TRANSMISSÃO DE VOZ EM REDES AD HOC

Pedro Braconnot Velloso

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte, Dr.Ing.

Prof. Marcelo Gonçalves Rubinstein, D.Sc.

Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

Prof. Virgilio Augusto Fernandes Almeida, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2003

VELLOSO, PEDRO BRACONNOT

Transmissão de Voz em Redes Ad Hoc [Rio de Janeiro] 2003

XV, 64 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2003)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Redes sem fio ad hoc

2. Transmissão de voz

3. Mobilidade

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

À Ana Maria Braconnot Velloso.

Agradecimentos

À minha família, principalmente meus pais, por todo o amor, orientação, incentivo e apoio ao longo da minha vida.

Aos professores Otto e Rubi por toda a amizade, confiança e orientação, além de sempre estarem presentes, para dar conselhos e ajudar a superar todos os obstáculos.

Aos amigos Eric e Cunha, pela amizade e pela ajuda com o desenvolvimento da tese.

A toda a equipe do GTA, em particular aos amigos, Aline, Bernardo, Artur, Paulo, Valentim, Kleber, Saulo, Bicudo, Igor, Rafael, Luis Gustavo, Rezende, pela amizade e pela boa convivência durante toda a tese.

Ao professor Virgilio Almeida e ao Doutor Luís Henrique Costa pela presença na banca examinadora.

Às funcionárias do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ, Bia, Solange e Roberto pela presteza no atendimento na secretaria do Programa.

À CAPES, pelo financiamento da pesquisa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

TRANSMISSÃO DE VOZ EM REDES AD HOC

Pedro Braconnot Velloso

Agosto/2003

Orientadores: Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte

Marcelo Gonçalves Rubinstein

Programa: Engenharia Elétrica

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise da capacidade de transmissão de voz em redes ad hoc, revelando aspectos específicos do comportamento deste tipo de rede. O estudo deste comportamento é de grande importância para o desenvolvimento de novos algoritmos e novas aplicações de voz em redes ad hoc. Foram analisadas as redes ad hoc de comunicação direta e de múltiplos saltos, levando em consideração parâmetros de qualidade de serviço como o atraso, a variação do atraso, a taxa de perda e as perdas consecutivas. Além disso, as causas das perdas também foram analisadas. Desta maneira, pôde-se avaliar a influência da carga da rede, da provisão de qualidade de serviço, da mobilidade e da densidade de nós na capacidade de transmissão de voz da rede. Os resultados mostram que a técnica de diferenciação de serviço utilizada é capaz de aumentar a capacidade de transmissão de voz da rede. Além disso, as análises efetuadas para as redes de múltiplos saltos mostram que é possível manter algumas conversações com qualidade aceitável mesmo em cenários adversos em termos de carga da rede e mobilidade dos nós.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

VOICE TRANSMISSION IN AD HOC NETWORKS

Pedro Braconnot Velloso

August/2003

Advisors:	Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte
	Marcelo Gonçalves Rubinstein
Department:	Electrical Engineering

This work aims to analyze the voice transmission capacity of ad hoc networks and to discover the specific behavior of such networks. The study of this behavior is of great importance for developing new algorithms and new voice applications for ad hoc networks. Single hop and multihop networks have been analyzed by taking into account quality of service parameters such as delay, jitter, loss rate, and number of consecutive losses. Furthermore, loss causes have also been analyzed. We have evaluated the effect of network load, of quality of service (QoS) provisioning, of mobility, and of node density on the voice transmission capacity of the network. The results show that the service differentiation technique used in this work is able to increase the voice transmission capacity. Moreover, multihop analysis show that it is possible to carry a number of talks of acceptable quality even in the case of adverse scenarios in terms of the network load and node mobility.

Lista de acrônimos

ACELP : *Algebraic-Code-Excited Linear Prediction*;

AODV : *Ad hoc On-demand Distance Vector*;

ARQ : *Automatic Repeat Request*;

BER : *Bit Error Rate*;

CCK : *8-chip Complementary Code Keying*;

CFP : *Contention Free Period*;

CNG : *Confort Noise Generator*;

CP : *Contention Period*;

CS-ACELP : *Conjugate Structure Algebraic-Code-Excited Linear Prediction*;

CSMA/CA : *Carrier-Sense Multiple Access/Collision Avoidance*;

CTS : *Clear To Send*;

DBPSK : *Differential Binary Phase Shift Keying*;

DCF : *Distributed Coordination Function*;

DQPSK : *Differential Quadrature Phase Shift Keying*;

DIFS : *Distributed Inter-Frame Space*;

DSR : *Dynamic Source Routing*;

DSSS : *Direct Sequence Spread Spectrum*;

DTX : *Discontinous Transmission*;

FEC : *Forward Error Correction*;

FHSS : *Frequency Hopping Spread Spectrum*;

GFSK : *Gaussian Frequency Shift Keying*;

HEC : *Header Error Control*;

HR/DSSS : *High Rate DSSS*;

IP : *Internet Protocol*;

ITU-T : *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*;

MAC : *Medium Access Control*;

MONARCH : *Mobile Networking Architectures*;

MOS : *Mean Opinion Score*;

MP-MLQ : *Multi-Pulse-Maximum Likelyhood Quantization*;

NAV : *Network Allocation Vector*;

ns : *Network Simulator*;

OFDM : *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*;

PCF : *Point Coordination Function*;

PCM : *Pulse Code Modulation*;

PDF : *Probability Density Function*;

PDU : *Protocol Data Unit*;

PIFS : *PCF Inter-Frame Space*;

PMF : *Probability Mass Function*;

PSM : *Power Saving Mode*;

QAM : *Quadrature Amplitude Modulation*;

QoS : *Quality of Service*;

RERR : *Route Error*;

RREP : *Route Reply*;

RREQ : *Route Request*;

RTCP : *Real Time Control Protocol*;

RTP : *Real Time Protocol*;

RTS : *Request To Send*;

SFD : *Start Frame Delimiter*;

SIFS : *Short Inter-Frame Space*;

TDM : *Time Division Multiplexing*;

TIM : *Traffic Indication Map*;

UDP : *User Datagram Protocol*;

VAD : *Voice Activity Detector*;

VoIP : *Voice over IP*.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Capítulo 1

Introdução

A COMUNICAÇÃO sem fio permite a mobilidade, proporcionando uma maior flexibilidade, além de possuir um baixo custo de instalação comparado às redes com fio. Por essa razão, a utilização de redes locais sem fio tem apresentado um grande crescimento nos últimos anos. As aplicações compreendem desde comunicações a curtas distâncias e com pouca mobilidade, como encontros em salas de reunião, a comunicações em maiores distâncias e com grande mobilidade, como operações militares ou de resgate. Muitas destas aplicações seriam inconvenientes ou até mesmo inviáveis em redes tradicionais cabeadas.

1.1 Motivação

O grande crescimento da popularidade das redes sem fio tem despertado interesse em oferecer aplicações de voz e vídeo em tempo real neste tipo de rede, sendo que uma das áreas que vêm recebendo bastante atenção é a de redes ad hoc. As redes sem fio são divididas em duas categorias. A primeira abrange as redes com infra-estrutura, nas quais toda a comunicação é realizada através de um ponto de acesso, como é o caso das redes celulares de telefonia. A segunda categoria engloba as redes sem infra-estrutura, também denominadas redes ad hoc, nas quais as estações se comunicam diretamente, não existindo o ponto de acesso. Nas redes ad hoc de comunicação direta os nós podem se comunicar, única e exclusivamente, com os nós que estão dentro do seu raio de cobertura. Por sua vez, nas redes ad hoc de múltiplos saltos, as estações da rede também se comportam como roteadores, permitindo a comunicação entre os nós cuja distância ultrapassa o raio de cobertura, sendo, como conseqüência, bem mais complexas.

As redes ad hoc apresentam diversas vantagens como, por exemplo, a grande flexibilidade, pois podem ser formadas rapidamente mesmo em lugares ermos, o baixo custo de instalação e a robustez, pois podem resistir a catástrofes da natureza e a situações de destruição por motivo de guerra. Desta maneira, as principais aplicações para redes ad hoc são em ambientes onde não haja qualquer tipo de infra-estrutura de comunicação, ou esta seja economicamente inviável, ou ainda, caso a infra-estrutura existente não seja confiável, como é o caso de operações militares em território inimigo.

Como toda rede sem fio, as redes ad hoc têm os problemas de baixa taxa de transmissão, de alta probabilidade de erro e de grande variação das condições do meio de transmissão. Além destas restrições, as estações de uma rede ad hoc de múltiplos saltos são mais complexas, pois possuem mecanismos específicos de controle de acesso ao meio para evitar os problemas de terminais expostos e escondidos, e todo nó deve agir como um roteador. Esta complexidade torna a transmissão de voz em redes ad hoc um grande desafio.

Diferentes tecnologias foram propostas e implementadas a fim de viabilizar as aplicações de redes ad hoc. Uma das tecnologias que vem obtendo grande êxito comercial é a tecnologia baseada no padrão IEEE 802.11, que define um conjunto de normas para redes locais sem fio. As principais vantagens do 802.11 são o baixo custo dos dispositivos de rede e a grande flexibilidade, pois pode ser utilizado tanto para redes com infra-estrutura, como para redes ad hoc.

1.2 Trabalhos relacionados

A pesquisa na área de qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS) em redes ad hoc abrange diversos tópicos que incluem roteamento com QoS [1, 2, 3], modelos de QoS [4, 5], sinalização [6, 7, 8] e QoS na subcamada de controle de acesso ao meio [9, 10, 11, 12]. Bharghavan *et al.* [1] propuseram um protocolo de roteamento (*Core-Extraction Distributed Ad hoc Routing* - CEDAR) capaz de prover QoS em redes ad hoc. O CEDAR é baseado na eleição de líderes responsáveis por realizar o roteamento e propagar os enlaces mais estáveis para os nós mais distantes e os enlaces menos estáveis ou de menor capacidade para os nós mais próximos. O núcleo da rede é formado pelos nós selecionados que devem executar um algoritmo para descoberta de uma rota que satisfaça a banda passante requerida. Xiao *et al.* [4] propuseram um modelo flexível de QoS para redes móveis ad hoc, que consiste em um modelo híbrido entre o DiffServ (*Differentiated Services*) e o IntServ (*Integrated Services*). Nesse modelo, o tráfego de maior prioridade recebe a provisão de QoS por fluxo (IntServ) e o tráfego menos prioritário recebe provisão de QoS por classe (DiffServ). O INSIGNIA, proposto por Campbell *et al.* [6], é um protocolo de sinalização que provê suporte a QoS em redes móveis ad hoc. A sinalização é transmitida junto com os dados, em pacotes IP. Este protocolo é parte integrante de um mecanismo de controle de fluxo para redes sem fio. Em [9, 10], foram apresentados os principais problemas referentes à provisão de diferenciação de serviço em redes locais sem fio que seguem o padrão IEEE 802.11. Também foram avaliadas, por meio de simulações, as principais técnicas de diferenciação de serviço na subcamada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC). Os resultados obtidos nesses trabalhos mostraram ser possível prover prioridades no acesso ao meio em redes ad hoc através da modificação do valor do DIFS (*Distributed Inter-Frame Space*), da janela de tempo do *backoff* e do tamanho do quadro a ser transmitido. Os trabalhos [11, 12] propõem mudanças na função que gera o *backoff* a fim de prover diferenciação de serviço em redes 802.11. Deng e Chang [11] investigaram, através de simulações, o impacto da diferenciação de serviço nos tráfegos de vídeo e de voz em redes ad hoc de comunicação direta. A análise leva em consideração o atraso médio dos pacotes e a probabilidade de perda. Mutka e Kang [12] propuseram a criação de três classes de serviço, demonstrando, através de simulações, a eficiência desta técnica.

A transmissão de voz em tempo real deve obedecer a certos requisitos de qualidade de serviço devido a características intrínsecas a este tipo de tráfego. Os principais requisitos são o atraso, a variação do atraso e a taxa de perda. Alguns trabalhos [13, 14, 15, 16] analisam o atraso e a perda de pacotes na Internet. Diot *et al.* [14] realizaram medidas em *backbones* da Sprint. Os resultados mostraram que neste *backbone* o congestionamento não era problema, porém a quebra de enlaces e a instabilidade no roteamento causavam perdas em grandes rajadas, acarretando sérios danos ao tráfego de voz. Borella *et al.* [16] também coletaram dados referentes à perda de pacotes na Internet e mostraram que a distribuição das perdas consecutivas apresenta uma cauda longa. Além disso, eles consideraram que as perdas de até dez pacotes consecutivos são devidas a descarte nas filas de roteadores devido ao congestionamento, enquanto que perdas em rajadas maiores que dez pacotes são oriundas da manutenção de rotas ou quebra de enlaces.

Existem alguns trabalhos que analisam a capacidade de transmissão de voz em redes infra-estruturadas baseadas no padrão IEEE 802.11. Köpsel e Wolisz [17] realizaram simulações para avaliar o efeito da taxa de erro binária (*Bit Error Rate* - BER) no atraso do acesso ao meio e no *goodput* em redes com infra-estrutura, mostrando que a elevação da taxa de erro provoca um aumento considerável no atraso de acesso ao meio. Isto se deve ao aumento do espaçamento entre quadros (*Inter-Frame Space*), pois este parâmetro varia de acordo com a taxa de erro do canal. Wolisz *et al.* [18] analisaram a capacidade do padrão 802.11 em relação ao número de estações transmitindo voz em redes infra-estruturadas. Esse trabalho avalia, através de simulações, o ponto ótimo de chaveamento entre os mecanismos de controle de acesso no modo distribuído (*Distributed Coordination Function* - DCF) e centralizado (*Point Coordination Function* - PCF), tendo em vista que o PCF apresenta um melhor desempenho em redes com maior carga. A partir dos resultados obtidos, os autores propuseram um mecanismo híbrido de acesso ao meio que utiliza o DCF e o PCF. No entanto, a avaliação da capacidade de transmissão de voz em redes ad hoc é um tema ainda pouco explorado.

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é realizar uma análise da capacidade de transmissão de voz em redes ad hoc, revelando aspectos específicos do comportamento deste tipo de rede. O estudo deste comportamento é de grande importância para o desenvolvimento de novos algoritmos de roteamento e controle de fluxo, para a criação de mecanismos adaptativos de dimensionamento de *buffers*, bem como para a escolha de parâmetros em estudos analíticos, sendo essencial para o projeto e a implementação de aplicações de voz em redes ad hoc.

A análise da capacidade de voz em redes ad hoc foi realizada através de simulações [19, 20, 21, 22], sendo dividida em duas partes. Na primeira parte é analisado o caso de redes ad hoc de comunicação direta e na segunda são analisadas as redes ad hoc de múltiplos saltos. Nas redes de comunicação direta foram avaliados os efeitos da carga da rede e da provisão de QoS. Para atingir este objetivo foi utilizada uma técnica de diferenciação de serviço na subcamada de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC) do padrão IEEE 802.11, que consiste na mudança da função de geração do *backoff* do mecanismo distribuído de acesso ao meio DCF. No cenário de múltiplos saltos, foram avaliados os efeitos da variação da carga da rede, da mobilidade e da densidade de nós na capacidade de transmissão de voz da rede. Os parâmetros levados em consideração nas análises foram o atraso, a variação do atraso, a taxa de perdas e as perdas consecutivas. Além disso, foram também identificadas as causas que levaram a perdas de pacotes.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. No Capítulo 2, são apresentadas as características básicas da transmissão de voz em redes de comutação por pacote. No Capítulo 3, são apresentadas as principais características do padrão IEEE 802.11 e são descritos os principais mecanismos propostos para prover qualidade de serviço em redes IEEE 802.11. Detalhes referentes às simulações e à análise dos resultados são apresentados no Capítulo 4. Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Transmissão de voz sobre IP

A INTERNET foi projetada baseada na técnica de comutação de pacotes para a transmissão de dados. Nesta técnica, ao contrário da comutação de circuitos, o meio é compartilhado, permitindo assim aumentar a eficiência da utilização dos recursos da rede. A comutação de pacotes é ideal para a transmissão de dados, entretanto ela apresenta alguns problemas para a transmissão de tráfegos que possuem restrições de tempo, como é o caso da transmissão de voz em tempo real.

Este capítulo aborda as principais características da transmissão de voz em pacotes. São apresentados os protocolos usados, os modelos de avaliação da qualidade de uma conversação, as codificações, os modelos analíticos e os parâmetros de qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS).

2.1 A arquitetura

Para se transmitir voz em uma rede de comutação de pacotes, a voz analógica deve ser transformada para a forma digital através dos codificadores de voz (Figura 2.1. Em

Figura 2.1: A arquitetura voz sobre IP.

seguida, é aplicada a etapa de geração do pacote. A informação binária da saída do codificador de voz é armazenada até que se consiga atingir o tamanho estipulado para a parte de dados do pacote e acrescentam-se os cabeçalhos. Depois, os pacotes são transmitidos nó-a-nó até o destino. Finalmente, no destino, os pacotes são recebidos, a informação é decodificada e a voz é reproduzida. A Figura 2.2 mostra a arquitetura voz sobre IP (*Voice over IP* - VoIP). Pode-se perceber que existe uma determinada sobrecarga referente ao acréscimo dos cabeçalhos dos protocolos, isto é, para cada pacote de voz devem ser acrescentados 12 octetos referentes ao cabeçalho do protocolo *Real Time Protocol* (RTP), 8 octetos referentes ao protocolo *User Datagram Protocol* (UDP), 20 octetos referentes ao protocolo *Internet Protocol* (IP), perfazendo um total de 40 octetos, e o cabeçalho da subcamada de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC) que será apresentado no Capítulo 3. Do ponto de vista de sobrecarga de cabeçalhos e de processamento dos protocolos deve-se enviar a maior quantidade possível de informação de voz em cada pacote para maximizar a utilização da capacidade da rede. No entanto, quanto maior a informação de voz, maior o tempo de espera para a geração do pacote e maior o tempo de transferência nó-a-nó na rede de comutação por pacotes. Assim, existe um compromisso entre a eficiência e o atraso. Diversos trabalhos abordaram este compromisso para a rede Internet cabeada. No entanto, este assunto foi pouco explorado para as redes sem fio do tipo IEEE 802.11. Deve ser ressaltado que neste ambiente os mecanismos de acesso ao meio são específicos e para cada quadro enviado é requerido um reconhecimento, pois não é possível identificar as colisões. Este procedimento aumenta o tráfego da camada de enlace e dificulta ainda mais o acesso ao meio.

O protocolo *Real-Time Protocol* (RTP) [23] provê serviços fim-a-fim para aplicações de tráfego em tempo-real. Por isso, ele é utilizado para transportar pacotes de voz. As principais funcionalidades oferecidas pelo RTP são a identificação do tipo de tráfego, o número de seqüência de pacotes, o selo de temporização (*timestamping*) e, com o auxílio do *Real-Time Control Protocol* (RTCP), o monitoramento da entrega dos pacotes. Usualmente, o RTP é utilizado sobre o protocolo UDP (*User Datagram Protocol*), que provê um serviço de transporte não confiável. Isto acontece porque não é necessária a retransmissão de pacotes perdidos, porque um pacote retransmitido, muito provavelmente, não chegará no receptor a tempo de ser reproduzido. Além disso, o RTP faz uso da multiplexação e

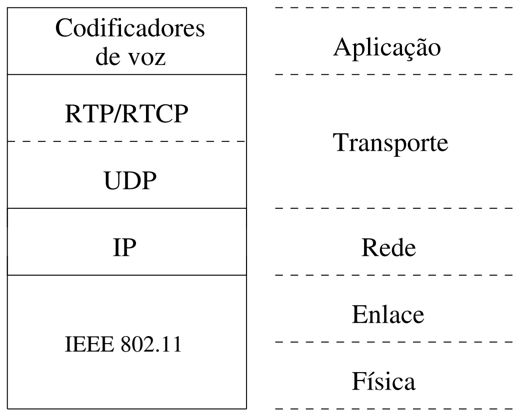


Figura 2.2: A arquitetura voz sobre IP.

do *checksum* provido pelo UDP. No entanto, o RTP não provê nenhuma garantia de atraso ou de qualquer outro parâmetro de QoS. O RTP também não garante a entrega ordenada dos pacotes, mas o receptor pode utilizar o número de seqüência para ordená-los.

O RTCP é um protocolo de controle utilizado em conjunto com o RTP, que fornece informações sobre a qualidade de uma dada sessão RTP. Uma sessão RTP consiste em um conjunto de participantes que se comunicam através do protocolo RTP, sendo que para cada sessão são necessárias duas comunicações UDP (duas portas diferentes), uma utilizada pelo RTP e a outra pelo RTCP. Estas informações estão relacionadas a características da sessão, tais como: os participantes, a variação do atraso, a taxa de perdas, entre outras.

A norma H.323 define um padrão para ser utilizado em conferências através da Internet [24]. O H.323 especifica os protocolos de transporte, de controle e de sinalização, bem como os codificadores de voz. Isso tudo para viabilizar o estabelecimento de chamadas telefônicas na Internet. O padrão H.323 recomenda o uso tanto do RTP quanto do RTCP para o transporte e controle da qualidade do tráfego de voz.

2.2 Os modelos de avaliação da qualidade da voz

A qualidade de um sinal de voz pode ser determinada através da escala MOS (*Mean Opinion Score*), na qual os ouvintes atribuem valores entre 0 e 5 ao sinal de voz de acordo com a sua opinião sobre a qualidade do sinal. Este parâmetro é bem subjetivo, por isso a ITU (*International Telecommunication Union*) desenvolveu um modelo (E-Model [25, 26, 27]) a fim de medir a qualidade da voz de maneira mais precisa. Este modelo baseia-se na escala R, que leva em consideração alguns prejuízos da qualidade da voz. O valor de R pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$R = R_0 - Is - Id - Ie - A. \tag{2.1}$$

Nesta expressão, R_0 representa a relação sinal-ruído, Is representa distorções relacionadas à quantização, Id está relacionado com o atraso, Ie com a distorção gerada pela compressão dos codificadores e pela perda de pacotes. O parâmetro A representa um decréscimo em R que o ouvinte está disposto a tolerar, por estar usufruindo dos benefícios da utilização de VoIP. A Tabela 2.1 apresenta os valores das escalas MOS e R.

Tabela 2.1: Avaliação da qualidade da voz.

R	Qualidade da voz	MOS
90 - 100	Excelente	4,3 - 4,5
80 - 90	Alta	4,0 - 4,3
70 - 80	Média	3,6 - 4,0
60 - 70	Baixa	3,1 - 3,6
50 - 60	Pobre	2,6 - 3,1
0 - 50	Inaceitável	1,0 - 2,6

2.3 Codificadores de voz

A função dos codificadores de voz é transformar a voz da forma analógica para a forma digital. A codificação da voz consiste basicamente na amostragem e na quantização do sinal. A amostragem transforma o sinal contínuo em um sinal discreto enquanto a quantização converte o sinal discreto analógico em uma seqüência de bits.

O codificador mais básico definido pela ITU-T é o G.711 [28], que utiliza a modulação *Pulse Code Modulation* (PCM). A faixa de freqüência da voz humana utilizada para telefonia é de 4 kHz, e segundo a taxa de Nyquist [29], a voz deve ser amostrada pelo menos no dobro da freqüência. Assim, têm-se 8 mil amostras por segundo. Cada amostra é representada por um octeto, portanto, a taxa de transmissão da voz PCM é de 64 kbps. Na quantização é utilizada uma escala logarítmica de modo a aumentar a resolução de sinais de menor volume. Na verdade, a escala não é logarítmica, mas são utilizados vários segmentos lineares, a fim de realizar uma aproximação da curva desejada.

Existem codificadores de voz que utilizam a técnica de supressão de silêncio. Esta técnica se baseia no fato de que durante uma conversação o interlocutor fala em média 35% do tempo. Para suprimir o silêncio, é necessária a existência de um detector de voz (*Voice Activity Detector* - VAD), responsável por detectar se o interlocutor está falando ou está em silêncio. O VAD pode ser implementado com ou sem histerese, isto é, ao invés de utilizar apenas um limiar de tensão na detecção de atividade e de silêncio, pode-se utilizar dois limiares, como mostra a Figura 2.3, de maneira a evitar que o final das palavras sejam cortados. É necessário também um dispositivo (*Discontinuous Transmission* - DTX) que interromperá a transmissão toda vez que receber a informação de que o interlocutor está em silêncio. Por fim, é necessário um dispositivo (*Confort Noise Generator* - CNG) para simular o ruído de fundo enquanto o interlocutor estiver em silêncio, pois o silêncio absoluto causa desconforto aos ouvidos humanos.

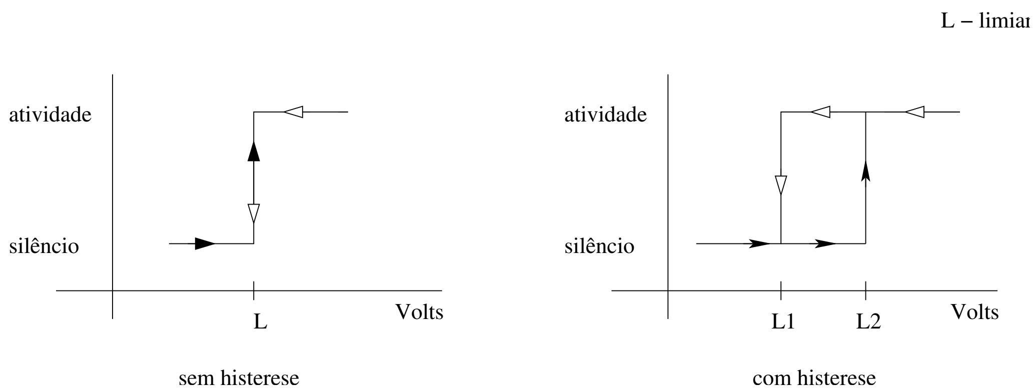


Figura 2.3: Detector de voz.

Existem ainda diversos outros codificadores de voz que possuem taxas de transmissão inferiores. A grande maioria destes codificadores faz a compressão do sinal de voz em quadros, onde cada quadro contém diversas amostras de voz. Estas técnicas de compressão utilizam informações dos quadros anteriores para a geração dos quadros atuais. O codificador G.723.1 [30] foi selecionado pela *International Multimedia Telecommunications Consortium (MTC) VoIP Forum* para o padrão H.323 banda estreita. Este codificador possui uma taxa de transmissão de 5,3 ou 6,3 kbps, que pode ser ajustada dinamicamente. O tamanho do quadro é de 30 ms mais 7,5 ms de informações do quadro anterior. O G.723.1 utiliza o *Multi-Pulse-Maximum Likelyhood Quantization* (MP-MLQ) para excitação da taxa mais alta, enquanto que para a taxa mais baixa é utilizado o *Algebraic-Code-Excited Linear Prediction* (ACELP). O codificador G.729A [31] utiliza a técnica de codificação *Conjugate Structure Algebraic-Code-Excited Linear Prediction* (CS-ACELP). Ele possui uma taxa de 8 kbps com tamanho de quadro de 10 ms mais 5 ms de informações do quadro anterior. Tanto o G.723.1 quanto o G.729A são capazes de realizar a supressão de silêncio. A Tabela 2.2 resume as principais características dos codificadores anteriormente mencionados.

Tabela 2.2: Características dos codificadores de voz.

Codificador	Taxa	Quadro	MOS
G.711 (PCM)	64 kbps	1 ms	4,1
G.723.1 (MP-MLQ)	6,3 kbps	30 ms	3,9
G.723.1 (ACELP)	5,3 kbps	30 ms	3,65
G.729A (CS-ACELP)	8 kbps	10 ms	3,7

2.4 A modelagem da voz

As fontes de voz com compressão de silêncio são modeladas a partir de fontes de atividade/silêncio (*on/off*). O tempo de permanência em cada estado é representado por uma variável aleatória exponencialmente distribuída. Os valores médios de permanência em cada estado dependem do tipo do detector de silêncio. Segundo Jiang e Schulzrinne [32], os valores médios de permanência em cada estado podem estar entre 200-400 ms (atividade) e 500-700 ms (silêncio) para detectores sem histerese, e 1-2 s para ambos os estados, no caso de detectores que utilizam histerese. Sriram e Whitt [33] utilizaram como valores médios 352 ms e 650 ms para a permanência nos estados de atividade e de silêncio, respectivamente. A recomendação P.59 [34] da ITU-T especifica um modelo *on/off* para geração de voz com médias de 227 ms (atividade) e 596 ms (silêncio) sem histerese e 1,004 ms (atividade) e 1,587 ms (silêncio) com histerese.

Jiang e Schulzrinne [32] realizaram experimentos para analisar esta questão da modelagem da voz em fontes de atividade/silêncio. Eles mostraram que, para os sistemas modernos de detecção de silêncio, a distribuição exponencial não é a mais adequada para representar o tempo médio de permanência nos estados, pois os resultados indicaram que a distribuição do tráfego de uma fonte de atividade/silêncio apresenta uma cauda longa. Além disso, foram realizadas simulações para mostrar como este resultado pode afetar a análise de desempenho de aplicações de VoIP.

2.5 Os parâmetros de qualidade de serviço

A transmissão de voz por pacotes em tempo-real deve satisfazer alguns requisitos, tais como garantir um atraso máximo para cada pacote, uma variação máxima do atraso dos pacotes e uma taxa máxima de perda de pacotes. Dentre estes parâmetros, o atraso é o que mais contribui para a perda da interatividade da conversação. Na Tabela 2.3 são apresentados alguns valores de tolerância ao atraso recomendados pelo ITU-T [35]. O atraso total é composto, basicamente, pela soma de quatro parcelas: o atraso de codificação e decodificação, o atraso de geração de pacotes, o atraso de propagação e o atraso de espera em filas. Esta última parcela considera não apenas as filas dos roteadores, mas também as filas dos *buffers* dos receptores. Na Internet, quando a rede está congestionada, o atraso devido à espera em filas representa a maior parte do atraso total. Entretanto, em redes sem fio, na presença de diversas estações transmitindo simultaneamente, o tempo de acesso ao meio contribui significativamente para o aumento do atraso. Isto se reflete em um aumento do transbordo das filas da subcamada MAC das estações da rede.

O tráfego de voz, ao contrário do tráfego de dados, admite a ocorrência de perdas de

Tabela 2.3: Tolerância ao atraso em comunicações de voz.

Atraso da voz	Tolerância
até 150ms	Aceitável com boa interatividade
150ms - 400ms	Aceitável, mas o usuário já percebe alguma perda de interatividade
acima de 400ms	Inaceitável, com perda de interatividade

pacotes. Contudo, existe um certo limite para a taxa de perda de modo a não prejudicar a inteligibilidade. Outro fator relevante para a transmissão de voz é o número de pacotes consecutivos perdidos em um mesmo fluxo, pois a perda de pacotes consecutivos é mais prejudicial que a perda de pacotes intercalados. Isto ocorre devido à quantidade de silêncio provocada pela perda de pacotes consecutivos.

Existem algumas técnicas para suavizar a perda de pacotes. A grande vantagem destas técnicas é não acrescentar sobrecarga na rede. Dentre essas técnicas, destacam-se:

- substituição por silêncio - consiste na substituição dos pacotes perdidos por silêncio. Esta técnica pode causar cortes na voz, sobretudo, quando são utilizados pacotes grandes ou quando há uma alta taxa de perda. Hardman *et al.* [36] mostraram que esta técnica apresenta um desempenho adequado apenas para pacotes menores que 16 ms e com uma taxa de perda inferior a 1%;

- substituição por ruído - consiste na substituição dos pacotes perdidos por ruído branco. Esta técnica apresenta um melhor desempenho que a substituição por silêncio. Este fato é atribuído à habilidade do cérebro humano em reconstruir a mensagem recebida na presença de ruído de fundo, o que não é possível com o silêncio [37];

- repetição de pacote - consiste na repetição do último pacote corretamente recebido no lugar do pacote perdido. É recomendável que o sinal repetido seja desvanecido para garantir uma melhor qualidade;

- interpolação - esta técnica utiliza informações dos pacotes vizinhos ao pacote perdido para reconstruí-lo. Wong *et al.* [38] mostraram que a interpolação utilizando características da forma de onda dos sons anteriores e posteriores à perda apresenta um melhor desempenho que as técnicas de substituição por silêncio e de repetição. Pode-se utilizar também os pacotes vizinhos para tentar prever o pacote perdido, tendo em vista que a voz apresenta uma grande auto-correlação [37];

- intercalação - nesta técnica, os quadros de voz são rearrumados nos pacotes, de maneira que quadros consecutivos não sejam enviados em um mesmo pacote. Estes quadros devem ser ordenados no receptor antes de serem reproduzidos. Desta maneira, a perda de um pacote significa a perda de alguns quadros espaçados, tornado-se mais tolerável ao ouvido humano. O maior problema desta técnica é o acréscimo de atraso, pois a fonte deve gerar n pacotes que serão rearrumados antes da transmissão.

Existem ainda técnicas de recuperação de perdas que podem ser classificadas em: correção direta ou automática (*Forward Error Correction* - FEC), por retransmissão (*Automatic Repeat Request* - ARQ) e mistas (FEC+ARQ ou ARQ+FEC). As técnicas por retransmissão e mista são baseadas na retransmissão dos pacotes perdidos. Portanto, estas técnicas não são muito adequadas para tráfegos com restrições de tempo-real. A correção direta (FEC) acrescenta redundâncias aos pacotes de voz para viabilizar a detecção e a correção de pacotes perdidos. Alguns trabalhos [39, 40, 41] que pesquisam mecanismos de recuperação de perdas utilizando FEC foram propostos. Bolot e García [39] propuseram e analisaram um mecanismo de recuperação de perdas no qual o pacote n é transmitido com uma versão do pacote $n-1$ codificada a uma taxa inferior à taxa do pacote n. Este mecanismo permite apenas a recuperação de perdas espaçadas. Com o objetivo de minimizar a sobrecarga na rede, um mecanismo FEC adaptativo foi proposto por Moreno *et al.* [40]. Neste mecanismo, a quantidade de redundância acrescida em cada pacote baseia-se no número de pacotes perdidos da rede. Towsley *et al.* [41] realizaram uma análise matemática da perda de pacotes na presença de um mecanismo FEC e a partir do resultado obtido propuseram um mecanismo FEC adaptativo.

A variação do atraso (*jitter*) também pode degradar a qualidade da voz transmitida, pois a reprodução de um tráfego de voz deve ser feita de forma cadenciada. O fator que mais contribui para o aumento do *jitter* é a espera nas filas dos roteadores, pois o tamanho destas filas está diretamente relacionado com a carga da rede. Por isso, os pacotes de voz podem sofrer diferentes atrasos em um mesmo roteador. Além disto, os pacotes podem percorrer diferentes caminhos, ou seja, passar por diferentes roteadores, aumentando a probabilidade de ocorrerem diferenças de atraso. Para resolver este problema são utilizados *buffers* no receptor para o armazenamento da voz antes de sua reprodução. Portanto, o aumento da variação do atraso implica um aumento do tamanho do *buffer*. Assim, após a chegada no receptor cada pacote deve ser armazenado no *buffer* e aguardar o seu momento de reprodução, causando um aumento no atraso do pacote. Caso um pacote chegue após o momento de sua reprodução, ele é automaticamente descartado. Por este motivo, na escolha do tamanho do *buffer* existe um compromisso entre o atraso do pacote e a taxa de descarte. Um *buffer* pequeno pode diminuir o atraso do pacote, no entanto, se ele for muito pequeno em relação à média da variação do atraso, muitos pacotes serão descartados. Por outro lado, quanto maior for o tamanho do *buffer*, a fim de minimizar o descarte de pacotes, maior será o atraso do pacote. Desta maneira, os trabalhos [42, 43, 44] propõem e analisam mecanismos adaptativos de armazenamento de voz, nos quais o tamanho do *buffer* varia de acordo com o atraso, a variação do atraso e a taxa de perda.

Neste trabalho são avaliadas as perdas, as perdas consecutivas, o atraso e a variação do atraso, em redes sem fio ad hoc. A recuperação de pacotes perdidos e o uso de técnicas de substituição, repetição, interpolação ou intercalação estão previstas como trabalhos futuros.

Capítulo 3

O padrão IEEE 802.11

O IEEE 802.11 é um padrão para redes locais sem fio que define tanto a camada física quanto a subcamada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC) da camada enlace. Este capítulo descreve as principais características da camada física e os métodos de acesso ao meio do IEEE 802.11.

3.1 Modos de operação

O padrão IEEE 802.11 [45], também conhecido como Ethernet sem fio ou WiFi (*Wireless Fidelity*), é definido tanto para redes com infra-estrutura como para redes ad hoc. No primeiro caso (Figura 3.1), as estações se comunicam apenas com um ponto de acesso, que pode ser interligado a outros pontos de acesso através de uma rede cabeada. Além disso, esta rede cabeada pode estar conectada à Internet.

No modo ad hoc as estações se comunicam diretamente umas com as outras (Figura 3.2), não existindo a entidade centralizadora do ponto de acesso. A partir deste conceito pode-se dividir as redes ad hoc em redes de comunicação direta e redes de múltiplos saltos. Na comunicação direta, as estações se comunicam apenas com aquelas que estiverem dentro dos seus raios de alcance. Desta forma, as estações A, B e C não se comunicam com as estações D, E e F, formando duas redes isoladas como mostra a Figura 3.2. Nas redes de múltiplos saltos todas as estações possuem também a propriedade

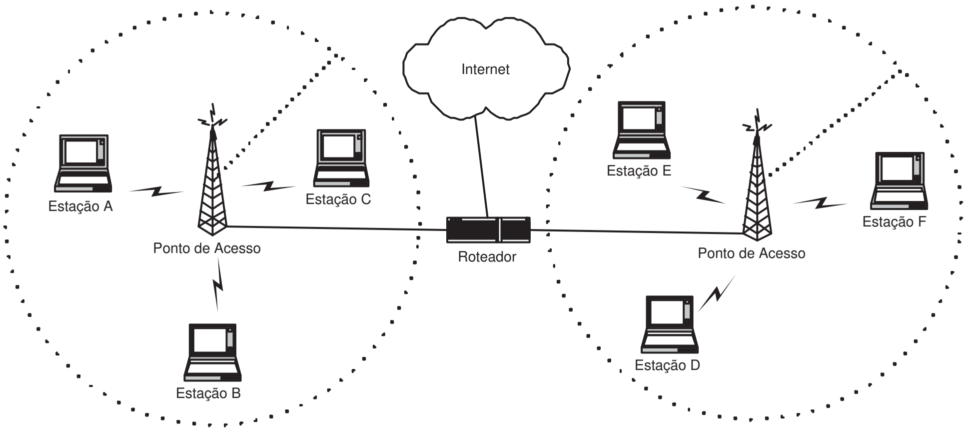


Figura 3.1: O IEEE 802.11 no modo infra-estruturado.

de rotear/encaminhar mensagens. Assim, estações que estejam mutuamente fora de alcance podem se comunicar se as mensagens puderem ser encaminhadas através de outras estações. Na Figura 3.2 as estações A, B e C podem se comunicar com as estações D, E e F através da estação G.

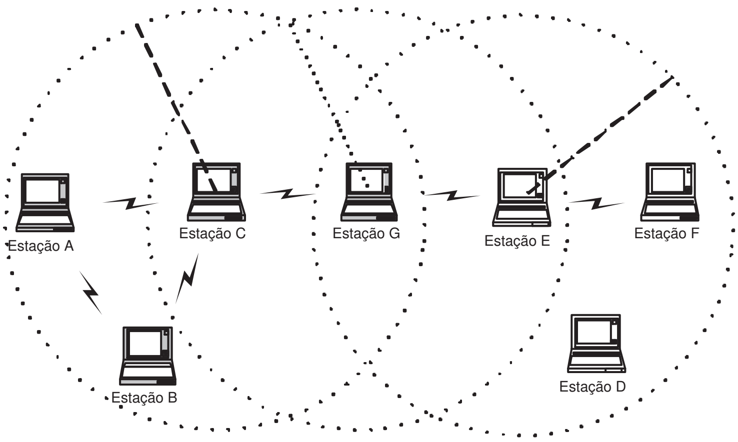


Figura 3.2: O IEEE 802.11 no modo ad hoc.

3.2 A camada física

Na camada física são definidas três técnicas de transmissão: o espalhamento de espectro por salto de freqüência (*Frequency Hopping Spread Spectrum* - FHSS), o espalhamento de espectro por seqüência direta (*Direct Sequence Spread Spectrum* - DSSS) e o infravermelho. A técnica de espalhamento de espectro (*Spread Spectrum*) consiste em espalhar o sinal em uma largura de banda superior àquela exigida pelo sinal original, procurando simular um ruído branco. O objetivo é minimizar o efeito da interferência em freqüências específicas e a interferência causada por múltiplos caminhos. A Figura 3.3 apresenta o espectro do sinal antes e depois do espalhamento na freqüência.

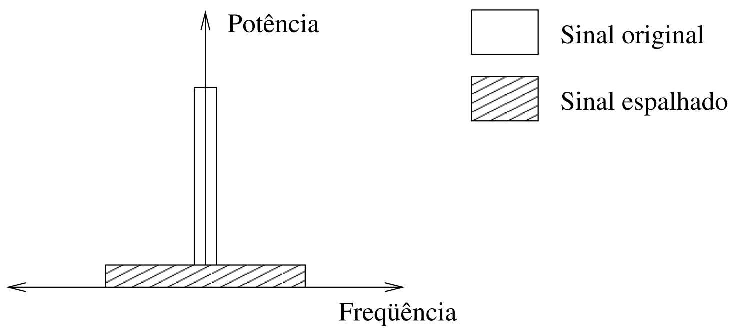


Figura 3.3: A técnica de espalhamento de espectro.

3.2.1 A técnica de espalhamento de espectro por salto de freqüência

A técnica de espalhamento de espectro por salto de freqüência (FHSS) utiliza o salto de freqüência para implementar o espalhamento. O sinal, ao invés de ser enviado em uma única portadora, é enviado utilizando-se um conjunto de portadoras. A seqüência de portadoras utilizada na transmissão deve ser conhecida pelo receptor. No padrão 802.11 são utilizadas 79 portadoras na freqüência de 2,4 GHz a 2,48 GHz (padronização norte americana). Cada canal ocupa uma banda de 1 MHz. A k-ésima seqüência de saltos pode ser obtida a partir da seguinte fórmula:

$$f_c = 2402MHz + (b[i] + k)mod(79), \tag{3.1}$$

onde 2402 MHz é a freqüência básica e $b[i]$ é uma variável aleatória uniformemente distribuída no intervalo de 0 a 78. Para cada salto i é obtido um valor diferente de $b[i]$. As taxas de transmissão disponíveis são de 1 Mbps, com modulação 2-GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*) e de 2 Mpbs com modulação 4-GFSK. Como a taxa de 1 Mbps é uma implementação obrigatória, o cabeçalho de cada quadro dever ser transmitido a 1 Mbps, a fim de permitir que todas as estações sejam capazes de compreendê-lo.

A Figura 3.4 ilustra o formato do quadro utilizado com a técnica FHSS. O quadro contém os seguintes campos:

80	16	12	4	16	variável	bits
sincronização	SFD	tamanho	sinal	HEC	dados	

Figura 3.4: O formato do quadro da camada física com salto de freqüência.

- sincronização - Os primeiros 80 bits são utilizados para a sincronização, o ajuste de ganho e a detecção de energia;
- delimitador de início de quadro (*Start Frame Delimiter* - SFD) - É utilizado para a sincronização de início do quadro. A seqüência de bits padrão é 1111001110010000;
- tamanho da PDU (tamanho) - Este campo armazena o tamanho do campo de dados em número de octetos;
- campo de sinalização (sinal) - Este campo é utilizado para indicar a taxa de transmissão, que pode ser de 1 Mbps ou 2 Mbps;
- controle de erro do cabeçalho (*Header Error Control* - HEC) - Os campos “sinal” e “tamanho” são protegidos por este campo.

O principal problema apresentado por esta técnica é a limitação da potência de transmissão. Por este motivo, o raio de alcance de transmissão obtido utilizando FHSS é inferior ao raio obtido a partir da DSSS. Além disso, a implementação do FHSS é custosa e complexa. Por estas razões esta técnica foi abandonada nas versões 802.11a [46] e 802.11b [47].

3.2.2 A técnica de espalhamento de espectro por seqüência direta

A outra técnica prevista no padrão IEEE 802.11 é o espalhamento de espectro por seqüência direta (*Direct Sequence Spread Spectrum* - DSSS). Esta técnica consiste na multiplicação do sinal binário original por uma seqüência binária pseudo-aleatória com taxa de transmissão bem maior que a taxa de transmissão do sinal original. Nesta técnica o sinal original é separado por código e não pela freqüência, como é o caso da técnica FHSS. Para que isto ocorra, os códigos da seqüência pseudo-aleatória devem ser ortogonais entre si. O 802.11 utiliza um código de 11 bits, correspondendo a uma taxa de transmissão 11 vezes maior que a taxa do sinal original, conhecido como código de Barker (Figura 3.5).

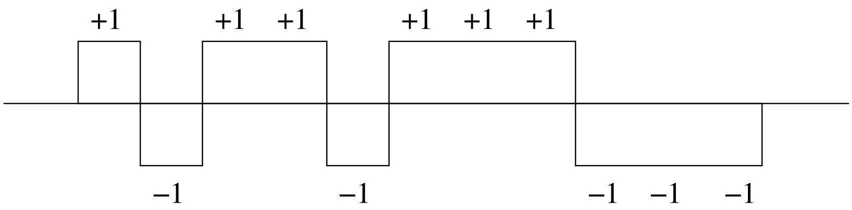


Figura 3.5: O código de Barker.

O DSSS utiliza a mesma faixa de freqüência de 2,4 GHz. As taxas de transmissão disponíveis no DSSS são de 1 Mbps com modulação DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*) e de 2 Mbps com modulação DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*).

O padrão 802.11 normalizou uma extensão conhecida como IEEE 802.11b. Nesta norma é definida uma extensão ao DSSS, denominada (*High Rate DSSS - HR/DSSS*), que permite a transmissão de dados em taxas de 5,5 Mbps e 11 Mbps. Para isto, é utilizada a técnica de modulação *8-chip Complementary Code Keying* - CCK. Também é prevista a existência de mecanismos para a mudança dinâmica de taxa de transmissão, no entanto, o cabeçalho de cada quadro deve ser transmitido a 1 Mbps para manter a compatibilidade de todos os produtos. Assim, as taxas de transmissão foram categorizadas como taxas básicas (1 e 2 Mbps) e taxas de dados (5,5 e 11 Mbps). Um detalhe importante a ser ressaltado é o fato de que todos os quadros de controle (RTS, CTS e ACK entre outros, que são explicados mais adiante), bem como os quadros transmitidos em difusão (*broadcast*) ou difusão seletiva (*multicast*) devem ser enviados em uma das taxas básicas da estação base, no caso de redes infra-estruturadas, ou a 1 Mbps no caso de redes ad hoc.

A Figura 3.6 ilustra o formato do quadro utilizado com a técnica DSSS. O quadro contém os seguintes campos:

128	16	8	8	16	16	variável	bits
sincronização	SFD	sinal	serviço	tamanho	HEC	dados	

Figura 3.6: O formato do quadro da camada física com seqüência direta.

- sincronização - os primeiros 128 bits são utilizados para a sincronização, o ajuste de ganho e a detecção de energia;
- delimitador de início de quadro (SFD) - É utilizado para a sincronização de início do quadro. A seqüência de bits padrão é 1111001110010000;
- sinal - este campo é utilizado para indicar a taxa de transmissão;
- serviço - campo reservado para uso futuro;
- tamanho - armazena o tamanho do campo de dados;
- controle de erro do cabeçalho (HEC) - os campos "sinal", "serviço" e "tamanho" são protegidos por este campo.

O 802.11b define também um preâmbulo menor (*Short Preamble*) opcional, a fim de minimizar a sobrecarga do cabeçalho, desta maneira, aumentando a vazão da rede. Este novo preâmbulo contém apenas 72 bits e deve ser enviado a 1 Mbps, enquanto que o restante do cabeçalho é transmitido a 2 Mbps. O grande problema é a incompatibilidade com os receptores que não são capazes de receber este preâmbulo menor.

Os quadros de resposta a quadros de controle, como por exemplo o CTS e o ACK (Seção 3.3), podem ser transmitidos na taxa básica máxima da estação base, em redes com infra-estrutura, ou da estação que enviou o quadro responsável por disparar a resposta, no caso de redes ad hoc.

A faixa de freqüências de 2,4 GHz recebe interferências de outros equipamentos que usam esta mesma faixa de freqüências. Além disto, o padrão sem fio busca uma maior taxa de transmissão que permita um maior número de usuários e a possibilidade de transmitir vídeo. Desta forma, foi definido o padrão IEEE 802.11a, que utiliza a faixa de freqüências de 5 GHz e a técnica de multiplexação ortogonal por divisão de freqüências (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - OFDM). Neste padrão a taxa de transmissão pode chegar a 54 Mbps, com modulação 64-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). No entanto este padrão é incompatível com os anteriores, tornando-o pouco utilizado.

Em julho de 2003, foi definido um novo padrão, o IEEE 802.11g, que também possui uma taxa de transmissão de 54 Mbps, mas usa a faixa de freqüências de 2,4 GHz. Este padrão está sendo recebido com muita expectativa pois permite altas taxas de transmissão mantendo a compatibilidade com o padrão IEEE 802.11b.

3.3 A subcamada de controle de acesso ao meio

A subcamada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC) possui dois mecanismos de acesso: a função de coordenação centralizada (*Point Coordination Function* - PCF) e a função de coordenação distribuída (*Distributed Coordination Function* - DCF). O PCF é um mecanismo centralizado onde o ponto de acesso controla o acesso ao meio enquanto o DCF é um mecanismo distribuído, no qual cada elemento da rede deve escutar o meio e transmitir apenas quando o meio estiver vazio.

3.3.1 O mecanismo centralizado

Neste mecanismo centralizado (Figura 3.7), denominado função de coordenação centralizada (*Point Coordination Function* - PCF), foi definido um intervalo de tempo, chamado de super-quadro (*superframe*), que divide-se em dois períodos. No período livre de contenção (*Contention Free Period* - CFP) o ponto de acesso faz enquetes (*polling*) e cada estação deve transmitir apenas quando receber uma enquete do ponto de acesso. Após o término do período livre de contenção (CFP) começa o período de contenção (*Conten-*

tion Period - CP), no qual é utilizado o mecanismo distribuído (*Distributed Coordination Function* - DCF) para o acesso ao meio, que será descrito na seção seguinte.

O ponto de acesso deve enviar um sinal (*beacon*) indicando o início de cada super-quadro. Após ouvir este sinal, apenas as estações que receberem enquetes poderão transmitir. As estações que desejam transmitir tráfego de tempo-real devem solicitar ao ponto de acesso para serem incluídas na lista das estações que participarão da enquete. Isto deve ser feito durante o período de contenção.

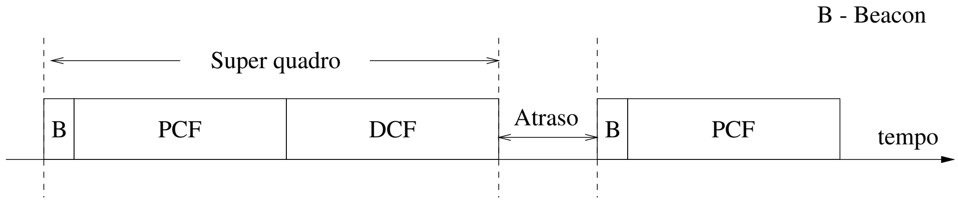


Figura 3.7: O esquema do mecanismo centralizado.

Modo de economia de energia

No modo de economia de energia (PSM - *Power Saving Mode*), as estações podem permanecer em dois modos de operação. No modo de economia de energia (Figura 3.8), o ponto de acesso armazena todos os quadros enviados para a estação e envia *broadcasts* periódicos informando se existem quadros a receber ou não. A estação, por sua vez, deve ouvir essas mensagens de *broadcast* e, quando tiver alguma informação a receber, fazer um pedido para receber os quadros (*polling*). As estações são identificadas através de um mapa de indicação de tráfego (TIM - *Traffic Indication Map*), que contém informações relacionadas ao tráfego das estações que estão no modo de economia de energia. O TIM é enviado periodicamente pelo ponto de acesso.

Liu e Wu [48] propõem uma adaptação ao mecanismo de economia de energia, na qual os usuários que estão transmitindo voz são tratados como estações que operam no modo de economia de energia. Desta maneira, cada um tem um intervalo de tempo específico para transmitir, ou seja, o mecanismo funciona como se fosse um TDM (*Time Division Multiplexing*).

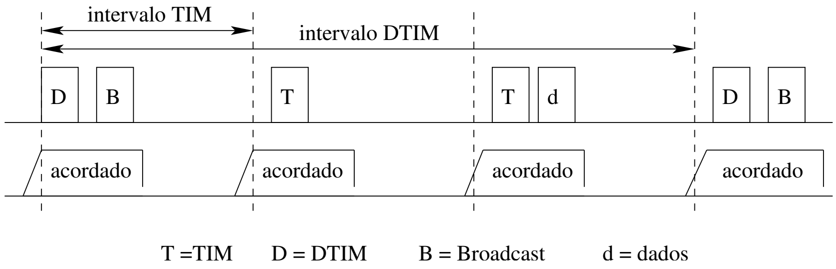


Figura 3.8: O mecanismo de economia de energia.

Existem dois problemas básicos no acesso centralizado. O primeiro é a diminuição do período livre de contenção quando uma estação captura o meio perto do final do super-quadro e continua transmitindo o quadro além do tempo previsto para o super quadro. A limitação da duração máxima do CFP pode provocar um adiamento de uma transmissão para o próximo CFP, em casos onde o número de fontes de fluxos de tempo-real é superior a capacidade de transmissão em um CFP. Ambos os problemas acrescentam atraso indesejado na transmissão. Além disso, o PCF acrescenta uma grande sobrecarga devido ao *polling*, sobretudo, quando este não é respondido, ou seja, a estação não possui pacotes para transmitir. Por estes motivos, surgiram algumas propostas para prover qualidade de serviço utilizando o mecanismo distribuído que são abordadas na Seção 3.4.

Embora o mecanismo centralizado tenha sido especificado para permitir a transmissão de tráfego de tempo-real, ele se baseia em enquetes do ponto de acesso. Como o foco deste trabalho são as redes ad hoc, não pode existir o ponto de acesso e, conseqüentemente, o método de acesso centralizado não é adequado.

3.3.2 O mecanismo distribuído

O mecanismo distribuído, denominado função de coordenação distribuída, utiliza o protocolo CSMA/CA (*Carrier-Sense Multiple Access/Collision Avoidance*) para controlar o acesso ao meio (Figura 3.9), pois em uma rede sem fio os terminais são capazes apenas de detectar a colisão na recepção, devido à grande diferença da potência entre o sinal transmitido e o sinal recebido, ocasionada pela atenuação do ar. Assim, torna-se necessária a utilização de um reconhecimento (ACK) para informar que o quadro foi recebido corretamente. Neste mecanismo, cada terminal da rede deve escutar o meio antes de iniciar a transmissão. Caso o meio esteja vazio, o terminal aguarda um certo intervalo de tempo (*Inter-Frame Space* - IFS). Após este intervalo de tempo, se o meio ainda estiver vazio, o terminal pode começar a transmissão. O valor deste intervalo de tempo é determinado pelo tipo de quadro a ser transmitido. Os quadros ACK utilizam um intervalo de tempo chamado de SIFS (*Short Inter-Frame Space*) e têm prioridade sobre os pacotes de dados, que usam o intervalo DIFS (*Distributed Inter-Frame Space*). Além disto, para evitar colisão, um terminal deve esperar, além do tempo DIFS, um tempo aleatório (*backoff*). No caso de vários terminais tentarem transmitir ao mesmo tempo, aquele que tiver o menor tempo de *backoff* irá transmitir primeiro. Este tempo é calculado a partir de um fator que depende do número de vezes consecutivas de geração do *backoff* multiplicado por um número aleatório. O tempo de *backoff* é decrementado apenas quando o meio está vazio.

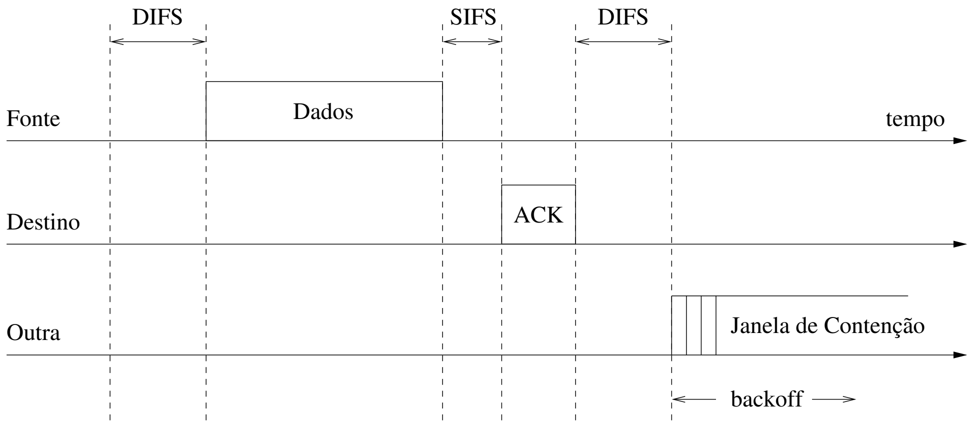


Figura 3.9: O esquema básico de acesso no mecanismo distribuído.

A cada vez que uma estação não recebe um ACK considera-se que houve uma colisão e o quadro deve ser retransmitido. Para minimizar a probabilidade de ocorrerem futuras colisões, o valor da janela de *backoff* é aumentado para a próxima potência de 2 menos 1, até um limite máximo predefinido. Este mecanismo é conhecido como *backoff* exponencial binário. As estações que obtiveram sucesso na última transmissão são favorecidas, pois possuirão tamanhos de janela de *backoff* menores que as estações que não conseguiram transmitir. Este problema é agravado quando a rede está com uma alta carga, pois a probabilidade de ocorrerem colisões é maior. Diversos trabalhos [49, 50, 51, 52, 53] estudam a questão da justiça do mecanismo DCF e propõem mudanças para impedir que estações monopolizem o meio de transmissão.

O problema de terminal escondido é um problema clássico de redes sem fio ad hoc. A Figura 3.10 ilustra um cenário onde pode ocorrer este problema. As estações A e C estão fora do raio de alcance mútuo e alcançam apenas a estação B, enquanto que B alcança A e C. Considere que A comece a transmitir para B. Em seguida, C também começa a transmitir para B, tendo em vista que C não é capaz de perceber que B já está recebendo informações de A. Neste caso, haverá colisão em B e apenas esta estação perceberá. As estações A e C só perceberam o problema após a expiração do tempo de espera pelo reconhecimento (ACK) de B.

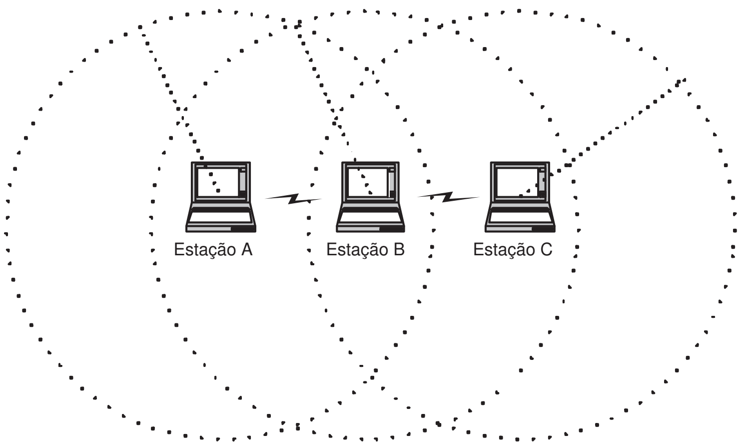


Figura 3.10: O problema do terminal escondido.

Com o objetivo de evitar o problema do terminal escondido foram definidos os quadros RTS (*Request to Send*) e CTS (*Clear to Send*), que armazenam informações referentes à duração das transmissões. Desta maneira, as estações devem enviar, antes de cada transmissão, um quadro RTS e esperar pela resposta da estação destino, que por sua vez deve enviar um quadro CTS, sinalizando que o nó fonte pode iniciar a transmissão, como mostrado na Figura 3.11. Todas as estações que escutarem o RTS ou CTS devem atualizar o valor do seu vetor de alocação de rede (NAV - *Network Allocation Vector*), que contém o tempo em que o canal estará ocupado.

Por um lado, este mecanismo aumenta a eficiência da rede por minimizar o número de

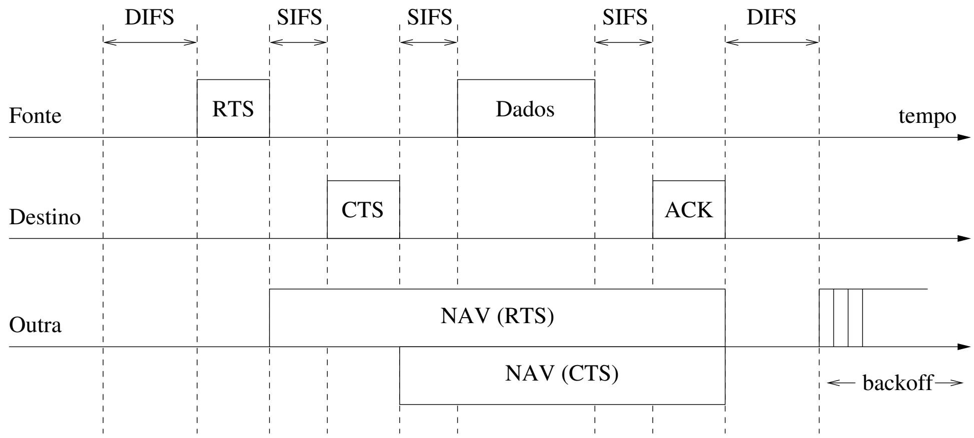


Figura 3.11: O mecanismo distribuído com RTS e CTS.

colisões e por garantir que as colisões ocorram apenas entre quadros de RTS, que são menores e não transportam dados. Por outro lado, o mecanismo acrescenta uma sobrecarga ao DCF, diminuindo a sua eficiência, além de reservar o meio desnecessariamente em algumas situações. Por isso, é previsto pela norma do IEEE 802.11 um tamanho mínimo de quadro, a partir do qual este mecanismo deve ser utilizado. Alguns trabalhos analisaram o efeito do RTS na vazão da rede. Crow *et al.* [54] concluíram que o valor ideal para o tamanho mínimo de pacote é em torno de 250 octetos, ou seja, todos os quadros menores que este valor não precisam ser precedidos de quadros RTS e CTS. Weinmuller *et al.* [55, 56] concluem que o valor do limiar deve mudar dinamicamente de acordo com a carga da rede.

Alguns trabalhos analisam matematicamente a capacidade de transmissão do padrão IEEE 802.11. Chua e Tay [57] desenvolveram um modelo matemático para analisar a probabilidade de colisão, a vazão máxima da rede e o limite de estações em cada célula. Morris *et al.* [58] investigaram analiticamente a capacidade de transmissão de redes ad hoc baseadas no 802.11. A análise foi realizada em relação ao tamanho de pacote e ao número de estações transmitindo. Qiao *et al.* [59] avaliaram analiticamente o *goodput* de redes 802.11a e propuseram um mecanismo de adaptação da taxa de transmissão com o objetivo de aumentar o *goodput* da rede. Gregori *et al.* [60] propuseram e avaliaram o desempenho de um mecanismo de *backoff* adaptativo, no qual o tamanho da janela de contenção do *backoff* varia de acordo com a carga da rede. Este novo mecanismo se mostrou mais eficiente que o mecanismo proposto pela norma.

3.4 Qualidade de serviço no IEEE 802.11

Os trabalhos relacionados à provisão de qualidade de serviço em redes baseadas no padrão IEEE 802.11 estão divididos em duas categorias [61]. A primeira delas engloba propostas [48, 62] referentes ao fornecimento de QoS através do mecanismo centralizado e associadas às redes sem fio com infra-estrutura. Na outra categoria, os trabalhos [63, 11, 12] visam prover QoS usando o mecanismo de acesso distribuído (DCF) e podem abranger tanto as redes sem fio com infra-estrutura como as redes ad hoc. Alguns trabalhos analisam mecanismos de provisão de QoS em redes 802.11 no modo ad hoc [9, 10, 64]. Lindgren *et al.* [64] compararam técnicas de provisão de diferenciação de serviço em redes infra-estruturadas, utilizando tanto o PCF quanto o DCF.

Em redes ad hoc baseadas no padrão IEEE 802.11, o único mecanismo de acesso ao meio possível de ser utilizado é o distribuído, já que o PCF exige a presença de uma infra-estrutura. Existem três técnicas para oferecer diferenciação de serviço em redes ad hoc baseadas no IEEE 802.11 [65]. Estas técnicas consistem, basicamente, na variação de três parâmetros do mecanismo DCF para prover qualidade de serviço estatística ou determinística em redes ad hoc.

A primeira técnica consiste em alterar o valor do atraso aleatório (*backoff*). Esta técnica se baseia na variação da função que gera o *backoff*, alterando-se o fator multiplicativo ou o valor da janela do *backoff*, de maneira que cada terminal possa ter uma função diferente, de acordo com a qualidade de serviço requerida. As estações com maior prioridade teriam um fator multiplicativo menor, ou uma janela de tempo(*Contention Window* - CW) menor, que as estações com menor prioridade, proporcionando um menor tempo de espera no acesso ao meio. A fórmula da função que gera o *backoff* pode ser expressa da seguinte maneira:

$$backoff = random(CW) \times st, \tag{3.2}$$

onde st é o tempo de um *slot* e

$$CW = ((CW_{min} + 1) * 2^{i-1}) - 1, \tag{3.3}$$

onde i representa o número de tentativas de transmissão.

A segunda técnica consiste na mudança do valor do DIFS, que pode ser variado de acordo com a prioridade de cada estação, desta maneira, as estações com maior prioridade de acesso ao meio teriam um DIFS menor. Esta técnica também possibilita um menor tempo de espera no acesso ao meio.

A última técnica baseia-se na modificação do tamanho máximo do quadro a ser transmitido. Neste caso, as estações com maior prioridade poderiam transmitir quadros maiores que as demais estações. Esta técnica garante a diferenciação da qualidade de serviço ao permitir a transmissão de uma maior quantidade de informação a cada quadro, ao invés de fornecer prioridade no acesso ao meio, como as duas anteriores. Por este motivo, esta técnica não é adequada para transmissão de voz, pois o aumento do tamanho do quadro implica um aumento no atraso.

Dentre as técnicas apresentadas, foi escolhida para ser avaliada, através de simulações, a técnica de variação do tamanho da janela de contenção (CW), por minimizar a probabilidade de ocorrência de colisões devido à escolha de tempos iguais de *backoff* por duas ou mais estações. A avaliação do efeito desta técnica na provisão de QoS, assim como a análise da capacidade de transmissão de voz de redes ad hoc baseadas no padrão IEEE 802.11, foram realizadas a partir dos resultados de simulações.

Capítulo 4

Simulações

NESTE capítulo, são apresentadas as principais características da modelagem bem como detalhes referentes às simulações com os seus respectivos resultados. O objetivo das simulações é permitir uma análise da capacidade de transmissão de voz em redes ad hoc, revelando aspectos específicos do comportamento deste tipo de rede. As simulações foram realizadas no simulador de redes ns-2 e foram divididas em duas partes: uma referente às redes ad hoc de comunicação direta e a outra às redes ad hoc de múltiplos saltos.

Nas redes de comunicação direta foram avaliados os efeitos da carga da rede e da provisão de QoS. O mecanismo de provisão de QoS avaliado é uma técnica de diferenciação de serviço na subcamada de controle de acesso ao meio (MAC) do padrão IEEE 802.11, que consiste na mudança da função de geração do *backoff* do mecanismo distribuído (DCF) de acesso ao meio. No cenário de múltiplos saltos, foram avaliados os efeitos da variação da carga da rede, da mobilidade e da densidade de nós na capacidade de transmissão de voz da rede. Os parâmetros levados em consideração nas análises foram o atraso, a variação do atraso, a taxa de perda e as perdas consecutivas. Além disso, foram também identificadas as causas que levaram a perda de pacotes.

4.1 Ambiente de simulação

O ambiente de simulação utilizado foi o ns-2 (*Network Simulator* 2) [66], que implementa um simulador dirigido a eventos discretos para a simulação de serviços e de protocolos de rede. Esse simulador encontra-se em desenvolvimento dentro do projeto *Virtual InterNet Testbed* (VINT), uma colaboração entre a Universidade da Califórnia em Berkeley, o *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL), o *Information Sciences Institute* (ISI) da Universidade da Califórnia do Sul (USC) e o laboratório Xerox PARC. O ns-2 utiliza as linguagens C++ e OTcl (*Object Tool Command Language*), sendo o seu núcleo implementado em C++, para permitir um melhor desempenho. As simulações executadas são configuradas através de *scripts* OTcl que descrevem a topologia, o cenário de mobilidade, os protocolos e as aplicações a serem simuladas.

O pacote do ns-2 disponibiliza um gerador de cenários (`setdest`), que utiliza o modelo de mobilidade *random way point*. Neste modelo, cada nó i deve escolher aleatoriamente um destino d_i, dentro da área de simulação, para o qual ele deve se dirigir a uma velocidade v_i, uniformemente distribuída dentro do intervalo de zero a v_{max}. Após a chegada ao destino, o nó deve aguardar por um determinado intervalo de tempo, denominado tempo de pausa, previamente definido. Após o tempo de pausa o nó escolhe um novo destino e uma nova velocidade, com a qual ele se movimentará, e assim por diante.

O ns-2 disponibiliza módulos para simular as camadas física e enlace do padrão IEEE 802.11. O modelo da camada física utilizado leva em consideração a interferência devido à reflexão do sinal (*TwoRayGround*). A taxa de transmissão de dados é de 11 Mbps. Na subcamada de controle de acesso ao meio (MAC) foi utilizado um módulo que implementa o mecanismo de controle de acesso distribuído (DCF) segundo as especificações da norma. O tamanho da fila de interface (IFQ - *Interface Queue*) da subcamada MAC com a subcamada de enlace lógico (*Logic Link Control* - LLC) é de 50 pacotes. Este parâmetro é importante, como será visto mais adiante, porque o descarte de pacotes pela subcamada MAC, devido ao transbordo da fila IFQ, é um dos motivos de perdas de pacotes que pode influir significativamente no resultado das simulações.

O ns-2 também disponibiliza implementações de alguns dos principais protocolos de roteamento para redes ad hoc propostos na literatura. Dentre os protocolos disponíveis, escolheu-se utilizar o DSR (*Dynamic Source Routing*) [67], por ser um dos protocolos mais estudados da área, e por conseqüência possuir uma boa documentação. Além disso, o DSR possui uma implementação para o ns-2 mais estável e confiável, por já ter sido testada em diversos trabalhos.

4.2 O protocolo de roteamento DSR

O protocolo *Dynamic Source Routing* (DSR) foi desenvolvido pelo Departamento de Ciência da Computação da *Rice University*, por meio do projeto MONARCH (*MObile Networking ARCHitectures*) [68]. Além disso, foram desenvolvidas extensões ao ns-2 que permitiram a simulação do protocolo DSR neste simulador. O protocolo DSR foi criado para ser usado em um ambiente de rede sem fio com nós móveis. Assim, as rotas são dinâmicas e mudam com a movimentação dos nós. Portanto, o protocolo DSR é um protocolo de roteamento sob demanda de maneira a minimizar a sobrecarga de roteamento, permitindo que rotas sejam descobertas com reações rápidas a possíveis mudanças na topologia da rede.

O DSR [69, 67] usa o roteamento por fonte, isto é, a fonte descobre e armazena, em cada pacote que envia, o caminho completo e ordenado que o pacote deve percorrer até chegar ao destino. Assim, não há necessidade de tabelas de roteamento com informações atualizadas nos nós intermediários através dos quais o pacote deve passar em seu caminho até o destino, além de evitar a formação de *loops*. Isto significa que os nós da rede não precisam armazenar rotas para todos os outros nós, mas apenas as rotas aprendidas sob demanda. Por isso, não há a necessidade de troca de mensagens periódicas para manter tabelas de roteamento atualizadas.

Por outro lado, quando um nó fonte deseja enviar pacotes a um nó destino cuja rota ele desconheça, é necessário iniciar o processo de descoberta de rotas. Este processo baseia-se na inundação da rede com mensagens RREQ (*Route REQuest*). Assim, cada nó intermediário deve, caso não conheça uma rota para o destino, reenviar o RREQ, em difusão. Os nós intermediários que conhecem uma rota válida para o destino, assim como o próprio destino, devem responder para a fonte com uma mensagem RREP (*Route Reply*). Cada rota aprendida possui um tempo de vida associado e quando este tempo expira a rota se torna inválida e deve ser descartada. Os nós também podem aprender rotas ouvindo o meio em modo promíscuo, permitindo assim a descoberta de rotas sem sobrecarga de roteamento. Se um determinado nó percebe a queda de um enlace em uso, um RERR (*Route Error*) é enviado para a fonte pelo caminho reverso, como parte do procedimento de manutenção de rotas. No DSR permite-se que um nó guarde, para um mesmo destino, várias possíveis rotas aprendidas por qualquer método de aprendizado. Desta forma, nesta situação pode-se evitar uma nova inundação na rede caso a fonte possua um caminho alternativo em sua tabela. Caso contrário, novo procedimento de descoberta de rota é efetuado. Portanto, no DSR a sobrecarga de roteamento pode até chegar a zero, quando nenhum nó deseja transmitir pacotes, ou em cenários onde todas as rotas já foram descobertas e não ocorram quebras de enlace. Pode-se citar como exemplo os cenários de comunicação direta e os cenários de múltiplos saltos com nós fixos. Por outro lado, em cenários de alta mobilidade, as mudanças de topologia da rede podem causar quebras de enlace, que aumentam consideravelmente a sobrecarga de roteamento e diminuem a taxa de entrega de pacotes [69].

4.3 Modelagem

Com o objetivo de simular conversações telefônicas, as fontes de voz foram modeladas segundo uma cadeia de Markov de dois estados (*on - off*), representando momentos de atividade, nos quais o tráfego de voz gerado é modelado por uma fonte com taxa binária constante (*Constant Bit Rate* - CBR), e momentos de silêncio, nos quais nenhum tráfego de voz é gerado. O tempo de permanência em cada estado é representado por uma variável aleatória com distribuição exponencial de média 1,2 s para o estado ativo e 1,8 s para o estado de silêncio [15, 70]. A taxa de transmissão no período ativo é de 64 kbps, simulando uma voz PCM (*Pulse Code Modulation*), com pacotes de 160 octetos [18].

A técnica de diferenciação de serviços é mais efetiva na condição de rede congestionada ou de alto tráfego. Nestes casos, as filas de pacotes a transmitir das estações enchem e o mecanismo de prioridade da diferenciação de serviços permite resultados melhores para os tráfegos privilegiados. Para simular o congestionamento da rede foi introduzido um tráfego de fundo modelado a partir de 5 fontes CBR transmitindo pacotes (UDP) de 500 octetos a taxas de 200 kbps ou de 250 kbps, referentes a cenários com carga média e carga alta na rede, respectivamente.

As estações fonte transmitem apenas um tipo de tráfego, ou seja, ou transmitem fluxos de voz ou tráfego de fundo. Além disso, uma estação transmite e recebe apenas um fluxo, seja ele de voz ou de tráfego de fundo. Estas medidas foram tomadas para evitar a concentração de carga em pontos específicos da rede e evitar a sobrecarga de processamento e de roteamento nas estações.

O tempo de simulação influi no tamanho do intervalo de confiança. Para se obter um intervalo adequado foi definido um tempo de simulação de 400 s. O tempo de início de transmissão de cada fonte é aleatório, uniformemente distribuído no intervalo de 1 a 11 s, impedindo assim que todas as fontes comecem a transmitir simultaneamente.

Para garantir uma interatividade de conversação aceitável, cada pacote de voz possui um tempo de vida de 250 ms. Assim, todo pacote que chega com um atraso maior que este limite é descartado e considerado como uma perda. Os tempos de codificação, de geração de pacotes e de espera na fila (*buffer*) do receptor foram desprezados. Foi definido como parâmetro de qualidade de serviço um limite máximo de 5% de perdas de pacotes em cada fluxo de voz [18]. Desta forma, para um determinado cenário, variando-se o número de estações que transmitem tráfego de voz, pôde-se chegar a um número máximo de estações transmitindo voz em uma rede ad hoc baseada no padrão IEEE 802.11.

Para todas as medidas, foram calculados intervalos de confiança de 90% relativos à média das amostras.

4.4 Resultados

Os resultados das simulações também foram separados em duas partes. Na seção seguinte, serão apresentados os resultados referentes às redes de comunicação direta e em seguida serão apresentados os resultados referentes às redes de múltiplos saltos.

4.4.1 As redes de comunicação direta

Nesta parte das simulações, foi utilizada a técnica de de diferenciação de serviços que provê diferentes tamanhos da janela de contenção da subcamada de acesso ao meio (MAC) do IEEE 802.11 a fim de dar prioridade ao tráfego de voz em relação ao tráfego de fundo.

O cenário de simulação corresponde a uma rede ad hoc de comunicação direta e, portanto, todas as estações estão mutuamente alcançáveis e todas as comunicações se efetuam em um único salto, da estação origem para estação destino. A competição pelo acesso ao meio é a grande limitação deste cenário. Procura-se obter resultados em relação à provisão de QoS sem a interferência dos problemas ocasionados pelo roteamento em redes ad hoc de múltiplos saltos. Assim, o cenário consiste em uma área de 150 m $\times$ 150 m com a presença de 35 nós fixos com raio de transmissão de 250 m. A prioridade para o tráfego de voz é obtida aumentando-se o valor da janela de contenção do tráfego menos prioritário. Nas simulações foram utilizados dois valores diferentes para as janelas de contenção do tráfego menos prioritário. Assim, a relação entre o tamanho das janelas de contenção das fontes de voz e das fontes de dados é de $1/2$, denominado de prioridade baixa, e de $1/3$, denominado de prioridade alta.

Primeiramente, foram realizadas simulações com a finalidade de verificar a influência da carga da rede no tempo de acesso ao meio. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram como o aumento do tráfego influencia a capacidade de transmissão da rede devido ao tempo de acesso ao meio. Deve ser ressaltado que como todos os nós estão fixos e se comunicam diretamente, os atrasos devidos à descoberta de rotas se dão apenas no início da simulação, pois para manter as rotas atualizadas os nós podem ouvir o meio em modo promíscuo. Os resultados indicam que com um aumento de 25% da carga (de 1 Mbps para 1,25 Mbps) percebe-se uma queda na capacidade da rede, comprovando que o aumento da carga da rede afeta a transmissão de voz em tempo-real.

A Figura 4.3 revela a sensibilidade da taxa de perda e da variação do atraso em relação

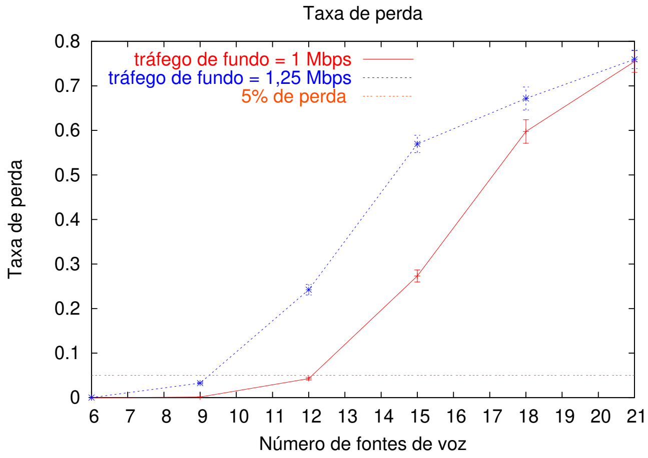


Figura 4.1: Influência da carga da rede na taxa de perda.

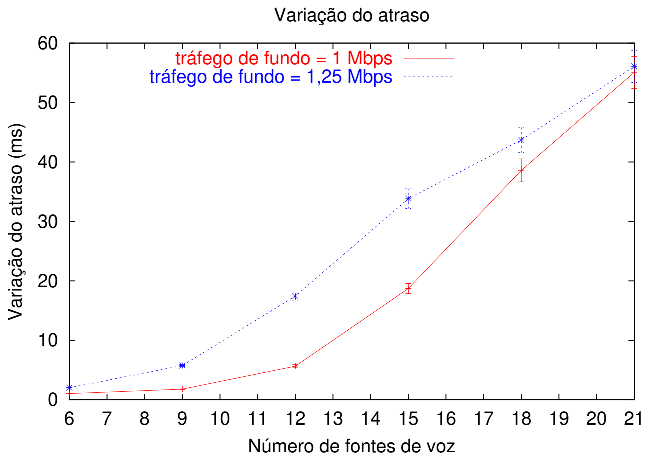


Figura 4.2: Influência da carga da rede na variação do atraso.

ao aumento da carga na rede. A curva de sensibilidade da taxa de perda é obtida através da divisão dos valores da curva referente à alta carga pela curva referente à média carga, da Figura 4.1. O mesmo procedimento foi executado para extrair a curva de sensibilidade da variação do atraso, ou seja, esta curva é o resultado da divisão entre as duas curvas da Figura 4.2. Nota-se que a taxa de perda apresenta uma sensibilidade grande na região onde o tráfego submetido à rede é menor, que corresponde à região onde o número de fontes de voz é menor. Conforme o tráfego submetido à rede aumenta, a variação na taxa de perda diminui, pois corresponde à região onde as curvas se encontram e onde a taxa de perda é muito elevada. A região onde a taxa de perda é próxima de 1 corresponde a um cenário onde a maior parte dos quadros não conseguem acesso ao meio, sendo perdidos por falta de *buffers* de transmissão, ou ainda os que são transmitidos chegam à estação receptora com atraso maior que 250 ms. A variação do atraso se mostrou menos sensível que a taxa de perda à variação da carga na região correspondente a um pequeno número de fontes de voz. O aumento do número de fontes de voz faz a curva da variação do atraso ultrapassar levemente a curva da taxa de perda e ficar perto de 1 também, como mostra a Figura 4.4 (*zoom* da Figura 4.3), pois com um alto nível de perdas são poucos os pacotes que realmente chegam ao receptor, não fazendo tanta diferença o tráfego de fundo.

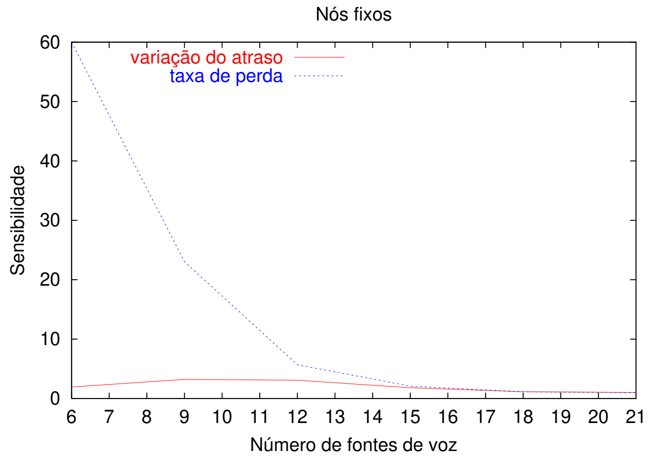


Figura 4.3: Sensibilidade ao aumento da carga da rede.

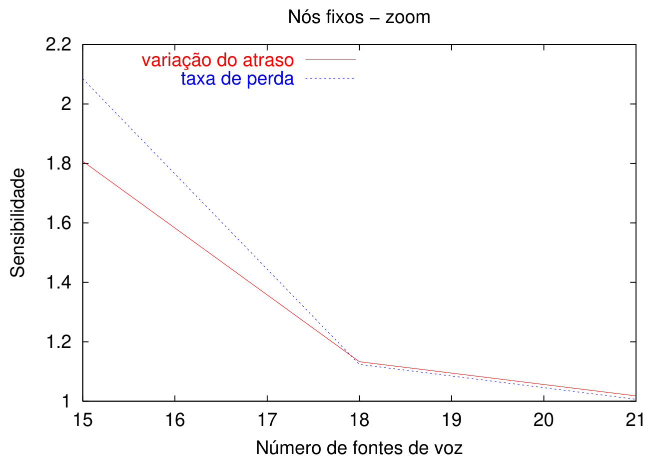


Figura 4.4: *Zoom* da sensibilidade ao aumento da carga da rede.

Utilizando-se a técnica de diferenciação de serviços a partir do uso de diferentes tamanhos da janela de *backoff* pôde-se avaliar o efeito da provisão de QoS na transmissão de voz. A todo tráfego diferente do tráfego de voz é atribuído um tamanho máximo da janela de *backoff* maior que o tamanho máximo da janela de *backoff* atribuído ao tráfego de voz. Variou-se também o nível de priorização. Quando o tráfego normal possui um tamanho da janela de contenção duas vezes maior que o tráfego de voz, a diferenciação de serviços é denominada de baixa prioridade. A diferenciação de serviços é dita de prioridade alta quando o tráfego normal possui uma janela de contenção três vezes maior que a janela do tráfego de voz. A Figura 4.5 mostra que em uma rede com média carga, a baixa prioridade, apesar de apresentar uma melhora, não proporcionou um aumento no número de fontes transmitindo voz, enquanto a prioridade mais alta obteve um aumento de uma fonte de voz, representando uma melhora de até 22,22%. Isto demonstra que a variação da janela de contenção provê uma certa diferenciação, porém não possibilita aumentar significativamente a capacidade de transmissão de voz. Constata-se também, que esta técnica proporciona um nível maior de diferenciação quando a rede é submetida a uma carga maior (Figura 4.6).

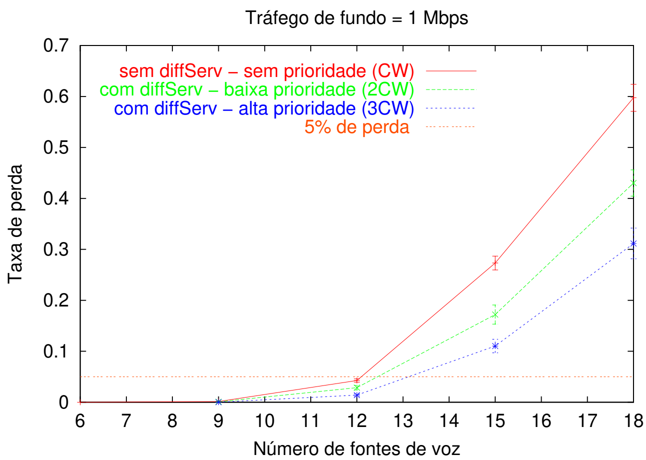


Figura 4.5: Efeito da provisão de QoS na taxa de perda com tráfego de fundo de 1 Mbps.

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram o efeito da diferenciação de serviço na variação do atraso. Os resultados mostram que esta técnica proporcionou uma diminuição do valor da variação do atraso, chegando a 50%.

A Figura 4.9(a) apresenta a função de probabilidade acumulada (*Probability Mass Function* - PMF) do número de perdas consecutivas. As curvas apresentam as perdas

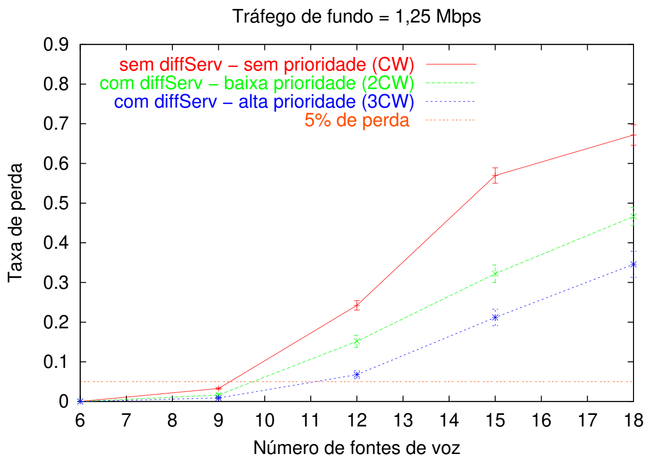


Figura 4.6: Efeito da provisão de QoS na taxa de perda com tráfego de fundo de 1,25 Mbps.

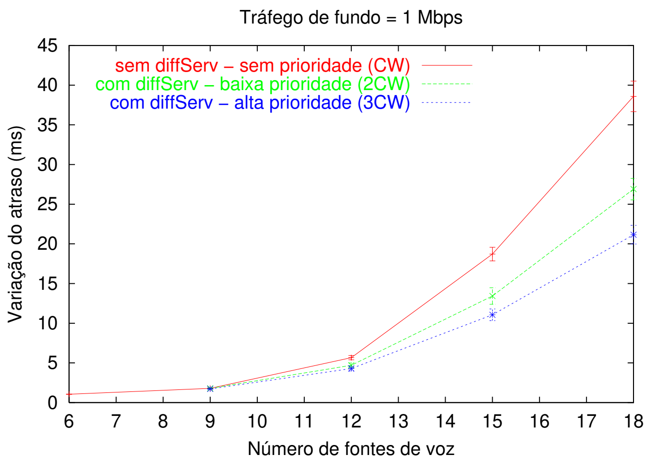


Figura 4.7: Efeito da provisão de QoS na variação do atraso com tráfego de fundo de 1 Mbps .

consecutivas referentes a doze fontes a média carga e nove fontes a alta carga, que representam os valores máximos de capacidade de transmissão de voz obtidos na Figura 4.1. Ambas as curvas apresentam comportamento similar. Como se trata de um cenário de comunicação direta e, portanto, não há quebra de enlaces nem espera por rotas, o principal responsável pelo aumento da taxa de perda acaba sendo o atraso de acesso ao meio. O atraso de acesso ao meio é influenciado pela carga da rede e pelo número de estações transmitindo. Somando-se o tráfego de voz ao tráfego de fundo, de ambos os cenários,

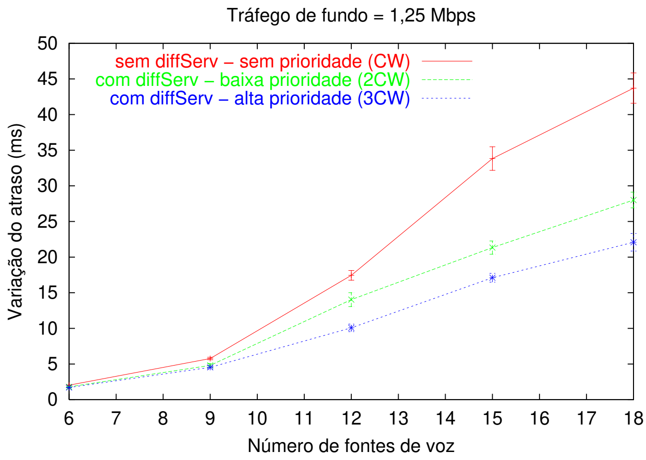
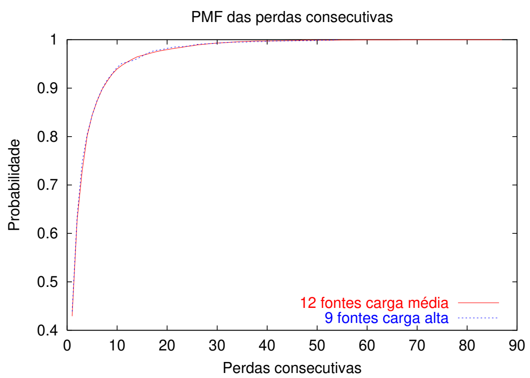
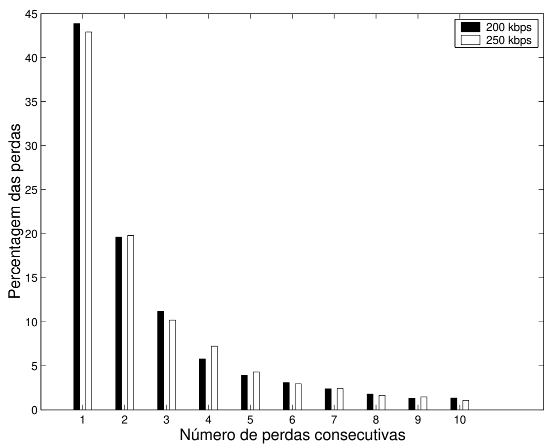


Figura 4.8: Efeito da provisão de QoS na variação do atraso com tráfego de fundo de 1,25 Mbps.

nota-se que o cenário com tráfego de fundo de 1,25 Mbps possui um tráfego total ligeiramente maior, no entanto, o cenário com tráfego de fundo de 1 Mbps permite um número maior de transmissões de voz. Desta maneira, esta diferença torna os tempos de acesso ao meio, neste dois pontos específicos (12 fontes com carga média e 9 fontes com carga alta), praticamente equivalentes. Deve-se ressaltar também, que para o cenário de comunicação direta as perdas em rajadas não passaram de 100 pacotes consecutivos perdidos.



(a) Função de probabilidade acumulada de perdas consecutivas.



(b) Probabilidade condicional.

Figura 4.9: Efeito da carga nas perdas de pacotes consecutivos.

A Figura 4.9(b) apresenta a função densidade de probabilidade (*Probability Density Function* - PDF) condicional do número de perdas consecutivas, condicionada na ocorrência da primeira perda, como mostra a fórmula:

$$P(k|1^a) = \frac{P(k) \bigcap P(1^a)}{P(1^a)}\ ,\ k \in \mathbb{N}. \tag{4.1}$$

Isto é, dada a ocorrência de uma perda (a primeira perda) qual a probabilidade de ocorrerem k perdas consecutivas. A Figura 4.9(b) confirma a similaridade do comportamento das perdas em rajadas. Além disso, percebe-se que dada a ocorrência da primeira perda a probabilidade de ocorrerem até 4 perdas consecutivas é maior que 80%, o que representa a grande maioria das perdas em rajada.

4.4.2 As redes de múltiplos saltos

Nesta seção são mostrados resultados de simulações que foram realizadas para avaliar o efeito da mobilidade na capacidade de transmissão de voz em redes ad hoc de múltiplos saltos. É importante ressaltar que o cenário de múltiplos saltos com mobilidade é bem mais adverso que o cenário de comunicação direta para se oferecer qualidade de serviço. Na comunicação direta o grande problema avaliado foi o acesso ao meio físico. No cenário de múltiplos saltos, os problemas de acesso ao meio físico se aplicam a cada salto. Além disto, existem o problema da falta de conectividade que ocorre quando não existe um caminho para se chegar da origem ao destino e o problema da descoberta dinâmica de rotas. Os cenários utilizados nas simulações possuem 40 nós, com raio de transmissão de 250 m, em uma área retangular de 800 m $\times$ 600 m. Desta forma, a densidade é de 1/12000 m^2, ou seja, um nó a cada área de 120 m $\times$ 100 m, o que proporciona uma alta conectividade. Neste cenário, o número máximo de enlaces que um pacote deve percorrer para chegar ao nó destino, pelo melhor caminho, é igual a quatro.

Foram simulados dois níveis de mobilidade: velocidade média de 1 m/s e 4 m/s, com tempo de pausa igual a zero, denominadas mobilidade baixa e média, respectivamente. Foi feita uma pequena modificação no modelo *random way point* a fim de suavizar a mudança de velocidade. Assim, a velocidade de cada nó i (v_i) está distribuída uniformemente no seguinte intervalo: $0,8v_m \leq v_i \leq 1,2v_m$, onde v_m representa a velocidade média. Para cada nível de mobilidade, simulou-se o comportamento da rede com carga zero e com baixa carga. Não foram realizadas simulações com carga alta, devido à baixa capacidade de transmissão das redes de múltiplos saltos.

Nestes cenários específicos, o tráfego de fundo foi modelado a partir de 20 fontes CBR transmitindo a uma taxa de 16 kbps a fim de minimizar a variância dos resultados. Cada resultado é uma média de diversas medidas com um intervalo de confiança de 90%. As medidas são referentes a diferentes rodadas de simulação, sendo que para cada rodada, são gerados diferentes cenários, respeitando as configurações previamente estabelecidas.

As Figuras 4.10 e 4.11 mostram a influência da mobilidade na capacidade da rede em relação ao número de fontes de voz. Conforme o número de fontes aumenta, cresce a taxa de perda. Considerando que uma conversação com qualidade não admite uma taxa de perda de pacotes de voz maior que 5%, em uma rede sem carga é possível ter 10 fontes de voz para uma baixa mobilidade e apenas 4 para uma média mobilidade (Figura 4.10). Em um cenário de rede com baixa carga com um nível de mobilidade baixo são suportadas 5 conversações de voz (Figura 4.11). Assim, pode-se perceber que o aumento da mobilidade prejudica muito a capacidade da rede, chegando a 60% do nível baixo de mobilidade para o nível médio. Os resultados referentes ao nível de mobilidade média com baixa carga na rede não são apresentados, porque nesta configuração não é possível obter fontes transmitindo voz com uma taxa de perda inferior a 5%.

As Figuras 4.12 e 4.13 permitem avaliar o impacto da mobilidade na variação do atraso, tornando mais evidente a degradação da capacidade da rede a partir do aumento da mobilidade e do aumento da carga na rede.

A Figura 4.14 apresenta a PMF das perdas consecutivas no cenário de baixa mobilidade e sem carga. A capacidade de transmissão de voz deste cenário é de 10 fontes, enquanto a taxa de perda para 7 fontes e 13 fontes é aproximadamente de 2,4% e 8,1%, respectivamente (Figura 4.10). A Figura 4.14 mostra que quanto maior o número de fontes de voz transmitindo, mais rápido a curva se aproxima do valor um. Isto significa que quando a rede está com pouca carga, as perdas em longas rajadas tendem a ser mais repre-

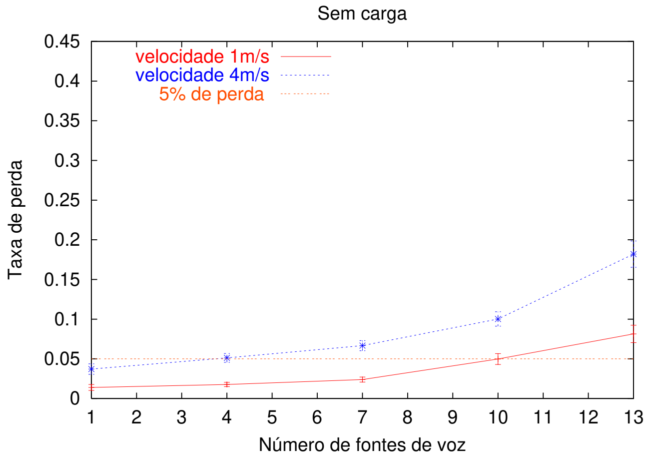


Figura 4.10: Efeito da mobilidade na taxa de perda - carga zero.

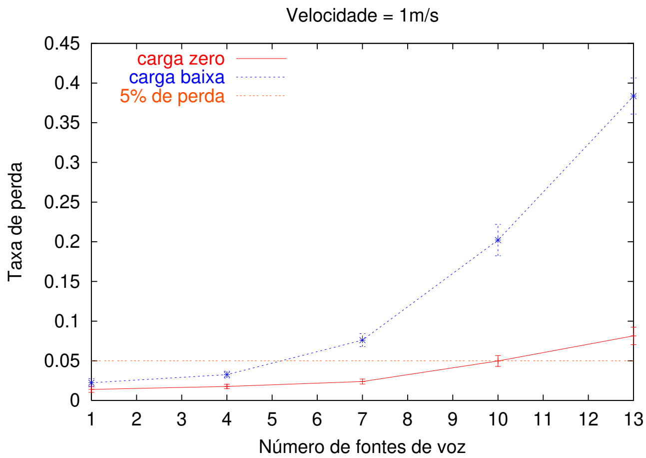


Figura 4.11: Efeito da carga da rede na taxa de perda - baixa mobilidade.

sentativas. Isto acontece porque, neste tipo de cenário, ocorrem quebras de enlace devido a mudanças na topologia, podendo causar perdas de pacotes em longas rajadas. É importante mencionar que apesar da figura mostrar apenas valores de rajadas até 250 pacotes, este valor pode chegar até 2.000 pacotes consecutivos. Este número é bem superior aos 100 pacotes do cenário de comunicação direta, evidenciando novamente o impacto das quebras de enlace.

A Figura 4.15(a) mostra a PDF condicional dada a ocorrência da primeira perda. Pode-se observar que as ocorrências de uma única perda e duas perdas consecutivas representam a maior parte das perdas em rajada.

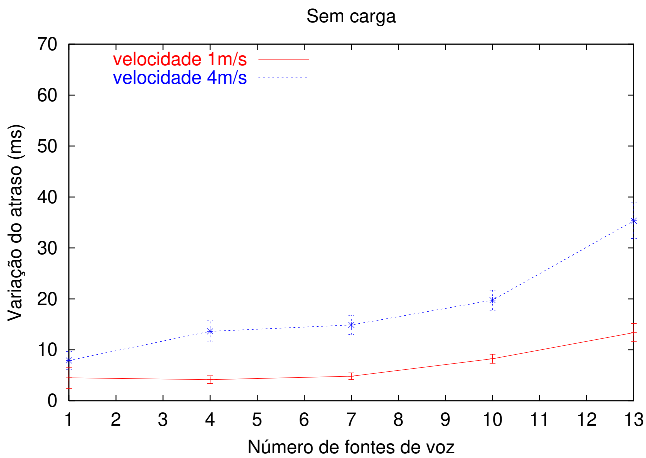


Figura 4.12: Efeito da mobilidade na variação do atraso - carga zero.

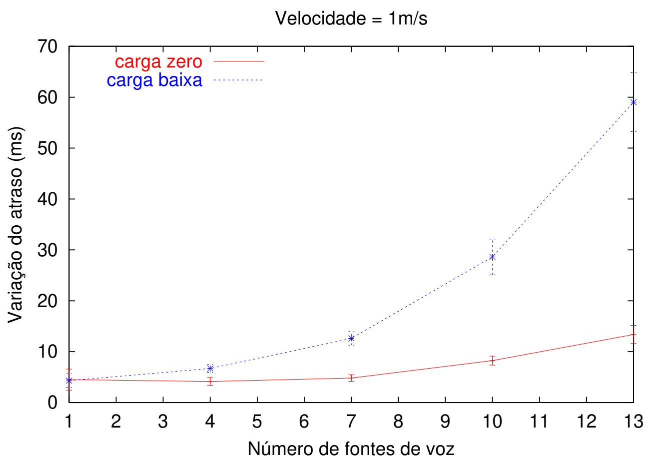


Figura 4.13: Efeito da carga da rede na variação do atraso - baixa mobilidade.

A Figura 4.15(b) torna mais clara a diferença entre as curvas da Figura 4.14. Nota-se que até 11 perdas consecutivas representam 80% das perdas em rajada no limite da capacidade deste cenário (10 fontes de voz), enquanto que para 7 fontes de voz, este valor é quase o dobro (21 pacotes), apesar de apresentar uma taxa de perda (2,4%) inferior ao cenário de dez fontes de voz (5%).

A Figura 4.16 apresenta a PMF das perdas consecutivas para cenários de baixa e média mobilidade. Ambas as curvas correspondem ao limite máximo da capacidade de transmissão de voz de cada cenário (Figura 4.10). O cenário de média mobilidade possui menos da metade da carga da rede que o cenário de baixa mobilidade e apresenta a mesma

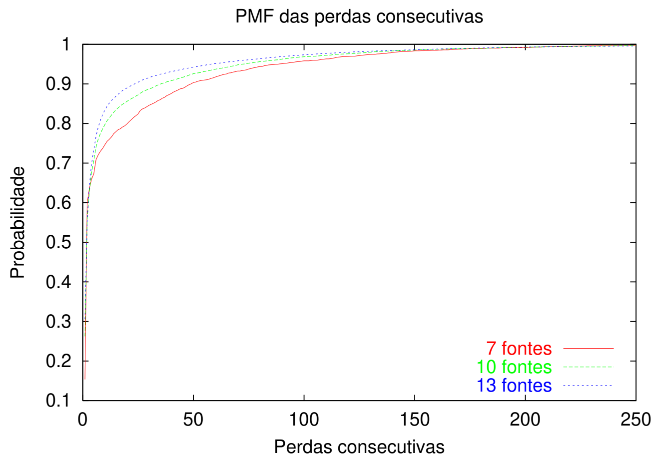


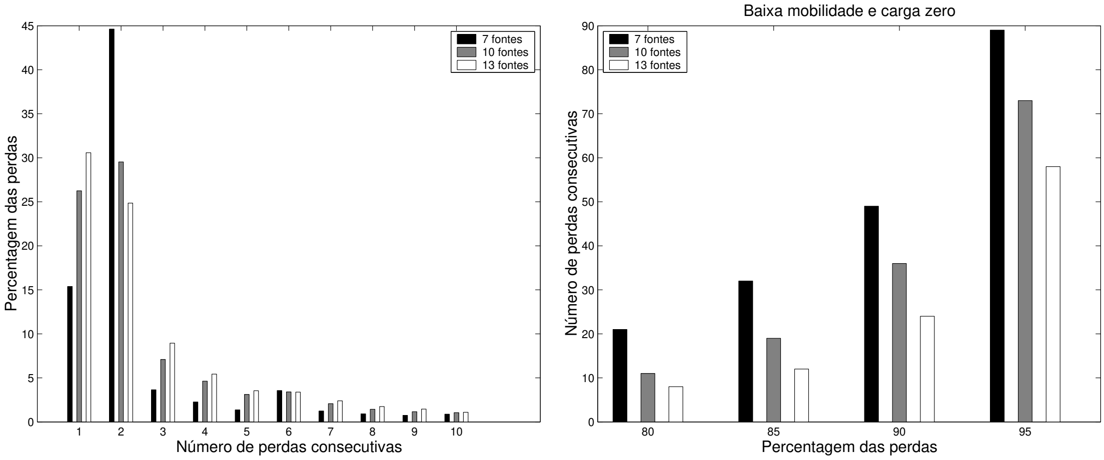
Figura 4.14: PMF das perdas consecutivas - 1 m/s e sem carga.

taxa de perda, no entanto, pode-se perceber uma pequena diferença no comportamento das perdas em rajada. Esta diferença fica ainda mais evidente na Figura 4.17(b). Isto acontece, pois o aumento da mobilidade provoca mudanças de topologia que estão diretamente relacionadas com as quebras de enlace.

A probabilidade condicional, mostrada na Figura 4.17(a), revela que, apesar das quebras de enlace provocarem perdas em grandes rajadas, dada a ocorrência da primeira perda, a probabilidade que esta rajada contenha menos de 3 pacotes é ainda bem alta.

No cenário de múltiplos saltos, ao contrário do cenário de comunicação direta, existe a possibilidade de um nó não estar alcançável e, também, de ocorrerem quebras de enlace devido a movimentação dos nós. Estas são as principais causas das longas perdas de pacotes consecutivos. No entanto, a Figura 4.17(a) revela que a probabilidade condicional, dada a ocorrência da primeira perda, de uma perda de até 3 pacotes consetutivos é ainda bem alta. Isto implica que, neste cenário, a maior probabilidade de perdas é devida ao excesso de tráfego submetido à rede e não por ausência de rota.

Para se ter uma idéia melhor das causas das perdas, os pacotes perdidos foram divididos em dois grupos: pacotes que chegam ao receptor e são descartados por apresentarem um atraso maior que 250 ms e pacotes que se perdem por outros motivos. O primeiro grupo foi denominado “tempo de vida” e o segundo de “outros”. É importante ressaltar que todos os pacotes que não chegam ao receptor se perdem por falta de *buffers* na fila da



(a) Probabilidade condicional (b) Percentagem de perdas consecutivas

Figura 4.15: Perdas consecutivas - 1 m/s e sem carga.

subcamada MAC ou por chegarem ao limite máximo do número de colisões especificado no padrão IEEE 802.11.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam a percentagem de perda referente a estes dois grupos em relação à média do total de pacotes perdidos, ao variar a mobilidade e a carga da rede.

Tabela 4.1: Causa das perdas com velocidade igual a 1 m/s.

	Causa de perdas			
Carga	Tempo (%)	Total	Outros (%)	Total
zero	69,14	3.315,3	30,86	1.270
baixa	68,43	14.434,3	31,57	8.614,1

Verifica-se que ao aumentar a carga da rede, a percentagem de pacotes descartados devido à expiração do tempo de vida manteve-se quase constante, apesar do aumento da média do total de perdas. Isto mostra que o aumento da carga provoca um aumento no tempo de acesso ao meio, causando não apenas um aumento do atraso do pacote, mas também um aumento do número de pacotes perdidos devido a transbordo das filas da subcamada MAC. Por outro lado, quando se aumentou a mobilidade a percentagem de pacotes perdidos por outros motivos aumentou. Isto ocorre porque o aumento da mobili-

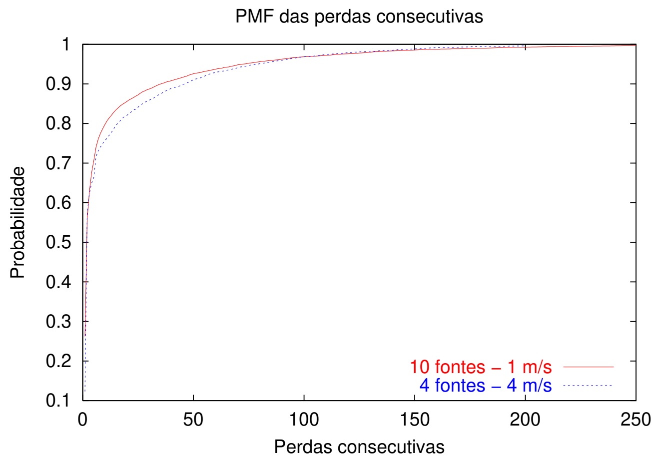


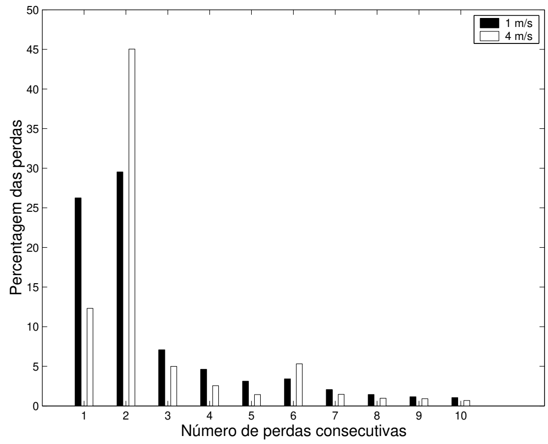
Figura 4.16: Efeito da mobilidade na PMF das perdas consecutivas - carga zero.

Tabela 4.2: Causa das perdas com carga zero.

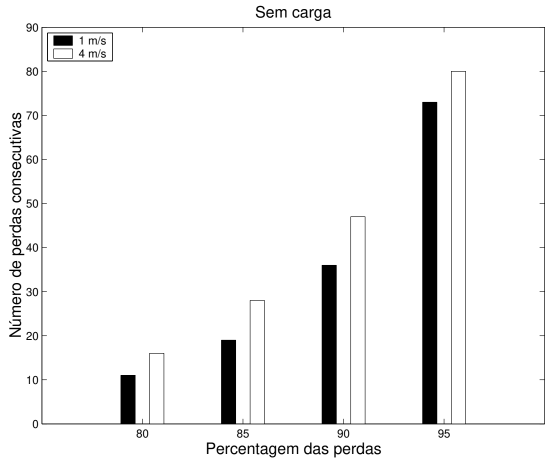
	Causa de perdas			
Velocidade	Tempo (%)	Total	Outros (%)	Total
1 m/s	69,14	3.315,3	30,86	1.270
4 m/s	45,64	3.095,4	54,36	3.638,5

dade provoca uma diminuição da taxa de entrega de pacotes do protocolo de roteamento, como mostraram Royer *et al.* [71]. Pode-se inferir destes resultados que o aumento da mobilidade (de 1 m/s para 4 m/s) aumenta significativamente a quebra de enlaces e o mecanismo de roteamento não consegue achar uma rota a tempo do pacote chegar com mesmos de 250 ms de atraso. No entanto, no cenário de baixa mobilidade, o aumento da carga da rede provoca mais perdas por falta de *buffers* na subcamada MAC, mas o mecanismo de justiça desta camada mantém as perdas por tempo de vida praticamente o mesmo. Uma outra forma de explicar este resultado é que em alta mobilidade a quebra de enlace enche as filas da subcamada MAC que "não são esvaziadas" por falta de rota enquanto a carga enche as filas da subcamada MAC que são esvaziadas lentamente pela dificuldade de acesso ao meio.

As Figuras 4.18 e 4.19 mostram a variação dos resultados em relação à variação do tráfego de fundo e do nível de mobilidade, isto é, a sensibilidade da variação do atraso e da taxa de perda em relação às variações das condições da rede, da mesma. Desta forma, a



(a) Probabilidade condicional



(b) Percentagem de perdas consecutivas

Figura 4.17: Efeito da mobilidade nas perdas consecutivas - carga zero.

partir da divisão dos valores das curvas das Figuras 4.10 e 4.11, obteve-se a sensibilidade da taxa de perda e, a partir da divisão dos valores das curvas das Figuras 4.12 e 4.13, obteve-se a sensibilidade da variação do atraso. Nota-se que a variação do atraso é mais sensível às variações na carga da rede que a taxa de perda, pois apresentou maior variação em relação à mudança deste parâmetro. Por outro lado, a taxa de perda mostrou-se mais sensível à variação da mobilidade que à variação do atraso, exceto pelo primeiro ponto, onde existe apenas uma fonte de voz transmitindo. Isto mostra que a taxa de perda não sofre um grande impacto da mobilidade em uma rede com baixa utilização.

A densidade de nós afeta a conectividade da rede, que está diretamente relacionada à capacidade de transmissão dos nós. Para analisar o efeito da variação da densidade de nós na transmissão de voz, foram gerados outros cenários variando-se a área de simulação e mantendo-se o número de nós constante, igual a 40. Deve ser ressaltado que a densidade pode ser alterada variando-se o número de nós ou a área. Neste trabalho variou-se a área. Desta forma, foram realizadas simulações com três áreas diferentes, representando três densidades diferentes. Uma primeira área de 600 m $\times$ 600 m (área menor) representa uma densidade de 1 nó por 9.000 m^2. A segunda área simulada é de 800 m $\times$ 600 m (área média), a mesma área utilizada no restante do trabalho, representando uma densidade de 1 nó por 12.000 m^2. A última área simulada representa uma densidade de 1 nó por

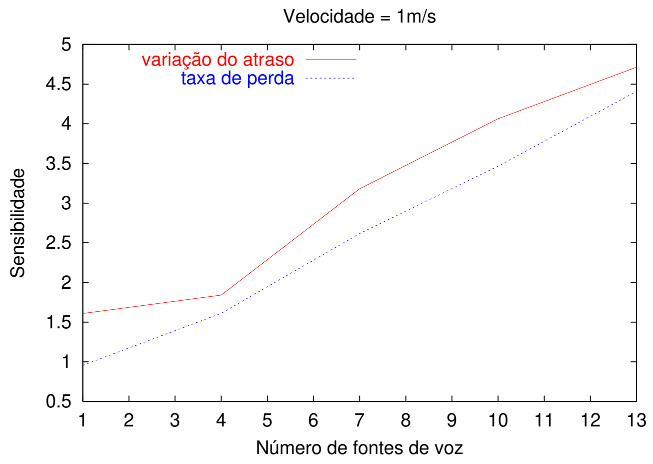


Figura 4.18: Sensibilidade em relação à carga da rede - baixa mobilidade.

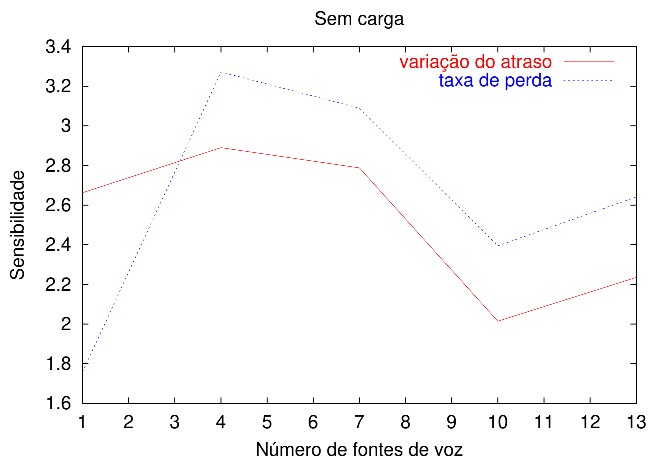


Figura 4.19: Sensibilidade em relação à mobilidade - carga zero.

15.000 m^2 com uma área de 1.200 m $\times$ 500 m (área maior). Os resultados podem ser observados pelas Figuras 4.20 e 4.21. Pode-se perceber que tanto a taxa de perda quanto a variação do atraso apresentam um comportamento semelhante. A área maior apresentou um pior desempenho devido à baixa densidade de nós na rede, acarretando uma maior probabilidade de quebra de enlaces e a falta de conectividade. A área menor, onde há uma maior densidade de nós, obteve resultados ligeiramente piores que a área média, pois quanto maior a densidade de nós, maior é a disputa pelo meio. No entanto, percebe-se que conforme se aumenta o número de fontes de voz, a capacidade da rede, na área média, vai se degradando até atingir a curva da área menor. Isto ocorre porque em uma área maior, a probabilidade de acontecerem quebras de enlace aumenta e este efeito é agravado pelo aumento do número de fontes voz.

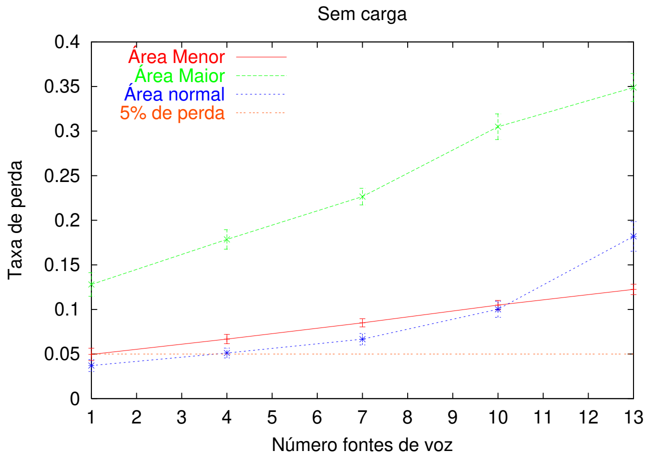


Figura 4.20: Efeito da densidade de nós da rede na taxa de perda.

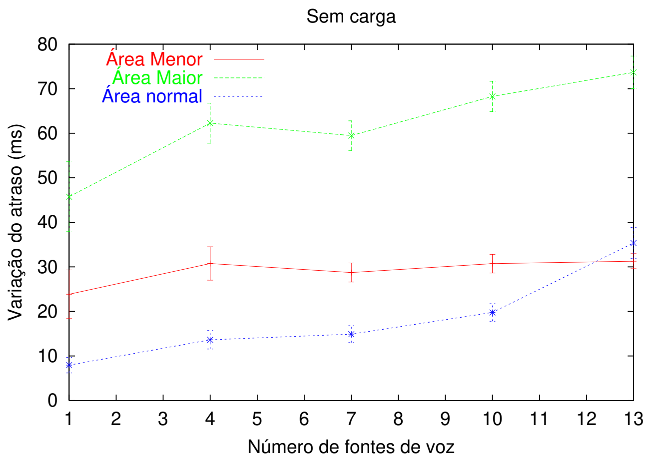


Figura 4.21: Efeito da densidade de nós da rede na variação do atraso.

As Figuras 4.22 e 4.23(b) mostram o comportamento das perdas consecutivas mediante a variação da densidade de nós da rede. O aumento da densidade de nós diminui as perdas em rajada, entretanto, a Figura 4.23(a) mostra que para rajadas pequenas o comportamento das perdas consecutivas é bastante semelhante nos três cenários simulados.

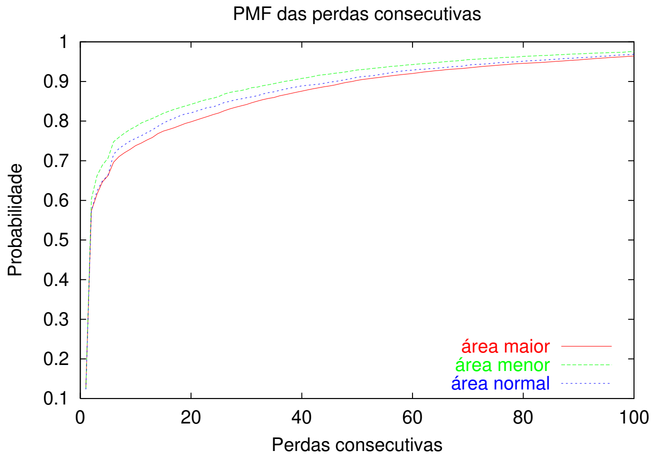
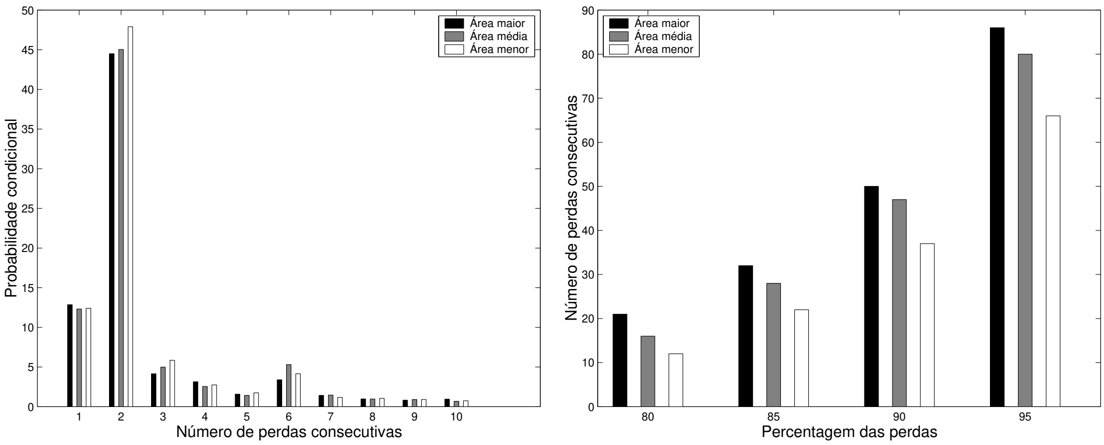


Figura 4.22: Efeito da densidade de nós da rede na PMF das perdas consecutivas.



(a) Probabilidade condicional

(b) Percentagem de perdas consecutivas

Figura 4.23: Efeito da densidade de nós da rede nas perdas consecutivas.

Capítulo 5

Conclusões

AS redes sem fio vêm apresentando, nos últimos anos, um desenvolvimento extraordinário e as previsões apontam que o número de acessos à Internet pelos dispositivos sem fio deverão ultrapassar os acessos convencionais em poucos anos. No entanto, as redes sem fio apresentam uma alta taxa de erro, variações nos estados dos enlaces e restrições em relação à banda passante disponível e ao consumo de energia. Para as redes ad hoc acrescentam-se os problemas oriundos da ausência de infra-estrutura, que dificultam a provisão de qualidade de serviço (QoS). Isto implica um aumento da complexidade dos nós da rede ad hoc, tornando ainda mais difícil a transmissão de tráfego de tempo-real.

O principal objetivo deste trabalho foi analisar a capacidade de transmissão de voz em tempo-real em redes ad hoc. A análise abrange as redes ad hoc de comunicação direta e de múltiplos saltos. Para o cenário de comunicação direta foi realizada uma seqüência de simulações e avaliadas as influências da carga da rede e da provisão de QoS no tráfego de voz. Uma outra seqüência de simulações mostrou as influências da carga da rede, da mobilidade e da densidade de nós da rede em cenários de múltiplos saltos. Em ambos os cenários, foram identificados os motivos que levaram a perda de pacotes. Para prover qualidade de serviço, foi utilizada uma técnica de diferenciação de serviço na subcamada MAC, baseada na variação da janela de contenção do mecanismo de acesso ao meio DCF do padrão IEEE 802.11. Foi definido como parâmetro de qualidade de serviço um atraso máximo de pacote de voz de 250 ms e uma taxa de perda máxima de 5%. A partir destes parâmetros, foi obtida a capacidade de transmissão de voz em cada um dos cenários.

Os resultados mostram que mesmo em cenários bastante adversos onde a rede está carregada e os nós se movem constantemente é viável a comunicação de voz sem perda de interatividade. Entretanto, comprova-se que o aumento, tanto da mobilidade quanto da carga da rede, implica a degradação da capacidade de transmissão de voz. O aumento da carga da rede afeta diretamente o tempo de acesso ao meio, aumentando, por conseqüência, o descarte de pacotes devido à expiração do tempo de vida, enquanto a variação da mobilidade provoca perdas de pacotes devido a falta de rota. A diminuição da densidade de nós da rede teve um efeito negativo na capacidade de transmissão da rede, devido ao aumento da probabilidade de quebras de enlace e o aumento do número de saltos necessários para cobrir a maior distância entre os nós. Este último efeito foi ocasionado pela forma que se diminuiu a densidade pois aumentou-se a área ao invés de reduzir o número de nós.

A taxa de perda se mostrou, para um número pequeno de nós, mais sensível que a variação do atraso no cenário estático, onde todos os nós se comunicavam diretamente. Já no cenário dinâmico, a variação do atraso (*jitter*) se mostrou mais sensível à carga e menos sensível à mobilidade.

A análise das perdas em rajada revelou que as perdas de apenas um pacote e de dois pacotes consecutivos representam a maior parte das perdas em rajadas tanto nos cenários de comunicação direta quanto nos de múltiplos saltos. A partir dos resultados, pôde-se verificar que nas redes de múltiplos saltos, as perdas em grandes rajadas significam uma pequena parte das perdas consecutivas, porém, em relação ao total de perdas, elas representam a grande parte.

Outro resultado importante se refere à questão da complexidade das redes móveis ad hoc de múltiplos saltos. A análise revelou que o aumento do tráfego da rede reduz drasticamente a capacidade de transmissão de voz, que já se mostrava bastante limitada. A mobilidade provoca quebras de enlace devido à mudança de topologia, implicando um aumento no tamanho das perdas em rajada. Nos cenários simulados de múltiplos saltos, estas perdas consecutivas chegaram a 2.000 pacotes, enquanto nos cenários de comunicação direta este valor não passou de 90 pacotes consecutivos.

A técnica de diferenciação de serviço na subcamada MAC utilizada ofereceu duas classes de serviços com três níveis de prioridade. Apesar de conseguir uma redução do valor da variação do atraso da classe de maior prioridade, esta técnica não se mostrou muito eficiente em relação à taxa de perda, pois a diferenciação obtida não foi suficiente para proporcionar um aumento significativo do número de fontes de voz.

Alguns trabalhos futuros incluem a comparação com outros protocolos de roteamento para redes ad hoc, a utilização de outros mecanismos de provisão de qualidade de serviço e a avaliação do impacto do reconhecimento (ACK) do padrão IEEE 802.11 na capacidade de transmissão da rede. O protocolo de roteamento AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*) é um dos principais concorrentes do protocolo DSR, por isso, seria interessante realizar uma comparação de desempenho, em relação à transmissão de voz, entre estes dois protocolos. Pode-se ainda, dividir os fluxos de voz e de dados em diferentes filas na subcamada MAC, dando uma certa prioridade aos pacotes de voz, com a finalidade de fornecer qualidade de serviço. Este mecanismo pode ser utilizado em conjunto com a técnica de variação da janela de *backoff*. A transmissão do ACK para cada quadro recebido pela subcamada MAC prejudica a capacidade de transmissão das redes 802.11. Tendo em vista que a retransmissão de pacotes não é adequada para transmissão de tráfegos em tempo-real, a supressão do ACK para os pacotes de voz pode ser uma alternativa para aumentar a capacidade da rede.

Por fim, destaca-se a importância da existência de um mecanismo de controle de admissão distribuído, com o objetivo de limitar o número de estações transmitindo voz, impedindo que o excesso de usuários inviabilize qualquer tipo de transmissão de tráfego de tempo-real.

Referências Bibliográficas

[1] SIVAKUMAR, R., SINHA, P., E BHARGHAVAN, V. CEDAR: a core-extraction distributed ad hoc routing algorithm. In *IEEE Infocom* (Nova Iorque, EUA, março de 1999).

[2] IWATA, A., CHIANG, C.-C., G. YU, M. G., E T-W. Scalable routing strategies for ad hoc wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications 17*, 8 (agosto de 1999), 1369–1379.

[3] CHEN, S., E NAHRSTEDT, K. Distributed quality-of-service routing in ad hoc networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications 17*, 8 (agosto de 1999), 1488–1505.

[4] XIAO, H., SEAH, W. K. G., LO, A., E CHUA, K. C. A flexible quality of service model for mobile ad-hoc networks. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring 2000)* (Tóquio, Japão, maio de 2000).

[5] GAHNG-SEOP AHN, ANDREW T. CAMPBELL, A. V., E SUN, L.-H. SWAN: Service differentiation in stateless wireless ad hoc networks. In *IEEE Infocom* (Nova Iorque, EUA, junho de 2002).

[6] LEE, S.-B., E CAMPBELL, A. T. INSIGNIA: In-band signaling support for QoS in mobile ad hoc networks. In *5th International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC98)* (Berlim, Alemanha, outubro de 1998).

[7] TSAI, J., E GERLA, M. Multicluster mobile multimedia radio network. *ACM-Baltzer Journal of Wireless Networks 1*, 3 (1995), 255–265.

[8] WU, H.-K., E CHUANG, P.-H. Dynamic QoS allocation for multimedia ad hoc wireless networks. *Mobile Networks and Applications 6*, 4 (2001), 377–384.

[9] AAD, I., E CASTELLUCCIA, C. Differentiation mechanisms for IEEE 802.11. In *IEEE Infocom* (Anchorage, Alasca, abril de 2001).

[10] RUBINSTEIN, M. G., E DE REZENDE, J. F. Qualidade de serviço em redes 802.11. In *XX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2002)* (Búzios, RJ, Brasil, maio de 2002).

[11] DENG, J., E CHANG, R. S. A priority scheme for IEEE 802.11 DCF access method. *IEICE Transactions on Communications E82-B*, 1 (janeiro de 1999), 96–102.

[12] KANG, S.-S., E MUTKA, M. W. Provisioning service differentiation in ad hoc networks by the modification of backoff algorithm. In *Int'l Conference on Computer Communication and Network (ICCCN)* (Scottsdale, Arizona, EUA, outubro de 2001).

[13] BOLOT, J.-C. Characterizing end-to-end packet delay and loss in the internet. *Journal of High-Speed Networks 2*, 3 (dezembro de 1993), 305–323.

[14] BOUTREMANS, C., IANNACCONE, G., E DIOT, C. Impact of link failures on VoIP performance. In *12th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV)* (Miami, EUA, maio de 2002).

[15] MARKOPOULOU, A., TOBAGI, F., E KARAM, M. Assessment of VoIP quality over Internet backbones. In *IEEE Infocom* (Nova Iorque, EUA, junho de 2002).

[16] BORELLA, M. S., SWIDER, D., ULUDAG, S., E BREWSTER, G. B. Internet packet loss: measurement and implications for end-to-end QoS. In *International Conference on Parallel Processing* (agosto de 1998).

[17] KÖPSEL, A., E WOLISZ, A. Voice transmission in an IEEE 802.11 WLAN based access network. In *Workshop on Wireless Mobile Multimedia (WoWMoM'2001)* (Roma, Itália, julho de 2001).

[18] KÖPSEL, A., EBERT, J.-P., E WOLISZ, A. A performance comparison of point and distributed coordination function of an IEEE 802.11 WLAN in the presence of real-time requirements. In *Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC2000)* (Tóquio, Japão, outubro de 2000).

[19] VELLOSO, P. B., RUBINSTEIN, M. G., E DUARTE, O. C. M. B. Analyzing voice transmission capacity on ad hoc networks. In *International Conference on Communications Technology (ICCT 2003)* (Pequim, China, abril de 2003).

[20] VELLOSO, P. B., RUBINSTEIN, M. G., E DUARTE, O. C. M. B. Uma análise da capacidade da transmissão de voz em redes ad hoc. In *XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2003)* (Natal, RN, Brasil, maio de 2003).

[21] VELLOSO, P. B., RUBINSTEIN, M. G., E DUARTE, O. C. M. B. The effect of mobility on voice transmission capacity in mobile ad hoc networks. In *The 3rd IEEE Latin American Network Operations and Management Symposium - LANOMS'2003* (Foz do Iguaçu, Brasil, setembro de 2003).

[22] VELLOSO, P. B., RUBINSTEIN, M. G., E DUARTE, O. C. M. B. Uma avaliação da capacidade da transmissão de voz em redes 802.11 no modo ad hoc. *A ser publicado na Revista Brasileira da Sociedade de Telecomunicações*.

[23] SCHLZRINNE, H., CASNER, S., FREDERICK, R., E JACOBSON, V. RTP: A transport protocol for real-time applications. *Internet RFC 1889* (janeiro de 1996).

[24] HERSENT, O., GURLE, D., E PETIT, J.-P. *IP Telephony - Packet-based multimedia communications systems*, first ed. Addison-Wesley Publishing Company, 1997.

[25] ITU-T. G.107: The Emodel, a computational model for use in transmission planning. In *International Telecommuication Union* (dezembro de 1998).

[26] ITU-T. G.108: Application of the Emodel: a planning guide. In *International Telecommuication Union* (setembro de 1998).

[27] ITU-T. G.113: Transmission impairments due to speech processing. In *International Telecommuication Union* (fevereiro de 2001).

[28] ITU-T. G.711: Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies. In *International Telecommuication Union* (novembro de 1988).

[29] HAYKIN, S. *Communication Systems*, second ed. Addison-Wesley Publishing Company, 1997.

[30] ITU-T. G.723.1: Dual rate speech coder for multimedia communications transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s. In *International Telecommuication Union* (março de 1996).

[31] ITU-T. G.729: Coding of speech at 8kbit/s using conjugate-structure algebraic-code-excited linear prediction. In *International Telecommuication Union* (março de 1996).

[32] JIANG, W., E SCHULZRINNE, H. Analysis of on-off patterns in VoIP and their effect on voice traffic aggregation. In *9th IEEE International Conference on Computer Communication Networks* (2000).

[33] SRIRAM, K., E WHITT, W. Characterizing superposition arrival processes in packet multiplexers for voice and data. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications 4*, 6 (setembro de 1986), 833–846.

[34] ITU-T. P.59: Telephone transmission quality objective measuring apparatus: Artificial conversation speech. In *International Telecommuication Union* (março de 1993).

[35] ITU-T. One-way transmission time. In *Recomendação G.114* (março de 1993).

[36] HARDMAN, V., SASSE, M. A., HANDLEY, M., E WATSON, A. Reliable audio for use over the internet. In *INET* (Honolulu, Hawai, junho de 1995).

[37] PERKINS, C., HODSON, O., E HARDMAN, V. A survey of packet-loss recovery techniques for streaming audio. *IEEE Network 12*, 5 (setembro de 1998), 40–48.

[38] GOODMAN, D. J., LOCKHART, G. B., WASEM, O. J., E WONG, W.-C. Waveform substitution techniques for recovering missing speech segments in packet voice communications. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing ASSP-34*, 6 (dezembro de 1986), 1440–1448.

[39] BOLOT, J.-C., E GARCÍA, A. V. The case for FEC-based error control for packet audio in the internet. *ACM Multimedia Systems* (1997).

[40] PADHYE, C., CHRISTENSEN, K. J., E MORENO, W. A new adaptive FEC loss control algorithm for voice over IP applications. In *19th IEEE International Performance, Computing, and Communication Conference* (fevereiro de 2000).

[41] BOLOT, J.-C., FOSSE-PARISIS, S., E TOWSLEY, D. Adaptive FEC-based error control for interactive audio in the internet. In *IEEE Infocom* (Anchorage, Alasca, abril de 1994).

[42] RAMACHANDRAN, R., KUROSE, J., TOWSLEY, D., E SCHULZRINNE, H. Adaptive playout mechanisms for packetized audio applications in wide-area networks. In *IEEE Infocom* (Anchorage, Alasca, abril de 1994).

[43] MOON, S., KUROSE, J., E TOWSLEY, D. Packet audio playout delay adjustment: performance bounds and algorithms. *ACM/Springer Multimedia Systems 6* (janeiro de 1998), 17–28.

[44] LIANG, Y., FARBER, N., E GIROD, B. Adaptative playout scheduling using time-scale modification in packet voice communications. In *International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing ICASSP* (junho de 2001).

[45] IEEE. *Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications - Part 11*. Standard 802.11, 1999.

[46] IEEE. *Supplement to part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications*. Standard 802.11a, 1999.

[47] IEEE. *Supplement to part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications*. Standard 802.11b, 1999.

[48] LIU, H.-H., E WU, J.-L. C. A scheme for supporting voice over IEEE 802.11 wireless local area network. *Proceedings of the National Science Council, China 25*, 4 (2001), 259–268.

[49] LU, S., BHARGHAVAN, V., E SRIKANT, R. Fair scheduling in wireless packet networks. In *ACM SIGCOMM'97* (Cannes, França, setembro de 1997).

[50] NANDAGOPAL, T., KIM, T., GAO, X., E BHARGHAVAN, V. Achieving MAC layer fairness in wireless packet networks. In *International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom)* (Boston, EUA, agosto de 2000).

[51] WANG, Y., KO, C. C., E BENSAOU, B. Fair medium access in 802.11 based wireless ad-hoc networks. In *ACM Mobile Ad Hoc Netwoking and Computing (Mobihoc)* (Boston, EUA, agosto de 2000).

[52] VAIDYA, N. H., BAHL, P., E GUPTA, S. Distributed fair scheduling in a wireless lan. In *International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom)* (Boston, EUA, agosto de 2000).

[53] WANG, Y., E BENSAOU, B. Achieving fairness in IEEE 802.11 DFWMAC with variable packet lengths. In *IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom)* (Texas, EUA, novembro de 2001).

[54] CROW, B. P., INDRA WIDJAJA, F., KIM, J. G., E SAKAI, P. T. IEEE 802.11 wireless local area networks. *IEEE Communications Magazine 35*, 9 (setembro de 1997), 116–26.

[55] WEINMILLER, J., WOESNER, H., E WOLISZ, A. Analyzing the RTS/CTS mechanism in the DFWMAC media access protocol for wireless LANs. In *IFIP TC6 Workshop on Personal Wireless Communications* (abril de 1995).

[56] WEINMILLER, J., WOESNER, H., E WOLISZ, A. Analyzing and improving the IEEE 802.11-MAC protocol for wireless LANs. In *4th International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (MASCOTS'96)* (San Jose, EUA, fevereiro de 1996).

[57] TAY, Y., E CHUA, K. A capacity analysis for the IEEE 802.11 MAC protocol. *Wireless Networks 7*, 2 (março de 2001), 159–171.

[58] LI, J., BLAKE, C., COUTO, D. S. J. D., LEE, H. I., E MORRIS, R. Capacity of ad hoc wireless networks. In *International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom)* (2001), pp. 61–69.

[59] QIAO, D., CHOI, S., E SHIN, K. G. Goodput analysis and link adaptation for IEEE 802.11a wireless LANs. *IEEE Transactions on Mobile Computing 1*, 4 (outubro de 2002), 278–292.

[60] BONONI, L., CONTI, M., E GREGORI, E. Design and performance evaluation of an asymptotically optimal backoff algorithm for IEEE 802.11 wireless LANs. In *33rd Hawaii International Conference on System Sciences-Volume 8* (Maui, Havaí, janeiro de 2000).

[61] VELLOSO, P. B., RUBINSTEIN, M. G., E DUARTE, O. C. M. B. Transmissão de voz em redes ad hoc. In *Workshop em Qualidade de Serviço e Mobilidade (WQoSM)* (Angra dos Reis, RJ, Brasil, maio de 2003).

[62] VEERARAGHAVAN, M., COCKER, N., E MOORS, T. Support of voice services in IEEE 802.11 wireless LANs. In *IEEE Infocom* (Anchorage, Alasca, abril de 2001).

[63] BARRY, M. G., CAMPBELL, A. T., E VERES, A. Distributed control algorithms for service differentiation in wireless packet networks. In *IEEE Infocom* (Anchorage, Alasca, abril de 2001), pp. 582–590.

[64] LINDGREN, A., ALMQUIST, A., E SCHELIÉN, O. Quality of service schemes for IEEE 802.11 - a simulation study. In *Proceedings of the Ninth International Workshop on Quality of Service (IWQoS 2001)* (junho de 2001).

[65] AAD, I., E CASTELLUCCIA, C. Introducing service diferentiation into IEEE 802.11. In *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)* (Antibes, França, julho de 2000).

[66] FALL, K., E VARADHAN, K. *The ns Manual*. UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, abril de 2002. Disponível em http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html.

[67] JOHNSON, D. B., MALTZ, D. A., HU, Y.-C., E JETCHEVA, J. G. *The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)*, fevereiro de 2002. Internet draft.

[68] DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE - RICE UNIVERSITY. *Monarch Project - Mobile Networking Architectures*. Disponível em http://www.monarch.cs.rice.edu, 2002.

[69] VILLELA, B. A. M., E DUARTE, O. C. M. B. Uma análise de protocolos de roteamento sob demanda de redes ad hoc. In *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBT'2003)* (Rio de Janeiro, Brasil, outubro de 2003).

[70] BRANDY, P. A technique for investigating on/off patterns of speech. *Bell Labs Tech Journal 44*, 1 (janeiro de 1965), 1–22.

[71] DAS, S. R., PERKINS, C. E., E ROYER, E. M. Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks. In *IEEE Infocom* (março de 2000), pp. 3–12.

Apêndice A

Parâmetros do IEEE 802.11b

A TABELA a seguir apresenta alguns parâmetros referentes ao padrão 802.11b.

Tabela A.1: Principais parâmetros.

Parâmetro	Valor
tempo de um *slot*	20μs
SIFS	10μs
DIFS	50μs
PIFS	30μs
tamanho do preâmbulo longo	144μs
tamanho do preâmbulo curto	72μs
tamanho do cabeçalho	48 bits
CW_{min}	31 *slots*
CW_{max}	1023 *slots*
tamanho do quadro RTS	20 bits
tamanho do quadro CTS	20 bits
tamanho do quadro ACK	20 bits

Os parâmetros de espaçamento entre quadros DIFS (*Distributed Inter-Frame Spacing*) e PIFS (*PCF Inter-Frame Spacing*) estão relacionados com o espaçamento curto entre quadros SIFS (*Short Inter-Frame Spacing*) e o tempo de um *slot* da seguinte maneira:

$$PIFS = SIFS + slot, \tag{A.1}$$

$$DIFS = SIFS + 2 * slot. \tag{A.2}$$