela sigla ‘CEA’ e quadros CF-Poll+CF-ACK pela sigla ‘POA’.

Além das modificações já citadas, outras adições no código do simulador fizeram-se necessárias a fim de tornar o uso do meio físico simulado semelhante ao modo ERP-OFDM da recomendação IEEE 802.11g. Como todo o resto do código adicionado pelo autor no simulador, também esta extensão é configurável e de habilitação opcional em tempo de compilação, utilizando-se a *flag* ‘PCF\_SUPPORT’. Para a parametrização deste novo trecho de código, foram criadas uma variável para o objeto MAC802\_11, chamada ‘SignalExtension\_’ e acessível do script, e mais o comando ‘use-OFDM’.

A variável, que possui valor padrão igual a 0, corresponde a um tempo adicionado após a transmissão de cada quadro, exatamente como é função do campo *signal extension* do PMD IEEE 802.11g em ERP-OFDM. Seu valor neste trabalho é de 6  $\mu$ s, assim como está definido na recomendação da IEEE (IEEE, 2003, *clause* 19.3.2.3).

O novo comando, que deve ser executado sempre que o objeto MAC802\_11 desejar operar no modo compatível com OFDM, faz papel também fundamental nas simulações realizadas. A execução deste comando ativa uma parte do código que modifica a utilização do meio físico, compatibilizando-o com o padrão OFDM. Com isso,

simulações de ambos 801.11a e 802.11g se tornam mais realísticas, transmitindo o campo *Service* do cabeçalho PLCP na mesma taxa do PSDU (dados) e, principalmente, adicionando na transmissão os campos *Tail* e *Pad*, que podem ocupar um tamanho relevante do tamanho final do quadro. A única ressalva quanto a esta implementação é o fato dela não apresentar o tamanho do quadro no *trace* da camada MAC como possuindo estes campos. Porém, o tempo de transmissão, que é o mais importante no nosso cálculo de utilização do meio físico e na simulação propriamente dita, encontram-se de acordo com o especificado pela IEEE para o cenário desejado.

Desta forma, acredita-se que a extensão PCF desenvolvida neste trabalho torna mais verossímil a simulação da WLAN IEEE 802.11g, fazendo inclusive com que a capacidade máxima calculada analiticamente na próxima subseção esteja muito próxima da obtida nas simulações.

Entretanto, com o aumento do número de estações nos experimentos simulados, um novo problema no código do simulador foi encontrado. Mas desta vez ele não dizia respeito apenas ao modo PCF, mas sim ao modo de operação básico do MAC IEEE 802.11, o DCF. O problema, que interrompia a simulação a qualquer momento dependendo do cenário, indicava como causa da interrupção a seguinte frase: “*Scheduler: Event UID not valid*”. Após com algumas pesquisas nas listas de discussão dos usuários e dos desenvolvedores do simulador (NS, 2005-b), foram encontrados vários relatos do mesmo problema, datando desde 2000 (versão 2.1b7). Felizmente várias propostas de soluções também foram apresentadas nestas listas. A melhor delas, pelos testes realizados, mas que segundo relatos ainda não resolve o problema para a totalidade dos casos, foi desenvolvida na Universidade de Padova, na Itália, e divulgada por Federico Maguolo, que compartilhou a proposta de solução e muito bem a documentou em (UNIPD, 2005).

Assim, novamente trabalhou-se no porte de um *patch* desenvolvido numa versão mais antiga para uma mais atual. Mas, no caso do *patch* originado na Itália, o trabalho foi facilitado devido a menor diferença entre as versões (2.27 para 2.29) e, principalmente, devido a menor quantidade de código, que é muito inferior à extensão PCF desenvolvida na Suécia. Como resultado disso, não mais ocorreu o mencionado problema dentro dos cenários propostos.

A versão final do arquivo de *patch* do simulador NS 2.29, com as modificações propostas neste trabalho, encontra-se na página do autor na Internet (MARSHALL, 2006), onde também estão os arquivos do simulador modificados em versão integral e mais um arquivo com instruções e informações sobre a versão.

#### 4.1.2 Modelo Utilizado

O modelo de simulação pode ser considerado como sendo junção de duas partes desenvolvidas para reproduzir o comportamento de uma WLAN IEEE 802.11: o ambiente de simulação (NS-2) e o cenário (script). No primeiro, é modelado o comportamento da rede como um mecanismo que permite a variação de poucos parâmetros, mas que executa diversos algoritmos arranjados de forma a reproduzir as especificações da IEEE para o 802.11 e de diversos outros padrões de redes, desde o nível de aplicação até a camada física. Por outro lado, o script de simulação tem o papel de definir a topologia da rede, seu estado num dado instante e ainda parametrizar variáveis de operação do ambiente de simulação. Apenas para exemplificar, entre estas variáveis estão incluídas o tamanho e a vazão dos pacotes gerados, o tipo de antena e o comprimento da fila da interface. Assim sendo, sem o script o simulador não possui nenhuma funcionalidade.

Partindo da condição *sine qua non* que o simulador funcione corretamente em todos os pontos necessários do padrão IEEE 802.11 e nas demais normas, o enfoque desta subseção será apresentar o ambiente de rede descrito no script. Ainda assim, eventuais referências ao funcionamento da ferramenta de simulação também se farão necessárias.

O mencionado script, cujo conteúdo determina o sistema de rede simulado pelo NS-2, é escrito em TCL, uma poderosa linguagem de scripts. Todavia, para o entendimento da topologia e do funcionamento da rede não é necessário o domínio desta linguagem, como mostra a listagem do script desenvolvido, apresentado no apêndice A.

O ponto inicial na definição do modelo é o entendimento da infra-estrutura sob investigação. Como citado diversas vezes anteriormente, a rede simulada será um BSS estruturado, com todas as estações equidistantes do AP e imóveis. Em cada cenário serão considerados diferentes números de “estações de voz” e de “estações de dados”. Em cada uma dessas estações, com exceção do AP, são gerados e consumidos apenas pacotes tipo RTP, representando aplicações de VoIP, ou pacotes tipo EXP, representando outras aplicações em cima do protocolo UDP com variação exponencial dos tempos de rajada e inatividade.

O tráfego relativo às estações de voz é um tráfego bidirecional e simétrico, espelhado nas características dos codificadores apresentados no capítulo 2. Este fluxo, a exemplo do que acontece com o fluxo de dados, se dará diretamente entre as estações e o AP, evidenciando assim o desempenho da rede WLAN IEEE 802.11 na comunicação. A cada um dos pacotes de voz são adicionados todos os cabeçalhos utilizados nos canais de mídia dos protocolos padrões do VoIP. Embora este assunto já tenha sido citado de forma breve no capítulo 2, a tabela 4.2 traz detalhadamente a descrição do fluxo de pacotes de voz modelado, mostrando na coluna ‘Nível’ a camada onde é definido o valor do parâmetro. Cabe ainda citar que nenhum outro canal de comunicação, incluindo controle, sinalização e gerenciamento, faz parte do modelo proposto. Logo, os dados obtidos para o fluxo de voz modelado podem ser utilizados em qualquer cenário de comunicação VoIP que utilize o protocolo RTP, como SIP, H.323 e MGCP, bastando adicionar aos cálculos os outros tráfegos, que matematicamente possuem peso muito pequeno na utilização do meio físico.

O modelo foi construído de forma a permitir que apenas um, dos três tipos de codificação de voz apresentados, seja selecionado em cada cenário. Essa escolha se dá através de um argumento na linha de comando do simulador. Da mesma forma que é feita a determinação do número de estações de voz, do número de estações de dados e do nome arquivo de saída do simulador (arquivo de *trace*). Assim, a automatização da simulação em todos os cenários foi possível com o uso de um simples shell script recursivo, que variava os parâmetros e chamava o simulador e o analisador (descrito na seção 4.2), gerando os diferentes arquivos de simulação e de estatísticas para cada cenário.

Tabela 4.2: Fluxo de Pacotes de Voz Modelado

	<i>G.711</i>	<i>G.729A</i>	<i>G.723.1</i>	<i>Nível</i>
Latência (ms)	20	20	30	Script
Quadro do codificador (bytes)	160	20	24	Script
Cabeçalho RTP (bytes)	12	12	12	Script
Cabeçalho UDP (bytes)	8	8	8	Script
Cabeçalho IP (bytes)	20	20	20	NS
Cabeçalho MAC (bytes)	28	28	28	NS
PLCP Tail + Pad (bytes)	13	18	14	Script
<b>Subtotal (bytes)</b>	<b>241</b>	<b>106</b>	<b>106</b>	
<b>Subtotal (<math>\mu</math>s @54 Mbit/s)</b>	<b>35,7</b>	<b>15,7</b>	<b>15,7</b>	
Cabeçalho PLCP (bits)	40	40	40	Script
<b>Subtotal (24 bits, <math>\mu</math>s @ 6 Mbit/s)</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	
<b>Subtotal (16 bits, <math>\mu</math>s @ 54 Mbit/s)</b>	<b>0,296</b>	<b>0,296</b>	<b>0,296</b>	
Preâmbulo ( $\mu$ s)	16	16	16	Script
Signal Extension ( $\mu$ s)	6	6	6	Script
<b>Subtotal (<math>\mu</math>s @ 6 Mbit/s)</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	
<b>TOTAL (<math>\mu</math>s)</b>	<b>62</b>	<b>42</b>	<b>42</b>	

Já as estações de dados, quando presentes, representam no modelo proposto nodos com aplicações que não possuem restrições temporais em seus tráfegos, e por isso também serão referidas como “estações de baixa prioridade”. Ao contrário das estações de voz, estas não fazem parte da lista de *polling* no PC, quando o cenário incluir o modo PCF. Também, o fluxo dos dados modelado para estas estações é assimétrico, onde a direção AP-Estação possui taxa média de aproximadamente 285 kbit/s, e a direção oposta em torno de 50 kbit/s. A razão disto é assemelhar o modelo aos casos onde as estações fazem o papel de cliente, que na maior parte do tempo de operação ficam buscando informações de servidores remotos, o que para o autor tende a ser a maioria dos casos de uso em termos qualitativos.

Os quadros de dados trafegam na rede sobre o protocolo de transporte UDP, com diferentes tamanhos para cada direção do fluxo e são gerados em rajadas com tamanhos que obedecem a uma distribuição exponencial. Os parâmetros relativos aos tráfegos de dados são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.3: Fluxos de Pacotes de Dados Modelados

	<i>AP-Estação</i>	<i>Estação-AP</i>
Rajada média (ms)	50	100
Taxa de Rajada (kbit/s)	2000	400
Inatividade média (ms)	300	700
Tamanho do Pacote (bytes)	1000	600
Cabeçalho IP	20	20
Cabeçalho MAC (bytes)	28	28
PLCP Tail + Pad (bytes)	3	25
<b>Subtotal (bytes)</b>	<b>1051</b>	<b>673</b>
<b>Subtotal (<math>\mu</math>s @54 Mbit/s)</b>	<b>155,7</b>	<b>99,7</b>
Cabeçalho PLCP (bits)	40	40
<b>Subtotal (24 bits, <math>\mu</math>s @ 6 Mbit/s)</b>	<b>4</b>	<b>4</b>
<b>Subtotal (16 bits, <math>\mu</math>s @ 54 Mbit/s)</b>	<b>0,296</b>	<b>0,296</b>
Preâmbulo ( $\mu$ s)	16	16
Signal Extension ( $\mu$ s)	6	6
<b>Subtotal (<math>\mu</math>s @ 6 Mbit/s)</b>	<b>22</b>	<b>22</b>
<b>TOTAL (<math>\mu</math>s)</b>	<b>182</b>	<b>126</b>

Além dos dois tipos de tráfego de interesse detalhados, consta no modelo um terceiro tipo. Trata-se de um fluxo CBR unidirecional que parte do AP e vai até cada uma das estações. O propósito deste tráfego, que é ativado antes de qualquer um dos outros dois, é unicamente de inicializar as tabelas ARP de todas as estações para que a troca de mensagens deste protocolo não afete a análise dos fluxos que são realmente o objeto do estudo. Durante esta inicialização, apenas um pacote é enviado para cada estação, com intervalo de 200 ms entre as estações para certificar que a estação anterior já tenha tido sua tabela criada e o AP também atualize a sua.

Quanto ao posicionamento físico das estações, visto que não é do interesse desta pesquisa estudar a adaptação da PHY a diferentes distâncias, ou ainda analisar problemas como o do ‘nodo oculto’, optou-se por dispor as todas as estações no mesmo ponto dentro de um plano XY, distantes 10 metros do AP. Outra opção que essencialmente traria um resultado similar seria dispô-las circundando o AP, mas esta topologia tornou-se difícil pela baixa resolução do plano XY do simulador (0,5 metro), o que não iria permitir que as estações ficassem realmente equidistantes. Por outro lado, esta distância de 10 metros foi arbitrada de forma a permitir que todas as estações consigam atingir sua vazão máxima no meio físico, os 54 Mbit/s no caso da PHY 802.11g. Além disso, esta separação física se assemelha a de uma infra-estrutura real, como uma sala de conferência, um saguão de aeroporto ou um cyber-café, embora não tenha sido considerado no modelo nenhum obstáculo nem interferências na banda de frequência utilizada. É importante ressaltar também que em nenhum dos cenários simulados foi considerada a hipótese de haver estações no modo de economia de energia ou haver interferências eletromagnéticas na banda dos 2.4 GHz, ou seja, a taxa de erro no canal é considerada nula.

Como é sabido, o AP concentra de todos os fluxos de pacotes e possui como uma de suas funções críticas a distribuição dos pacotes endereçados a cada uma das estações. Mas para fazer isso com êxito, foi necessário alterar o valor padrão do seu comprimento

da fila de pacotes para interface MAC, que inicialmente era 50. O novo valor, 500 pacotes, foi escolhido de forma a acomodar com folga as rajadas do tráfego de dados de até 20 estações e ainda manter os pacotes de voz gerados por até 200 estações por mais de um período de latência do codificador. Desta forma, não deverá ocorrer descarte de pacotes da fila enquanto o sistema não exceder sua capacidade nominal.

No que se refere à camada PHY, o modelo desenvolvido define os parâmetros a fim de compatibilizá-la com a extensão 802.11g em modo ERP-OFDM, como apresentado na tabela 4.4. Deve-se lembrar que o comando ‘use-OFDM’, criado para este trabalho, também deve ser executado a fim de obter compatibilidade do simulador com a extensão mencionada.

Tabela 4.4: Parâmetros 802.11g ERP-OFDM

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
basicRate_	24 Mbit/s	SlotTime_	9 $\mu$ s
dataRate_	54 Mbit/s	SIFS_	10 $\mu$ s
PLCPDataRate_	6 Mbit/s	PreambleLength_	96 bits
<b>SignalExtension_</b>	<b>6 <math>\mu</math>s</b>	PLCPHeaderLength_	40 bits

Obs.: a variável ‘SignalExtension\_’ foi criada nesta implementação

Outros parâmetros, relativos à camada MAC, também são configurados pelo script de simulação produzido, como é apresentado na tabela 4.5, adiante. Observa-se que, da maneira como está definida a variável RTSThreshold, os quadros de RTS e CTS nunca serão utilizados nos experimentos.

Tabela 4.5: Parâmetros 802.11 MAC

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
CWMin_	15	RTSThreshold_	1500 bytes
CWMax_	1023	ShortRetryLimit_	7
		LongRetryLimit_	4

#### 4.1.3 Validação do Modelo

Esta etapa, na realidade, foi realizada concomitantemente com a anterior, num ciclo de desenvolvimento em espiral. A cada nova modificação no simulador, nova etapa de validação do código era realizada. Na grande maioria das vezes, esta checagem era feita com inspeção visual do arquivo de simulação (*trace*) gerado, comparando-o com as especificações do padrão (IEEE, 1999-b) e suas extensões ‘g’ (IEEE, 2003) e ‘a’ (IEEE, 2000), com os cálculos realizados com base nas mesmas informações e com alguns artigos da área.

##### 4.1.3.1 Camadas MAC 802.11 e PHY 802.11g

As primeiras validações do modelo de simulação foram realizadas com o intuito de depurar a funcionalidade do simulador no modo PCF. Nesta fase, apenas a análise do arquivo de *trace*, com especial atenção na camada MAC, e sua comparação com referências como (IEEE, 1999-a) foram suficientes para que a simulação pudesse ser considerada válida.

O primeiro passo na validação do simulador foi certificar que as alterações não influenciaram no comportamento do modo de acesso básico, o DCF. Para isso, como mencionado anteriormente, foi executado o mesmo script de simulação duas vezes, gerando dois arquivos que em seguida foram comparados com o programa ‘diff’ para Linux. A diferença entre as execuções seqüenciais do script estava na forma como o NS-2 havia sido compilado: a primeira com a *flag* PCF\_SUPPORT definida, enquanto na segunda não. Os dois arquivos de *trace* gerados não apresentaram nenhuma diferença, o que leva a supor que o modo DCF ficou preservado, pelo menos na ausência do modo PCF no mesmo cenário.

Adicionalmente ao modo de validação por comparação, citado no parágrafo anterior e que pressupõe o correto funcionamento da distribuição original do NS, o arquivo de *trace* teve seu conteúdo analisado. Todos os pontos básicos, passíveis de verificação, como o tamanho dos quadros, os tempos de transmissão e os espaços entre quadros se mostraram coerentes. Parte desta inspeção será explicado em seguida, quando o modo de operação PCF for verificado.

No quadro a seguir (figura 4.3) é apresentado um trecho do arquivo gerado pela simulação e usado na validação do modelo. Para um melhor entendimento do formato disposto no arquivo de *trace* recomenda-se a leitura da seção 3.24 do manual do simulador NS (FALL; VARADHAN, 2006). Na simulação apresentada existem 50 estações de voz e mais 5 de dados, além do próprio AP. O codificador de voz utilizado é o G.711 com quadro de 20 ms. Configurou-se o CFP para ser iniciado a cada 19 TU (19\*1024  $\mu$ s).

O que pode ser entendido a partir da análise da figura é que, em ordem cronológica crescente, a camada física/MAC da estação 35 transmite o pacote de número 53413, tipo rtp, com tamanho 245, para o AP (nodo 0). Verifica-se, em seguida, a recepção deste pacote pelo nível físico/MAC do AP, que após o tempo de um SIFS envia um quadro ACK de volta e, em seguida, recebe o pacote no sua camada de aplicação (AGT). Na seqüência nota-se a geração, no nível de aplicação, de dois pacotes ‘rtp’ (53415 e 53416). Mas entre os dois, a camada MAC do AP envia um quadro de *Beacon*, que posteriormente aparece sendo recebido simultâneamente pelas estações 1, 2, 3, 4 e 5. Na realidade, o quadro de beacon será recebido por todas as estações do BSS, e a partir deste momento se inicia o CFP, com o AP entregando pacotes de voz e requisitando outros das estações na lista de *polling*.

Do trecho exposto pode-se afirmar que partes do mecanismo de acesso e do script de simulação encontram-se coerentes com a especificação apresentada no padrão IEEE 802.11 e com os objetivos propostos. Primeiramente, no que tange os tamanhos dos pacotes apresentados, algumas particularidades devem ser mencionadas. Uma delas é que os pacotes RTP são criados com o tamanho de 180 bytes, equivalente ao quadro de voz e mais os cabeçalhos RTP e UDP. Exatamente como acontece nas linhas 6 e 8 do trecho de arquivo de *trace*. Quando este pacote passa pelo nível de roteamento, omitido neste trecho para facilitar o entendimento, ele recebe mais 20 bytes do cabeçalho do protocolo IP. Chega então ao nível MAC com 200 bytes, mas sai dali com 245 bytes, como pode ser verificado na primeira linha. Estes 45 bytes adicionados, porém, não condizem à realidade por dois motivos: o primeiro é que eles representam não só o cabeçalho da camada MAC, mas também aos campos da camada PHY, uma vez que a implementação das duas é feita de forma unificada; e o segundo é porque, conforme já foi mencionado, a extensão de código desenvolvida para dar suporte a PHYs OFDM não adiciona os campos *Tail* e *Pad* na informação de tamanho do pacote, mas apenas corrige esta característica no tempo de transmissão. Nos 45 bytes adicionados, oriundos

da implementação original de redes 802.11 no NS-2, estão contemplados os 28 bytes do cabeçalho MAC, os 5 bytes do cabeçalho PLCP e ainda 12 bytes simbolizando o preâmbulo PLCP (o que dá exatamente os 16  $\mu$ s se transmitido a 6 Mbit/s, como é o caso). Mas é interessante notar também que os mesmos pacotes RTP chegam ao nível de aplicação com 200 bytes, e não os mesmos 180 como eles são gerados. Esta é outra característica herdada da implementação original do NS-2 que mereceria uma maior atenção, pois aparentemente os pacotes são enviados ao nível de aplicação ainda com o cabeçalho IP, podendo gerar incongruências em cálculos onde número de bytes enviados e recebidos neste nível sejam relevantes. Não obstante, todos os quadros exclusivos do modo PCF mais o quadro de *Beacon* apresentam-se com tamanho igual a 45 bytes, o que não condiz com seus tamanhos reais, apresentados no capítulo 3 e usados no cálculo do tempo de transmissão. Assim, também estes quadros, embora apresentem comprimentos diferentes dos esperados, estão com seus períodos de ocupação do meio calculados corretamente.

```

...
s 25.701168000 _35_ MAC --- 53413 rtp 245 [44 0 35 2048] ----- [35:0 0:102 32 0]
r 25.701230000 _0_ MAC --- 53413 rtp 245 [44 0 35 2048] ----- [35:0 0:102 32 0]
s 25.701240000 _0_ MAC --- 0 ACK 31 [0 35 0 0]
r 25.701255000 _0_ AGT --- 53413 rtp 200 [44 0 35 2048] ----- [35:0 0:102 32 0]
r 25.701274000 _35_ MAC --- 0 ACK 31 [0 35 0 0]
s 25.701281000 _0_ AGT --- 53415 rtp 180 [0 0 0 0] ----- [0:127 43:1 32 0]
s 25.701392000 _0_ MAC --- 0 BCN 45 [0 -1 0 25956]
s 25.701394000 _18_ AGT --- 53416 rtp 180 [0 0 0 0] ----- [18:0 0:51 32 0]
r 25.701446000 _1_ MAC --- 0 BCN 45 [0 -1 0 25956]
r 25.701446000 _2_ MAC --- 0 BCN 45 [0 -1 0 25956]
r 25.701446000 _3_ MAC --- 0 BCN 45 [0 -1 0 25956]
r 25.701446000 _4_ MAC --- 0 BCN 45 [0 -1 0 25956]
r 25.701446000 _5_ MAC --- 0 BCN 45 [0 -1 0 25956]
...

```

Figura 4.3: *Trace* da geração do Quadro de *Beacon*

Ainda analisando o trecho de arquivo de *trace* apresentado na figura 4.3, pode-se validar a utilização do meio físico checando os tempos de transmissão e de intervalo entre os quadros. Por exemplo, entre a primeira e a segunda linha, o tempo de transmissão do quadro pode ser extraído subtraindo-se os tempos de cada um dos eventos, o que neste caso vale 62  $\mu$ s. Não por acaso, este é exatamente o tempo calculado e apresentado na tabela 4.2 como o período total de ocupação do meio, lembrando que o atraso de propagação foi desconsiderado por ser de pouca relevância no cálculo. Da mesma forma, esta verificação foi estendida a todos os quadros de interesse presentes nas simulações realizadas, obtendo-se na totalidade deles a validação dos tempos de transmissão. A seguir, na tabela 4.6 são apresentados os tempos de transmissão teóricos e de simulação dos outros quadros utilizados.

Tabela 4.6: Transmissão dos Quadros MAC 802.11

<i>Tipo do Quadro</i>	<i>Taxa</i>	<i>Tempo</i>
ACK	24 Mbit/s	34 $\mu$ s
Beacon	24 Mbit/s	54 $\mu$ s
CF-Poll, Data + CF-Poll, CF-Poll + CF-ACK, Data + CF-Poll + CF-ACK	54 Mbit/s	34 $\mu$ s
CF-End, CF-End+CF-ACK	24 Mbit/s	34 $\mu$ s

Os intervalos entre os quadros são outros dados que também estão especificados nos documentos do padrão IEEE 802.11. Alguns deles são determinísticos, como tempo para que uma estação responda com quadro ACK a um pacote recebido, outros só podem ser verificados se pertencem a uma faixa de valores esperados, como é o caso do início de uma transmissão durante o modo DCF, que obedece ao algoritmo *Binary Exponential Backoff*. No trecho de simulação apresentado anteriormente o envio do quadro ACK durante a operação em DCF está correto, pois é realizado em um SIFS (IEEE, 1999-b, *clause* 9.2.3.1), o que para o PHY em estudo equivale a 10  $\mu$ s. É importante ressaltar, também, que o tempo para o envio do ACK é mesmo em ambos os modos de operação da rede WLAN 802.11, DCF ou PCF. De maneira similar, o espaço de tempo entre a recepção do quadro ACK e a transmissão quadro de *Beacon* também está em conformidade com o especificado pela IEEE. Nota-se neste ponto o tempo de 118  $\mu$ s, que significa que o AP respeitou o intervalo mínimo entre quadros para iniciar a transmissão do *Beacon* (IEEE, 1999-b, *clause* 9.3), um SIFS, e também que nenhuma outra estação ocupou o meio após o tempo mínimo de espera em DCF (IEEE, 1999-b, *clause* 9.2.3.3), um DIFS, que equivale a 28  $\mu$ s ( $2 \times Slot + SIFS$ ). Características que mantêm-se respeitadas no trecho da figura 4.4, onde se pode verificar exatamente a transmissão do quadro de *Beacon* subsequente ao mostrado na figura 4.3.

```

...
r 25.720621000 _17_ MAC --- 0 ACK 31 [0 17 0 0]
s 25.720655000 _35_ AGT --- 53525 rtp 180 [0 0 0 0] ----- [35:0 0:102 32 0]
s 25.720676000 _0_ MAC --- 53355 exp 1065 [44 51 0 2048] ----- [0:151 51:1 32 51]
s 25.720744000 _0_ AGT --- 53526 rtp 180 [0 0 0 0] ----- [0:94 32:1 32 0]
r 25.720858000 _51_ MAC --- 53355 exp 1065 [44 51 0 2048] ----- [0:151 51:1 32 51]
s 25.720868000 _51_ MAC --- 0 ACK 31 [0 0 0 0]
r 25.720883000 _51_ AGT --- 53355 exp 1020 [44 51 0 2048] ----- [0:151 51:1 32 51]
r 25.720902000 _0_ MAC --- 0 ACK 31 [0 0 0 0]
s 25.721029000 _35_ MAC --- 53525 rtp 245 [44 0 35 2048] ----- [35:0 0:102 32 0]
r 25.721091000 _0_ MAC --- 53525 rtp 245 [44 0 35 2048] ----- [35:0 0:102 32 0]
s 25.721101000 _0_ MAC --- 0 ACK 31 [0 35 0 0]
r 25.721116000 _0_ AGT --- 53525 rtp 200 [44 0 35 2048] ----- [35:0 0:102 32 0]
r 25.721135000 _35_ MAC --- 0 ACK 31 [0 35 0 0]
s 25.721145000 _0_ MAC --- 0 BCN 45 [0 -1 0 31076]
...

```

Figura 4.4: Trace para verificação do intervalo do CFP

Diferentemente daquilo que havia sido programado no script de simulação, onde o CFP deveria compreender 19 TU (19456  $\mu$ s), o envio do segundo quadro de Beacon, e também início do CFP, ocorreu 19,753 ms após a transmissão do primeiro, segundo as

informações da figura 4.4. Todavia, embora isso possa parecer estranho, na realidade modela o comportamento exato do que é estabelecido no padrão IEEE 802.11, pois o atraso foi gerado em função da ocupação momentânea do meio físico. Mas assim que a transmissão corrente naquele instante se concluiu, um período SIFS foi aguardado e logo o AP deu início ao período livre de contenção.

A continuidade da validação das outras funções da rede, sejam implementadas ou legadas, seguiram o mesmo caminho das mencionadas anteriormente. Uma checagem minuciosa e especializada foi feita caso a caso, sempre que uma nova variação de funcionalidade era requerida pelo cenário. Na figura 4.5, para exemplificar outros casos interessantes, são apresentados 4 novos trechos da mesma simulação anterior. Todos eles pertencentes ao período de operação em PCF.

```

...
r 25.721209000 _54_ MAC --- 0 BCN 45 [0 -1 0 31076]
r 25.721209000 _55_ MAC --- 0 BCN 45 [0 -1 0 31076]
s 25.721219000 _0_ MAC --- 53425 rtp 245 [32768 1 0 2048] ----- [0:1 1:1 32 1]
r 25.721281000 _1_ MAC --- 53425 rtp 245 [32768 1 0 2048] ----- [0:1 1:1 32 1]
s 25.721281000 _0_ AGT --- 53527 rtp 180 [0 0 0 0] ----- [0:127 43:1 32 0]
s 25.721291000 _1_ MAC --- 0 ACK 31 [0 0 0 0]
r 25.721306000 _1_ AGT --- 53425 rtp 200 [32768 1 0 2048] ----- [0:1 1:1 32 1]
r 25.721325000 _0_ MAC --- 0 ACK 31 [0 0 0 0]
...
r 25.759833000 _55_ MAC --- 0 BCN 45 [0 -1 0 40804]
s 25.759843000 _0_ MAC --- 0 POL 45 [32768 1 0 0]
r 25.759877000 _1_ MAC --- 0 POL 45 [32768 1 0 0]
s 25.759906000 _0_ MAC --- 53660 rtp 245 [32768 2 0 2048] ----- [0:4 2:1 32 2]
r 25.759968000 _2_ MAC --- 53660 rtp 245 [32768 2 0 2048] ----- [0:4 2:1 32 2]
...
s 25.860342000 _32_ MAC --- 54288 rtp 245 [32768 0 32 2048] ----- [32:0 0:93 32 0]
r 25.860404000 _0_ MAC --- 54288 rtp 245 [32768 0 32 2048] ----- [32:0 0:93 32 0]
s 25.860414000 _0_ MAC --- 0 POA 45 [32768 33 0 0]
r 25.860429000 _0_ AGT --- 54288 rtp 200 [32768 0 32 2048] ----- [32:0 0:93 32 0]
r 25.860448000 _33_ MAC --- 0 POA 45 [32768 33 0 0]
s 25.860458000 _33_ MAC --- 54295 rtp 245 [32768 0 33 2048] ----- [33:0 0:96 32 0]
r 25.860520000 _0_ MAC --- 54295 rtp 245 [32768 0 33 2048] ----- [33:0 0:96 32 0]
...
s 25.862181000 _50_ MAC --- 54291 rtp 245 [32768 0 50 2048] ----- [50:0 0:147 32 0]
r 25.862196000 _50_ AGT --- 54274 rtp 200 [32768 50 0 2048] ----- [0:148 50:1 32 50]
r 25.862243000 _0_ MAC --- 54291 rtp 245 [32768 0 50 2048] ----- [50:0 0:147 32 0]
s 25.862253000 _0_ MAC --- 0 CEA 45 [32768 -1 0 0]
r 25.862268000 _0_ AGT --- 54291 rtp 200 [32768 0 50 2048] ----- [50:0 0:147 32 0]
r 25.862287000 _1_ MAC --- 0 CEA 45 [32768 -1 0 0]
r 25.862287000 _2_ MAC --- 0 CEA 45 [32768 -1 0 0]
...

```

Figura 4.5: *Trace* dos quadros em PCF

No primeiro dos quatro trechos, chama a atenção o envio do quadro ‘Data+CF-Poll’ para a estação 1. Enviado após um período SIFS, decorrido desde o recebimento do quadro de *Beacon* pelas estações, o pacote de dados que também contém uma autorização para que a estação 1 envie algum quadro armazenado não pode ser identificado de maneira unívoca no arquivo *trace*. Isto acontece porque o autor preferiu omitir esta informação para privilegiar o rastreamento dos quadros com informações do nível de usuário. Entretanto, numa rápida análise contextual do *trace*, é capaz de se inferir que o quadro também carrega a informação do *polling*, e, eventualmente, mais a

informação de confirmação de recebimento (ACK) para a estação anterior da lista. Nota-se neste trecho que, em virtude do fato da estação 1 não possuir nenhum quadro para enviar ela retorna um ACK, indicando que o pacote de usuário foi recebido. Caso contrário, se esta estação tivesse recebido um quadro com a requisição ‘CF-Poll’, mas sem nenhum pacote de usuário, ela iria se omitir e o AP, após um período PIFS (*Slot* + SIFS), enviaria a requisição para a próxima estação da lista (IEEE, 1999-b, *clause* 9.3.3), como acontece no segundo trecho apresentado. Convém ressaltar, porém, que o período PIFS corresponde ao período de inatividade no meio físico, ou seja, o tempo de transmissão do quadro ‘CF-Poll’ deve ser descontado do tempo de espera.

Já no terceiro e quarto trechos da figura 4.5, são mostrados exemplos da implementação dos quadros ‘CF-Poll+CF-ACK’ e ‘CF-End+CF-ACK’, respectivamente simbolizados pelos identificadores POA e CEA.

Ao término desta tarefa de validação pontual das funcionalidades da WLAN IEEE 802.11 no simulador, partiu-se para um tipo de validação mais “macro”. Uma vez que todos os tipos de quadros utilizados, com seus tempos de transmissão, tamanhos, períodos de intervalo e aplicação contextual, foram considerados compatíveis com as normas e padrões aplicáveis, uma verificação quantitativa dos fluxos modelados se fez necessária. Desta forma a próxima seção, que descreve o uso e o funcionamento da ferramenta de análise da simulação, dará continuidade a espiral de desenvolvimento, mostrando mais algumas etapas de validação do modelo.

## 4.2 Análise dos Dados da Simulação

Obtidos e devidamente validados os arquivos de saída do simulador, também chamados de arquivos de *trace*, é necessário então, a partir dos mesmos, obter os dados de interesse do trabalho, dados de um nível de abstração bem mais alto do que o simples registro da sucessão de eventos no simulador. Nesta etapa inicia-se a análise dos arquivos de *trace* do simulador visando a determinação das características de rede do cenário simulado. Para tanto, como foi mencionado anteriormente, foi utilizado um programa gratuito pra fins acadêmicos, chamado Trace Graph, versão 2.02. Com o uso desta ferramenta, métricas como o atraso, o jitter, a vazão e a taxa de perdas de pacotes puderam ser extraídas dos arquivos gerados pela simulação. Disponível em versões tanto para Windows quanto para Linux, o programa foi instalado e executado a partir do mesmo ambiente que rodou as simulações.

O primeiro passo, após a correta instalação do simulador, foi o teste de suas funcionalidades com pequenos arquivos de *trace* com conteúdo bem conhecido. Desta forma simples foram validadas todas as análises de interesse para o trabalho, como a contagem de pacotes gerados, enviados, descartados e perdidos, o período de simulação de um tráfego específico, a vazão instantânea, o atraso fim-a-fim e a variação do atraso (jitter). Todos os arquivos de simulação, como é recomendado no arquivo de ajuda do programa (MALEK, 2003), foram gerados com os *traces* dos níveis de aplicação (AGT) e roteamento (RTR) habilitados para uma correta interpretação da saída das simulações.

A seguir, é apresentada a metodologia de obtenção de cada uma das métricas desejadas.

### 4.2.1 Taxa de Perda de Pacotes

Embora o analisador seja capaz de gerar gráficos e estatísticas automaticamente sobre os pacotes perdidos, esta informação não se mostra eficaz em virtude da diferenciação entre os pacotes descartados e os pacotes perdidos na aplicação. Para o

Trace Graph, pacotes perdidos são todos aqueles que são transmitidos (eventos ‘s’) mas nunca recebidos (eventos ‘r’) na estação de destino. Exemplo disso são os pacotes não recebidos por causa de interferências no meio físico, déficit de potência no transmissor ou, nos casos pertinentes ao trabalho, descartados definitivamente no nível MAC por problemas como o atingimento do número máximo de retransmissões ou a expiração do tempo de validade do pacote.

Por outro lado, são os pacotes descartados (eventos ‘D’ do simulador) que formam a maioria absoluta dos pacotes com insucesso nas transmissões realizadas nas simulações executadas. Estes eventos ocorrem quase na totalidade dos casos em virtude do estouro da fila de pacotes que aguardam sua vez para serem transmitidos pelo nível físico. Esta fila, conhecida no simulador como IFQ (*Interface Queue*), reside entre o nível de roteamento/rede e a camada MAC, e tem seu comprimento definido pelo usuário no script de simulação, como descrito previamente. No momento que o meio físico atinge a saturação, esta fila começa a crescer em todas as estações, mas de forma muito mais acentuada dentro AP, que concentra todos os fluxos e, por conseguinte, é o responsável pela maioria dos eventos de descarte de pacotes.

Assim sendo, os números relativos à taxa de perda de pacotes, importantes no desenvolvimento do fator R de avaliação da qualidade de voz, são determinados a partir da soma dos dois tipos de falhas na transmissão. O relatório ‘*Simulation info*’ é a função que fornece, entre outros dados, as informações requeridas. Para exemplificar, a saída deste relatório na análise referente aos pacotes do tipo RTP numa simulação com 80 estações de voz mais o AP é apresentada logo a seguir, na figura 4.6.

Simulation information:	
Simulation length in seconds:	25.086199
Number of nodes:	81
Number of sending nodes:	81
Number of receiving nodes:	81
Number of generated packets:	199584
Number of sent packets:	146552
Number of forwarded packets:	0
Number of dropped packets:	53032
Number of lost packets:	0
Minimal packet size:	40
Maximal packet size:	60
Average packet size:	53.3333
Number of sent bytes:	8793120
Number of forwarded bytes:	0
Number of dropped bytes:	3181920
Packets dropping nodes:	0 2 7 10 15 22 30 39 40 41

Figura 4.6: Relatório de Informações da Simulação

Destes dados criados pelo analisador, o número de pacotes gerados, enviados, descartados e perdidos são colocados numa tabela do software de planilha eletrônica MS Excel<sup>1</sup>, da Microsoft, para que seja gerado o resultado de interesse, a taxa de perda de pacotes em cada um dos cenários. Em 4.1 é mostrada a fórmula utilizada para a extração desta métrica a partir dos dados mencionados.

$$\% \text{ perda de pacotes} = \frac{(\text{Number of dropped packets}) + (\text{Number of lost packets})}{(\text{Number of generated packets})} \quad (4.1)$$

#### 4.2.2 Atraso Fim-a-Fim

Esta, na realidade, é uma das métricas requeridas pelo Modelo E na determinação da estimativa de qualidade de voz. O fator  $I_d$ , como mostrado no capítulo 2, modela justamente a degradação percebida pelo usuário de acordo com o atraso fim-a-fim dos pacotes. A seguir, vê-se um histograma com a distribuição dos atrasos fim-a-fim dos pacotes gerados pelo programa quando analisando um dos cenários experimentados neste trabalho. Na figura verifica-se a grande diferença entre a distribuição de frequência de *jitter* e esta, especialmente na densidade do primeiro intervalo. Mas apenas com o histograma da figura 4.8 é que se pode conhecer a distribuição efetiva de atraso dos pacotes, inclusive com seu tempo mínimo de transmissão, que não aparece no gráfico devido à resolução da escala, mas que pode ser visto no arquivo textual disponibilizado pelo software como sendo 112  $\mu\text{s}$  (Figura 4.9).

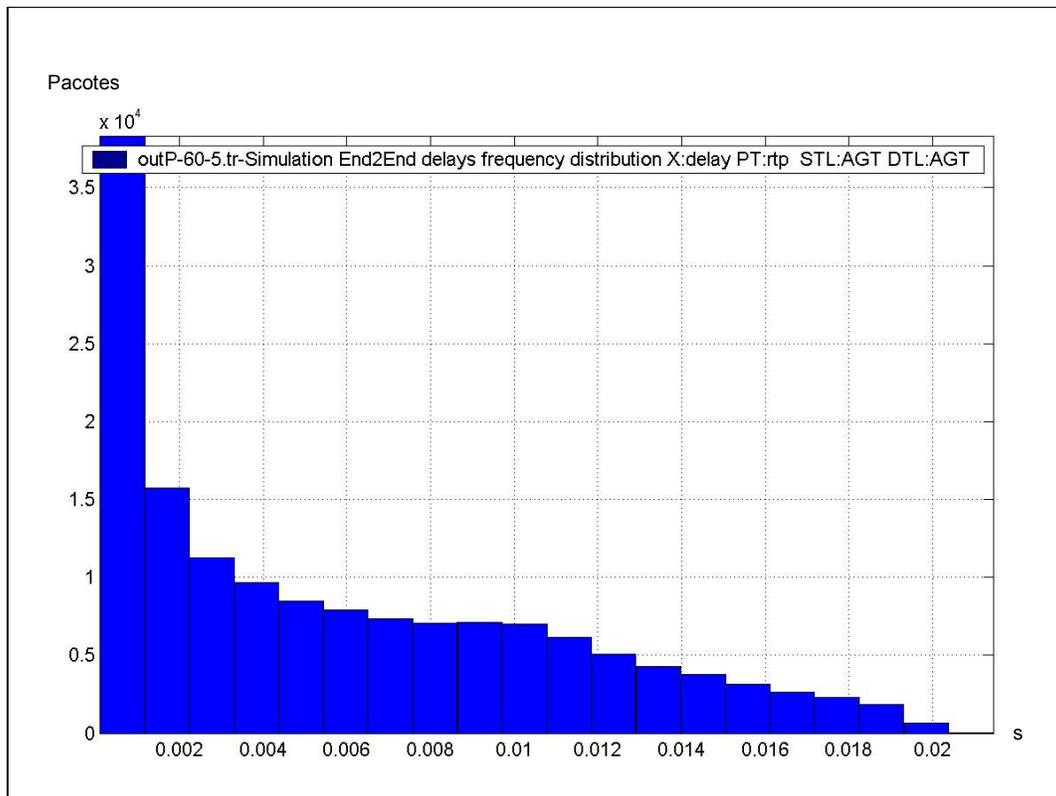


Figura 4.8: Distribuição de Frequência do Atraso Fim-a-Fim

Considerando-se então que a geração dos pacotes no nível de aplicação é precisamente cadenciada, a informação provida por esta análise permite a extração do impacto da rede IEEE 802.11 modelada na variação do atraso de forma absoluta.

Os valores de formação do histograma, oferecidos também textualmente pelo software e apresentados no quadro 4.9, são utilizados na obtenção dos dois valores de *jitter* extraídos para cada um dos cenários simulados. Mas isto ocorre apenas após a tabulação dos dados de perda de pacotes, feita da maneira como foi mencionada na subseção 4.2.1. Isto porque o percentual de perda de pacotes é uma informação básica na escolha dos cenários estudados, uma vez que valores em torno 5% de perda no fluxo dos pacotes de voz já colocam a qualidade da conversação no nível de “muitos usuários insatisfeitos” para a maioria dos codificadores, como mostra o gráfico da figura 2.8. Desta forma, foram determinados para cada um dos cenários os valores de *jitter* máximo, que compreende 100% dos pacotes, e de “*jitter* 98%”, cuja abrangência atinge 98% dos pacotes de voz. Estes valores de variação de atraso são então considerados equivalentes ao tamanho, em milissegundos, do elemento de compensação de *jitter* (*dejittering buffer*) idealizado, tornando o atraso do sistema constante e igual a este valor para todos os pacotes.

0.0001120000	38281.0000000000
0.0011787500	15719.0000000000
0.0022455000	11277.0000000000
0.0033122500	9691.0000000000
0.0043790000	8503.0000000000
0.0054457500	7888.0000000000
0.0065125000	7346.0000000000
0.0075792500	7089.0000000000
0.0086460000	7104.0000000000
0.0097127500	6981.0000000000
0.0107795000	6140.0000000000
0.0118462500	5077.0000000000
0.0129130000	4284.0000000000
0.0139797500	3796.0000000000
0.0150465000	3165.0000000000
0.0161132500	2644.0000000000
0.0171800000	2285.0000000000
0.0182467500	1836.0000000000
0.0193135000	656.0000000000
0.0203802500	15.0000000000

Figura 4.9: Descrição Textual do Histograma em 4.8

O *jitter* máximo, tomando como exemplo a distribuição de atrasos da figura 4.9, se refere ao maior valor de atraso apresentado, menos o menor dos atrasos. Entretanto, os valores apresentados na primeira coluna deste quadro se referem ao primeiro valor de cada um dos intervalos do histograma. Então, como o interesse no estudo é o pior caso, deve-se acrescentar ao valor de atraso apresentado na última linha o tempo de um intervalo de dados do histograma, que é sempre constante e, neste caso, igual a 0,00106675 segundo. É importante ressaltar, ainda, que o tamanho dos intervalos e os valores máximo e mínimo do histograma são calculados pelo próprio software, levando à suposição, por parte do autor, que os valores máximo e mínimo do gráfico sejam iguais aos próprios valores máximo e mínimo de atraso por ele calculados. E nesta hipótese, posteriormente, haveria uma divisão desta faixa em 20 intervalos iguais, onde a totalidade dos pacotes ficaria compreendida.

Pouco mais complicado é o cálculo do valor de variação de atraso que compreende 98% dos pacotes gerados. Um cálculo estimado, baseado nas informações do histograma, foi desenvolvido para determinar esta informação. Trata-se de um método

que inicia pelo cálculo do número de pacotes que representam 2% do total de pacotes gerados. Feito isso, são somados os pacotes de cada intervalo do histograma, do final para o início, até que se atinja um ponto onde a adição da quantidade de pacotes do próximo intervalo ultrapassa os 2% calculados anteriormente. Neste momento é feita uma interpolação do próximo intervalo, considerando que os pacotes estejam igualmente distribuídos dentro do mesmo, obtendo-se assim o tempo relativo aos pacotes faltantes na adição para o atingimento dos 2%. Por tratar-se de intervalos não tão grandes, mas com grande quantidade de pacotes, acredita-se que o valor determinado seja muito próximo do real. Por último então é subtraído deste valor obtido o menor dos atrasos apresentados no histograma. Assim, ambas as informações necessárias para a modelagem do atraso total dos sistemas, com 0 e 2% de perda de pacotes, são determinadas e passadas para o Modelo E em conjunto com outros parâmetros.

#### 4.2.3 Taxa de Transmissão de Pacotes

Taxas de transmissão, seja em pacotes ou em bits, estão presentes quase todas as análises de desempenho de redes. Todavia, no caso deste trabalho, estas análises não fazem parte do objetivo principal. Ao contrário, formam um conjunto de estatísticas auxiliares usadas apenas na validação e como facilitador no entendimento da resposta do sistema modelado.

Os gráficos gerados para estes fins apresentam informações de vazão dos pacotes gerados, enviados e recebidos, tanto para os fluxos RTP como os EXP. O fato de haver discrepância entre os tamanhos de pacote registrados nos eventos de envio e de recepção, como foi descrito no item 4.1.2, direcionou o trabalho para o uso de taxas de pacotes por unidade de tempo e não de bits, como talvez fosse o mais natural. O intervalo de cálculo das taxas utilizado nos gráficos é de 0,1 segundo, escolhido de forma a permitir uma melhor resolução. Desta forma, todos os gráficos de vazão apresentam o valor instantâneo, em determinado instante da simulação, do número de eventos dividido por 0,1 segundo. Em outras palavras, o número de pacotes dividido por 0,1.

### 4.3 Complemento Analítico Para Obtenção do Fator R

Para que seja possível estimar a avaliação da qualidade de voz feita pelos usuários de um serviço de conversação, segundo a proposta feita no capítulo 2, é necessário integrar os desenvolvimentos analíticos dos vários fatores que constituem o modelo E, e ainda imputar neles as três variáveis resultantes da análise da simulação: o atraso mínimo fim-a-fim, a variação do atraso e taxa de perda de pacotes.

Inicialmente, retoma-se a equação de determinação do fator R, exposta em 2.1, no capítulo 2, já substituindo os fatores de valor constante calculados no mesmo capítulo. O resultado é apresentado na equação 4.7, logo a seguir.

$$R = 93,06 - I_d - I_{e-eff} \quad (4.7)$$

O segundo passo consiste na determinação do valor dos fatores que possuem variáveis dependentes,  $I_d$  e  $I_{e-eff}$ , que foram desenvolvidos ao longo do capítulo 2, em cada um dos cenários simulados. No cálculo de ambos os fatores, além dos dados obtidos a partir das simulações, o tipo do codificador utilizado exerce influência direta. O comprimento do elemento de compensação de *jitter*, extraído a partir da simulação,

com uso dos atrasos fim-a-fim resultantes, é requerido no cálculo do fator  $I_d$ . Da mesma forma, o fator  $I_{e\text{-eff}}$  utiliza em sua expressão analítica a taxa de perda de pacotes, que é determinada após a análise dos arquivos de simulação. Nos itens a seguir são detalhados os desenvolvimentos analíticos para a determinação de cada um destes fatores.

#### 4.3.1 Fator $I_d$

Sendo o fator do modelo E responsável por modelar a degradação percebida por usuários em relação ao atraso na comunicação, o  $I_d$  é também o parâmetro analiticamente mais complexo na análise proposta neste trabalho. Formado por três fatores que modelam diferentes aspectos impactados pelo atraso, sua equação de formação obedece a expressão 2.4. Cada um desses fatores,  $I_{dte}$ ,  $I_{dle}$  e  $I_{dd}$ , está relacionado originalmente a uma variável diferente referente aos atrasos do sistema, e por isso fez-se a suposição descrita em 2.15, que relaciona estas três variáveis entre si. Desta forma, a única variável relativa ao atraso dos pacotes no sistema será o atraso total, representado por  $T_a$ , e cujo valor é constante para cada cenário devido ao elemento de compensação de *jitter*. Na tabela 4.7 tem-se os atrasos relativos a todo o sistema modelado, como apresentado em 2.3.3.4, excetuando-se os dados variáveis que serão diferentes em cada cenário simulado. A tabela foi montada com base nas tabelas 2.3 e 2.4 e na equação 2.19.

Tabela 4.7: Atrasos do Sistema Modelado

		<i>G.711</i>				<i>G.723.1</i>				<i>G.729a</i>			
$T_{tterm}$ (ms)	$T_{codec\ alg}$	0,125				37,5				15			
	$T_{codec\ comp}$	~ 0				20				10			
	$T_{multiplex\ rtp}$	19,875				0				10			
$T_{rede}$ (ms)	Lat. Trans.	0,025				0,025				0,025			
	$T_{mac}$	$T_{mac}$				$T_{mac}$				$T_{mac}$			
	Lat. Rec.	0,025				0,025				0,025			
	Lat. Rede	0		100		0		100		0		100	
$T_{rterm}$ (ms)	<i>Dejitter</i>	$B_{0p}$	$B_p$	$B_{0p}$	$B_{2p}$	$B_{0p}$	$B_p$	$B_{0p}$	$B_{2p}$	$B_{0p}$	$B_p$	$B_{0p}$	$B_{2p}$
	$T_{codec\ descomp}$	~ 0				2				1			
$T_a - T_{snp}$ (ms)		20,00		120,00		59,50		159,50		36,00		136,00	

Sendo a variável  $T_{mac}$  equivalente ao atraso calculado pelas simulações, incluído o tempo transmissão no meio físico,  $B_{0p}$  e  $B_{2p}$  correspondem ao comprimento dos buffers de *dejitter* estipulados para compensar a variação em  $T_{mac}$ , para os casos de transmissões sem perdas e com 2% dos pacotes perdidos. Logo, no computo do atraso total as duas grandezas não se somam, mas o que acontece é que a variação de atraso individual de cada pacote, representado por  $T_{mac}$ , é substituído pelo atraso constante inserido pelo elemento de compensação de *jitter*,  $B_{np}$ , mais o tempo mínimo de transmissão de um pacote. Além disso, as latências entre as camadas MAC e de aplicação devem ser consideradas, mas elas também já estão incluídas nos valores de atraso calculados a partir das análises das simulações ( $T_{snp}$ , onde 'n' representa a taxa de perdas).

Assim, aos subtotais ( $T_a - T_{snp}$ ) mostrados na tabela 4.7, só será acrescido o tempo extraído do histograma de distribuição de frequência de atrasos,  $T_{s0p}$  ou  $T_{s2p}$ , de acordo

com a taxa de perdas desejada. Estes tempos, analiticamente, corresponderão então às expressões apresentadas a seguir.

$$T_{s0p} = (\text{latência SO transmissor}) + (\text{tempo de transmissão do pacote no meio físico}) + B_{0p} + (\text{latência SO receptor}) \quad (4.8)$$

$$T_{s2p} = (\text{latência SO transmissor}) + (\text{tempo de transmissão do pacote no meio físico}) + B_{2p} + (\text{latência SO receptor}) \quad (4.9)$$

Neste ponto, tendo obtido o valor de  $T_a$ , calcula-se o fator  $I_d$  de acordo com as equações desenvolvidas, tendo como base as equações do item 2.3.3, e mostradas a seguir. O complexo cálculo do fator  $I_d$  foi automatizado com o uso da ferramenta Maple 9.5.

$$I_d = \left[ \frac{94,77 - R_e}{2} + \sqrt{\frac{(94,77 - R_e)^2}{4} + 100} - 1 \right] (1 - e^{-T_a}) + \frac{94,77 - [1228,5(2 \times T_a + 1)^{-0,25}]}{2} + \sqrt{\frac{[94,77 - [1228,5(2 \times T_a + 1)^{-0,25}]]^2}{4} + 169} + I_{dd} \quad (4.10)$$

$$R_e = 207,5 - 100 \log \frac{1 + \frac{T_a}{10}}{1 + \frac{T_a}{150}} + 6e^{-0,3T_a^2} \quad (4.11)$$

$$\text{Se } T_a \leq 100 \text{ ms, } I_{dd} = 0$$

$$\text{Se } T_a > 100 \text{ ms, } I_{dd} = 25 \left\{ \left[ 1 + \frac{\left[ \log \left( \frac{T_a}{100} \right) \right]^6}{\log 2} \right]^{\frac{1}{6}} - 3 \left[ 1 + \frac{\left[ \log \left( \frac{T_a}{100} \right) \right]^6}{3 \times \log 2} \right]^{\frac{1}{6}} + 2 \right\} \quad (4.12)$$

#### 4.3.2 Fator $I_{e\text{-eff}}$

O Fator Efetivo de Falhas do Equipamento,  $I_{e\text{-eff}}$ , é determinado a partir da equação apresentada em 2.21, que demonstra que o fator é dependente das características específicas do codificador de voz utilizado e da resposta do mesmo sob diferentes condições de perda de pacotes. Basicamente, em todos os cenários o fator  $I_{e\text{-eff}}$  será determinado a partir da equação mencionada. Adicionalmente, em alguns casos, será analisado o algoritmo de dejitter dos pacotes como se este descartasse 2% dos pacotes gerados. Na tabela 4.8, apresenta  $I_{e\text{-eff}}$  os codificadores de interesse.

Tabela 4.8: Valores de  $I_{e-eff}$  utilizados

	G.711		G.711 An. I		G.729a		G.723.1	
	Var	2	Var	2	Var	2	Var	2
$I_e$	0		0		11		15	
Bpl	4,3		25,1		19		16,1	
BurtR	-	1	-	1	-	1	-	1
$I_{e-eff}$	Eq. 2.23	30,16	Eq. 2.24	7,01	Eq. 2.25	19	Eq. 2.26	23,84

Notar-se-á, após apresentação dos resultados, no capítulo 5, a grande influência da perda de pacotes no desempenho dos codificadores observado pelos usuários, onde, por exemplo, a qualidade do G.711 decai de “muito bom” quando não há perdas, para “muitos usuários insatisfeitos” quando há 2% de perda nos pacotes. No entanto, já nos codificadores que possuem PLC, a curva de degradação já não se mostra tão acentuada, como atesta o gráfico apresentado no capítulo 2.

## 4.4 Cenários Simulados

Os cenários simulados foram escolhidos com o intuito de fornecer informações relevantes à caracterização da qualidade de experiência em serviços de voz sobre IP em ambientes que assemelhem a *Hot Spots*, públicos ou não, onde a WLAN IEEE 802.11 opere em modo estruturado. Adicionalmente, foram feitas comparações com o modo de acesso básico, o DCF, sem e com estações de dados, e análises do impacto do parâmetro dot11CFPPeriod da MIB IEEE 802.11 e do uso de codificadores de baixa taxa de transmissão (G.723.1 e G.729a).

Considerando que as questões relativas à topologia da rede e à operação das camadas MAC e PHY já foram previamente explanadas nos itens anteriores, esta subseção se concentra em expor os cenários usados nos experimentos e descrever a objetivo em suas escolhas.

### 4.4.1 Variação do Intervalo entre CFPs

A MIB definida pelo padrão IEEE 802.11 permite que, entre outras opções, o período de operação da rede em PCF seja configurado de acordo com o desejado. Basicamente, para fins práticos de uso do modo PCF, duas variáveis comandam esta condição de operação da rede: dot11CFPPeriod e dot11CFPMaxDuration. A primeira é responsável por configurar o intervalo entre sucessivos períodos livre de contenção. Sua unidade, em termos diretos, é a TU, descrita anteriormente e definida no padrão como 1024  $\mu$ s. Mas, na realidade, o período definido pelo número de quadros DTIM, que por sua vez depende possui intervalo dependente dos quadros de Beacon, que, por fim, são configurados em TU (IEEE, 1999). A segunda variável, dot11CFPMaxDuration, refere-se ao tempo máximo ocupado pelo CFP dentro de um período CFPPeriod, com limites mínimo e máximo definidos pelo padrão e tendo como unidade a TU. No mínimo, a duração corresponde a duas vezes o tempo de transmissão do maior quadro, incluindo a fragmentação, mais os tempos do Beacon inicial e do quadro CF-End. No máximo, o tempo do CFP pode ser equivalente ao intervalo entre períodos menos o tempo de transmissão do maior quadro, incluindo quadros de controle, fragmentação e os intervalos entre quadros (IEEE, 1999-b, *clause* 9.3.3.3).

<sup>1</sup>Todos os direitos reservados para Mapplesoft.

Fica claro então que, enquanto a variável *dot11CFPPeriod* determina a frequência com que acontecem os períodos CF, *dot11CFPMaxDuration* é responsável pela divisão das fatias de tempo entre os modos PCF e DCF. Mas, de acordo com a implementação da lista de *polling* e da quantidade de tráfego na rede, esta razão entre a duração do CFP e o intervalo entre CFPs pode acabar sendo reduzida. Isto porque a maneira com que o PC deve implementar a lista não é totalmente definida no padrão (LI; LI; CAI, 2004), e da maneira como Lindgren e Almquist conceberam o modelo utilizado, cada estação receberá, no máximo, uma única requisição de transmissão (*poll*). Depois disso, mesmo que ainda reste algum tempo para o CFP, o quadro CF-End é enviado e a operação em modo DCF é iniciada antecipadamente. Desta forma, o tempo médio de operação em DCF tende a ser sempre maior que o especificado pela diferença entre *dot11CFPPeriod* e *dot11CFPMaxDuration*.

Sendo o interesse principal deste trabalho caracterizar a capacidade da WLAN IEEE 802.11 para serviços de voz, o tempo reservado para DCF dentro dos *superframes* (como é chamada a soma dos períodos livre de contenção e com contenção) será sempre o mínimo, respeitada a resolução da TU. Ou seja, se o CFP for configurado com o valor de 100 TU, a duração máxima do CFP será equivalente a 99 TU. Em outros trabalhos, como (LINDGREN; ALMQUIST, 2001-b) foi atribuída a esta variável valores em frações de TU, o que na interpretação do padrão feita pelo autor não é possível, segundo a descrição da cláusula 7.3.2.5 em (IEEE, 1999-b).

Então, para caracterização unicamente do efeito da variação do intervalo entre CFPs na capacidade da rede IEEE 802.11 em dar suporte a aplicações de voz, foram feitas simulações com as particularidades expostas na tabela 4.9.

Tabela 4.9: Cenários Utilizados no Estudo do Impacto do Intervalo entre CFPs

<i>Simul.</i>	<i>Cen.</i>	<i>STAs de Voz</i>	<i>Codific.</i>	<i>STAs de Dados</i>	<i>Atraso de Rede (ms)</i>	<i>CFP Period (TU)</i>	<i>CFP MaxDur. (TU)</i>
1 a 7	1 <sup>a</sup> 28	10, 35, 60, 85, 100, 120 e 140	G.711, G.711 + PLC	0	0, 100	9	10
8 a 15	29 <sup>a</sup> 60	5, 20, 45, 70, 100, 115, 130 e 150	G.711, G.711 + PLC	0	0, 100	18	19
17 a 22	62 <sup>a</sup> 88	10, 35, 60, 85, 100, 120 e 140	G.711, G.711 + PLC	0	0, 100	19	20
23 a 29	89 <sup>a</sup> 116	10, 35, 60, 85, 100, 120 e 140	G.711, G.711 + PLC	0	0, 100	39	40

Cada simulação diz respeito a um ambiente de rede, com um número fixo de estações. Como a intenção é também caracterizar a resposta da rede em termos de sua capacidade máxima (número de estações), várias simulações foram realizadas no intuito de formar um gráfico dependente do número de estações. Desta forma, no mínimo sete pontos foram simulados para se obter cada uma das curvas desejadas. Para quatro

diferentes valores de CFPeriod/CFPMaxDuration, foram executadas ao todo 29 simulações.

Extraídas das simulações realizadas, as informações de atraso e taxa de perda de pacotes foram utilizadas no cálculo dos fatores  $I_d$  e  $I_{e\text{-eff}}$ , respectivamente. Além disso, ainda neste cálculo, variaram-se dois parâmetros: o atraso na rede externa a WLAN IEEE 802.11 e, para efeito de mera comparação, a ativação ou não do algoritmo de PLC no codificador G.711. Ambas as variações, no entanto, não afetam a simulação, mas apenas o desenvolvimento analítico para obtenção do Fator R.

Como resultado das análises feitas nesses cenários, se obteve um valor “ótimo” de intervalo entre os períodos CF, para o codificador G.711, que foi utilizado como parâmetro fixo nos demais experimentos. Mas as conclusões geradas a partir destes cenários puderam ser estendidas para além das simulações com o codificador G.711, chegando até a codificadores de voz com diferentes latências.

#### 4.4.2 Coexistência com Estações de Dados

O estudo da qualidade do serviço de voz em cenários onde não existem outros tipos de tráfego é válido no sentido de se avaliar a capacidade máxima da rede e, eventualmente, ter alguma aplicação real em BSSs exclusivos de voz. Mas certamente este cenário não reflete a realidade da maioria absoluta das aplicações práticas, tanto corporativas como residenciais. Por conta disso, a resposta do sistema proposto quando inserido em redes que possuam também estações de dados foi estudo a partir dos seguintes cenários, mostrados na tabela 4.10.

Tabela 4.10: Cenários Utilizados no Estudo da Coexistência com Estações de Dados

Simul.	Cenários	STAs de Voz	Codific.	STAs de Dados
30 a 48	117 a 135	5, 20, 40, 60, 80 e 100	G.711	5, 10 e 20
43 a 48	136 a 142	5, 20, 40, 60, 80 e 100	G.711 + PLC	20
49 a 60	143 a 154	5, 20, 40, 60, 80 e 100	G.729a, G.723.1	20

#### 4.4.3 PCF x DCF

Embora a análise da performance do modo DCF não seja o objetivo deste trabalho, a comparação dele com o modo PCF torna-se muito interessante na prática, uma vez que o modo de acesso básico é quase absoluto nas redes IEEE 802.11 implantadas atualmente. Estes cenários permitem a comparação do desempenho de ambos os modos de operação, com e sem estações de dados, considerando-se a mesma PHY 802.11g em modo ERP-OFDM.

Na tabela 4.11 são apresentados os cenários utilizados nesta análise.

Tabela 4.11: Cenários Utilizados na Comparação PCF x DCF

<i>Simul.</i>	<i>Cenários</i>	<i>STAs de Voz</i>	<i>Codific.</i>	<i>STAs de Dados</i>	<i>Modo</i>
8 a 15	29 a 60	5, 20, 45, 70, 100, 115, 130 e 150	G.711	0	PCF
30 a 48	117 a 135	5, 20, 40, 60, 80, 100 e 120	G.711	5, 10 e 20	PCF
61 a 68	155 a 162	5, 20, 40, 60, 80, 100 e 120	G.711	0	DCF
69 a 87	163 a 181	5, 20, 40, 60, 80 e 100	G.711	5, 10 e 20	DCF

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Variação do Intervalo entre CFPs

Visando caracterizar a resposta da WLAN IEEE 802.11 a diferentes tamanhos de *superframe* foram realizados 29 experimentos de simulação que resultaram em 116 diferentes cenários apresentados na seqüência deste item. Entretanto, apesar do elástico número de cenários analisados, o resultado final deste estudo será exposto em apenas 2 figuras por codificador, apresentando a resposta do Fator R sob as diversas condições expostas na tabela 4.9.

#### 5.1.1 Resultados Parciais

Das simulações realizadas e analisadas, vários dados intermediários puderam ser extraídos, em especial aqueles intermediários à obtenção das grandezas que seriam levadas para a etapa analítica da metodologia, conforme a descrição do capítulo anterior.

O primeiro destes cálculos é a determinação da taxa de perda dos pacotes, que apontou os resultados mostrados na figura 5.1, correspondente a tabela 5.1. No gráfico, observa-se claramente a vantagem no uso do período de repetição do CFP equivalente a 19 TU, pois suas perdas ultrapassam os 5% apenas quando a rede aproxima-se de 140 estações. Em seguida, com resultados muito similares, mas já com desempenho significativamente inferior, encontram-se os casos onde o período dos CFPs valem 20 e 10 TU. Por último, com o pior dos resultados, o cenário com repetição do CFP a cada 40 TU chega ao número de 70 estações de voz com praticamente 10% dos pacotes perdidos.

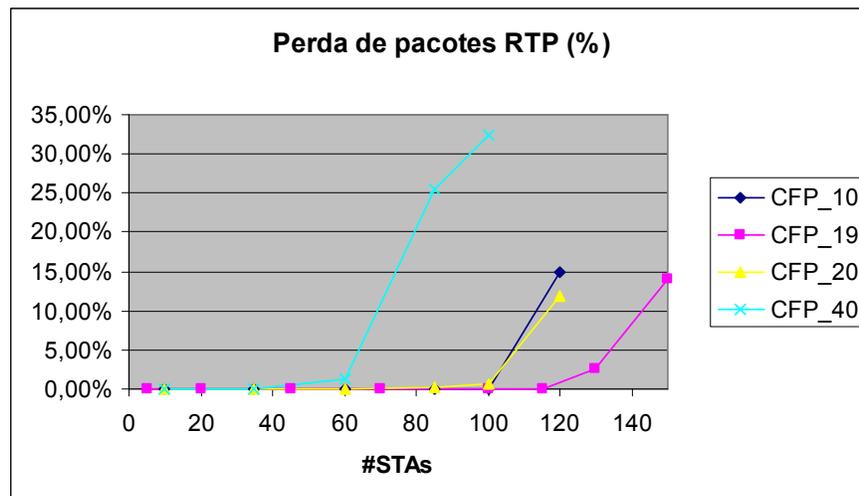


Figura 5.1: Taxa de Perda dos Pacotes com Variação no Período CFP

Tabela 5.1: Pontos das Curvas da Figura 5.1

#STAs	10	19	20	40
5		0 %		
10	0 %		0 %	0 %
20		0 %		
35	0 %		0 %	0 %
45		0 %		
60	0 %		0 %	1,24 %
70		0 %		
85	0 %		0,18 %	25,45 %
100	0 %	0 %	0,72 %	32,39 %
115		0 %		
120	14,86 %		11,99 %	
130		2,51 %		
150		14,02 %		

É importante ressaltar na análise desses resultados que a maneira como foi implementada a funcionalidade da lista de *polling* exerce grande influência nos mesmos. Por exemplo, de acordo com a implementação desta característica no modelo utilizado, criada por Lindgren e Almquist (2001-a), cada estação receberá, no máximo, um *poll* (ou dados mais *poll*) por período. Ou seja, em cenários onde o CFPeriod for maior do que a latência do codificador de voz, serão gerados nas estações mais de um pacote por período. Isto implica que a transmissão do pacote não enviado durante o PCF seja feita no período de contenção (DCF), ou ainda, em caso de insucesso nesta tentativa, o pacote seja mantido na fila. Em cenários deste tipo, se o DCF apresentar alta demanda por transmissão (grande número de estações ou alguma delas requerendo muita banda para si), os pacotes tendem a ser constantemente enfileirados, aumentando o atraso e, em casos mais severos, também a taxa de perda de pacotes. Assim sendo, pode-se pensar que quanto maior a relação *superframe*/latência do codificador, mais próximo o desempenho será do modo DCF. Isto é ratificado pela comparação dos resultados do cenário com período CFP de 40 TU e do modo DCF, mostrado no item 5.3. Isto justifica, também, a sensível diferença dos períodos de 19 e 20 TU, considerando que a latência do codificador reside exatamente entre os dois valores.

Por outro lado, se o período de repetição do CFP for muito menor do que a latência na geração dos pacotes, parte significativa da banda disponível no meio físico será ocupada por quadros CF-Poll sem nenhuma informação de dados ou que não resultam em transmissão por parte da estação. Então, apesar desta abordagem teoricamente reduzir o atraso na transmissão dos pacotes, a eficiência no uso do meio é reduzida, como demonstra a curva referente aos cenários com *superframe* igual a 10 TU na figura 5.1. Verifica-se na tabela 5.1 que, mesmo o cenário com período CFP de 20 TU tendo perda pouco maior no ponto de 100 estações, com 120 estações a curva dos cenários com CFPeriod igual a 10 TU já a excede, atingindo praticamente 15% de perda devido à parcela tempo gasta com quadros de *poll*.

Uma última consideração em relação às taxas de perda de pacotes obtidas diz respeito à relação PCF/DCF máxima nos cenários. Devido à resolução da TU, esta relação pode variar nos experimentos realizados desde 9/10 até 39/40, o que equivale a dizer que o tempo alocado para o modo PCF dentro do *superframe* variou de 90 a 97,5%. Entretanto, isto faz parte das limitações operacionais impostas pela própria

recomendação IEEE 802.11, segundo a interpretação do autor. Sendo assim, nada pode ser feito para se normalizar esta razão.

Não são muitos os trabalhos encontrados que estudem o efeito da variação do intervalo de repetição do CFP. Em (VEERARAGHAVAN; COCKER; MOORS, 2001) é feita uma análise de atraso e capacidade máxima de chamadas simultâneas em função da variação deste parâmetro. Todavia, o estudo, feito em cima das PHYs 802.11 e 802.11b, pressupõe um método dinâmico de agrupamento de quadros de voz em pacotes UDP que equivalha em tempo ao *superframe*. Neste caso, embora o sistema trabalhe sempre na condição ótima determinada anteriormente (latência do codificador = intervalo entre CFPs), ele dificilmente estará refletindo um cenário real, onde as definições da latência dos pacotes de voz e do tamanho do *superframe* encontram-se em camadas e alçadas diferentes, pois aplicação pode variar dinamicamente o codificador utilizado de acordo com as condições da rede. Em outro trabalho, (LINDGREN; ALMQUIST, 2001-b), estudou-se as diferenças na utilização do meio na vazão normalizada dos pacotes quando o intervalo de repetição do CFP é variado. Naquele, assim como neste trabalho, observou-se que intervalos muito pequenos acabam onerando a rede com muito tráfego de gerenciamento/controlado da camada MAC, e intervalos muito longos podem causar atrasos demasiados, mesmo o trabalho não mostrando o comportamento do atraso dos pacotes com diferentes períodos de repetição do CFP. Já num terceiro trabalho, (LI; LI; CAI, 2004), este mais recente, é apresentado um interessante estudo da influência deste parâmetro no atraso, no jitter e na vazão dos pacotes de voz dentro de uma rede com 802.11 (DSSS – 2 Mbit/s). Nele, os autores observaram nos experimentos realizados que o aumento do *superframe*, assim como o aumento do número de estações, leva ao aumento também do atraso médio dos pacotes. Também foi verificado que, quando há muitas estações no BSS, a redução no período de repetição do CFP também acarreta em crescimento no atraso médio, devido à queda na eficiência no uso meio físico por causa dos *polls* enviados às estações sem pacotes a transmitir. Vale ressaltar que, a métrica de atraso médio, desacompanhada de dados estatísticos que ajudem a caracterizar a distribuição dos atrasos torna-se inútil na estimativa da qualidade de voz resultante, pois o desvio padrão desta curva pode ser tal que, para atingir-se 95% dos pacotes deve-se considerar o atraso como sendo o dobro da média, por exemplo. Desta forma, o atraso a ser considerado na comunicação deve ser o máximo, ou então tal que englobe um percentual mínimo de pacotes, suficientes para o correto funcionamento do decodificador.

Ainda, deve-se atentar para a diferença de funcionalidade entre a lista de *polling* utilizada neste trabalho e a utilizada em (LI; LI; CAI, 2004). Nesta última, diferentemente do que acontece na implementada por Lindgren e Almquist (2001-a) e aproveitada nos experimentos propostos, o PC pode mandar mais de um quadro CF-Poll para a mesma estação no mesmo CFP. Descrita por Crow et al (1997), este algoritmo de *polling* determina que o PC envie requisições sequencialmente a todas as estações nele registradas e, ao chegar ao fim da lista com sobra de tempo no CFP, reinicie o processo. Cada estação que receber 'k' quadros CF-Poll, onde 'k' é uma variável configurável, sem mandar nenhum pacote em resposta é retirada da lista durante aquele CFP. Assim, o CFP só pode ser encerrado se todas as estações já tiverem recebido 'k' *polls* que não resultaram em transmissão de pacotes, ou quando foi atingido o tempo máximo do CFP (CFPMaxDuration).

Em comum, nesses três trabalhos citados, existem os fatos de todos estudarem PHYs de até 2 Mbit/s de taxa máxima de transmissão (com exceção do primeiro, que também apresenta a PHY 802.11b a 11 Mbit/s) e de não orientarem as análises a um método de

avaliação da qualidade de voz, permanecendo apenas no nível de rede. A primeira característica inviabiliza comparações diretas com os resultados deste trabalho, uma vez que a PHY utilizada corresponde ao padrão IEEE 802.11g operando em 54 Mbit/s, que apresenta desempenho muito superior aos outros mencionados. O segundo ponto faz com que as métricas extraídas dos experimentos tenham naturezas diferentes, por serem direcionadas para um objetivo específico. Neste caso, métricas relevantes, como a taxa de perda dos pacotes, não são consideradas, e outras métricas essenciais, como o atraso, são estudadas de forma diferente da requerida para estimar-se a qualidade da voz percebida pelos usuários.

Dois diferentes análises foram realizadas em relação à determinação dos atrasos nos cenários propostos. A primeira, que por fim acabou sendo a mais relevante, apresenta o atraso máximo de um pacote num determinado cenário, independentemente da taxa de perdas no mesmo. A segunda, criada apenas para tentar separar a influência da taxa de perdas no atraso dos pacotes, refere-se ao atraso máximo descartando-se 2% do total dos pacotes gerados. Estes dados, mais adiante, junto com os outros atrasos do sistema, formarão o componente  $T_a$ , dentro do modelo do fator  $I_d$  (fator de falhas por atraso). A seguir são apresentados os gráficos de atraso e suas tabelas de origem, para análise dos resultados obtidos.

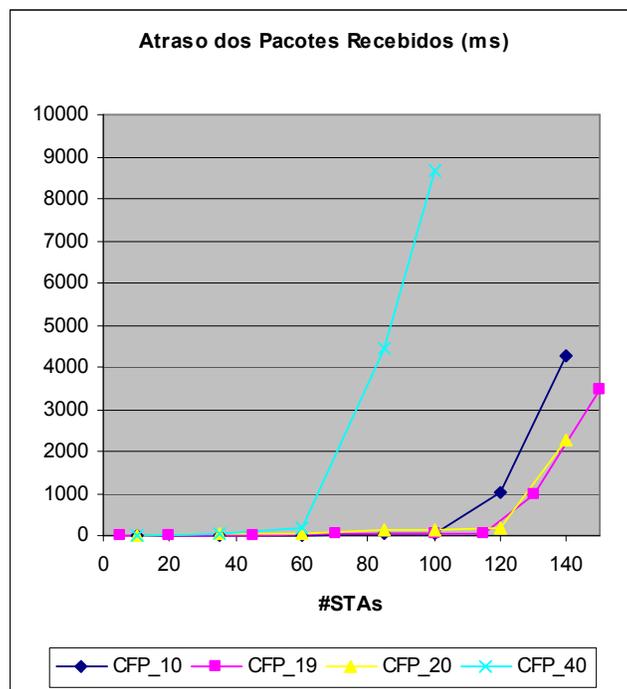


Figura 5.2: Atraso Máximo dos Pacotes RTP para Diferentes *Superframes*



Figura 5.3: Atraso Máximo dos Pacotes RTP Admitindo 2% de Perdas

Tabela 5.2: Pontos das Curvas das Figuras 5.2 e 5.3

#STAs	10 [Max,2%p] (ms)		19 [Max,2%p] (ms)		20 [Max,2%p] (ms)		40 [Max,2%p] (ms)	
5			0,683	0,388				
10	0,929	0,488			0,907	0,411	0,886	0,379
20			3,137	0,808				
35	8,162	2,016			25,58	2,224	49,25	2,53
45			15,66	3,329				
60	11,447	9,705			22,385	15,695	194,68	180,89
70			36,93	18,751				
85	24,175	12,085			136,4	127,2	4443,26	
100	31,272	16,914	34,065	19,583	137,09	119,642	8655,93	
115			50,352	19,753				
120	1073,7				159,819		-	
130			984,65					
140	4281,0				2270,6		-	
150			3468,8					

Nas figuras anteriores é possível observar que, quanto menor o período de repetição do CFP, menores os atrasos, se considerados apenas os cenários onde é baixa a taxa de perda nos pacotes. Entretanto, como era de se esperar, no momento em que o meio físico torna-se saturado, os atrasos encontrados aumentam em taxas muito maiores. Também é interessante observar a diferença na distribuição dos atrasos nos casos de *superframe* igual a 19 e a 20 TU. Nota-se na figura 5.2 que as curvas de atraso máximo

são similares, todavia, devido ao fato de no segundo caso as estações gerarem pacotes numa taxa maior do que acontecem os *pollings*, na figura 5.3 observa-se a grande diferença entre os atrasos para 2% de perda a partir de 80 estações no BSS. Esta diferença, que chega a 100 ms para 85 estações, já equivale uma perceptível diferença na qualidade de voz estimada pelo Modelo E dependendo do codificador. Melhor visualização da diferença na distribuição dos atrasos pode ser vista nas figuras 5.4 e 5.5, que são histogramas de frequência de distribuição do atraso fim-a-fim dos pacotes para cenários com 100 estações. Deve ser notado que nestas condições, ambos os ambientes apresentam taxa de perda de pacotes inferior a 1%.

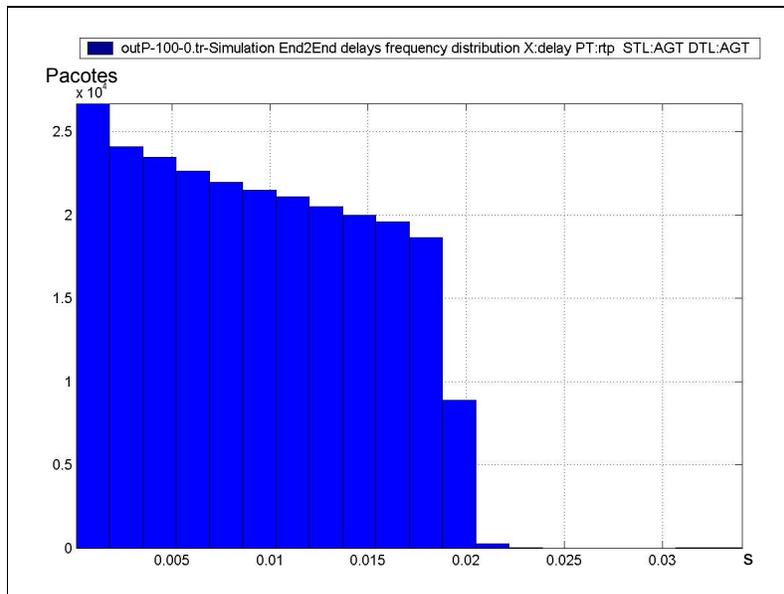


Figura 5.4: Histograma de Atrasos para *Superframe* = 19 TU

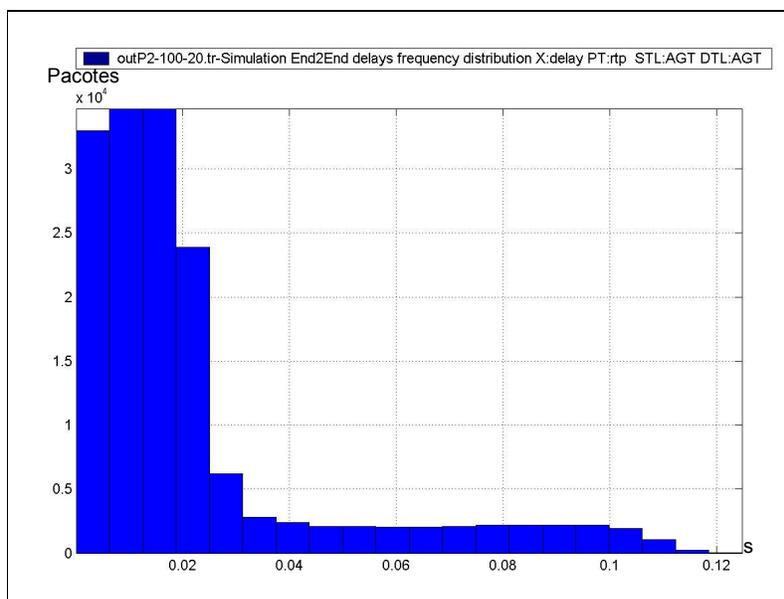


Figura 5.5: Histograma de Atrasos para *Superframe* = 20 TU

Somado aos outros atrasos do sistema, como mostrado no item 4.3.1, os atrasos de simulação determinam o valor da variável  $T_a$ , que é então usada com entrada na equação que calcula o fator  $I_d$ . Por outro lado, o fator  $I_{e-eff}$ , referente ao desempenho do codificador quando sob determinadas condições de rede, foi determinado de duas formas distintas, apresentadas na tabela 4.8. Com a obtenção dos resultados finais, concluiu-se que os cenários que consideravam o algoritmo do buffer de dejitter funcionando como um “filtro” para 98% dos pacotes gerados não apresentou vantagem na qualidade voz nas condições simuladas. A intenção, com esta variação, seria demonstrar que eventualmente o descarte de um pequeno percentual dos pacotes poderia gerar um ganho na qualidade que se sobressaísse ao fato de contar, no decodificador, com 100% dos pacotes gerados mesmo que sob pena de um maior atraso final. Mas, embora isso seja uma realidade em vários tipos de redes reais, o jitter adicionado aos pacotes apenas no acesso da WLAN 802.11 não se mostrou suficiente para justificar este tipo de abordagem. A inserção de variação de atraso no caminho externo ao BSS, como ocorreria na conexão com uma rede *wired*, talvez já fosse o suficiente para que esta troca fosse vantajosa em termos da qualidade da voz.

O fato é que, com todos os fatores que compõem o Modelo E já calculados, o resultados desejados serão mostrados nos próximos dois itens, para o codificador G.711 com e sem o algoritmo de recuperação de perdas de pacotes (PLC).

### 5.1.2 Fator R - G.711

A qualidade da voz estimada pelo Fator R para o codificador G.711 mostrou o mesmo que os dados parciais já indicavam: a melhor opção, dentre os cenários, é contar o período de repetição do CFP equivalente a 19 TU, ou 19,456 milissegundos. Em seguida vem o sistema com *superframe* igual a 10 TU, com o de 20 TU próximo e por último, com desempenho muito inferior aos demais, os cenários onde o CFPPeriod vale 40 TU. Na figura 5.6 observa-se a evolução de degradação da qualidade da voz com o acréscimo de estações, considerando o atraso inserido pela rede intermediária (fora do BSS) nulo. Vale ressaltar que as curvas relativas aos sistemas com buffer de dejitter reduzido para cobrir 98% dos pacotes gerados nem foram consideradas por causa do alto fator  $I_{e-eff}$ , por si só suficiente para qualificar a voz quase como “Quase a Totalidade dos Usuários Insatisfeitos”, segundo a tabela de conversão para MOS.

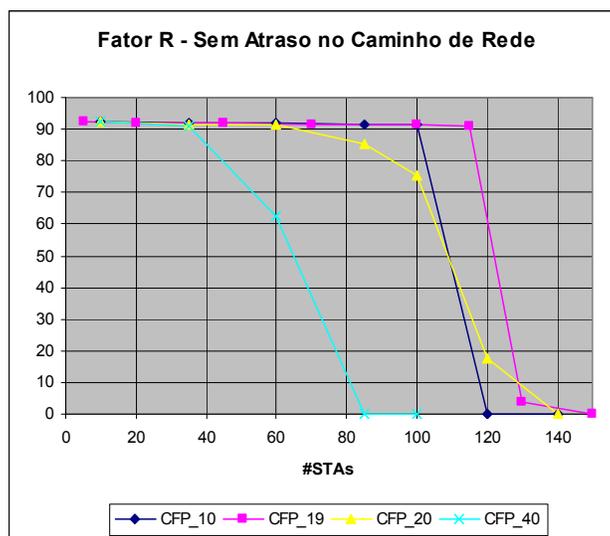


Figura 5.6: Fator R de cenários PCF, sem estações de dados e sem atraso externo

Verifica-se, observando a figura anterior, a diferença na inclinação do decaimento das curvas onde o *superframe* é maior que a latência em relação às outras. Isto se deve a diferença na influência dos fatores de atraso ( $I_d$ ) e perda ( $I_{e-eff}$ ) nos pacotes. Ao mesmo tempo em que estes cenários apresentam maior atraso, o crescimento na taxa de perdas é menos acentuado do que nos cenários com período de CFP menor que a latência dos pacotes de voz gerados, e isso faz com que a degradação na qualidade seja mais gradual para este codificador. Além disso, evidentemente, nota-se que, considerando uma qualidade mínima aceitável referente à faixa subjetiva “Alguns Usuários Insatisfeitos”, ou Fator R maior que 70, pode-se colocar num mesmo BSS até 115 estações de voz, se o *superframe* for igual a 19 TU. Enquanto para os demais intervalos de repetição do CFP, 10, 20 e 40 TU, pode-se utilizar até 105, 100 e 50 estações de voz com chamadas simultâneas, respectivamente.

Se for considerado na verificação destes resultados um cálculo simplista da capacidade de transmissão durante um CFP de 18 TU, pode-se observar que existe coerência nos dados obtidos. A equação 5.1 traduz analiticamente um caso de ocupação máxima de CFP, que evidentemente não reflete a média dos períodos, especialmente porque cada estação produz pouco menos de um pacote durante este intervalo, ou seja, nem sempre as estações (incluindo o PC) terão pacotes a enviar. Também, não foi incluído no cálculo o período com contenção (DCF), que vale, pelo menos, 1024  $\mu s$ . Mesmo assim, observa-se grande semelhança com os dados obtidos a partir de simulação, como pode ser visto.

$$\begin{aligned} \text{Ocupação máxima do CFP} &= BCN + CFEND + SIFS + n \times 2 \times (G711 + SIFS) < 18 \times TU \\ n < \frac{18,432ms - (54 + 34 + 10)\mu s}{2 \times (62 + 10)\mu s} &\rightarrow n = 127 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Adicionando aos cenários anteriores mais 100 ms, referente a um possível atraso na rede externa ao BSS, observa-se um pequeno decréscimo de qualidade nas chamadas de voz, assim como mostra a figura 5.7. Entretanto, a capacidade total de chamadas simultâneas permanece quase inalterada, por conta do grande influência das perdas de pacotes no codificador. Visualmente é possível presumir que o sistema é capaz de tratar, na mesma condição de qualidade do cenário anterior, 115, 105, 90 ou 50 estações, de acordo com período de repetição do CFP utilizado (19, 10, 20 e 40, respectivamente). Nota-se que sofreram redução significativa em suas capacidades máximas apenas aqueles cenários que já apresentavam maior atraso, por causa da característica do fator  $I_d$ , que apresenta grande influência apenas quando o atraso fim-a-fim ultrapassa o chamado “joelho” dos 175 ms.

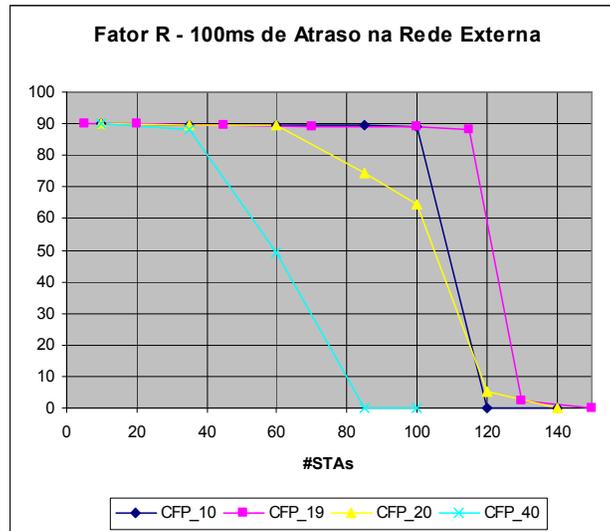


Figura 5.7: Fator R de cenários PCF sem estações de dados e com atraso externo

### 5.1.3 Fator R – G.711 Anexo I (PLC)

No entanto, quando o codificador G.711 passa a contar com o algoritmo de PLC descrito no Anexo I da mesma norma, os resultados apresentam relevantes diferenças. Verifica-se que, sendo ou não considerado o atraso na rede externa, a capacidade máxima de chamadas de voz atinge o valor de 120, e mais uma vez o melhor caso é o do cenário com *superframe* igual a 19 TU. Também o cenário onde o período de repetição do CFP equivale a 10 TU apresenta capacidade similar com ou sem atraso na rede externa. Mas, neste caso, o número máximo de chamadas de voz simultâneas fica próximo de 105. Todavia, diferentemente do que acontece com o mesmo codificador sem PLC, a capacidade do sistema com intervalo entre CFPs de 20 TU supera a do cenário onde o *superframe* vale 10 TU, permitindo até 110 estação de voz ativas. Isto acontece por causa da maior habilidade do codificador em tratar fluxos de pacotes incompletos (com perdas) em relação ao mesmo cenário sem PLC no decodificador. E como era esperado, novamente o cenário com intervalo de repetição do CFP igual a 40 TU obteve a menor capacidade em transportar conexões de voz, alcançando um número em torno de 65 chamadas simultâneas, que ainda assim já são aproximadamente 15 a mais do que no mesmo ambiente, mas sem o algoritmo de PLC. A seguir, na figura 5.8, apresenta-se graficamente o desempenho dos cenários sem o atraso de redes externas e, na seguinte, mostra-se a resposta dos mesmos sob uma carga de 100 ms adicionais de atraso. Em 5.9, apenas as curvas dos cenários que já apresentam maior atraso é que sofreram deterioração na qualidade de voz.

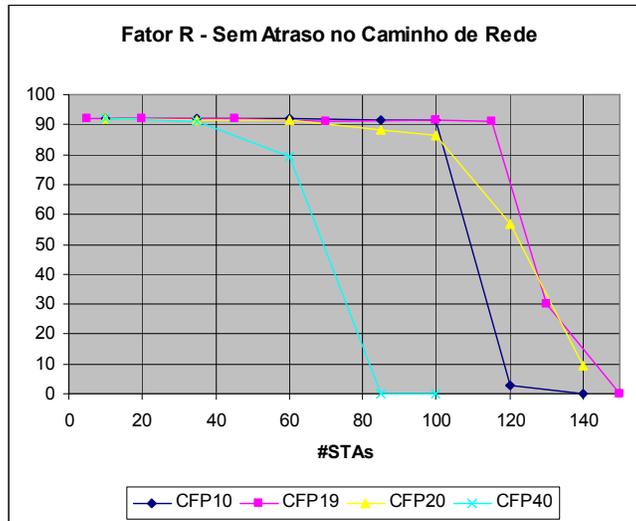


Figura 5.8: Fator R de cenários PCF, sem dados, sem atraso externo e com PLC

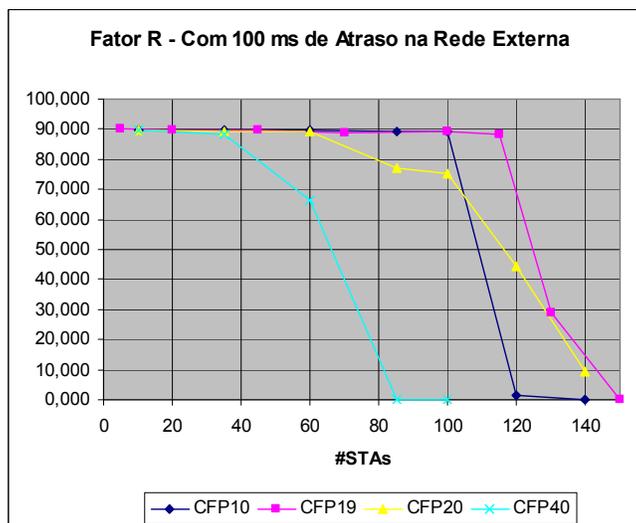


Figura 5.9: Fator R de cenários PCF, sem dados, com atraso externo e com PLC

## 5.2 Coexistência com Estações de Dados

Tendo em vista o objetivo de caracterizar experimentalmente a resposta da WLAN IEEE 802.11 no intuito de reunir informações que ajudem no entendimento e projeto de ambientes reais, o estudo de cenários onde dados e voz coexistam torna-se essencial. Assim, vários casos foram analisados, utilizando inclusive diferentes codificadores, a fim de tornar mais abrangente os dados reunidos.

### 5.2.1 Respostas sob Diferentes Cargas de Dados

Mais uma vez, com os interesses voltados a estudar o tráfego de voz, foram adicionados fluxos de dados correspondentes a estações que não fazem parte da lista de *polling*, ou seja, possuem baixa prioridade. Todos os cenários simulados fazem uso do

período de repetição do CFP de 19 TU e, assim como nas simulações do item 5.1, o tempo máximo do período livre de contenção (CFPMaxDuration) será 18 TU. Isto deixará, quando sistema estiver próximo da saturação, pouco tempo para o tráfego de dados. Mas isso não é problema, uma vez que toda a análise está direcionada para a priorização absoluta do tráfego de voz. Em outras situações, cabe ao engenheiro de rede determinar a divisão do *superframe* para dados e voz.

#### 5.2.1.1 G.711

Na primeira das análises estudou-se a taxa de perda de pacotes, tanto para os fluxos de dados (pacotes tipo EXP), quanto para os de voz (RTP) gerados pelo codificador G.711. Os resultados, apresentados nas figuras 5.10 e 5.11, mostraram que quanto maior o número de estações de dados, maior é taxa de perda dos pacotes.

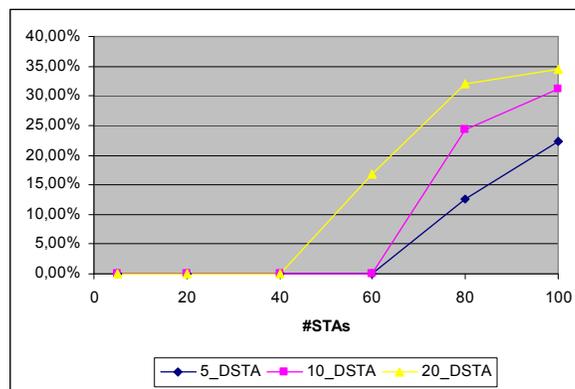


Figura 5.10: Taxa de perda dos pacotes RTP G.711

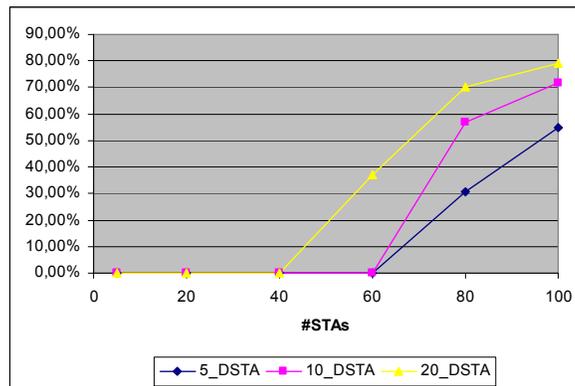


Figura 5.11: Taxa de perda dos pacotes EXP

Observando as curvas dos gráficos anteriores, nota-se a semelhança no formato das curvas entre os dois tipos de pacotes. Nota-se também que ambos iniciam a perda de pacotes a partir do mesmo número de estações. Nenhuma surpresa, se for lembrado que o AP concentra todos os fluxos numa fila única, e que quando esta encontra-se cheia os últimos pacotes são descartados (*drop-tail*), independentemente do tipo. Já num AP real isto não deve ocorrer, visto que o gerenciamento da fila de pacotes para a interface fica, aparentemente, acima da camada MAC. Infelizmente, nenhum mecanismo de descarte

seletivo ou priorização dos pacotes foi utilizado pelo simulador NS-2 em sua fila (IFQ), que nada mais é que um elemento do tipo FIFO (primeiro que entra, primeiro que sai). E isto torna a estabilidade do sistema com um todo muito frágil, pois o tráfego de uma estação mal-comportada comprometerá todos os outros, incluindo também os daquelas estações atendidas pelo PCF. Por esta razão a eficiência dos fluxos de voz é tão diferente daquela encontrada nos cenários sem tráfego de dados, quando na realidade ela deveria apresentar apenas uma pequena queda, referente unicamente ao compartilhamento do meio durante o curto período de funcionamento em DCF.

Em relação aos atrasos no fluxo de voz, o comportamento dos pacotes que são recebidos pelo decodificador é similar àquele estudados nos cenários onde não há tráfego de dados. Considerada uma pequena variação inserida pela distribuição exponencial dos pacotes gerados nos fluxos de dados, os atrasos obtidos por todos os cenários, independentemente do número de estações de dados, seguem uma mesma tendência, como mostra a figura 5.12.

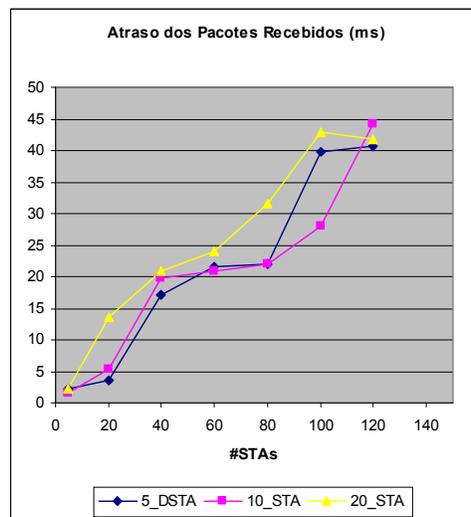


Figura 5.12: Atraso dos Pacotes RTP Recebidos

Entretanto, para se ter uma idéia mais precisa da curva de distribuição dos atrasos nos pacotes, é apresentada a figura 5.13, onde são mostrados apenas os pontos referentes ao atraso de 98% dos pacotes gerados. Neste gráfico pode-se verificar que o número de estações de dados influi proporcionalmente na curva de atraso, mas não de forma tão significativa, já que, devido a precoce perda de pacotes de voz na fila, o CFP não chega a atingir seu tempo máximo.

No final, o fator R calculado para estes cenários demonstra a grande redução na capacidade da rede em trafegar chamadas de voz sobre pacotes na presença fluxos intensos de dados. Comparando as figuras 5.14 e 5.15, onde são apresentadas as curvas do fator R para o codificador G.711 sem e com atraso adicional externo à WLAN, nota-se a influência quase nula do atraso na qualidade da voz percebida. Evidentemente, isto acontece em razão dos pequenos atrasos apresentados em 5.12 e 5.13, que somados aos outros atrasos do sistema e a adicionais 100 ms, ainda assim, não são suficientes para mudar significativamente a resposta. Por outro lado, o fator  $I_{e-eff}$ , referente às perdas de pacotes, influencia agressivamente nos resultados, tornando a qualidade final estimada muito inferior àquela dos cenários sem estações de dados.

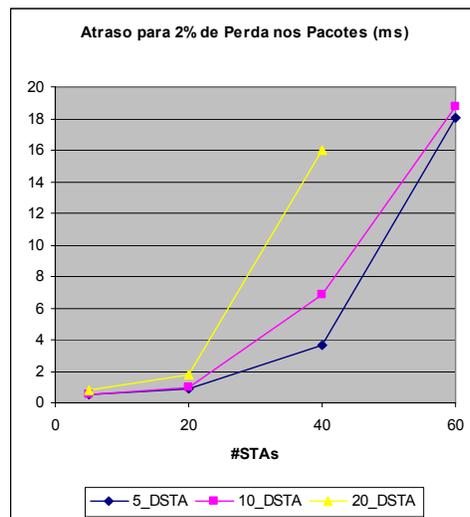
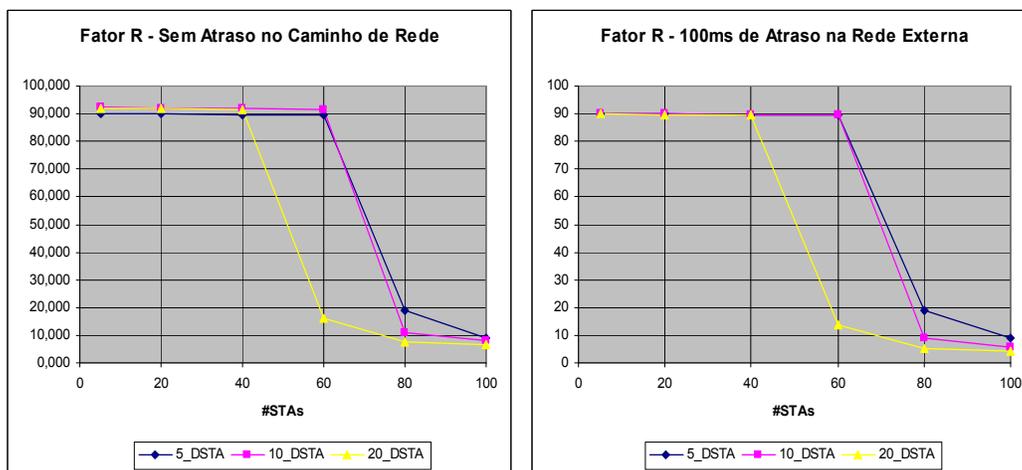


Figura 5.13: Atraso dos pacotes para 2% de perdas.



Figuras 5.14 e 5.15: Fator R para o codificador G.711, com estações de dados

## 5.2.2 Comparação Entre Codificadores

As diferenças entre a qualidade de voz obtida pelos diferentes codificadores de voz escolhidos será apresentada neste item. Infelizmente, devido à limitação do simulador em relação à fila única para todos os pacotes, já mencionada anteriormente, as vantagens e desvantagens de um codificador específico ficaram um pouco mascaradas. Mas, de qualquer forma, é possível comparar nas figuras 5.16 e 5.17 o desempenho dos quatro codificadores em relação à pontuação atribuída pelo Modelo E, ficando aparente as características de cada um deles.

Todos os cenários mostrados levam em consideração um BSS populado com 20 estações de dados. Além disso, para o codificador de voz padrão G.723.1 pressupõe-se que, assim como mostraram os resultados da seção 5.1, a maior capacidade seria atingida quando o período de repetição do CFP fosse imediatamente menor que a latência de geração dos pacotes pelo codificador. Desta forma, para estes cenários

especificamente, as variáveis MIB `dot11CFPPeriod` e `dot11CFPMaxDuration` foram configuradas com os valores de 28 e 29 TU, respectivamente.

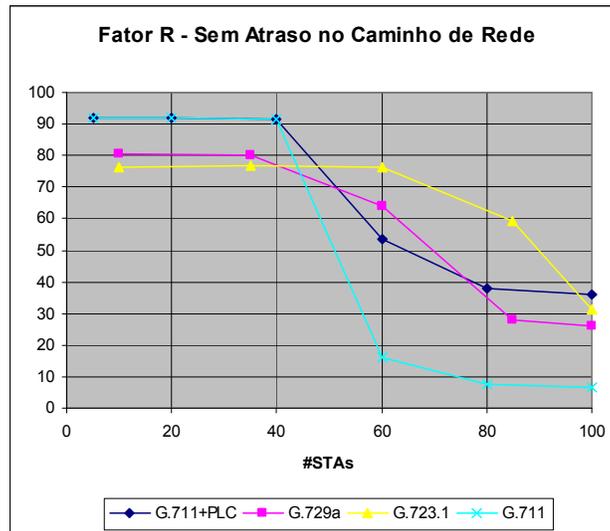


Figura 5.16: Fator R de diferentes codificadores com 20 estações de dados

Nota-se, pelo gráfico anterior, que o codificador G.723.1 leva vantagem sobre todos os outros no quesito capacidade máxima de chamadas simultâneas, permitindo aproximadamente 65. Em segundo, praticamente empatados, ficam os codificadores G.729a e G.711 com PLC, com um limite de 50 conexões com qualidade equivalente a 70 no Fator R. Por último, mas nem tão atrás dos segundos colocados, está o G.711 sem algoritmo de compensação de perdas de pacotes. Mas é importante ressaltar que, devido à característica da fila de interface do simulador, já citada neste item inclusive, as perdas de pacotes de voz são determinadas pela incapacidade do meio em dar vazão aos pacotes de dados. Com isso, todos os cenários foram muito prejudicados, havendo um nivelamento das perdas, não pela taxa de transmissão do codificador, mas pelas perdas sofridas em decorrência do congestionamento da fila de pacotes sendo enviados à camada MAC.

Da mesma forma como já foi explicado no item anterior (5.2.1), o adicional de atraso atribuído às redes externas ao BSS não influencia muito na qualidade da comunicação de voz em virtude da demasiada taxa de perda nos pacotes. A figura 5.17 ratifica isto, possuindo um mínimo de diferença perceptível em relação à figura anterior (5.16).

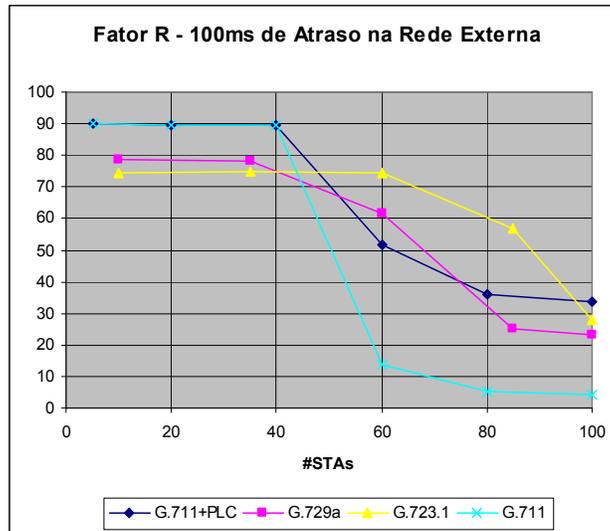


Figura 5.17: Fator R de diferentes codificadores com 20 estações de dados e atraso adicional

## 5.3 PCF x DCF

Sendo o modo de acesso distribuído, o DCF, a configuração mais utilizada hoje em ambientes reais de emprego das WLAN IEEE 802.11, sua comparação com os dados obtidos e apresentados até agora, referentes ao modo PCF, torna-se um trabalho altamente relevante para engenheiros e analistas de rede, além, é claro, da própria comunidade acadêmica.

### 5.3.1 Sem Estações de Dados

Por ser o modo mais disseminado globalmente, diversos outros trabalhos já foram realizados com o intuito de caracterizar a capacidade do modo DCF em transportar tráfego de voz. Analiticamente, um dos mais importantes é o estudo feito por Bianchi (2000), onde a função distribuída da camada MAC 802.11 é modelada em termos de sua vazão e taxa de perdas como um processo de Markov. Aplicada na determinação da capacidade para realização de chamadas de voz sobre as PHYs 802.11a e 802.11b por Garg e Kappes (2003), retornou resultados similares àqueles obtidos via simulação no mesmo trabalho, e também aos encontrados nesta dissertação, feita a distinção entre as extensões 'a' e 'g' da norma.

Também Medepalli et al. (2004) e Coupechoux, Kumar e Brignol (2004) apresentam números relativos à capacidade máxima de chamadas de voz em WLANs IEEE 802.11 operando em modo DCF. No primeiro trabalho, camadas físicas 802.11a, b e g são estudadas a partir do uso do codificador G.711 no modelo de conversação definido pela recomendação P.59 da ITU. Mas apenas métricas de rede são utilizadas na qualificação dos fluxos de voz, podendo levar a resultados diferentes da análise do valor do fator R diretamente, como é feito pelo segundo trabalho para a PHY 802.11b.

Na figura 5.18, a seguir, são mostradas as curvas do Fator R do codificador de voz padrão G.711, sem PLC, para redes DCF e PCF com período de repetição do CFP de

19, 20 e 40 TU. Observa-se que, a grosso modo, quanto maior o valor deste intervalo, dentre os casos expostos, mais próximo do desempenho do modo DCF fica a rede PCF. Todavia, a partir de certo valor de *superframe*, a capacidade atingida pelo modo DCF supera a do modo centralizado. Isto porque, além de passar a maior parte do tempo funcionando com o modo de acesso distribuído, o sistema ainda arca com desperdício de banda gerado por *pollings* mal-sucedidos durante o PCF. Logo, conclui-se que, fazendo uso do algoritmo de *polling* disponível, o ajuste das variáveis *dot11CFPPeriod* e *dot11CFPMaxDuration* se faz necessário para garantir um melhor desempenho por parte do modo PCF.

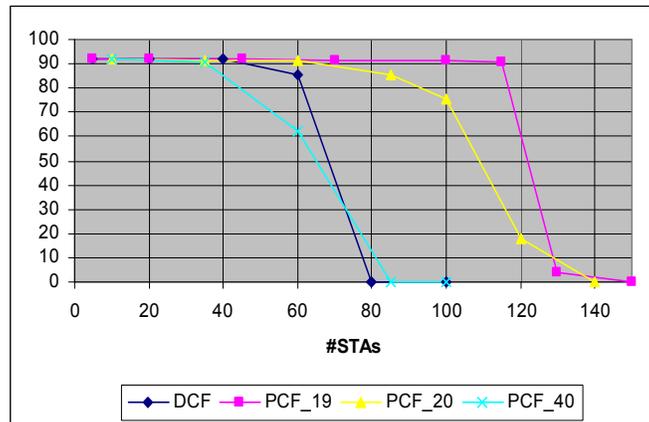


Figura 5.18: Fator R DCF v. PCF, G.711 sem PLC

Então, garantindo qualidade mínima equivalente à faixa de “alguns usuários insatisfeitos” numa rede 802.11g ERP-OFDM operando apenas em DCF, podem ser realizadas em torno de 65 chamadas de voz simultâneas. Número que cai para 60, quando são adicionados 100 ms de atraso nos pacotes para simular o tempo de transmissão dos mesmos em redes externas ao BSS, como mostra a figura 5.19.

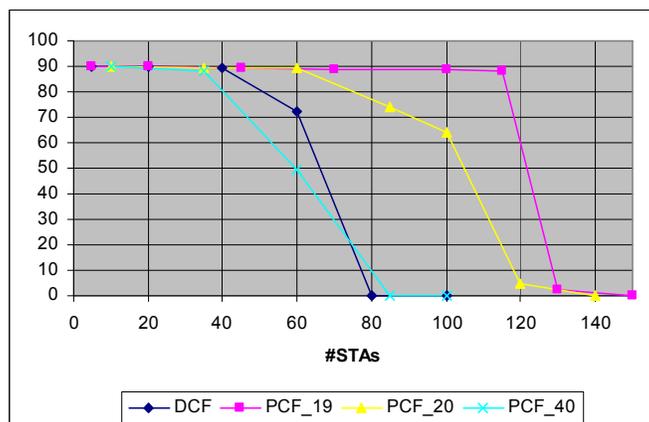


Figura 5.19: Fator R DCF v. PCF, G.711 sem PLC, 100 ms de atraso externo

Por outro lado, o cenário de maior capacidade em PCF praticamente duplica esta capacidade, permitindo mais de 115 estações com as mesmas condições de qualidade, o

que comprova que, desde que devidamente escolhidos os parâmetros que configuram o *superframe*, o uso do modo centralizado aumenta muito a eficiência no uso do meio físico em relação ao modo DCF.

Em comparação com o trabalho de Garg e Kappes (2003), resultados muito próximos foram encontrados. No trabalho citado, a capacidade máxima determinada para o codificador G.711, com pacotes de 20 ms e sob PHY 802.11a (praticamente a mesma eficiência do 802.11 ERP-OFDM), é de 56 estações. O resultado pode ser considerado absolutamente coerente com o obtido por simulação neste trabalho, uma vez que no estudo feito em 2003 não eram admitidas perdas nos pacotes. E, observando a taxa de perda de pacotes no modo DCF dos experimentos realizados, verifica-se que antes de chegar a 60 estações também este já apresentava perdas, como mostra a tabela 5.3. Entretanto, só com uma análise completa, levando em consideração também o atraso e a resposta do codificador, como feita pelo Modelo E, pode-se dizer que a capacidade total é, na realidade, pouco superior a 65 chamadas simultâneas.

Tabela 5.3: Taxa de perda de pacotes RTP G.711 em DCF

# STAs	Perdas (%)
5	0
20	0
40	0
60	0,4
80	26,57
100	65,93
120	73,37

Em outro trabalho que permite comparação, (MEDEPALLI et al., 2004), a capacidade máxima atingida no mesmo cenário é de 102 chamadas, determinada analiticamente, e de 105 chamadas simultâneas segundo a simulação, tanto para a PHY 802.11a quanto para a 802.11g (se desabilitada a compatibilidade com 802.11b). Tamanha diferença deve-se principalmente ao fato daquele trabalho adotar um modelo de conversação que interrompe a transmissão durante os períodos de silêncio, recurso conhecido como VAD. Criado pela ITU-T (1993), o modelo artificial de conversão é representado por uma cadeia de Markov com 4 estados: apenas estação ‘a’ falando, apenas estação ‘b’ falando, ambas falando e ambas em silêncio. Como o período de cada estado corresponde a uma variável aleatória com distribuição exponencial e médias 854, 854, 226 e 456 ms, respectivamente, fez-se a consideração que, na média, cada estação transmite voz durante 45,1% do tempo. Desta forma, estendendo esta proporção para o caso onde as estações transmitam continuamente, a capacidade máxima de conexões de voz seria próxima de 48. Uma aproximação grosseira, uma vez que a eficiência do meio também varia de acordo com o total de estações, mas que de qualquer forma já serve para ratificar os valores encontrados até agora.

### 5.3.2 Com Estações de Dados

Na presença de estações de dados, a qualidade do tráfego de voz em BSSs operando somente no modo de acesso distribuído é ainda mais deteriorada. Fato totalmente compreensível, visto que os pacotes de voz compartilham do mesmo atraso do tráfego de dados, que são limitados pela baixa eficiência de transmissão deste modo de acesso. Em outras palavras, em DCF todos os pacotes são iguais e todas as estações possuem a

mesma chance de conseguir acessar o meio físico, o que faz com que o AP seja o gargalo de um sistema com a eficiência limitada pelo número total de estações, pela demanda por banda da transmissão e até pelo tamanho médio do quadro, que quanto menor pior.

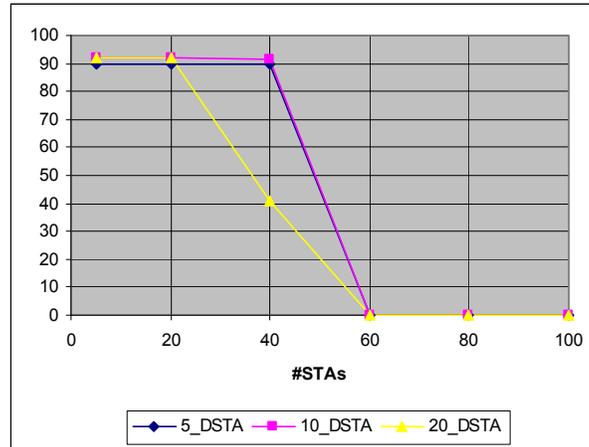


Figura 5.20: Fator R DCF, G.711 sem PLC, com tráfego de dados

Nota-se, a partir da figura anterior, que quando existem estações trafegando dados, o desempenho das aplicações de voz também sofre degradação no modo DCF. Comparativamente, a capacidade máxima de chamadas de voz em modo DCF foi até menos afetada do que a do modo PCF, quando coexistindo com 20 estações de dados, pois caiu de 65 chamadas para 30, uma redução de 53,8%. Enquanto isso, o modo PCF experimentou uma redução de mais de 60%, visto que sua capacidade caiu de 115 estações de voz para aproximadamente 45. Tudo porque, embora o modo PCF consiga manter controlado o atraso, ele não pode evitar o descarte dos pacotes na fila quando o tráfego de dados encontra-se saturado.

## 6 CONCLUSÃO

### 6.1 Conclusões

Ao final deste trabalho, tem-se a noção que o objetivo de contribuir com informações não só acadêmicas, mas também válidas no âmbito profissional, foi atingido com êxito. Inicialmente, a simplificação do Modelo E para uso em análises de qualidade de voz para telefonia sobre pacotes pode ser utilizada tanto em estudos futuros, como até em equipamentos terminais, para cálculo em tempo-real da qualidade do serviço telefônico se utilizando de informações fornecidas por protocolos de controle como o RTCP.

A respeito do uso de serviços de voz sobre a WLAN IEEE 802.11, conclui-se que, apesar do imenso ganho de capacidade provida pela extensão 802.11g, em especial quando não é oferecida compatibilidade com a 802.11b, a sua aplicação em ambientes compartilhados com fluxos de dados deve ser feita com cautela. Além disso, verificou-se que, desde que devidamente configurado, o modo PCF possui capacidade aproximadamente 75% superior ao modo DCF em ambientes exclusivos para o tráfego de voz. Enquanto, nestas condições, o modo distribuído permite a realização de 65 chamadas simultâneas usando o codificador G.711, o modo centralizado atinge a marca de 115 conversações simultâneas com qualidade média equivalente a 70 na escala R.

A alteração nos valores das variáveis MIB de controle do PCF, `dot11CFPPeriod` e `dot11CFPMaxDuration`, demonstrou que é possível aumentar a capacidade dos sistemas sem estações de dados em mais de 100%, como é caso onde é utilizado o codificador G.711 com algoritmo de PLC, com latência de 20 ms, e estas duas variáveis têm seus valores modificados de 10 para 19 TU e de 9 para 18 TU, respectivamente. Pelos ensaios realizados, verificou-se que o valor 'ótimo' da variável `dot11CFPPeriod` é o maior número inteiro de TUs menor do que a latência de geração dos pacotes pelo codificador.

Dentre os resultados, também se pôde observar a grande influência do algoritmo de *polling* executado durante os CFPs. Não especificado pela recomendação e pouco citado em bibliografias, a forma como o AP implementa o *polling* das estações é capaz de tornar um cenário de hipotética maior eficiência, num cenário de grandes taxas de perda de pacotes. Exemplo disso é o desempenho dos cenários cujo período de repetição do CFP é maior do que a latência dos pacotes de voz. Como o AP só manda um único *poll* para cada estação durante o CFP, estes cenários têm abreviada a duração do CFP e os pacotes pendentes ficam então para serem enviados durante o CP. Mas como neste período a eficiência do meio cai, menos pacotes são transmitidos e aqueles que não conseguem acessar ao meio são mantidos na fila, que em seguida já terá mais alguns novos pacotes. Desta forma, a capacidade total cai e o atraso médio dos pacotes aumenta. No entanto, se o AP fosse capaz de enviar vários *polls* para a mesma estação

os resultados seriam bem diferentes, possivelmente proporcionando um aumento da capacidade e até uma redução do atraso médio.

Outro ponto do sistema que se mostrou muito delicado foi a fila de pacotes esperando para serem transmitidos pelo AP. Como este equipamento concentra todos os fluxos direcionados a (e oriundos de) entidades externas ao BSS, o que normalmente é quase a totalidade dos casos, sua fila de quadros para transmissão é sempre a primeira a ficar cheia e causar a perda de pacotes. Isto fica evidenciado no momento em que estações de dados com tráfegos maiores do que a capacidade do meio são inseridas no BSS. Nestes cenários, seja em PCF ou DCF, a capacidade de máxima de chamadas de voz é limitada pelo mau comportamento dos tráfegos paralelos. Na descrição do padrão 802.11 fica claro que, para o modo DCF, não existe nenhum tipo '*workaround*', pois os pacotes são sempre retirados da fila na ordem em que foram colocados, não importando a estação de destino. Todavia, para o modo PCF, que já faz uso do serviço de busca seletiva de pacotes, provido pela interface MAC quando o AP busca pacotes para uma determinada estação durante o CFP, a possibilidade do uso de filas diferenciadas não é claro. Mas o certo é que, da maneira como foi construído, o simulador NS-2 não pode prover esta essencial funcionalidade para uma harmoniosa coexistência de tráfegos de diferentes prioridades. Para resolver este grave problema da camada MAC original, a IEEE publicou, já quando este trabalho estava em fase de conclusão, a extensão 802.11e, que fornece diferenciação de serviços de duas formas distintas, incluindo já o mesmo número de filas do que são as prioridades de tráfego (no máximo 8). Desta forma, acredita-se, a WLAN IEEE 802.11 será capaz de lidar de forma diferenciada com cada classe de tráfego, fazendo com que as de menor prioridade não influenciem (tanto) no desempenho das mais prioritárias.

Ainda referente aos resultados obtidos, ratificou-se a idéia de que o codificador G.723.1 é capaz de prover o maior número de chamadas simultâneas dentre os codificadores de voz analisados, com a qualidade especificada. Todavia, o mesmo não pode ser dito a respeito do codificador G.729a, que em alguns cenários onde há estações de dados apresentou capacidade máxima equivalente ao codificador G.711 com algoritmo PLC. Mas é evidente que, ainda assim o G.729a permanece mais vantajoso frente ao G.711, uma vez que a sua taxa de transmissão é de 8 kbit/s, contra os 64 kbit/s do outro. Ainda em relação aos codificadores, também é possível observar, a partir dos resultados expostos no capítulo 5, uma significativa vantagem em utilizar-se um algoritmo de compensação de perdas (PLC) em conjunto com o codificador G.711. Com o uso de componente citado, consegue-se perceber ganhos superiores a 10% na capacidade máxima de chamadas simultâneas, sob o custo de poucos ciclos de máquina.

Por fim, outra alternativa levantada nos cenários propostos, mas que se apresentou não positiva por causa da natureza do atraso geral do sistema modelado, é a utilização do buffer de dejitter com apenas 98% dos pacotes gerados. Tal opção só se mostra produtiva quando a curva de distribuição dos atrasos for ainda mais alargada (maior desvio padrão) do que aquela imposta apenas pela variação nos atrasos da WLAN, para que o ganho em atraso compense a degradação sofrida pelos 2% de pacotes descartados. Assim sendo, parece que o *dejittering* buffer ideal só deve fazer uso do descarte de alguns pacotes no momento que a profundidade do mesmo ultrapassar um determinado valor calculado para cada codificador de voz.

## 6.2 Próximos Trabalhos

No intuito de analisar a qualidade de serviços telefônicos sobre a WLAN IEEE 802.11, parece natural que seqüência do trabalho seja aplicar o mesmo modelo na avaliação de capacidade máxima da extensão 802.11e, especialmente em cenários de voz e dados. Além disso, o modelo de tráfego de voz pode ser evoluído para algum modelo conversacional que alterne períodos ativos e inativos. Já em relação ao Modelo E, deve-se entender que seu uso para estimar analiticamente a qualidade de voz percebida por seres humanos é limitado. Que embora este seja um modelo em constante aprimoramento, o comportamento humano é dependente de uma série de variáveis muito difíceis de definir. No intuito de aproximar ainda mais esta estimativa da realidade, a aplicação do Modelo E Estendido, da ETSI, pode ser avaliada.

Finalmente, se for do interesse manter-se na linha de pesquisa sobre o modo PCF, novos algoritmos de *polling* e a possibilidade da criação de múltiplas filas, mesmo que no nível de rede, devem ser estudadas e testadas.

## REFERÊNCIAS

BIANCHI, G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, New York, v.18, n.3, p. 535-547, 2000.

BRUNO, R.; CONTI, M.; GREGORI, E. IEEE 802.11 optimal performances: RTS/CTS mechanism vs. basic access. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PERSONAL, INDOOR AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS, PIMRC, 13., 2002, Lisboa. **Proceedings...** New York: IEEE Press, v. 4, p. 1747-1751. 2002.

CHATZIMISIOS, P.; BOUCOUVALAS, A. C.; VITSAS, V. Effectiveness of RTS/CTS handshake in IEEE 802.11a Wireless LANs. **Electronics Letters**, Stevenage, v. 40, n. 14, p. 915-916, July 2004.

CISCO SYSTEMS. **Understanding Delay in Packet Voice Networks**. Disponível em: < <http://www.cisco.com/warp/public/788/voip/delay-details.html> >. Acesso em: ago. 2005.

CLARK, A. D. Modeling the Effects of Burst Packet Loss and Recency on Subjective Voice Quality. In: IP TELEPHONY WORKSHOP, IPTEL, 2001, New York. **Proceedings...** [S.l.]: Columbia University, 2001.

COLE, R. G.; ROSENBLUTH, J. H. Voice over IP performance monitoring. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, New York, v.31, n.2, p. 9-24, Apr. 2001.

COUPECHOUX, M.; KUMAR, V.; BRIGNOL, L. ITC Voice Over IEEE 802.11b Capacity. In: SPECIALIST SEMINAR ON PERFORMANCE EVALUATION OF WIRELESS AND MOBILE SYSTEMS, 16., 2004, Antwerp. **Proceedings...** Antwerp: University of Antwerp, 2004. v. 1, p. 151-158.

CROW, B. P. et al. IEEE 802.11 wireless local area networks. **IEEE Communications Magazine**, New York, v.35, n.9, p. 116-126, Sept. 1997.

EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE. **Technical Report: ETR 250: Transmission and Multiplexing (TM): Speech communication quality from mouth to ear for 3,1 kHz handset telephony across networks**. Sophia Antipolis, 1996.

FALL, K.; VARADHAN, K. **The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation)**. The VINT Project. Disponível em: <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>>. Acesso em fev. 2006.

FREE SOFTWARE FOUNDATION. **GNU Compiler Collection**. Disponível em: <<http://www.gnu.org/software/gcc/>>. Acesso em: jan. 2006.

FRIEDMAN, T.; CACERES, R.; CLARK, A. **RTP Control Protocol Extended Reports (RTCP XR)**: RFC 3611. [S.l.]: Internet Engineering Task Force, Network Working Group, 2003.

GARG, S.; KAPPES, M. Can I add a VoIP call? In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, ICC, 2003, Anchorage. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2003. v. 2, p. 779-783.

GAST, M. S. **802.11® Wireless Networks**: The Definitive Guide. 2<sup>nd</sup> ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2005.

GLAPA, M. J.; HOUCK, D. J.; YANG, W. **End-to-end Voice Quality – The impact of VoIP Cable Telephony in the Triple Play**. Murray Hill, Lucent Technologies/Bell Labs Innovation, 2004. Disponível em: <[http://www.lucent.com/livelink/0900940380069d32\\_White\\_paper.pdf](http://www.lucent.com/livelink/0900940380069d32_White_paper.pdf)>. Acesso em: nov. 2005.

HAMBLEEN, M. VoIP: Ready for Prime Time. **Computerworld**. Jan. 2005. Disponível em: <<http://www.computerworld.com/printthis/2005/0,4814,98961,00.html>>. Acesso em: maio 2005.

HANDLEY, M. et al. **SIP**: Session Initiation Protocol: RFC 2543. [S.l.]: Internet Engineering Task Force, Network Working Group, 1999.

HUSTON, G. Happy Birthday Ethernet. **The ISP Column**, 2003. Disponível em: <<http://www.potaroo.net/ispcol/2003-05/>>. Acesso em: ago. 2005

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING. **IEEE 802.11 WG part 11**: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification. New York, 1997.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING. **IEEE 802.11 WG part 11**: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification. New York, 1999.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING. **IEEE 802.11 WG part 11 [ISO/IEC 8802-11: 1999]**: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification. New York, 2003.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING. **IEEE 802.11a WG part 11 [ISO/IEC 8802-11:1999/Amd 1:2000(E)]**: wireless LAN medium access

control (MAC) and physical layer (PHY) specification: Amendment 1: high-speed physical layer in the 5 GHz band. New York, 2000.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING. **IEEE 802.11b WG part 11**: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification: Amendment 2: high-speed physical layer extension in the 2.4 GHz band. New York, 1999.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING. **IEEE 802.11b/Cor1-2001 WG part 11**: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification: Amendment 2: high-speed physical layer extension in the 2.4 GHz band. Corrigendum 1. New York, 2001.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING. **IEEE 802.11e WG part 11**: Draft Amendment to Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Amendment 7: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS) Enhancements. New York, 2005.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING. **IEEE 802.11g WG part 11**: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification: Amendment 4: Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band. New York, 2003.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING. **IEEE 802.11j WG part 11**: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification: Amendment 7: 4.9 GHz – 5 GHz Operation in Japan. New York, 2004.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING. **Official IEEE 802.11 working group project timelines**. Disponível em: [http://grouper.ieee.org/groups/802/11/802.11\\_Timelines.htm](http://grouper.ieee.org/groups/802/11/802.11_Timelines.htm). Acesso em: fev. 2006.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **ITU-T Recommendation G.723.1 (03/96)**: Speech coders: Dual rate speech coder for multimedia communications transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s. Geneva, 1996.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **ITU-T Recommendation H.323 (02/98)**: Packet-based multimedia communications systems. Geneva, 1998.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **ITU-T Recommendation G.711 (11/88)**: Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies. Geneva, 1988.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **ITU-T Recommendation P.800 (08/96)**: Methods for subjective determination of transmission quality. Geneva, 1996.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **ITU-T Recommendation G.729 (03/96)**: Coding of speech at 8 kbit/s using conjugate-structure algebraic-code-excited linear-prediction (CS-ACELP). Geneva, 1996.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **ITU-T Recommendation G.729/Annex A (11/96)**: Reduced complexity 8 kbit/s CS-ACELP speech codec. Geneva, 1996.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **ITU-T Recommendation G.861 (02/98)**: Objective quality measurement of telephone-band (300-3400 Hz) speech codecs. Geneva, 1998.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **ITU-T Recommendation G.862 (02/01)**: Perceptual evaluation of speech quality (PESQ), an objective method for end-to-end speech quality assessment of narrowband telephone networks and speech codecs. Geneva, 2001.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **Introduction to the E-Model**, ITU-T Home : Study Period 2001-2004, October, 2004. Disponível em: < <http://www.itu.int/ITU-T/2001-2004/com12/emodelv1/introduction.html> >. Acesso em: jun. 2005.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **ITU-T Recommendation G.114 (05/03)**: One-way transmission time. Geneva, 2003.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **ITU-T Recommendation G.114 (2003) Amendment 1 (09/03)**: New Appendix II: Guidance on one-way delay for voice over IP. Geneva, 2003.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **ITU-T Recommendation G.107 (03/05)**: The E model, a computational model for use in transmission planning. Geneva, 2005.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **ITU-T Recommendation G.113/Appendix I (05/02)**: Transmission impairments due to speech processing. Appendix I: Provisional planning values for the equipment impairment factor  $I_e$  and packet-loss robustness factor  $B_{pl}$ . Geneva, 2002.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **ITU-T Recommendation G.113 (02/01)**: Transmission impairments due to speech processing. Geneva, 2001.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **ITU-T Recommendation G.711/Appendix I**

**(09/99):** A high quality low-complexity algorithm for packet loss concealment with G.711. Geneva, 2001.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **ITU-T Recommendation P.59 (03/93):** Artificial conversational speech. Geneva, 1993.

KÖPSEL, A.; WOLISZ, A. Voice transmission in an IEEE 802.11 WLAN based access network. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON WIRELESS MOBILE MULTIMEDIA, WOWMOM, 4., 2001, Rome. **Proceedings...** New York: ACM Press, 2001. p. 23-32.

LI, C.; LI, J.; CAI, X. Performance Evaluation of IEEE 802.11 WLAN – High Speed Packet Wireless Data Network for Supporting Voice Service. In: IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, WCNC, 2004, Atlanta. **Proceedings...** Piscataway, N.J.: IEEE Press, 2004, p. 1451–1456.

LINDGREN, A.; ALMQUIST, A. **Implementation of the PCF mode of IEEE 802.11 for the NS-2 simulator.** (pcf\_support-2.1b8.tar.gz). Luleå, v. 0.8b, 2001. Disponível em: <<http://www.sm.luth.se/~dugdale/>>. Acesso em: out. 2005.

LINDGREN, A.; ALMQUIST, A. **Quality of Service Schemes for IEEE 802.11.** 2001. 52 f. Master's thesis – Department of Computer Science and Electrical Engineering, Luleå University of Technology, Luleå.

LUSTOSA, L. C. G. et al. Utilização do Modelo E para avaliação da qualidade da fala em sistemas de comunicação baseados em voz sobre IP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES, SBRC, 22., 2004, Gramado. **Anais...** Gramado: II/UFRGS, 2004.

MALEK, J. **Trace graph - Network Simulator NS-2 trace files analyzer.** v. 2.02 for Linux. Disponível em: <<http://www.tracegraph.com/>>. Acesso em: dez. 2005.

MARKOPOULOU, A. P.; TOBAGI, F. A.; KARAM, M. J. Assessing the Quality of Voice Communications Over Internet Backbones. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, Piscataway, v.11, n.5, Oct. 2003.

MARSHALL, G. **Full-duplex PCF Support for NS-2.29.** (ns-2.29\_FullPcfSupport.tgz). Instituto de Informática, UFRGS, Porto Alegre. Disponível em: <<http://www.inf.ufrgs.br/~gmarshall>>. Acesso em: fev. 2006.

MEDEPALLI, K. et al. Voice Capacity of IEEE 802.11b, 802.11a and 802.11g Wireless LANs. In: GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE, GLOBECOM, 2004. **Proceedings...** Piscataway: IEEE Communications Society, 2004. v. 3, p. 1549-1553.

MÖLLER, S. **Assessment and Prediction of Speech Quality in Telecommunications.** Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991.

O'HARA, B.; PETRICK, A. **802.11 Handbook – A Designer's Companion**. New York: IEEE Press, 1999.

O'HARA, B.; PETRICK, A. **802.11 Handbook – A Designer's Companion**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: IEEE Press, 2005.

ORTIZ, L. F. Special Report : Solving QoS in VoIP: A Formula for Explosive Growth? **RTC Magazine**, San Clemente, July 2001.

PSYTECHNICS LIMITED. **Estimating Id within a VoIP network**. 2002. Disponível em: < <http://www.psytechnics.com> >. Acesso em: jul. 2005.

SMAVATKUL, N.; CHEN; Y.; EMEOTT, S. Voice capacity evaluation of IEEE 802.11a with automatic rate selection. In: IEEE GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE, GLOBECOM, 2003, San Francisco. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2003. v. 1, p. 518-522.

UNIVERSITY OF PADOVA. **Bug fix for NS2.27**. (NS2.27-BUG-FIXED1.tar.gz). Department of Information Engineering, UNIPD, Padova, 2005. Disponível em: < <http://www.dei.unipd.it/wdyn/?IDsezione=2435> >. Acesso em: out. 2005.

UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. **The Network Simulator ns-2**. Information Sciences Institute, USC. Disponível em: <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>>. Acesso em: out. 2004.

UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. **The Network Simulator ns-2: Mailing Lists**. Information Sciences Institute, USC. Disponível em: <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-lists.html>>. Acesso em: out. 2005.

VEERARAGHAVAN, M.; COCKER, N.; MOORS, T. Support of voice services in IEEE 802.11 wireless LANs. In: ANNUAL JOINT CONFERENCE OF THE IEEE COMPUTER AND COMMUNICATIONS SOCIETIES, INFOCOM, 20., 2001, Anchorage. **Proceedings...** Anchorage: IEEE Press, 2001. v. 1, p. 488-497.

WILKIE, W. L. **Consumer Behaviour**. New York: John Wiley & Sons, 1994.

WITTMANN, A. Assuring VoIP Quality: Not There Yet. **Network Magazine**, San Francisco, Mar. 2005.

YANKEE GROUP. **2006 forecast for IP telephony systems in north America**. [S.l.], 2005

## APÊNDICE A SCRIPT DE SIMULAÇÃO

```
#
# NS-2 Simulation Script
#
# Author: Guilherme MARSHALL {gmarshall@inf.ufrgs.br}
# Date: October 2005
#
# Description:
# This ns script was created to simulate an IEEE 802.11 infrastuctured BSS
# as part of a master's degree dissertation. This simulation may help
# analizing packet delay issues at WLAN MAC layer, under different load
# conditions
#
# Arguments:
# 1 - Number of Voice Mobile Stations
# 2 - Number of Data Mobile Stations
# 3 - Vocoder: 1 = G.723.1, 2 = G.729A, 3 = G.711
# 4 - Coordination Function Type: 0 = DCF, 1 = PCF
# 5 - Output trace file
#

# Define Simulation Topology
# Wireless Network Specific Parameters
set opt(chan) Channel/WirelessChannel; # channel type
set opt(prop) Propagation/TwoRayGround; # radio-propagation model
set opt(ant) Antenna/OmniAntenna; # Antenna type
set opt(ll) LL; # Link layer type
set opt(ifq) Queue/DropTail; # Interface queue type
set opt(ifqlen) 500; # max packet in ifq
#set opt(engmodel) EnergyModel
#set opt(initenergy) # (in Joules)
#set opt(rxPower) # (in Watts)
#set opt(txPower) # (in Watts)
#set opt(idlePower) # (in Watts)
set opt(netif) Phy/WirelessPhy; # network interface type
set opt(mac) Mac/802_11; # MAC type
set opt(rp) DSDV; # ad-hoc routing protocol
set opt(pcf) [lindex $argv 3]; # 0 = DCF; 1 = PCF
# Scenario Variables
set opt(nmvs) [lindex $argv 0]; # Num. of Mobile Voice Stations
set opt(nmds) [lindex $argv 1]; # Num. of Mobile Data Stations
```

```

set opt(nms)          [expr 1+[expr $opt(nmvs)+$opt(nmds)]]; # Total Num. of
Mobile Stations
                    # VOCODER Selection Parameters
if { [lindex $argv 2] == 1 } {
                    # G.723.1 @ 6.4 kbit/s, 1 frame/packet (30 ms/packet)
set opt(fri)          30ms;                               # frame interval
set opt(frs)          24;                               # frame size = 24 Bytes
} elseif { [lindex $argv 2] == 2 } {
                    # G.729a, 2 frame/packet (20 ms/packet)
set opt(fri)          20ms;                               # frame interval (x2)
set opt(frs)          20;                               # frame size = 20 Bytes
} elseif { [lindex $argv 2] == 3 } {
                    # G.711, 20 ms/packet
set opt(fri)          20ms;                               # frame interval (x160)
set opt(frs)          160;                               # frame size = 160 Bytes
}

                    # Geographic Position
set opt(x)            10;
set opt(y)            10;

                    # Simulator Parameters
set opt(seed)         0.0;
set opt(at)           "ON";                               # Agent trace
set opt(rt)           "ON";                               # Router trace
set opt(mt)           "OFF";                              # MAC trace
set opt(ml)           "OFF";                              # Movement trace
set opt(eott)         "ON";                               # EOT trace
set opt(stop)         25;                                 # Simulation time
set opt(tr)           [lindex $argv 4];                  # Trace file

# Create Simulator
set ns [new Simulator]

# We will create the trace files
#$ns use-newtrace
set nstrace [open $opt(tr) w]
$ns trace-all $nstrace

# Define Geographical Topology (20m x 20m - resolution 0.5m)
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid 20 20

# Create GOD without movement pattern
# Total Mobile Nodes = AP + voice stations + data stations
create-god $opt(nms)

# New API to config node:
# 1. Create channel (or multiple-channels);
# 2. Specify channel in node-config (instead of channelType);

```

```
# 3. Create nodes for simulations.
```

```
# Create channel #1 and #2
```

```
set chan_1_[new $opt(chan)]
```

```
# Set node-config for our scenario
```

```
$ns node-config      -adhocRouting      $opt(rp) \
                    -llType           $opt(ll) \
                    -macType          $opt(mac) \
                    -propType         $opt(prop) \
                    -ifqType          $opt(ifq) \
                    -ifqLen           $opt(ifqlen) \
                    -phyType          $opt(netif) \
                    -antType          $opt(ant) \
                    -topoInstance     $topo \
                    -agentTrace       $opt(at) \
                    -routerTrace      $opt(rt) \
                    -macTrace         $opt(mt) \
                    -movementTrace    $opt(ml) \
                    -channel          $chan_1_ \
```

```
# Set PHY and MAC default parameters
```

```
Mac/802_11 set basicRate_          24.0e6
Mac/802_11 set dataRate_           54.0e6
Mac/802_11 set CWMin_              15           ;# b=31, a&g=15
Mac/802_11 set CWMax_              1023        ;# a,b&g
Mac/802_11 set SlotTime_           0.000009   ;# b=20us, a&g=9us
Mac/802_11 set SIFS_               0.000010   ;# b&g=10us, a=16us
Mac/802_11 set PreambleLength_     96         ;# bits@6Mbit/s [16us]
Mac/802_11 set PLCPHeaderLength_   40         ;# bits@6Mbit/s [6.66us]
(not incl. Tail+Pad)
Mac/802_11 set PLCPDataRate_       6.0e6      ;# a&g=6Mbit/s
Mac/802_11 set SignalExtension_    0.000006   ;# 802.11g ERP-OFDM
signal extension
Mac/802_11 set ShortRetryLimit_    7           ;#
Mac/802_11 set LongRetryLimit_     4           ;#

Mac/802_11 set RTSThreshold_       1500       ;#
Mac/802_11 set CFPPeriod_          1           ;# 1 DTIM Interval
Mac/802_11 set CFPPMaxDuration_    18         ;# TU
Mac/802_11 set BeaconPeriod_       19         ;# TU (1024 us)
```

```
# Voice traffic model
```

```
# Voice Frame + RTP + UDP
```

```
Agent/RTP set interval_           $opt(fri)
```

```
Agent/RTP set packetSize_         [expr $opt(frs) + 12 + 8]
```

```
# Make sure UDP packets don't get fragmented
```

```

Agent/UDP set packetSize_      2000

# Creating the AccessPoint (n0) and the other stations
for {set i 0} {$i < $opt(nms)} {incr i} {
    set s($i) [$ns node $i]
    $s($i) random-motion 0;      # Disable random motion

    # Set station's common MAC Parameters
    set mac_s($i) [$s($i) getMac 0]

    # Set station's PHY as ERP_OFDM compatible
    $mac_s($i) use-OFDM

    # If this node is the AP...
    if { $i == 0 } {
        # Provide initial (X,Y, for now Z=0) co-ordinates for mobilenodes
        $s($i) set X_ 10.0
        $s($i) set Y_ 10.0
        $s($i) set Z_ 0.0

        # Get bss_id for the AP
        set AP_ADDR [$mac_s(0) id]
        $mac_s(0) bss_id $mac_s(0)

        # Make the AP be the PC
        if { $opt(pcf) == 1 } {
            $mac_s(0) make-pc
            $mac_s(0) set CFPollable_ 1
        }
    } else {
        # Provide initial (X,Y, for now Z=0) co-ordinates for mobilenodes
        $s($i) set X_ 0.0
        $s($i) set Y_ 10.0
        $s($i) set Z_ 0.0

        # Tell everyone who the AP is
        $mac_s($i) bss_id $mac_s(0)

        # If this node is a voice station...
        if { $i <= $opt(nmvs) } {
            # Add this station do PCF polling list
            if { $opt(pcf) == 1 } {
                $ns at [expr $opt(nms)*(0.2 + 0.04)+1] "$mac_s(0)
addSTA $i 1 0"
                $ns at [expr $opt(nms)*(0.2 + 0.04)+1] "$mac_s($i) set
CFPollable_ 1"
            }
        }
    }
    # Set Agents for this 'connection'
}

```

```

# Upstream
set rtp_up($i) [new Agent/RTP]
set loss_up($i) [new Agent/LossMonitor]
$ns attach-agent $s($i) $rtp_up($i)
$ns attach-agent $s(0) $loss_up($i)
set cbr_up($i) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_up($i) attach-agent $rtp_up($i)
$ns connect $rtp_up($i) $loss_up($i)
# Downstream
set rtp_down($i) [new Agent/RTP]
set loss_down($i) [new Agent/LossMonitor]
$ns attach-agent $s(0) $rtp_down($i)
$ns attach-agent $s($i) $loss_down($i)
set cbr_down($i) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_down($i) attach-agent $rtp_down($i)
$ns connect $rtp_down($i) $loss_down($i)
} else {
# If this node is a data station...
# -----
## TCP connections
## Upstream
#set tcp_up($i) [new Agent/TCP]
#$ns attach-agent $s($i) $tcp_up($i)
#$ns connect $tcp_up($i) $sink_up
#set ftp_up($i) [new Application/FTP]
#$ftp_up($i) attach-agent $tcp_up($i)
## Downstream
#set tcp_down($i) [new Agent/TCP]
#set sink_down($i) [new Agent/Sink]
#$ns attach-agent $s(0) $tcp_down($i)
#$ns attach-agent $s($i) $sink_down($i)
#$ns connect $tcp_down($i) $sink_down($i)
#set ftp_down($i) [new Application/FTP]
#$ftp_down($i) attach-agent $tcp_down($i)
# -----
# Upstream
set udp_up($i) [new Agent/UDP]
set sink_up($i) [new Agent/Null]
$ns attach-agent $s($i) $udp_up($i)
$ns attach-agent $s(0) $sink_up($i)
set exp_up($i) [new Application/Traffic/Exponential]
$exp_up($i) set packetSize_ 600
$exp_up($i) set burst_time_ .1
$exp_up($i) set idle_time_ .7
$exp_up($i) set rate_ 400k
$exp_up($i) attach-agent $udp_up($i)
$ns connect $udp_up($i) $sink_up($i)
## Downstream
set udp_down($i) [new Agent/UDP]

```

```

        set sink_down($i) [new Agent/Null]
        $ns attach-agent $s(0) $udp_down($i)
        $ns attach-agent $s($i) $sink_down($i)
        $ns connect $udp_down($i) $sink_down($i)
        set exp_down($i) [new Application/Traffic/Exponential]
        $exp_down($i) set packetSize_ 1000
        $exp_down($i) set burst_time_ .05
        $exp_down($i) set idle_time_ .3
        $exp_down($i) set rate_ 2000k
        $exp_down($i) attach-agent $udp_down($i)
    }
    # this is a 'warm up' traffic only, used to initialise the ARP tables
    set init_udp($i) [new Agent/UDP]
    set init_sink($i) [new Agent/Null]
    $ns attach-agent $s(0) $init_udp($i)
    $ns attach-agent $s($i) $init_sink($i)
    $ns connect $init_udp($i) $init_sink($i)
    set init_cbr($i) [new Application/Traffic/CBR]
    $init_cbr($i) set packetSize_ 50
    $init_cbr($i) set interval_ 100
    $init_cbr($i) attach-agent $init_udp($i)
}
}

# Procedure to be called at the end of the simulation
proc finish {} {
    global ns nstrace ;#namtrace
    $ns flush-trace
    close $nstrace
    #close $namtrace
    #exec nam $namtrace &
    exit 0
}

# Start the dummy traffic
for {set i 1} {$i <= [expr $opt(nms) - 1]} {incr i} {
    $ns at [expr 0.2*$i + $opt(nms)*0.04] "$init_cbr($i) start"
    $ns at [expr $opt(nms)*(0.2 + 0.04) + 0.5] "$init_cbr($i) stop"
}

# Make it happen!
for {set i 1} {$i <= $opt(nmvs)} {incr i} {
    $ns at [expr $opt(nms)*(0.2 + 0.04) + 2.001 + $i*0.001033] "$rtp_up($i) start"
    $ns at [expr $opt(nms)*(0.2 + 0.04) + 2.001 + $i*0.002267] "$rtp_down($i)
start"
}
for {set i [expr $opt(nmvs) + 1]} {$i < $opt(nms)} {incr i} {
    $ns at [expr $opt(nms)*(0.2 + 0.04) + 0.501 + $i*0.140623] "$exp_up($i) start"
}

```

```

    $ns at [expr $opt(nms)*(0.2 + 0.04) + 0.501 + $i*0.086909] "$exp_down($i)
start"
}

# Ok, that's enough.
for {set i 1} {$i <= $opt(nmvs)} {incr i} {
    $ns at [expr $opt(stop) + $opt(nms)*(0.2 + 0.04) + 2.0] "$rtp_up($i) stop"
    $ns at [expr $opt(stop) + $opt(nms)*(0.2 + 0.04) + 2.0] "$rtp_down($i) stop"
}
for {set i [expr $opt(nmvs) + 1]} {$i < $opt(nms)} {incr i} {
    $ns at [expr $opt(stop) + $opt(nms)*(0.2 + 0.04) + 2.0] "$exp_up($i) stop"
    $ns at [expr $opt(stop) + $opt(nms)*(0.2 + 0.04) + 2.0] "$exp_down($i) stop"
}

$ns at [expr $opt(stop) + $opt(nms)*(0.2 + 0.04) + 5] "finish"

$ns run

```