

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

ARLEN OLIVEIRA DO NASCIMENTO

**Otimizações na camada MAC visando
melhorar a qualidade da fala de VoIP em
redes mesh sem fio**

Prof.

Edjair de Souza Mota, Dr-Ing

Orientador

Manaus, Outubro de 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

*“Follow your steps and you will find,
the unknowns ways are on your mind”*

— ANDRÉ MATTOS

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus, pois sem ele, nada disso seria possível.

A minha família, em especial a minha mãe, Maria Oliveira, pela educação, pelos valores passados a mim, pela compreensão e por todo o tipo de suporte sempre que eu precisei. Ao meu pai, Paulo Nascimento, que apesar da distância, também sempre me acolheu quando eu precisei. As minhas irmãs, Adrielle e Adrienne, Junior e Paula, pelas conversas sem noção e pelos momentos de lazer.

A minha namorada, Renata, por toda a compreensão em todos os momentos, pelo apoio e incentivo incondicionais durante todos esses anos.

Ao professor Edjair Mota, pela valorosa orientação acadêmica desde o segundo período da graduação, pela amizade, pela confiança e por todas as oportunidades únicas concedidas a mim.

Ao professor Edjard Mota pela confiança e por quebrar paradigmas com aquelas aulas de Introdução a Computação que mostraram, não só pra mim, que era aquilo mesmo que eu queria. E ao professor Edson Nascimento por possibilitar a minha participação em dois grandes eventos e que contribuíram bastante para o meu crescimento.

A Andrea Giordanna, Loide Mara e Saulo Queiroz pelas discussões - acadêmicas ou não -, pelos momentos de descontração, pelas gargalhadas, pelos passeios nesses 4,

5 anos. Ao Saulo, especialmente, por termos desenvolvido excelentes trabalhos juntos, apesar de todos os perrengues e dificuldades. Também gostaria de agradecer a Alexandre Passito, André Venâncio, Gabriel Leitão, Leandro Galvão e Regeane Aguiar pela amizade.

Celina, Luiz e Kleverson Santana que sempre ajudaram, não só a mim, mas toda minha família, das mais diversas formas e que certamente contribuíram muito para me tornar o que eu sou e para chegar onde eu consegui chegar hoje.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	9
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
RESUMO	17
ABSTRACT	19
1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Objetivos	24
2 REFERENCIAL TEÓRICO	27
2.1 Redes sem fio IEEE 802.11	27
2.2 Camada física	32
2.2.1 Tecnologias da camada física	32
2.2.2 Adaptação de taxa e propagação dos sinais	36

2.3	Modelos de propagação para redes em malha sem fio	38
2.3.1	Modelos determinísticos <i>Free Space</i> e <i>Two-Ray ground</i>	39
2.3.2	Modelo <i>Shadowing</i> log-normal	40
2.3.3	Modelo de desvanecimento: Distribuição <i>Ricean</i>	41
2.4	Camada MAC 802.11	42
2.4.1	Problema do nó escondido	44
2.4.2	Problema do nó exposto	45
2.4.3	Funções de coordenação da camada MAC	45
2.4.4	Estrutura dos quadros	51
3	PROPOSTA DE TRABALHO	55
3.1	Classificação, priorização de tráfego de tempo real e janelas de <i>backoff</i> diferenciadas	55
3.2	Diminuição do número máximo de tentativas de retransmissão	57
3.3	Diferenciação dos intervalos entre quadros	58
3.4	Trabalhos relacionados	59
4	METODOLOGIA	61
4.1	Credibilidade em Experimentos de Simulação	61
4.2	Métricas e ambiente de avaliação	63
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	69
5.1	Experimentos para $L_{retry} = 3$	69
5.2	Experimentos para $L_{retry} = 5$	75
5.3	Experimentos para $L_{retry} = 7$	80

5.4	Considerações gerais sobre os experimentos	85
5.4.1	Experimentos com tráfego de fundo	86
6	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AODV	<i>Ad-hoc On Demand Vector</i>
BEB	<i>Binary Exponencial Backoff</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
BSSID	<i>Basic Service Set ID</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CFP	<i>Contention Free Period</i>
CIP	<i>Confidence Interval Procedures</i>
CP	<i>Contention Period</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Colision Avoidance</i>
CTS	<i>Clear-To-Send</i>
DIFS	<i>DCF Interframe Space</i>
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i>

DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
EIFS	<i>Extended Interframe Space</i>
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
HR/DSSS	<i>High Rate/DSSS</i>
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MOS	<i>Medium Opinion Score</i>
MIMO	<i>Multiple Input, Multiple Output</i>
MRIP	<i>Multiple Replications In Parallel</i>
LoS	<i>Line-Of-Sight</i>
NAV	<i>Network Allocation Vector</i>
NLoS	<i>Non-Line-Of-Sight</i>
NS-2	<i>Network Simulator 2</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OLSR	<i>Optimized Link State Routing Protocol</i>
PCF	<i>Point Coordination Function</i>
PIFS	<i>PCF Interframe Space</i>
PRNG	<i>Pseudo Random Number Generator</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>

RTPC	Rede de Telefonia Pública Comutada
RTS	<i>Request-To-Send</i>
SIFS	<i>Short Interframe Space</i>
UNII	<i>Unlicensed National Information Infrastructure</i>
VoIP	Voz sobre IP

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Pilha de protocolos da especificação 802.11	28
Figura 2.2:	<i>Basic Service Set</i> do 802.11	31
Figura 2.3:	<i>Infrastructure BSS</i> do 802.11	31
Figura 2.4:	Transmissão utilizando banda estreita (método convencional) <i>versus</i> sinal transmitido utilizando espalhamento espectral	33
Figura 2.5:	Canal FHSS	34
Figura 2.6:	Processo de transmissão e recepção do DSSS.	35
Figura 2.7:	Espectro segundo o DSSS	35
Figura 2.8:	Canal OFDM	36
Figura 2.9:	Problema do nó escondido.	44
Figura 2.10:	Problema do nó exposto.	45
Figura 2.11:	PCF e DCF.	47
Figura 2.12:	Mecanismo de Acesso Básico.	48
Figura 2.13:	Mecanismo RTS/CTS.	50
Figura 2.14:	Quadros do MAC do 802.11	53
Figura 4.1:	Cenário onde as chamadas foram realizadas	66
Figura 5.1:	MOS para $L_{retry} = 3$	70

Figura 5.2:	Perda para $L_{retry} = 3$	72
Figura 5.3:	Atraso para $L_{retry} = 3$	73
Figura 5.4:	MOS do $L_{retry} = 5$	76
Figura 5.5:	Perda do $L_{retry} = 5$	77
Figura 5.6:	Atraso do $L_{retry} = 5$	78
Figura 5.7:	MOS do $L_{retry} = 7$	81
Figura 5.8:	Perda do $L_{retry} = 7$	82
Figura 5.9:	Atraso do $L_{retry} = 7$	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Expoentes de degradação típicos para alguns ambientes	41
Tabela 2.2:	Valores de CW_{min} , CW_{max} , SIFS, DIFS e <i>slots</i> de tempo para as camadas físicas FHSS, DSSS e OFDM.	49
Tabela 4.1:	Projeto de experimentos.	67
Tabela 5.1:	Resultados para $L_{retry} = 3$ com 2 chamadas simultâneas	74
Tabela 5.2:	Resultados para $L_{retry} = 3$ com 4 chamadas simultâneas	74
Tabela 5.3:	Resultados para $L_{retry} = 3$ com 6 chamadas simultâneas	75
Tabela 5.4:	Resultados para $L_{retry} = 3$ com 8 chamadas simultâneas	75
Tabela 5.5:	Resultados para $L_{retry} = 5$ com 2 chamadas simultâneas	78
Tabela 5.6:	Resultados para $L_{retry} = 5$ com 4 chamadas simultâneas	79
Tabela 5.7:	Resultados para $L_{retry} = 5$ com 6 chamadas simultâneas	79
Tabela 5.8:	Resultados para $L_{retry} = 5$ com 8 chamadas simultâneas	80
Tabela 5.9:	Resultados para $L_{retry} = 7$ com 2 chamadas simultâneas	83
Tabela 5.10:	Resultados para $L_{retry} = 7$ com 4 chamadas simultâneas	84
Tabela 5.11:	Resultados para $L_{retry} = 7$ com 6 chamadas simultâneas	84
Tabela 5.12:	Resultados para $L_{retry} = 7$ com 8 chamadas simultâneas	85

RESUMO

Redes *mesh* (ou redes em malha) sem fio são redes em que cada nó é capaz de participar ativamente do processo de roteamento. São redes auto-configuráveis, o que significa que basta que um nó esteja ao alcance de outros para este se tornar parte da rede. Em tese, o alcance de uma rede em malha pode ser aumentado indefinidamente através de múltiplos saltos.

Voz sobre IP é uma tecnologia que possibilita a utilização de uma rede IP para a realização de chamadas dentro da mesma rede IP ou para outras redes como as redes de telefonia tradicional ou celular. A utilização de VoIP apresenta muitas vantagens em relação a telefonia comum pois é capaz de agregar mais serviços e com custos menores, tanto de implementação como de manutenção.

Combinar as vantagens de ambas as tecnologias é uma tendência cada vez maior, no entanto, ainda existem diversas questões que precisam ser respondidas e resolvidas afim de garantir a melhor experiência possível para o usuário.

Neste trabalho é apresentada uma série de otimizações nas redes em malha sem fio baseadas na especificação IEEE 802.11 a fim de obter melhorias na qualidade das chamadas VoIP para o usuário final. As otimizações mencionadas são precedidas de um estudo detalhado da camada MAC para identificar os seus pontos críticos.

Para avaliar as otimizações propostas foi projetado um ambiente de simulação con-

fiável baseado nos *softwares* Network Simulator 2 (ns-2) e Akaroa-2. Esta dissertação propõe e analisa melhorias na implementações das camadas MAC e PHY no ns-2, necessárias para garantir a acurácia dos resultados. Foram realizadas chamadas de voz em um cenário com 9 roteadores *mesh* dispostos em grade. A avaliação da qualidade das chamadas foi efetuada através de três parâmetros coletados durante as simulações, MOS, perda e atraso.

Os resultados mostraram que com a modificação de alguns parâmetros da camada MAC é possível conseguir ganhos significativos na qualidade das chamadas VoIP. No entanto, em alguns casos, é necessário haver um equilíbrio entre alguns desses parâmetros afim de garantir patamares razoáveis para a qualidade final do serviço.

Também foi possível verificar que os intervalos entre quadros e o tamanho máximo da janela de *backoff* (CW_{max}), que são parâmetros chave, não são capazes de influenciar no desempenho da rede. No entanto, outros parâmetros, como o número máximo de retransmissões (L_{retry}) e o tamanho mínimo da janela de *backoff* (CW_{min}) são fatores determinantes para a melhoria do desempenho.

De posse dos resultados, é possível criar um conjunto de configurações ótimas para cada cenário. Essas informações podem ser utilizadas para criar uma base de dados que pode ser consultada por um agente que monitora a rede chaveando as configurações afim de manter sempre a melhor qualidade possível.

Palavras-chave: Redes Mesh, Voz sobre IP, Controle de Acesso ao Meio, Simulação Confiável.

MAC Optimizations to Improve the VoIP Speech Quality in Wireless Mesh

Networks **ABSTRACT**

Wireless Mesh Networks are those where every node is capable of routing packets. They are self-configurable, which means that in order to a node joins the network, it only has to reach nodes which are members of such network. Theoretically, the range of wireless meshes can be increased indefinitely using multiple hops.

Voice over IP is a technology which that can make use of an IP network to make phone calls to other IP networks on any other telecommunication network. Nowadays, VoIP is more advantageous because it is capable to provide more services than traditional telephony and minor implementation costs as well as maintenance costs.

Put VoIP and wireless meshes to work together is a major trend, however, these technologies pose their own challenges which need to be overcome in order to provide to the final user the best experience.

In this work, we propose a set of optimizations in a 802.11 based wireless mesh network in order to obtain gains in VoIP speech quality. These optimizations will be performed in the MAC layer by means of a deep study to identify its bottlenecks.

To evaluate the proposed optimizations, we used a highly credible simulation environment based on Network Simulator (ns-2) and Akaroa-2. We realised several modifications on ns-2 in order to guarantee the accuracy of the results. The experiments were carried out in a wireless mesh backbone composed of 9 nodes by means of an increasing number

of simultaneous VoIP calls. In order to quantify the experience of the user, we collected MOS, loss rate e delay of every VoIP call.

Results showed that the modification of some MAC layer parameters can improve the VoIP quality. However, in some cases, there is a tradeoff between parameters that need to be observed.

Keywords: Wireless Mesh, Voice over IP, Medium Access Control, Credible Simulation.

1 INTRODUÇÃO

Voz sobre IP (VoIP) é uma tecnologia que permite que pacotes de voz possam trafegar por redes IP e possibilita aos usuários dessas redes realizarem ligações dentro de uma rede IP ou para a Rede de Telefonia Pública Comutada (RTPC). As vantagens de VoIP sobre a telefonia tradicional são inúmeras: menores custos de implementação, menores custos de manutenção, redução de custos com ligações, mobilidade e diversos serviços que não estão disponíveis na telefonia tradicional.

Por outro lado, VoIP exige muitos recursos da rede onde está sendo implementada e é muito sensível a fatores como atraso, latência, perda de pacotes entre outros. A aplicação VoIP deve ser capaz de contornar, ou pelo menos aliviar, esses problemas através de diversas técnicas tais como, adaptação às condições da rede, compressão de cabeçalhos, utilização de mecanismos de compensação (*buffers*) afim de garantir Qualidade de Serviço (QoS) aceitável pelos usuários.

Garantir uma boa experiência para o usuário é fundamental para o sucesso de um serviço de comunicação na internet. Na literatura, existem diversas metodologias para quantificar a qualidade do serviço para o usuário. Neste trabalho será utilizada uma implementação do Modelo E apresentada em [15]. O Modelo E é então convertido para a pontuação MOS, cujo resultado é uma pontuação de 1 a 5, onde 1 representa uma quali-

dade péssima e 5, excelente [16].

Com as novas tecnologias de rede, as possibilidades para a implementação de serviços multimídia, tais como VoIP, se expandem e se tornam cada vez mais interessantes. Nos últimos anos, as redes sem fio vêm se tornando uma extensão natural das redes cabeadas devido a diversos fatores como mobilidade e flexibilidade na implementação. No entanto, redes sem fio trazem consigo determinadas características que se tornam obstáculos, principalmente, para serviços sensíveis às condições da rede como VoIP. Condições geográficas e disponibilidade de frequências são alguns dos fatores que devem ser levados em consideração para a implementação bem sucedida de uma rede sem fio.

Ainda hoje não há tecnologias definitivas que resolvam todos os problemas das redes sem fio. Isso faz com que essas redes estejam em constante e intenso desenvolvimento. Na literatura é possível encontrar inúmeras soluções para resolver os mais diversos problemas, desde novos protocolos de roteamento até novas técnicas de transmissão para a camada física.

As redes em malha sem fio surgiram da necessidade de tornar maior o alcance das redes sem fio. Em uma rede em malha, cada nó é um roteador em potencial, assim o alcance da rede pode, teoricamente, ser aumentado indefinidamente através de múltiplos saltos. Um *backbone mesh* é uma rede em malha composta apenas de roteadores sem mobilidade que podem ser conectados a um *gateway* que possui conexão com a Internet. Há diversos exemplos de redes em malha em plena operação em grandes áreas metropolitanas (Athens Wireless Network [40] e Berlin Freifunk.net [14]) e implementar VoIP nessas redes além de ser bastante atrativo é desafiador já que o meio físico em ambientes metropolitanos é bastante diversificado e complexo.

Em 1990, o IEEE (*Institute of Electric and Electronic Engineers*) iniciou um grupo

de trabalho para a definição de um padrão para redes sem fio, mas apenas em 1997, o padrão foi lançado com taxas de transmissão nominais de 1 e 2 Mbps. O grupo de trabalho 11, da especificação guarda-chuva 802, lançou o padrão 802.11 que define as camadas de Controle de Acesso ao Meio (MAC - *Medium Access Control*) e Física (PHY) [23]. Essa especificação, nada mais é do que um conjunto de protocolos que devem ser implementados nas duas camadas supracitadas a fim de que haja interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes.

No entanto, da forma em que estão especificados originalmente, esses protocolos apresentam muitas limitações no que diz respeito a tráfego de tempo real. Diversas melhorias podem ser encontradas na literatura, porém grande parte desses trabalhos se refere somente ao tráfego de melhor esforço. A literatura ainda é um pouco vaga no que diz respeito ao tráfego de tempo real e, mais especificamente, voz sobre IP, que possui muitas particularidades.

Em 2005, o IEEE lançou a especificação 802.11e que é capaz de prover qualidade de serviço na camada MAC através de diferentes classes de tráfegos que apresentam diferentes prioridades.

Através de algumas modificações nos protocolos da camada MAC é possível conseguir ganhos significativos no desempenho das redes sem fio. Também é possível obter ganhos de desempenho através da configuração de determinados parâmetros. Protocolo de roteamento, algoritmo de seleção de taxas, seleção da faixa de frequência utilizada e potência das antenas são fatores determinantes para o bom desempenho de uma rede sem fio. Essas modificações não fazem parte da especificação original das redes 802.11 porque essas redes não foram criadas originalmente para esse tipo de tráfego.

Realizar mudanças estruturais na camada MAC pode se tornar uma tarefa difícil, pois

nas camadas mais baixas a divisão entre *hardware* e *software* não é muito clara. Por isso, os experimentos apresentados neste trabalho foram realizados em ambiente de simulação, que nos proporciona total controle sobre os experimentos e também nos permite isolar o efeito de determinados parâmetros no resultado final.

No entanto, a utilização de simulação traz consigo a obrigatoriedade de se utilizar uma estrita metodologia para que se obtenham resultados estatisticamente confiáveis. A grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura apresentam fortes indícios de não seguirem essa metodologia, o que pode comprometer a confiabilidade dos resultados [26].

1.1 Objetivos

Este trabalho propõe otimizações na camada MAC visando melhorias na qualidade da fala em sistemas VoIP. As modificações serão avaliadas através de métricas como MOS, perda e atraso através da ferramenta MedQoS [1], desenvolvida pelo Grupo de Redes de Computadores Multimídia da Universidade Federal do Amazonas [20].

A metodologia consiste em realizar um estudo para definir os pontos críticos da camada MAC e realizar alterações para fazer com que as chamadas VoIP obtenham resultados superiores no ambiente modificado. A estratégia é priorizar o tráfego VoIP e diminuir os tempos de espera para um nó transmitir e, principalmente, ao realizar retransmissões. Também foi diminuído o número máximo de retransmissões de um quadro, já que muitas vezes um *quadro* retransmitido é descartado pelo receptor por exceder o seu tempo máximo de espera, gerando tráfego desnecessário na rede.

O restante desta dissertação está dividido da seguinte forma. No Capítulo 2, apresentamos um referencial teórico, onde o padrão 802.11 é explicado com mais detalhes e os principais pontos críticos que contribuem para a degradação do desempenho são aponta-

dos. No Capítulo 3, são descritas as modificações efetuadas na camada MAC. No Capítulo 4, são detalhados os cenários dos experimentos e a metodologia de simulação utilizada. No capítulo 5, os resultados obtidos são apresentados e explicados e no Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Redes sem fio IEEE 802.11

Redes sem fio podem ser descritas como uma coleção de terminais que transmitem e recebem informações e podem se movimentar em uma determinada área de alcance [5]. As transmissões são feitas através de ondas de rádio ou ondas infravermelhas. Em uma rede sem fio, a existência de um nó central não é obrigatória, o que faz com que os nós possam se auto organizar e definir com quais outros nós eles podem estabelecer conexões.

As redes sem fio podem ser estabelecidas sem a necessidade de infra-estrutura prévia e com fácil configuração. Essas duas características fazem com que o uso das redes sem fio nos mais diversos ambientes seja crescente nos dias de hoje. A flexibilidade é outro fator bastante atrativo porque possibilita o estabelecimento de redes em eventos rápidos como conferências e em lugares que não podem sofrer alterações tais como prédios tombados. Além disso, os usuários não precisam ficar presos a cabos para poderem utilizar os serviços providos pela rede e podem se juntar facilmente a redes sem fio.

Afim de estabelecer normas para garantir a interoperabilidade entre diferentes fabricantes de dispositivos para redes sem fio, o IEEE criou o grupo de trabalho 11 sob a especificação guarda-chuva 802 que inclui diversas especificações de redes locais e metropolitanas, como mostrada na Figura 2.1. As redes 802.11 também são conhecidas

comercialmente como redes WiFi (*Wireless Fidelity*) [12].

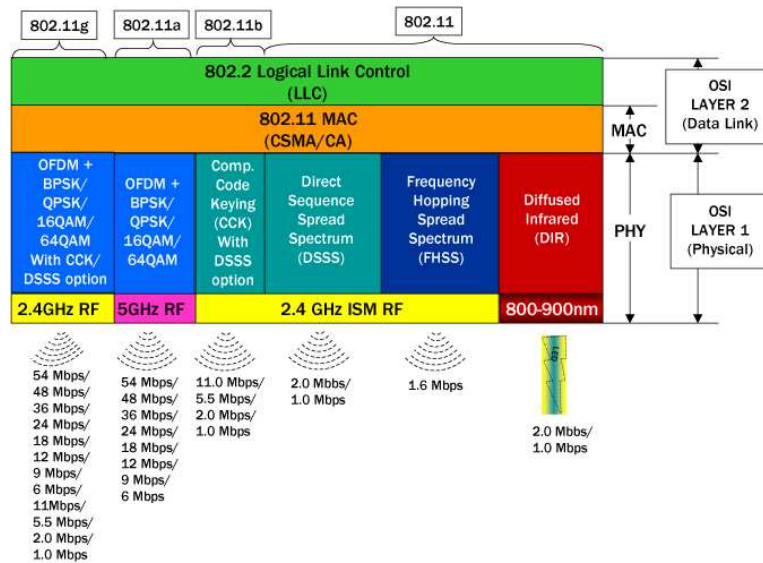


Figura 2.1: Pilha de protocolos da especificação 802.11

O padrão 802.11 [23] foi lançado em 1997 com taxas de transferência de até 2Mbps. Com o passar do tempo, as taxas de transmissão aumentaram e diversas outras características foram adicionadas e novas extensões foram criadas. Essas extensões são diferenciadas através de uma letra no final do nome do padrão [64].

Alguns padrões operam na faixa de frequência de 2,4 GHz que é conhecida como ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) e outros na faixa de 5GHz, conhecida como UNII (*Unlicensed National Information Infrastructure*), ambas são não-licenciadas e estão disponíveis na maioria dos países com pequenas variações nas frequências de alguns canais. A utilização de faixas de frequências não-licenciadas é estratégico para a proliferação das redes sem fio, pois livra o usuário de ter que licenciar uma rede sem fio para uso doméstico, por exemplo. No entanto, é necessário que os equipamentos utilizados respeitem os limites de potência de transmissão, diâmetro da antena entre outros. A legislação brasileira para utilização do espectro eletromagnético pode ser encontrada em [2].

A base do padrão 802.11 inclui a especificação da camada MAC e três camadas fí-

sicas: FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) e DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) e IR (*Infrared*). As versões posteriores do 802.11 acrescentaram mais duas outras camadas físicas, o HR/DSSS (*High Rate/DSSS*) e o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) que aumentaram consideravelmente a taxa de transmissão. A camada física que utiliza a tecnologia de Infravermelho, devido ao seu baixo desempenho e muitas restrições, nunca foi implementada comercialmente.

O desempenho de uma rede sem fio depende diretamente da faixa de frequências na qual ela opera. A interferência é um dos problemas mais recorrentes nesse tipo de rede, haja vista que o ar é um meio compartilhado e os canais ortogonais (que não se sobrepõem) disponíveis para comunicação são limitados, mais detalhes na seção 2.2.1.

Dentre os muitos fatores que influenciam na comunicação, pode-se destacar a interferência. A interferência pode ser classificada como destrutiva, quando os sinais estão em fases diferentes e anulam um ao outro, ou construtiva, quando sinais de mesma fase se adicionam um ao outro. A fonte de interferência pode ser tanto outros dispositivos 802.11 que operem próximos um do outro ou outros equipamentos que operam na faixa ISM como fornos de micro-ondas, telefones sem fio, equipamentos de comunicação, dispositivos *Bluetooth*, entre outros.

Outro problema grave nas redes sem fio é a segurança. Dados trocados entre dispositivos sem fio estão muito mais suscetíveis a interceptação do que em uma rede cabeada, já que os dados transmitidos podem ser processados por qualquer dispositivo que esteja no alcance dos nós comunicantes. Assim, o alcance de uma rede sem fio não é fisicamente limitado a prédios e terceiros podem interceptar o tráfego de dados sem muita dificuldade.

O padrão 802.11 possui extensões de *a* a *z* [58], dentre as quais destacamos, a extensão *i* que implementa soluções nativas de segurança e a extensão *e* que implementa

mecanismos para garantir qualidade de serviço na camada MAC.

O bloco básico das redes 802.11 é a BSS (*Basic Service Set*) (Figura 2.2) que é um grupo de nós que se comunicam entre si e são divididos em dois tipos: independentes e infra-estruturadas. Nas IBSS (*Independent BSS*), também chamadas de redes *ad-hoc*, os nós podem se comunicar diretamente com qualquer nó que esteja ao seu alcance. Em geral, redes *ad-hoc* tem propósitos específicos e são ideais para cenários onde não é possível estabelecer infra-estrutura como guerras e catástrofes.

As redes infra-estruturadas (*Infrastructure BSS*) (Figura 2.3) possuem um ponto central (ponto de acesso) por onde, necessariamente, passa toda a comunicação. Assim, para haver comunicação entre dois nós, ambos devem estar no raio de alcance do ponto de acesso e associados a ele. A associação a um ponto de acesso deve ser iniciada pelo nó que tenha interesse em se juntar a uma determinada rede sem fio e cabe ao ponto de acesso recusar ou aceitar esse pedido de acordo com as suas configurações. Nesta configuração, basta que as funcionalidades mais complexas estejam implementadas apenas no ponto de acesso. Isso que faz com que essa seja a configuração mais popular porque basta que os nós implementem as funções básicas de um dispositivo sem fio para participar de qualquer rede.

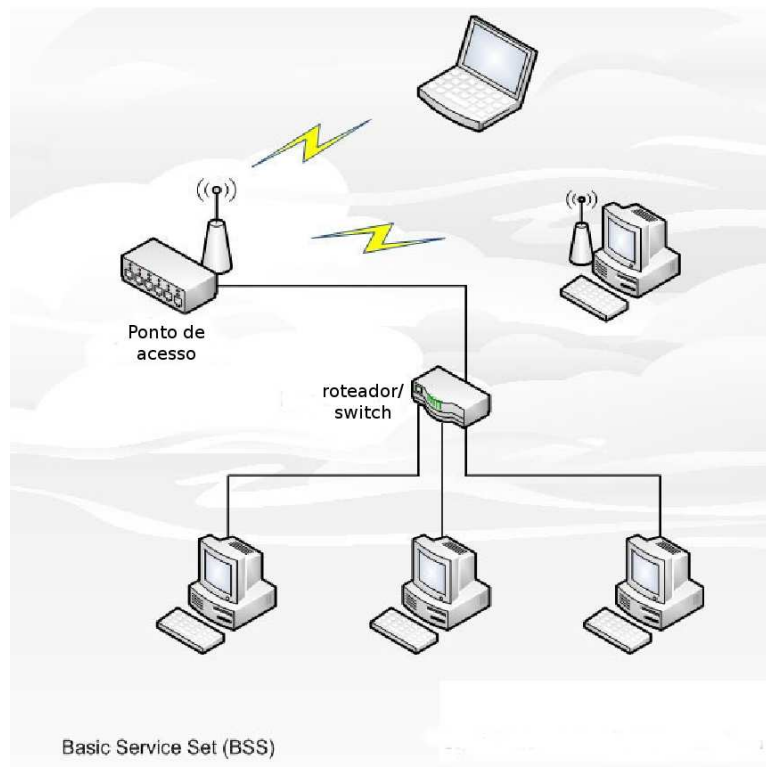


Figura 2.2: *Basic Service Set* do 802.11

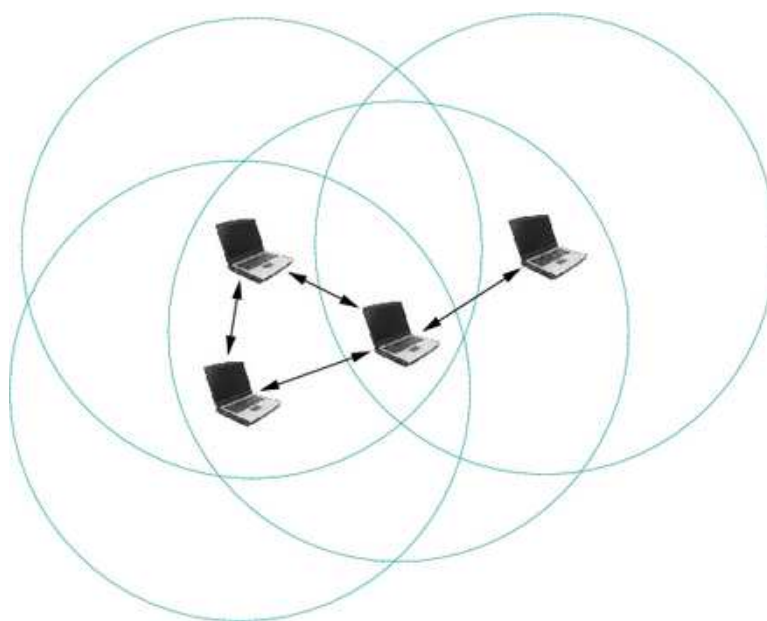


Figura 2.3: *Infrastructure BSS* do 802.11

2.2 Camada física

2.2.1 Tecnologias da camada física

O padrão 802.11 inicialmente homologou três tipos de camada física: Infravermelho, FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) e DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). A camada física FHSS também é utilizada pela tecnologia *Bluetooth* mas é bastante limitada e oferece taxas de transmissão muito baixas, da ordem 2Mbps. A OFDM, diferentemente das outras, também é utilizada na faixa de frequências de 5GHz. É a camada física utilizada na extensão *a* do 802.11.

Com exceção do infravermelho, todas as camadas físicas utilizam a tecnologia de espalhamento espectral que consiste em diminuir a potência do sinal e espalhá-lo por uma faixa de frequências maior. O espalhamento espectral é uma exigência para canais não-licenciados como o ISM e faz com que o sinal transmitido seja menos suscetível a interferências. Isso acontece porque os receptores tradicionais trabalham em bandas mais estreitas do que os receptores que utilizam espalhamento espectral (Figura 2.2.1) e para aqueles, um sinal espalhado espectralmente é percebido como ruído e é descartado. Combinado com certas técnicas de modulação, o espalhamento espectral pode se tornar muito eficiente.

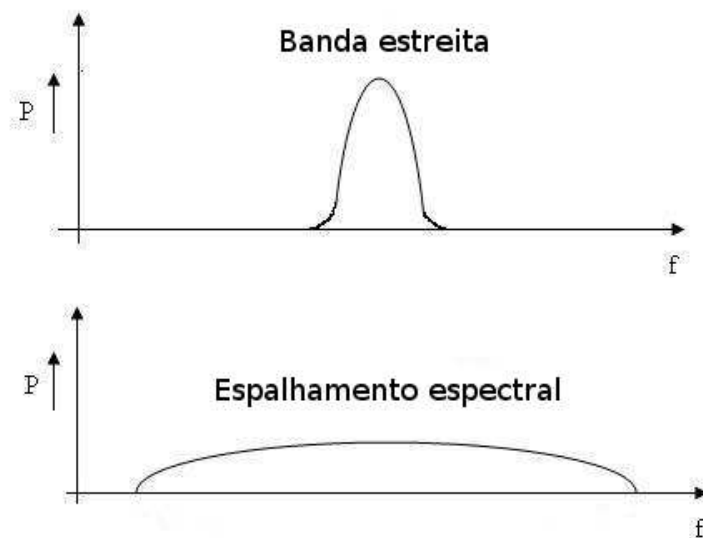


Figura 2.4: Transmissão utilizando banda estreita (método convencional) *versus* sinal transmitido utilizando espalhamento espectral

2.2.1.1 FHSS

O FHSS é a técnica mais rudimentar entre as três e a que oferece a menor taxa de transmissão. O espectro é dividido em quadrantes nos domínios de tempo e frequência, conforme ilustrado na Figura 2.5. A transmissão salta de quadrante em quadrante em padrões aleatórios previamente combinados entre o transmissor e o receptor. O meio é dividido em 79 canais de 1MHz e 78 seqüências diferentes de saltos de frequências. Esses canais podem ser usados por até $400\mu s$. Dessa forma, a probabilidade de colisões no FHSS é muito baixa, no entanto, só atinge taxas da ordem de 2Mbps, fato que aliado a implementação custosa e complexa, torna o FHSS pouco atrativo para ambientes de produção.

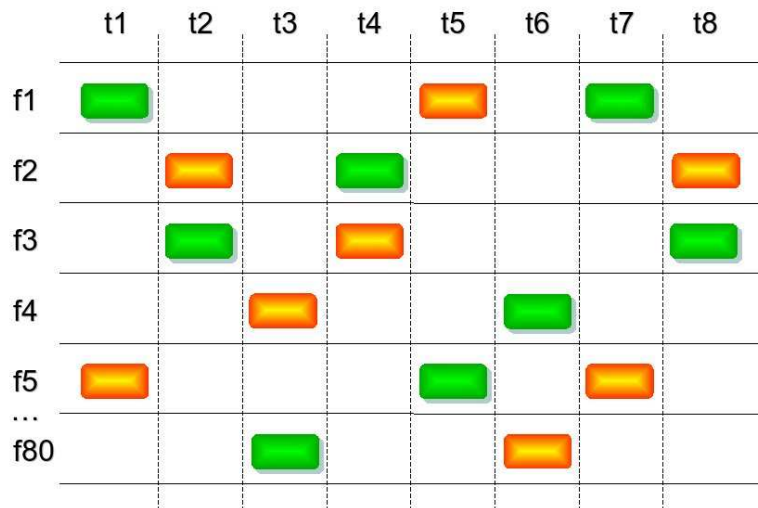


Figura 2.5: Canal FHSS

2.2.1.2 DSSS

No DSSS, o sinal é misturado a uma sequência de bits chamados *chips* através da operação XOR (ou exclusivo). Portanto, para cada *bit* de dados, uma sequência de bits é enviada, como pode ser visto na Figura 2.6. Mesmo que alguns bits da sequência se percam, é possível recuperá-los sem a necessidade de retransmissão por causa da redundância. Atinge taxas de até 11Mbps, no entanto, possui maior custo e maior consumo de energia. O DSSS divide o espectro em 11 canais de 22MHz cada com espaçamento de 5MHz, exceto para os canais 13 e 14, cujo espaçamento é de 12MHz. Desses 11 canais, apenas o 1, 6 e 11 são ortogonais, ou seja, não se sobrepõem (Figura 2.7). Esse é um ponto crítico na implementação de redes 802.11b porque permite a coexistência de apenas três redes sem que uma cause interferência na outra.

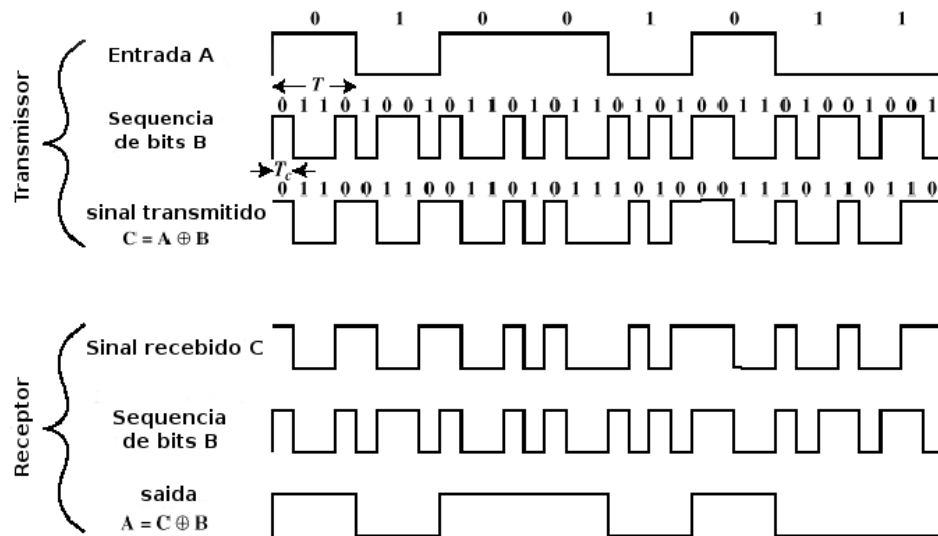


Figura 2.6: Processo de transmissão e recepção do DSSS.

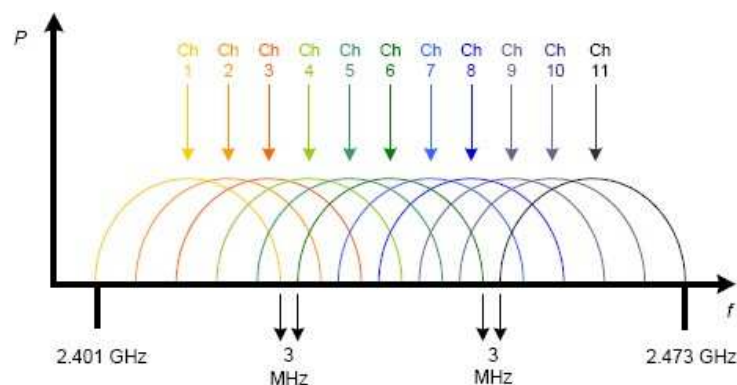


Figura 2.7: Espectro segundo o DSSS

2.2.1.3 OFDM

O OFDM divide a largura de banda em uma banda-base e várias sub-portadoras independentes igualmente espaçadas. Cada sub-portadora, entrega a sua porção de forma independente (Figura 2.8), dessa forma, tem-se melhor utilização do espectro e grande imunidade a interferência, com taxas de transmissão da ordem de 54 Mbps, mas com alto consumo de energia e alto custo. Porém, é capaz de apresentar bons resultados mesmo sob severas condições do canal. O OFDM consegue dividir o espectro em 19 canais ortogo-

nais, variando de acordo com a legislação local de alguns países, o que torna a extensão 802.11a muito vantajosa em relação a 802.11g. No entanto, o 802.11a, por operar na faixa de 5GHz não é compatível com o 802.11g, que opera em 2,4 GHz, o que faz com a aquisição de novos dispositivos de *hardware* seja necessária.

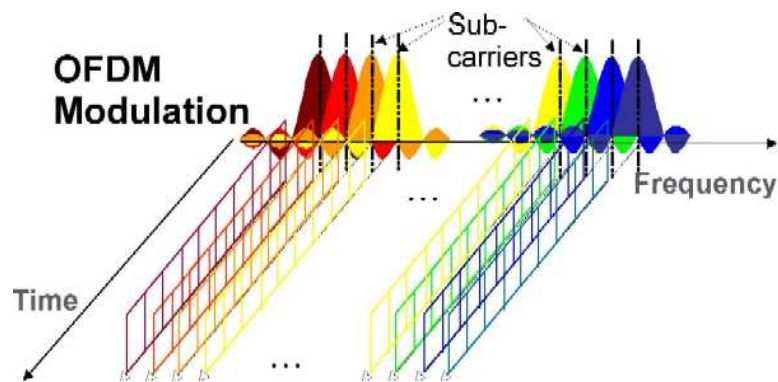


Figura 2.8: Canal OFDM

2.2.2 Adaptação de taxa e propagação dos sinais

A camada física também é responsável pela adaptação das taxas de transmissão. Os padrões 802.11 são capazes de transmitir em taxas pré-definidas que variam de acordo com a extensão, o 802.11a e 802.11g são capazes de transmitir em taxas de até 54 Mbps, o 802.11n, também conhecido como MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*), pode alcançar taxas de até 300Mbps. No entanto, a taxa de transmissão praticada em um dado instante varia de acordo com as condições do canal. Em ambientes reais, é incomum que valor máximo de transmissão seja atingido.

O controle de taxa, na sua forma mais básica, é feito com o nó que irá transmitir fazendo a monitoração do canal, e de acordo com a taxa de perdas (BER - *Bit Error Rate*), uma quantidade de *bits* por bloco é definida. Quanto melhores as condições do canal, maior a quantidade de *bits* por bloco serão modulados pelo transmissor, logo, em um intervalo de tempo mais bit são transmitidos, o que corresponde a um aumento da taxa

de transmissão. Quando as condições do canal não estão favoráveis, o transmissor diminui a quantidade de *bits* por bloco, pois caso o quadro que contém o bloco seja perdido, apenas uma pequena porção dos dados deve ser retransmitida. A quantidade de bits por bloco é variada pois em um canal menos suscetível a erro, a probabilidade de esse bloco chegar sem falhas ao destino aumenta. Quando o canal é considerado ruim, a quantidade de bits por bloco é diminuída porque no caso de um quadro ser perdido e ter que ser retransmitido, o prejuízo para a rede é o mínimo possível.

Porém, os primeiros algoritmos de adaptação de taxas desenvolvidos não eram capazes de distinguir perda de congestionamento. Isso se torna um problema porque quando há congestionamento na rede, os nós diminuem a taxa de transmissão, o que agrava o congestionamento, pois no momento em que a rede precisa de vazão, todos os nós diminuem as suas taxas de transmissão. Os algoritmos mais modernos já são capazes de fazer essa distinção.

A utilização desses algoritmos é crucial para o bom desempenho da rede, já que uma taxa alta em um canal suscetível a erro, resultaria em baixa vazão e uma taxa baixa em um canal em boas condições resultaria em subutilização do meio. Na grande parte dos roteadores disponíveis no mercado, algoritmos de adaptação já fazem parte da configuração padrão, no entanto, em experimentos de simulação utilizando o ns-2, essas configurações precisam estar declaradas de forma explícita. Mais detalhes no Capítulo 4.

A extensão *b* disponibiliza quatro taxas de transmissão (1, 2, 5,5 e 11 Mbps) e as extensões *a* e *g* disponibilizam oito (6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 e 54 Mbps). Para garantir a menor taxa de transmissão, devemos ter $BER \leq 10^{-5}$. Esse é o valor mínimo no qual um nó consegue captar um sinal e extrair a informação transmitida [72].

A qualidade do canal, que pode ser inferida a partir do BER, está diretamente relaci-

onada com a potência do sinal recebido. Ao longo de seu caminho entre o transmissor e o receptor, o sinal sofre diversas degradações devido a uma infinidade de fatores que variam de obstáculos entre o receptor e o transmissor até a qualidade dos equipamentos utilizados.

As ondas de rádio se propagam através de três fenômenos físicos: reflexão, dispersão ou espalhamento e difração.

- Reflexão: ocorre quando uma onda eletromagnética incide sobre uma superfície cujo tamanho é maior que o comprimento da onda referida, e.g., espelhos d'água, paredes, etc. O sinal refletido possui uma potência menor do que o sinal original. A reflexão causa um fenômeno bastante comum em redes sem fio, o *multipath fading*, que faz com que cópias do mesmo sinal, propagados por caminhos diferentes, sejam recebidas pelo destino em instantes diferentes.
- Dispersão ou espalhamento: ocorre quando uma onda eletromagnética incide sobre uma superfície cujo tamanho é menor ou igual ao comprimento da onda referida, e.g., móveis.
- Difração: ocorre quando o sinal incide em superfícies irregulares ou que possuam bordas ou pontas.

2.3 Modelos de propagação para redes em malha sem fio

A modelagem da propagação do sinal eletromagnético cumpre um papel fundamental na simulação de backbones em malha sem fio uma vez que é por meio dela que estima-se a qualidade do sinal recebido.

Os modelos de propagação são classificados em modelos de *larga-escala*, que esti-

mam a qualidade média do sinal a uma determinada distância do transmissor, ou seja, a degradação sofrida ao longo do percurso de propagação da onda (*path loss*), e modelos de *pequena-escala* ou modelos de desvanecimento (*fading models*), que capturam as rápidas flutuações da força do sinal em curtos espaços de tempo [49].

A seguir, apresentamos os modelos disponíveis no ns-2 bem como na maioria dos simuladores.

2.3.1 Modelos determinísticos *Free Space* e *Two-Ray ground*

Assim como na maioria dos simuladores de redes, o ns-2 contém os modelos *determinísticos* de propagação em larga-escala *Free Space* e *Two-Ray ground*. Ambos os modelos são dependentes basicamente da distância d , da potência do sinal transmitido P_t , dos ganhos obtidos pelas antenas do transmissor e receptor G_t e G_r e de um fator $L \geq 1$, referente a dissipações diversas que não estão relacionadas à propagação propriamente dita.

Os dois modelos assumem a existência de uma linha de visada direta entre o transmissor e o receptor, no entanto, o *Two-Ray ground* também modela um percurso de propagação onde ocorre uma reflexão sobre uma superfície plana. Essa consideração faz com que o *Two-Ray ground* seja ligeiramente mais preciso que o *Free-Space*. Porém, em [28] constatou-se que esses modelos são simples demais para modelar redes sem fio com múltiplos saltos.

A estimação da potência P_r no receptor, conforme o *Free Space* e o *Two-Ray ground*, são obtidas a partir das fórmulas 2.1 e 2.2, respectivamente, onde λ é o comprimento de onda em metros e h_t, h_r representam as alturas das antenas em relação à superfície plana:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (2.1)$$

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L} \quad (2.2)$$

2.3.2 Modelo *Shadowing* log-normal

O modelo *Shadowing* log-normal utiliza dois componentes, um determinístico e outro estocástico para descrever o valor médio da potência degradada $PL(d)$ ao longo de uma distância d . O componente determinístico é limitado por $\Theta(\log(d))$, ou seja, ele indica que a força média do sinal recebido decai logaritmicamente com a distância. No entanto, se houver diferentes níveis de obstrução ao longo do percurso que o sinal percorre, $PL(d)$ pode variar para o receptor. Para representar essa variação, o modelo *Shadowing* utiliza um componente estocástico log-normal expresso em decibéis que assume a forma de uma variável aleatória normal de média zero e desvio padrão σ , a saber, $X_\sigma \sim N(0, \sigma^2)$.

Portanto, no modelo *Shadowing*, para a correta estimação de P_r é necessário que o modelo seja alimentado com dois parâmetros dependentes do ambiente modelado, o *path loss exponent* α que é o expoente de degradação do percurso e o desvio padrão σ (em dB). $PL(d)$ pode ser derivado da equação a seguir, onde d_0 é a constante de *distância de referência*:

$$\begin{aligned} P_r(d) &= P_t - PL(d) - X_\sigma \\ P_r(d) &= P_t - 10 \log \left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] - 10\alpha \log \left(\frac{d}{d_0} \right) - X_\sigma \end{aligned} \quad (2.3)$$

A Tabela 2.3.2 mostra alguns valores tabelados para α que são utilizados nos nossos experimentos.

Conforme [41] o ns-2 aplica o modelo *Shadowing* incorretamente, a saber, cada quadro experimenta diferentes valores de PL . Tal referência aponta que o modelo é estocás-

Tabela 2.1: Expoentes de degradação típicos para alguns ambientes

Ambiente	Valor de α
Espaço livre	2
Rede interna com visada	1.6 a 1.8
Área urbana	2.7 a 3.5
Rede interna com obstruções	4 a 6

tico porém estático, não sendo adequado utilizá-lo para expressar oscilações temporais na qualidade do canal (*fading*).

2.3.3 Modelo de desvanecimento: Distribuição *Ricean*

Oscilações em curtos períodos de tempo na qualidade dos enlaces podem ocorrer devido fatores como: movimentação dos nós comunicantes ou de objetos no canal de propagação do sinal, largura de banda ou *desvancência por multi-percursos* (*multipath fading*) fenômeno no qual várias cópias do mesmo sinal chegam ao receptor.

Em [3], com o auxílio de um emulador de canal sem fio, os autores sugerem que o grande número de enlaces com taxas de perdas variável em um backbone em malha composto por 38 nós 802.11b, provavelmente deve-se ao *multipath fading*.

A distribuição *Ricean* (ou distribuição de Rice) é utilizada para modelar fenômenos de desvanecimento. O parâmetro chave desta distribuição é o fator K de *Ricean*. Este valor é a razão entre a potência do sinal de um percurso com visada (LOS - *Line-Of-Sight*) e a potência do sinal de um percurso sem visada (NLOS - *Non-Line-Of-Sight*). Dessa forma, se $k \rightarrow \infty$ a influência de NLOS tende a zero[62].

Originalmente, o ns-2 não disponibiliza uma implementação do modelo de Rice (esta característica é esperada para o ns-3 [22]). [46] dedica-se inteiramente à discussão desta distribuição a fim de implementá-la eficientemente no ns-2 (para mais detalhes sobre a distribuição, por favor consulte tal referência). Porém vale ressaltar que naquele trabalho

assume-se que o processo envelope do modelo de pequena escala é usado para modular cálculos do *Two-Ray ground* ou algum outro *modelo determinístico*.

Em [35], os autores apresentam uma correção da implementação do módulo *Shadowing* do ns-2 e o combinou com a implementação do Ricean proposta por [46]. Por meio desta contribuição é possível simular no ns-2 um canal considerando o modelo de *Shadowing* juntamente com um modelo de desvanecimento (modelo *shadow-fading*), tal como apresentado em [59].

Para uma discussão mais detalhada sobre os modelos apresentados nas subseções 2.3.1, 2.3.2 e 2.3.3, consultar [49].

Há ainda, um outra classe de modelo de propagação que estima a força e cobertura do sinal a partir da técnica (*ray tracing*). Utiliza-se aplicativos gráficos para modelar uma região específica e seus componentes como árvores, prédios, móveis, entre outros. Em seguida, o algoritmo é aplicado para simular os efeitos das ondas eletromagnéticas (reflexões, difrações e espalhamento do sinal) nesses objetos. A vantagem do *ray tracing* é que ele modela exatamente o ambiente desejado, no entanto, requer bastantes recursos computacionais o que torna o tempo de resposta de uma simulação muito elevado, além do mais, qualquer mudança no ambiente, requer uma nova modelagem. Em [57], um simulador determinístico baseado em *ray tracing* bem como uma discussão sobre os efeitos eletromagnéticos a pouco mencionados são apresentados em [57].

2.4 Camada MAC 802.11

A camada MAC é o ponto chave das redes sem fio, pois, através de diversos protocolos, controla quando e quais nós terão o direito de utilizar o canal para transmitir os seus dados. Pelo fato de utilizar o éter como meio de transmissão, as redes sem fio trazem

consigo vários problemas de segurança, acesso, integridade dos dados entre outros. No entanto, a camada MAC é um tópico sob intensa pesquisa e várias soluções vem sendo propostas para resolver os problemas descritos acima. Novas extensões são frequentemente lançadas com essas soluções propostas.

Na camada MAC, os nós se comunicam através de quadros ou quadros, palavras utilizadas indistintamente neste trabalho. Existem três tipos de quadros: de gerenciamento, controle e dados. Os quadros de gerenciamento são responsáveis pela autenticação, associação e desassociação de usuários a rede. quadros de controle são responsáveis por confirmar a entrega de quadros, requisitar o acesso ao meio, consumo de energia dos nós. E os quadros de dados são aqueles que contém as informações dos usuários finais. A estrutura dos quadros é descrita na subseção 2.4.4.

Nas redes *Ethernet*, o nó que transmitiu um quadros permanece escutando o canal até se certificar que o destino recebeu o quadros corretamente. Nas redes 802.11 isso não é possível, principalmente, porque os dispositivos só funcionam em modo *half-duplex*. Quando algum quadros não é recebido com sucesso, sempre assume-se que houve uma colisão. Esse protocolo é chamado de CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*).

Detectar colisões é um operação muito complexa em redes sem fio, por isso um protocolo chamado CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) é utilizado. Este protocolo trabalha de forma a evitar colisões através de intervalos de tempo aleatórios escolhidos pelos nós na disputa pelo meio e utilizando mensagens de confirmação para os quadros enviados. Caso a mensagem de confirmação (ACK) não seja recebida pelo transmissor, assume-se uma colisão e o quadros deve ser reenviado.

O controle exercido pelo CSMA/CA é considerado excessivo porque gera uma alta

carga de mensagens de controle na rede, cerca de 50% da banda disponível é utilizada somente para essas mensagens e cabeçalhos, o que faz com que a vazão real de uma rede sem fio 802.11b esteja entre 5 e 5,5 Mbps [69].

No entanto, existem duas situações em que o CSMA/CA não é capaz de funcionar corretamente e que caracterizam dois problemas clássicos das redes sem fio: o problema do nó escondido e do nó exposto.

2.4.1 Problema do nó escondido

Considere três dispositivos sem fio A, B e C, conforme ilustra a Figura 2.9. O problema do nó escondido ocorre quando os nós A e C não estão no raio de alcance um do outro, ou seja, A e C não se enxergam, no entanto, existe um nó intermediário B que está no raio de alcance de A e C, simultaneamente. O problema ocorre quando A ou C tentam utilizar o canal para se comunicar com B pois nenhum dos dois vai ser capaz de detectar as tentativas do outro, o que causa colisão.

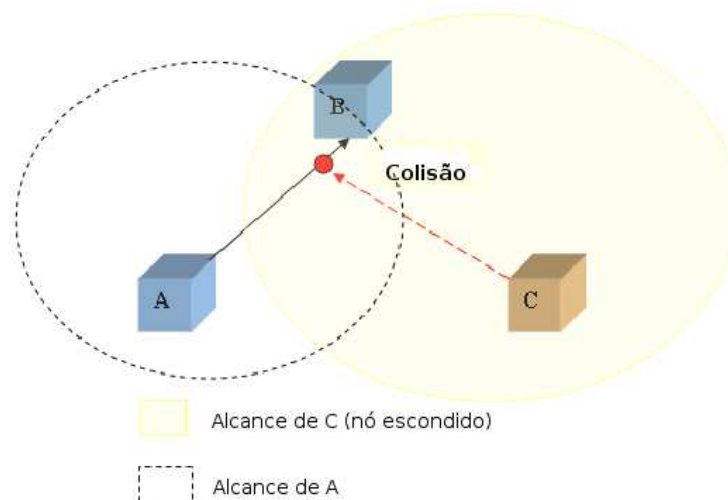


Figura 2.9: Problema do nó escondido.

2.4.2 Problema do nó exposto

O problema do nó exposto ocorre quando um nó A não consegue transmitir para um nó B por estar no raio de alcance de um nó C, que por sua vez, está realizando uma transmissão para um nó D, como mostra a Figura 2.10. Ou seja, uma transmissão que em nada atrapalharia a outra, deixa de ser realizada, o que causa a subutilização do meio.

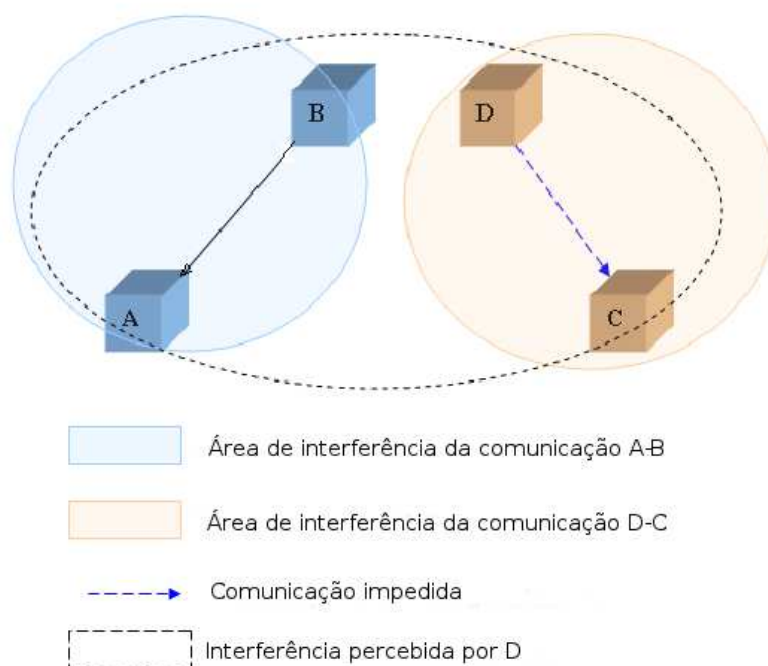


Figura 2.10: Problema do nó exposto.

2.4.3 Funções de coordenação da camada MAC

A camada MAC do 802.11 especifica dois mecanismos para acessar o meio sem fio: o DCF (*Distributed Coordination Function*) e o PCF (*Point Coordination Function*). O DCF é o mecanismo obrigatório e todos os dispositivos compatíveis com o padrão 802.11 devem implementá-lo. É um esquema de acesso compartilhado e aleatório baseado na disputa de canal que implementa a técnica CSMA/CA. No DCF, todos os nós podem utilizar igualmente o meio desde que entrem na disputa. A Figura 2.11 mostra as etapas

para acessar o meio usando o DCF e PCF.

O PCF é um mecanismo de acesso centralizado, que além de bastante complexo, não é obrigatório e por esses motivos não é implementado na grande maioria dos produtos disponíveis. No PCF, existe um ponto central que determina quais nós poderão utilizar o meio em um determinado momento. Este ponto central, normalmente, é o ponto de acesso. Os pontos de acesso também estão presentes nas redes que utilizam o DCF, no entanto, no modo DCF, o ponto de acesso é apenas mais um nó, com a diferença de que todas as mensagens devem passar por ele e que, comumente, faz ponte com uma rede externa.

O PCF também faz uso do DCF, já que o seu ciclo é dividido em dois períodos: o período livre de disputa (CFP - *Contention Free Period*) e o período de disputa (CP - *Contention Period*). O PCF utiliza *polling*, os nós que são capazes de responder ao *poll*, notificam o ponto de acesso, que depois, pergunta a cada estação se elas desejam transmitir. É por essa razão que uma rede *ad-hoc* não pode utilizar PCF, pois a figura do ponto de acesso inexistente nessa configuração. O PCF é vantajoso para aplicações que requerem qualidade de serviço (como voz e vídeo) pois é capaz de garantir um patamar de latência. O PCF não foi utilizado neste trabalho, maiores detalhes sobre o seu funcionamento podem ser em [23]

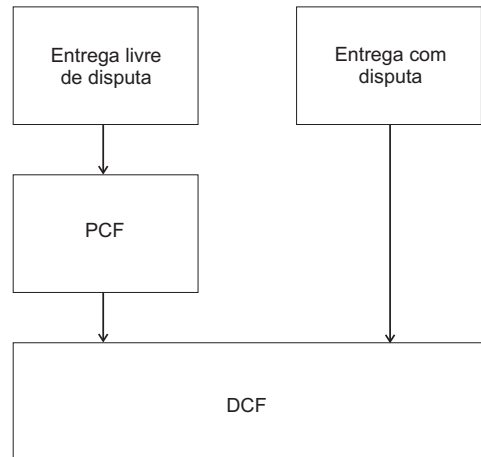


Figura 2.11: PCF e DCF.

O acesso ao meio é definido através de intervalos de tempo entre quadros. Dependendo do intervalo, os nós transmitem determinados tipos de quadros. Em [23] estão definidos quatro intervalos que são utilizados para prover níveis de prioridade entre os nós. Os intervalos estão listados em ordem crescente.

- SIFS - *Short Interframe Space*
- PIFS - *PCF Interframe Space*
- DIFS - *DCF Interframe Space*
- EIFS - *Extended Interframe Space*

O SIFS é utilizado como um divisor entre quadros de dados, quadros especiais e o quadro ACK. É o menor de todos os intervalos, e tem a mais alta prioridade na rede. O PIFS é utilizado no PCF para o ponto de acesso obter o acesso ao meio antes de todas as outras estações e é definido pela equação $PIFS = SIFS + Slot$. O DIFS é o tempo usado para os nós iniciarem uma transmissão e é definido pela equação $DIFS = SIFS + 2.Slot$. O EIFS é utilizado quando se recebe um quadros que contém erros e é definido pela

equação $EIFS = SIFS + DIFS + ACKTxTime$. $ACKTxTime$ é o tempo necessário para enviar uma mensagem ACK na taxa mais baixa possível. Como um intervalo SIFS é menor do que um intervalo DIFS nenhuma outra estação é capaz de detectar o meio livre antes da transmissão atual terminar, ou seja, antes de o transmissor receber o ACK do receptor.

No DCF, antes de o nó transmitir um quadros, o canal é monitorado até o nó perceber que o canal está ocioso por um DIFS, o nó inicia o processo de *backoff* (ou recuo) que consiste em escolher um valor aleatório para a janela de *backoff* (ou janela de contenção). Esta janela é decrementada de um a cada *slot* de tempo ocioso até atingir o valor zero. Durante a contagem, se o meio ficar ocupado, a contagem é congelada e retomada do ponto de onde parou. Neste momento, se o meio estiver ocioso, o nó inicia a sua transmissão. Caso contrário, o nó executa o algoritmo de *backoff* novamente. Esse processo é repetido algumas vezes antes de o nó desistir de transmitir o quadros. Todo o processo é ilustrado na Figura 2.12.

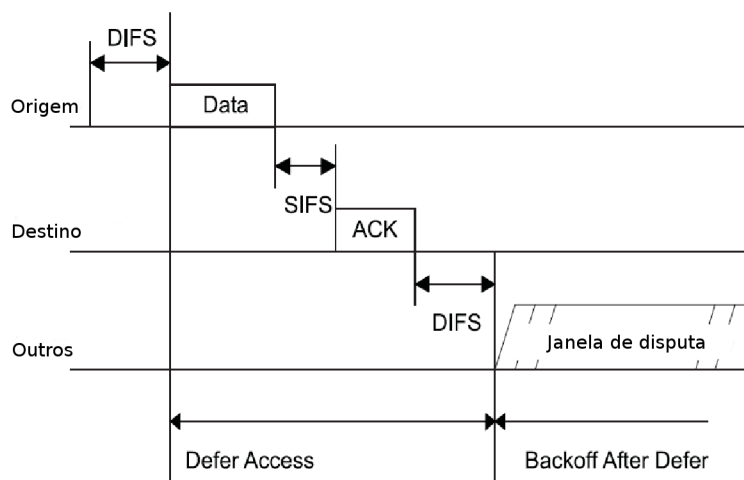


Figura 2.12: Mecanismo de Acesso Básico.

O valor para a janela de backoff é escolhido aleatoriamente a partir do intervalo $[0, CW - 1]$. Inicialmente, $CW = CW_{min}$. O valor de CW_{min} varia de acordo com a camada

Tabela 2.2: Valores de CW_{min} , CW_{max} , SIFS, DIFS e *slots* de tempo para as camadas físicas FHSS, DSSS e OFDM.

Camada Física	CW_{min}	CW_{min}	SIFS (μs)	DIFS (μs)	Slot (μs)
FHSS	15	1023	28	128	50
DSSS	31	1023	10	50	20
OFDM (20MHz)	15	1023	16	34	9
OFDM (10MHz)	15	1023	32	58	13
OFDM (5MHz)	15	1023	64	106	21

física utilizada e geralmente não podem ser mudados, mas alguns roteadores possibilitam a configuração desses valores. A cada tentativa de retransmissão, o nó deve dobrar o valor . Essa operação é repetida até o valor atual de CW atingir CW_{max} , que também é definido de acordo com a camada física. Ao final de uma transmissão bem-sucedida, CW é igualado a CW_{min} . A Tabela 2.2 mostra os valores típicos para CW_{min} , CW_{max} , SIFS e DIFS e *slots* de tempo para as camadas físicas do 802.11.

No DCF, as transmissões podem ocorrer de duas formas. A forma padrão é conhecida como DATA/ACK. Nesse modo, após a disputa, os quadros de dados são enviados e confirmados com uma mensagem ACK. Assim que um quadros é enviado, o transmissor inicia um contador interno chamado ACKTimeout que é o tempo máximo de espera pela confirmação do recebimento. Logo após o recebimento bem sucedido do quadros, o nó destino espera um SIFS para enviar o ACK.

A outra forma de enviar quadros é utilizando o RTS/CTS (Figura 2.13), também conhecido como *four-way handshake* que utiliza dois quadros especiais para negociar as transmissões, o RTS (*Request-To-Send*) e o CTS (*Clear-To-Send*). Esses quadros são trocados antes da transmissão efetiva dos dados. Após a disputa pelo meio, o nó envia um RTS para o nó destino, que deve ser respondido com um CTS. Somente após a troca bem sucedida dessas mensagens, é que o quadros de dados é enviado. Quando o RTS não é

respondido, o nó assume uma colisão e executa novamente o algoritmo de *backoff*. Assim que os demais nós detectam um RTS, a variável NAV (*Network Allocation Vector*) é configurada. Esta variável contém o tempo estimado da transmissão (que é extraído do quadros RTS) e previne que outros nós, que não a fonte e o destino, utilizem o meio.

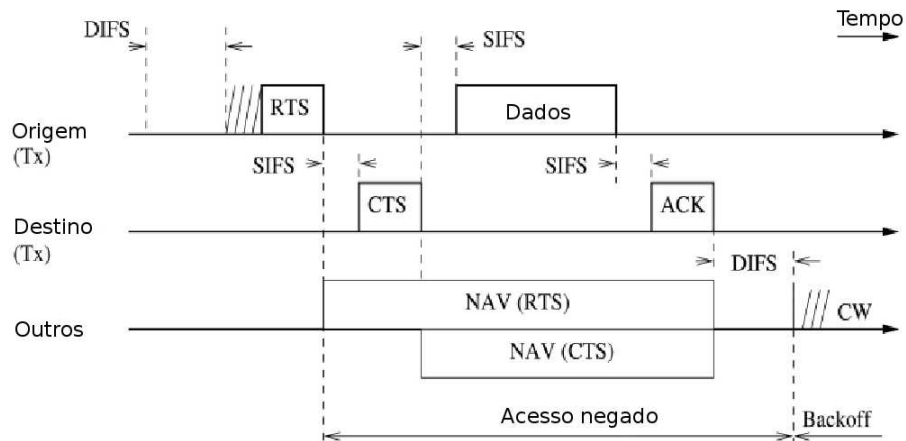


Figura 2.13: Mecanismo RTS/CTS.

A vantagem desse modo é evitar que quadros de dados sejam perdidos e causem impacto na performance da rede, já que os dados teriam que ser retransmitidos e esses quadros são muito maiores que os quadros RTS e CTS. O RTS/CTS não é habilitado por padrão, o administrador deve configurar um limiar chamado *RTSThreshold*, que é o tamanho mínimo de quadros a partir do qual este modo será utilizado, no entanto, existe um *trade-off* entre a vazão e o *RTSThreshold*. O RTS/CTS só é vantajoso a partir de um determinado tamanho de quadros, fator também dependente do tipo de tráfego da rede. Se bem ajustado, é possível aumentar o desempenho do sistema, pois o tempo desperdiçado em uma colisão é diminuído quando mensagens longas são enviadas já que os quadros só serão transmitidos quando a confirmação do destinatário (CTS) for recebida corretamente pelo remetente. Quando este mecanismo é utilizado, as colisões só acontecem com quadros RTS.

Independentemente de se utilizar DATA/ACK ou RTS/CTS, nas configurações BSS ou IBSS, mas desde que se utilize o DCF, o acesso ao meio será determinado através de uma janela de *backoff* e de intervalos de tempo pré-definidos (SIFS, PIFS, DIFS).

Na literatura é possível encontrar diversos estudos dedicados a avaliação de desempenho da camada MAC [6, 71, 21, 61, 7, 10] através de modelos matemáticos e/ou simulação. Nesses trabalhos, os autores consideram as técnicas de acesso DATA/ACK ou RTS/CTS sob o mecanismo de acesso DCF. Os autores afirmam que a performance dessas redes depende do tamanho mínimo da janela de *backoff* e em alguns casos da quantidade de nós.

O mecanismo padrão de *backoff* das redes 802.11 beneficia os nós que transmitiram mais recentemente pois sua janela de *backoff* CW está com o valor CW_{min} . Portanto, os nós que sofrem com colisões são bastante prejudicados e se o número de nós que desejam transmitir for muito grande, estes podem levar muito tempo para conseguirem o acesso ao meio. O congelamento da contagem quando um outro nó começa a utilizar o meio previne que os demais nós sofram de inanição.

2.4.4 Estrutura dos quadros

Um quadros de dados é mostrado na Figura 2.14. O campo *Frame Control* tem o tamanho de dois *bytes* e é dividido em 11 subcampos. Os campos *type* e *subtype* determinam de qual tipo é o quadros. Os campos *ToDS* e *FromDS* indicam de onde ou para onde um quadro está sendo transmitido. O campo *Retry* indica se aquele quadros é uma retransmissão. O campo *Power Management* indica se aquele nó entrará em modo de economia de energia após a conclusão da transmissão e o campo *WEP* indica se a função de encriptação WEP (*Wireless Equivalent Privacy*) está sendo utilizada.

O campo *Duration* contém o valor do NAV em microssegundos. quadros de difusão

broadcast tem duração 0 (zero) e não são confirmados pelos receptores. Nos períodos livre de disputa, a duração dos quadros é ajustada para 32678. Todos os nós devem monitorar esse campo de todos os quadros e atualizar os seus valores de NAV, se for o caso.

Podem existir até quatro campos de endereço de 48 *bits* em um quadros MAC. O *Destination Address* contém o destino final, aquele nó que vai encaminhar o conteúdo do quadro de dados até as camadas superiores. O *Source Address* identifica o nó que originou a transmissão. O campo *Receiver Address* indica o nó que vai processar o quadros, mas que não é seu destino final como no caso de um nó em uma rede cabeada. Nesse caso, o *Receiver Address* seria a interface sem fio do ponto de acesso. O *Transmitter Address* é utilizado somente no modo *bridge*. O campo *Basic Service Set ID* identifica as diferentes redes sem fio coexistentes em uma mesma área. O campo *Sequence Control* contém o número de sequência e também é usado para desfragmentação e descarte de quadros repetidos. O campo *Frame Body* contém os dados propriamente ditos. Podem ter uma carga útil de até 2304 *bytes*, mas as implementações devem suportar quadros de até 2312 *bytes* para acomodar o WEP. A Figura 2.14 ilustra um quadro MAC.

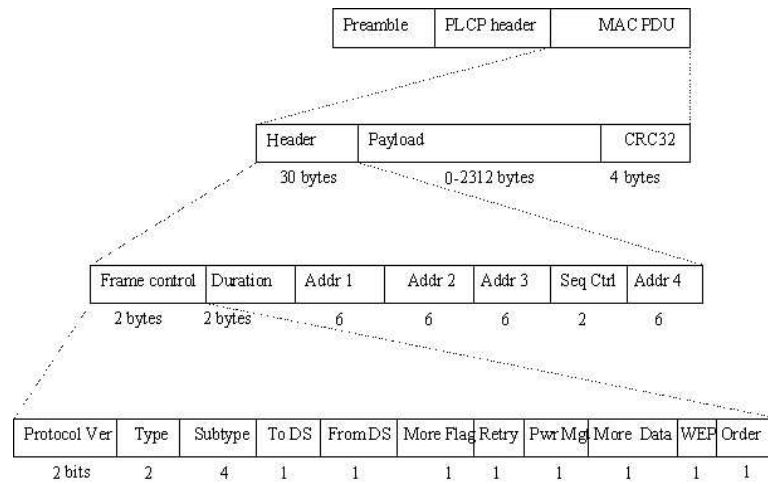


Figura 2.14: Quadros do MAC do 802.11

3 PROPOSTA DE TRABALHO

Na Seção 2.4, foi mostrado o funcionamento básico e alguns problemas inerentes a camada MAC do padrão 802.11. Neste capítulo é descrita uma proposta para otimizar alguns parâmetros da camada MAC visando melhorar a qualidade da fala em sistemas VoIP.

O objetivo deste trabalho é fazer um estudo profundo da camada MAC e otimizá-la para que tenhamos melhorias significativas nos parâmetros chave que compõem a qualidade de uma chamada VoIP em uma rede em malha. Para isso, iremos quantificar o impacto de parâmetros cruciais da camada MAC na qualidade da fala.

Como já mencionado anteriormente, as redes 802.11 não foram projetadas para tráfego de tempo real e não são capazes de atender a determinadas restrições impostas por este tipo de aplicação.

3.1 Classificação, priorização de tráfego de tempo real e janelas de *backoff* diferenciadas

As redes 802.11 são capazes de suportar chamadas VoIP com relativa qualidade, no entanto, com o aumento do número de usuários, a qualidade fica comprometida porque a disputa pelo meio se torna mais intensa e a probabilidade de perda de um quadro aumenta.

A abordagem mais natural para fazer com que o tráfego de tempo real não sofra descartes e, por conseguinte, não tenha a sua qualidade comprometida é priorizá-lo. Na camada MAC, essa priorização pode ser feita criando-se filas especiais apenas para esse tipo de tráfego ou fazendo com que a janela de *backoff* seja mais flexível.

No entanto, quando se prioriza uma classe de tráfego em detrimento de outra é possível que a classe preterida nunca consiga acesso ao meio. Mas, como nos experimentos realizados neste trabalho não houve injeção de nenhum outro tipo de tráfego, essa não é uma preocupação.

A classificação do tráfego é feita assim que o fluxo de dados VoIP chega na camada MAC, a partir daí, esse fluxo passa por uma série de funções diferenciadas especialmente para tratar esse tráfego. Mais detalhes a respeito da classificação do tráfego VoIP são mostrados no Capítulo 4.

Em uma rede com muitos usuários, a probabilidade de perda de pacotes aumenta porque o meio se torna mais disputado e também por causa da interferência que os nós causam entre si, e a cada transmissão mal-sucedida, a janela de *backoff* é dobrada. Isso faz com que alguns quadros sejam descartados no receptor por terem sido enviados quando já não podiam ser reproduzidos.

A diferenciação do tráfego será feita assim que o fluxo de dados for repassado a camada MAC. Daí em diante, todo o tráfego VoIP será tratado por funções diferenciadas.

A priorização do tráfego é feita através da diferenciação da janela de *backoff* por ser uma maneira flexível, já que é possível configurar em cada nó o tamanho da janela de *backoff*. A diferenciação é feita nos tamanhos mínimos e máximos de CW . Um fluxo de tráfego de tempo real que tem valores menores de CW_{min} consegue acesso ao meio de forma prioritária, conforme mencionado na Seção 2.4. Como já discutido em [61], a

influência do valor de CW_{max} pode ser desconsiderada.

Originalmente, os valores de CW fazem parte de uma sequência de potências de 2. Os experimentos realizados utilizam a mesma ideia para o valor inicial de CW_{min} . O valor de CW_{max} é mantido fixo mas é grande o suficiente para que a transmissão não seja descartada pelos motivos explicados anteriormente. Os valores de CW_{min} são sempre definidos antes do experimento começar.

A forma de incremento da janela de *backoff* também foi modificada. O algoritmo original de incremento, chamado de BEB (*Binary Exponencial Backoff*), é o grande responsável pelo impacto negativo nas retransmissões. Em vez de utilizar o algoritmo original, propomos um simples incremento de um no intervalo onde será escolhido o novo valor de CW . Dessa forma, mesmo após sucessivas retransmissões, o nó será menos prejudicado do que seria se estivesse sob o algoritmo original. Como mostrado em [71, 6, 34], adaptações desse tipo podem aumentar a vazão da rede de forma significativa, que é um fator que também contribui para a melhora das chamadas VoIP.

3.2 Diminuição do número máximo de tentativas de retransmissão

Quando um quadro não é recebido corretamente, é retransmitido L_{retry} vezes, somente depois dessas tentativas é que o quadro é considerado perdido. A cada tentativa de transmitir o quadro corretamente, o nó deve se submeter ao algoritmo de *backoff*. O valor típico de L_{retry} é 7 [23]. No pior caso, um nó transmite um quadro que contém tráfego VoIP 7 vezes e quando este alcança o destino pode ser descartado pelo buffer de compensação de *jitter* pois o momento em que este quadro deveria ser reproduzido já passou. O comportamento desse nó pode acarretar um efeito em cascata nos outros nós, pois ao final, quando o quadro for descartado, toda a utilização do meio terá sido em vão

e somente atrapalhou os outros nós.

Inicialmente, a ideia era subordinar uma retransmissão ao tempo restante para que o quadro fosse descartado pelo buffer de jitter. Ou seja, o quadro só seria retransmitido se houvesse tempo suficiente para que ele chegasse ao destino e fosse reproduzido pela aplicação. Essa ideia foi abandonada ainda na fase do levantamento das fragilidades da camada MAC por ter se mostrado ineficiente porque o *buffer* de jitter ao qual nos referimos está no receptor e além de gerar tráfego extra na rede, o custo para enviar um quadro, mesmo se utilizando um quadro especial, é muito alto pois este quadro teria que competir pelo meio como qualquer outro. Ainda, no pior caso, o quadro que serviria somente para autorizar o reenvio de um quadro de dados poderia ser perdido e entrar no processo de retransmissão até ser descartado pelos motivos já expostos em seções anteriores.

Outra ideia abandonada ainda na fase de estudos, foi a de eliminar as mensagens ACK para transmissões de quadros VoIP. No entanto, eliminar mensagens de confirmação é uma mudança muito profunda na camada MAC. Então a ideia passou a ser enviar as mensagens ACK apenas para alguns quadros, por exemplo, de cinco em cinco. Essa solução se mostrou um pouco mais factível, porém, seria necessário algum mecanismo de sincronização para que os nós soubessem os momentos certos de receber e transmitir um ACK.

3.3 Diferenciação dos intervalos entre quadros

Os intervalos entre quadros coordenam o acesso ao meio de transmissão. O padrão 802.11 define quatro intervalos diferentes dos quais três são utilizados para determinar o acesso ao meio. Se variados, os intervalos entre quadros também podem ser utilizados para criar níveis de prioridade. Os intervalos entre quadros são períodos de tempo in-

dependentes da taxa de transmissão, mas que variam de acordo com a camada física. O 802.11e também se utiliza de intervalos entre quadros diferenciados porém de forma mais complexa.

Os nós VoIP terão o seu DIFS diferenciado, porém este valor deve ser maior do que o SIFS afim de evitar colisões entre as mensagens de controle e quadros de dados porque imediatamente após um SIFS não há disputa.

3.4 Trabalhos relacionados

Há diversos trabalhos existentes que se dedicam aos mais diversos tipos de otimizações em redes em malha sem fio. O mais comum são otimizações através de modelos matemáticos e/ou simulações. As otimizações apresentadas nesse trabalho é baseada em um estudo dos pontos críticos da camada MAC e validada através de simulações.

A otimização da performance de voz sobre IP em redes em malha sem fio ainda é um ponto em que os trabalhos são relativamente escassos. A grande maioria dos trabalhos avalia a performance da rede como um todo e não apenas um determinado serviço e quando o fazem utilizam apenas a vazão como métrica. É o caso de [17] em que os autores apresentam otimizações para redes em malha visando o QoS utilizando diversas técnicas como agregação de pacotes, compressão de cabeçalho e mobilidade. Os autores, no entanto, utilizam um cenário muito simplista pois não consideram os problemas de canais com erros.

Em [27], os autores estudam o problema de VoIP em redes em malha considerando aspectos como roteamento e controle de admissão de ligações (CAC) em uma rede 802.11a, o que difere deste trabalho que utiliza 802.11b. A semelhança com este trabalho é a utilização do fator R, no entanto, o fator R é utilizado apenas para obtenção do MOS.

Em [63] os autores apresentam uma solução híbrida para serviços de voz em redes 802.11. Essa solução é implementada utilizando-se os dois modos de operação do protocolo MAC: o DCF e o PCF. Essa solução se torna pouco reproduzível por utilizar o PCF, que por não ser um módulo obrigatório, não é comumente implementado nos dispositivos disponíveis no mercado.

O trabalho apresentado em [66] é um dos primeiros artigos sobre VoIP em redes em malha e faz um apanhado geral sobre a maioria dos problemas envolvidos. Os resultados já demonstram o potencial das redes em malha para VoIP. Porém, já há codecs que utilizam a banda disponível de forma muito mais otimizada que o G.711, como o G.729, que é utilizado neste trabalho.

O diferencial deste trabalho em relação aos supracitados é a utilização de uma métrica objetiva como o MOS e a utilização de modelos confiáveis tanto na camada MAC quanto na camada física. Além disso, a abordagem da importância de se seguir estritamente uma metodologia de simulação para a obtenção de resultados confiáveis.

4 METODOLOGIA

4.1 Credibilidade em Experimentos de Simulação

Um dos aspectos mais importantes em um estudo de simulação é utilizar modelos de simulação válidos e que contenham os níveis de detalhes desejados ou necessários. Segundo [29], a fase de planejamento de um estudo de simulação leva de 30% a 40% do tempo total. Um modelo válido para simulação de redes sem fio é um conjunto de parâmetros, suposições, limitações e características do sistema real. Este modelo também deve ser capaz de reproduzir os erros que existem no sistema real. Este processo deve ser feito com prudência para que erros de modelagem não sejam introduzidos no sistema a ser estudado.

Depois de modelar o sistema é necessário planejar os experimentos que serão conduzidos e definir os detalhes intrínsecos a um estudo de simulação, tais como fontes de aleatoriedade e análise dos resultados.

Os geradores de números pseudo-aleatórios (PRNG - *Pseudo Random Number Generator*) são de fundamental importância para qualquer estudo de simulação estocástica. Tratam-se de algoritmos responsáveis pela produção de ‘números aleatórios’ de entrada para o modelo de simulação. O PRNG escolhido deve garantir que o seu ciclo de números gerados seja logo o suficiente para evitar *bias* ou correlação. Hoje, com o poder

de processamento aumentando quase que diariamente, PRNGs com ciclos pequenos podem gerar um ciclo inteiro em alguns minutos [26]. A discussão sobre PRNGs é intensa, teóricos afirmam que os PRNGs podem impor restrições sob os números gerados. No entanto, há diversos avanços em PRNGs que usam técnicas avançadas, como o Mersenne Twister [33] e o MRG32k3a [68], cujos ciclos são $2^{19937} - 1$ e $\sim 2^{191}$ respectivamente. Uma discussão mais aprofundada sobre PRNGs pode ser encontrada em [30].

Uma preocupação é que os processos de simulação estocástica convirjam para um estado de equilíbrio, o estado estacionário. Teoricamente, o estado estacionário ocorre quando a quantidade de amostras tende ao infinito, mas na prática, existe um ponto em que se pode considerar que o sistema esteja em equilíbrio e os erros podem ser desprezados [36].

Exceto no caso de simulações regenerativas, os dados coletados durante o período de transiente não representam a média dos parâmetros produzidos pela simulação, portanto, não podem ser utilizados para produzir boas estimativas de parâmetros no estado estacionário. A determinação do tamanho do estado não-estacionário é desafiadora e motivo de intensa pesquisa. Uma subestimação do tamanho desse estado leva a *bias* na estimativa final. Já a superestimação descarta informações no estado estacionário e aumenta a variância do estimador.

Outra dificuldade é a natureza das observações da saída de um modelo. Observações coletadas durante simulações estocásticas típicas, normalmente, apresentam alta correlação. Negar a existência de correlação pode resultar em intervalos de confiança muito otimistas. Para uma discussão mais profunda dessas questões, consulte [42].

O último ponto a se levar em conta é determinar o fim da simulação assim que a precisão relativa ao tamanho do intervalo de confiança tenha sido atingida. Há uma dicotomia

natural porque precisamos de amostras suficientes para um determinado nível de precisão, no entanto, essa grande quantidade de amostras pode aumentar bastante o tempo de execução da simulação.

A fim de tornar a demanda computacional das simulações estocásticas mais amena é possível (i) projetar experimentos que não necessitem de muitas observações; isto pode ser alcançado por meio de técnicas de redução da variância que visam aumentar a eficiência estatística de um estudo de simulação utilizando-se métodos estatísticos que reduzem a variância dos estimadores ou (ii) dedicar mais recursos computacionais através de replicações paralelas. Neste trabalho, a segunda opção foi a escolhida, mais detalhes na subseção 4.2.

4.2 Métricas e ambiente de avaliação

As modificações propostas no Capítulo 3 serão avaliadas através de simulação utilizando o simulador de eventos discretos *Network Simulator 2 (ns-2) release 31*. O ns-2 tem o seu núcleo escrito em C++ e utiliza *scripts* em linguagem TCL para a construção dos cenários. Além disso, é um programa de código aberto e que possui intenso desenvolvimento da comunidade acadêmica através de melhorias dos modelos existentes e novas propostas de diversos protocolos.

Dois outros fatores motivaram a escolha de simulação. O primeiro é que nas camadas inferiores a divisão entre *hardware* e *software* não é clara, o que faz com que modificações que tivessem que ser feitas em *hardware* se tornassem inviáveis. A segunda razão é que simulação permite o controle total sobre o ambiente que está sendo estudado. Assim, podemos introduzir pequenas mudanças e avaliá-las mais precisamente.

Para atender aos aspectos de credibilidade mencionados na Seção 4.1, utilizou-se o

aplicativo akaroa-2 [4]. O akaroa-2 confere ao ns-2 capacidade de realizar simulações confiáveis e eficientes. Ele provê heurísticas para detectar a partir de que amostras se chegou ao estado estacionário (e descarta o transiente), utiliza o gerador MRG32k3a e elimina correlação por meio da técnica de análise espectral. Além disso, permite a simulação em paralelo do modelo com sequências de números aleatórios independentes.

A análise espectral é uma forma de estimar o tamanho do intervalo de confiança ($Var(\bar{X}(n))$), processo conhecido como CIP (*Confidence Interval Procedures*). O akaroa-2 gera as amostras a partir de várias instâncias independentes do simulador (técnica conhecida como MRIP (*Multiple Replication In Parallel*) [37, 13], essas amostras são passadas a um processo central (*akmaster*) que as trata e para a simulação caso as condições de confiabilidade tenham sido atingidas.

A duração dos experimentos é determinada pelo Akaroa-2, que só termina a simulação quando os parâmetros pré-determinados são alcançados. O nível de confiança e a precisão relativa foram de 95% e 0,05, respectivamente.

Para a utilização neste trabalho, o Grupo de Redes de Computadores e Multimídia desenvolveu um intenso trabalho com o ns-2 através da compilação de diversos *patches* que incluíam, principalmente, melhorias na camadas física, MAC e de rede do simulador. Um complemento em forma de *patch* para o ns-2.31 contendo todas as extensões mencionadas aqui (aplicação VoIP com suporte ao cálculo do MOS, o modelo de *shadow-fading*, o algoritmo de adaptação de taxas ARF e a interferência cumulativa, o akaroa-2) está disponível em [20].

Diversos trabalhos na literatura apresentam fortes indícios de não possuírem confiabilidade estatística, o que pode comprometer severamente os resultados. Um erro comum nesses trabalhos é utilizar simulações de horizonte finito, com número fixo de amostras

e com duração pré-determinada. Se o número de amostras não for grande o suficiente, todas as amostras podem corresponder apenas ao período de transiente e, portanto, não podem ser utilizadas como amostras.

Além de destacar o aspecto estatístico, este trabalho reforça a necessidade de se utilizar modelos confiáveis em simulações de rede sem fio. Na literatura, a grande maioria dos trabalhos utiliza modelos de propagação determinísticos como o *Free Space* e o *Two-ray Ground*. Ambos os modelos assumem que há visada direta entre o transmissor e o receptor, o que nem sempre é verdade em ambientes urbanos. Apesar de o modelo *Two-ray Ground* ser mais preciso que o *Free Space* ambos falham em caracterizar de forma realística *backbones* em malha em ambientes urbanos. O impacto de modelos de propagação pouco realistas nos resultados pode ser visto em [47, 48, 38, 39].

De acordo com [22], a implementação padrão do modelo Shadowing no ns-2 é aplicada incorretamente pois cada quadro é recebido com diferentes valores de degradação da potência, assim o modelo deixa de ser estocástico e não representa as oscilações temporais na qualidade do canal. Em [35], o modelo é corrigido e incorporado na versão do ns-2 utilizada nos experimentos.

Para avaliar as chamadas VoIP no ns-2, utilizamos uma implementação de chamadas VoIP em conjunto com uma implementação do Modelo-E. O cenário utilizado foi um *backbone* em malha com 9 roteadores dispostos em grade e equipados com antenas omnidirecionais de 8.0 dBi, conforme mostra a Figura 4.1. Cada roteador está separado um do outro por 50 metros. Em nossas simulações o algoritmo para seleção automática de taxa de transmissão foi o ARF, o cômputo das interferências foi cumulativo, o modelo de recepção (responsável pela simulação de descarte de quadros) foi baseado em *thresholds* variáveis (um para cada taxa de transmissão), detalhes destas implementações no ns-2,

consultar [35].

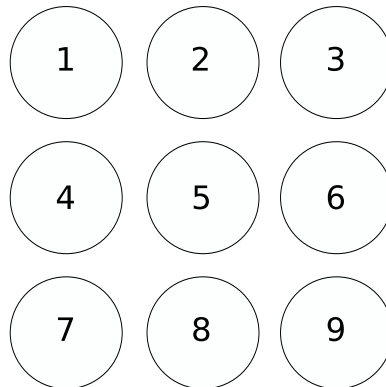


Figura 4.1: Cenário onde as chamadas foram realizadas

As chamadas VoIP foram modeladas com tráfego CBR ON/OFF, com os períodos de fala representados pelo ON e os períodos de silêncio representados pelo OFF, configuradas para emular uma chamada com as características do codificador G.729 por apresentar um baixo consumo de banda (8 Kbps). As chamadas tem 30 segundos de duração, com *buffer* de compensação de *jitter* estático de 100ms. O protocolo de roteamento escolhido foi o AODV devido a sua maturidade e por ser bastante utilizado em várias redes em malha em funcionamento atualmente. A escolha do AODV também foi baseada no trabalho [47] que mostra que a estratégia de roteamento reativa (representada pelo AODV) é superior a pró-ativa (representado pelo OLSR) em um cenário similar ao apresentado neste trabalho.

No total, serão realizadas 12 rodadas de experimentos como mostrado na Tabela 4.2. Em cada rodada, o número de chamadas VoIP será 2, 4, 6 e 8 com os nós escolhidos ao acaso. De cada uma das chamadas serão coletados o MOS, perda e atraso. Essas três variáveis são passadas ao akaroa-2 para que este garanta a confiabilidade estatística dos resultados. O MOS foi calculado a partir do “Modelo E estendido” e seu valor de tolerância mínimo considerado foi de 3.5. Uma discussão completa do procedimento de cálculo do MOS pode ser verificada em[16]. Em nosso estudo de caso, supomos chamadas

Tabela 4.1: Projeto de experimentos.

Número de chamadas	CW_{min}	CW_{max}	SIFS (μs)	L_{retry}
2	15	1023	5	3
4	31	1023	5	3
6	63	1023	5	3
8	127	1023	5	3
2	15	1023	5	5
4	31	1023	5	5
6	63	1023	5	5
8	127	1023	5	5
2	15	1023	5	7
4	31	1023	5	7
6	63	1023	5	7
8	127	1023	5	7

feitas do backbone para a Internet e estamos interessados em medir a qualidade da voz na saída do backbone (nó *gateway* 1). O valor de SIFS é modificado apenas uma vez pois o seu valor original já é muito baixo como mostrado na Tabela 2.2. No entanto, quando se modifica o valor de SIFS, por consequência se modifica todos os outros intervalos. São utilizados três valores diferentes para L_{retry} , 3, 5 e 7. Como o incremento de CW_{min} é unitário e o valor de CW_{max} permanece o mesmo, todas as retransmissões são causadas por L_{retry} , pois CW_{max} nunca é alcançado.

Na Tabela 4.2 estão os parâmetros utilizados para a realização das chamadas VoIP no ns-2 em todos os cenários. O tempo de duração da chamada é 30 unidades de tempo do ns-2.

A extensão 802.11b (11 Mbps) foi utilizada neste trabalho porque ainda não houve o mapeamento da camada física para o algoritmo de adaptação de taxa para a extensão 802.11g. Todos os cenários utilizam preâmbulo curto e taxa de transmissão básica de 2Mbps para as mensagens de controle.

Em todos os experimentos só há tráfego VoIP. Nenhum outro tipo de tráfego foi inje-

tado na rede afim de que possamos mensurar nos parâmetros coletados somente o impacto das modificações propostas.

O modelo de propagação utilizado foi o modelo de Rice com *path loss exponent* $\alpha = 2.7$. Esse valor de α foi obtido a partir da Tabela 2.3.2 apresentada em [49] e que define os valores de α para os mais diversos ambientes. A escolha do modelo de propagação foi baseada nos trabalhos [48, 38] que mostram o impacto das escolhas de parâmetros da camada física na camada de aplicação. A escolha do modelo de propagação depende do ambiente a ser modelado. O modelo Shadowing é capaz de modelar o cenário proposto, pois há diversas evidências de que os efeitos causados pelo *multipath fading* podem ser desconsiderados no nosso caso [19].

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção, os resultados são apresentados nas tabelas e gráficos a seguir. Para cada parâmetro avaliado são apresentadas a média, o tamanho da metade do intervalo de confiança δ , o número de amostras coletadas e o número de amostras que foram descartadas porque foram consideradas transiente.

5.1 Experimentos para $L_{retry} = 3$

Na Figura 5.1, os resultados obtidos são homogêneos e apresentam um comportamento de decréscimo do MOS conforme o número de chamadas simultâneas aumenta. Isso, de certa forma, é esperado, pois o canal se degrada conforme o número de usuários aumenta. As configurações que obtiveram os melhores desempenhos foram os cenários de duas chamadas simultâneas para todos os valores de CW_{min} , com exceção de $CW_{min} = 31$ para o ns-2 padrão. Para 4 chamadas simultâneas, todas as estimativas para o MOS estão acima de 3,5, o mínimo recomendado.

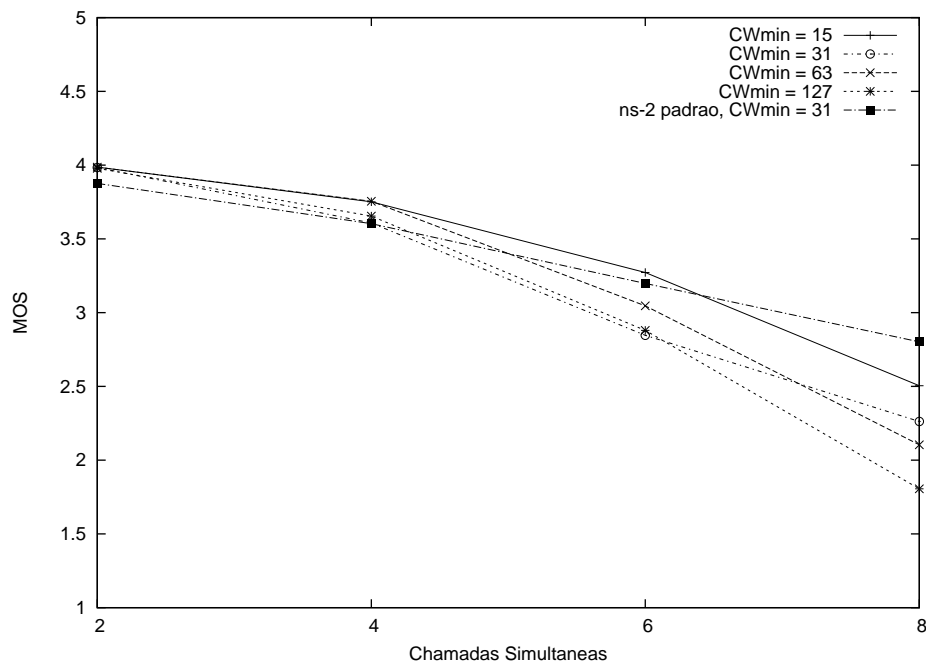


Figura 5.1: MOS para $L_{retry} = 3$

Para 6 e 8 chamadas simultâneas, nenhum dos valores do MOS está acima de 3,5, o que impõe restrições a serviços VoIP. O valor que mais se aproxima de 3,5 é 3,2, para 6 chamadas simultâneas e $CW_{min} = 15$. O usuário comum não consegue distinguir a diferença entre esses dois valores, e mesmo assim, é possível implementar um serviço VoIP em uma rede em malha ainda que com restrições. Para 8 chamadas simultâneas, o melhor resultado é obtido para o ns-2 padrão.

Para três cenários (2, 4 e 6 chamadas simultâneas), o melhor desempenho é obtido quando $CW_{min} = 15$. Isso se deve ao fato de que o tempo para o nó acessar o canal é diminuído pela metade em relação ao algoritmo original o que causa um aumento da vazão que, por sua vez, é refletido no MOS. Outra razão para esse desempenho é que após a primeira retransmissão, CW passa a valer 16 enquanto que, no segundo caso, passa a valer 32, e dessa forma continua até que o quadro seja descartado, ou seja, os quadros do primeiro caso terão mais prioridade do que os do segundo caso.

Entretanto, a diminuição no valor de CW_{min} nem sempre é benéfica para o desempe-

nho. Em todos os experimentos com 8 chamadas simultâneas (16 usuários) e $CW_{min} = 15$, os resultados não são favoráveis. Mas, quando o número de usuários é menor (2, 4 e 6 chamadas simultâneas; 4, 8 e 16 usuários, respectivamente), essa estratégia se mostra eficiente porque a janela de *backoff* é capaz de "acomodar" os usuários com valores distintos de CW , já que a probabilidade de 4 nós escolherem o mesmo valor para CW é pequena, mesmo quando o intervalo $[0, CW]$ é pequeno. O mesmo não acontece quando $CW_{min} = 15$ para 8 chamadas simultâneas, pois neste caso, tem-se 16 nós escolhendo um número aleatório de um intervalo que contém apenas 15 elementos, no mínimo dois nós escolherão o mesmo valor, o que resulta em colisões, e por conseguinte, retransmissões.

Na Figura 5.2, são mostradas as perdas para todos os valores de CW_{min} . O melhor desempenho (as menores taxas de perdas) é obtido quando $CW_{min} = 15$. Apesar de o ns-2 padrão também utilizar $CW_{min} = 31$, as suas taxas de perdas do primeiro são mais elevadas por causa do algoritmo de *backoff* original e também por causa do intervalo SIFS, que é menor. Para 2 chamadas simultâneas, as taxas de perdas são bastante parecidas, com exceção do ns-2 padrão. Para 4 chamadas simultâneas, o ns-2 padrão apresenta uma grande discrepância dos demais valores. A consequência dessa diferença pode ser vista na Figura 5.1 em que o $MOS = 3.6$.

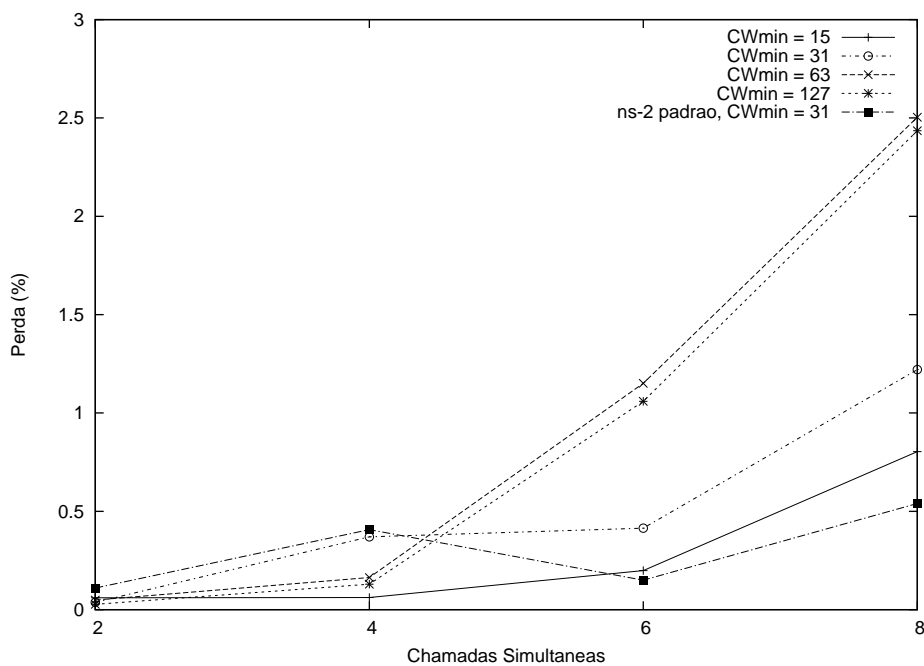


Figura 5.2: Perda para $L_{retry} = 3$

A taxa de perdas para os cenários em que $CW_{min} = 63$ e $CW_{min} = 127$ são muito parecidas e crescem rapidamente conforme o número de chamadas aumenta. No entanto, o crescimento mais agressivo é para o cenário em que o ns-2 padrão é utilizado.

Mesmo quando CW_{min} é grande o suficiente como nos casos em que $CW_{min} = 63$ e $CW_{min} = 127$, as taxas de perdas são as maiores porque o tempo que os nós esperam pra poderem transmitir é muito alto, o que faz com que os quadros sejam descartados pelo destinatário. Esse fato também é o motivo para os atrasos apresentados na Figura 5.3.

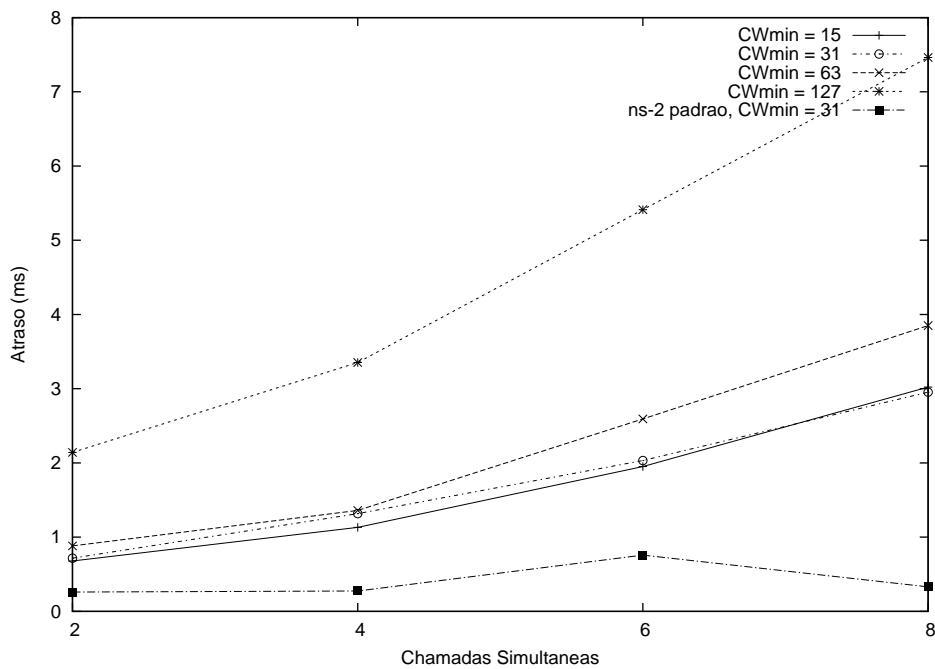


Figura 5.3: Atraso para $L_{retry} = 3$

O menor atraso para todos os cenários é obtido para o ns2-padrão. Esse comportamento compensa as altas taxas de perda e é por esse motivo que o MOS para esse cenário apresenta valores razoáveis.

O atraso para os cenários em que $CW_{min} = 15$ é maior do que o atraso para o cenário com o ns-2 padrão por causa das retransmissões causadas pelas colisões.

O atraso para $CW_{min} = 15, 31, 63$ são praticamente os mesmos mas com pequenas variações. Para $CW_{min} = 15$, o atraso é maior do que para o ns-2 padrão, isso acontece porque há mais retransmissões para o primeiro caso do que para o segundo. O pior resultado acontece no cenário em que $CW_{min} = 127$ porque os pacotes VoIP são descartados pela aplicação, pois o elevado atraso faz com que o tempo máximo para que os pacotes sejam reproduzidos pela aplicação se esgote. Nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 são mostrados os valores plotados nos gráficos.

Tabela 5.1: Resultados para $L_{retry} = 3$ com 2 chamadas simultâneas

CW_{min}	Params.	\bar{X}	δ	n
15	MOS	3.9	$11 \cdot 10^{-5}$	1356
	Perda (%)	0.06	$8.4338 \cdot 10^{-3}$	19782
	Atraso (ms)	0.67	$10.9102 \cdot 10^{-3}$	2020
31	MOS	3.9	$2.6143 \cdot 10^{-5}$	3305
	Perda (%)	0.03	$1.6127 \cdot 10^{-3}$	1452
	Atraso (ms)	0.71	$3.1992 \cdot 10^{-3}$	4320
63	MOS	3.9	$3.7396 \cdot 10^{-4}$	3231
	Perda (%)	0.04	$2.4788 \cdot 10^{-3}$	5690
	Atraso (ms)	0.88	$10.9762 \cdot 10^{-6}$	1416
127	MOS	3.9	$1.5122 \cdot 10^{-5}$	3410
	Perda (%)	0.02	$1.1148 \cdot 10^{-1}$	2190
	Atraso (ms)	2.14	$8.9562 \cdot 10^{-3}$	1320
ns-2 padrão	MOS	3.9	$1.2211 \cdot 10^{-5}$	2140
	Perda (%)	0.11	$83.3348 \cdot 10^{-2}$	1220
	Atraso (ms)	0.26	$10.92 \cdot 10^{-3}$	1192

Tabela 5.2: Resultados para $L_{retry} = 3$ com 4 chamadas simultâneas

CW_{min}	Params.	\bar{X}	δ	n
15	MOS	3.7	$28.1563 \cdot 10^{-1}$	2300
	Perda (%)	0.06	$22.4828 \cdot 10^{-3}$	3000
	Atraso (ms)	1.13	$7.9277 \cdot 10^{-4}$	3092
31	MOS	3.6	$4.7097 \cdot 10^{-2}$	3050
	Perda (%)	0.37	$2.0248 \cdot 10^{-7}$	3200
	Atraso (ms)	1.31	$6.9992 \cdot 10^{-3}$	1100
63	MOS	3.7	$1.1351 \cdot 10^{-3}$	2950
	Perda (%)	0.16	$1.4868 \cdot 10^{-2}$	2400
	Atraso (ms)	1.35	$10.3392 \cdot 10^{-3}$	2120
127	MOS	3.6	$11.4439 \cdot 10^{-1}$	2900
	Perda (%)	0.12	$18.22 \cdot 10^{-2}$	1800
	Atraso (ms)	3.35	$9.1212 \cdot 10^{-4}$	2202
ns-2 padrão	MOS	3.6	$3.9345 \cdot 10^{-6}$	2400
	Perda (%)	0.40	$28.9532 \cdot 10^{-3}$	2900
	Atraso (ms)	0.27	$6.3071 \cdot 10^{-3}$	2400

Tabela 5.3: Resultados para $L_{retry} = 3$ com 6 chamadas simultâneas

CW_{min}	Params.	\bar{X}	δ	n
15	MOS	3.2	$4.8022 \cdot 10^{-4}$	1584
	Perda (%)	0.19	$2.0272 \cdot 10^{-3}$	1296
	Atraso (ms)	1.95	$1.9127 \cdot 10^{-2}$	3446
31	MOS	2.8	$2.2859 \cdot 10^{-2}$	4196
	Perda (%)	0.41	$1.514 \cdot 10^{-2}$	1596
	Atraso (ms)	2.03	$5.8115 \cdot 10^{-4}$	1460
63	MOS	3.0	$10.5857 \cdot 10^{-3}$	1518
	Perda (%)	1.15	$8.777 \cdot 10^{-2}$	3030
	Atraso (ms)	2.59	$23.92 \cdot 10^{-4}$	1492
127	MOS	2.8	$1.1 \cdot 10^{-3}$	3220
	Perda (%)	1.05	$3.438 \cdot 10^{-6}$	1485
	Atraso (ms)	5.41	$1.92 \cdot 10^{-3}$	5492
ns-2 padrão	MOS	3.1	$9.33 \cdot 10^{-5}$	1200
	Perda (%)	0.15	$48.48 \cdot 10^{-3}$	3150
	Atraso (ms)	0.75	$4.1933 \cdot 10^{-3}$	3133

Tabela 5.4: Resultados para $L_{retry} = 3$ com 8 chamadas simultâneas

CW_{min}	Params.	\bar{X}	δ	n
15	MOS	2.5	$4.2353 \cdot 10^{-2}$	1560
	Perda (%)	0.80	$2.78924 \cdot 10^{-3}$	1560
	Atraso (ms)	3.02	$5.1569 \cdot 10^{-6}$	1452
31	MOS	2.2	$2.9631 \cdot 10^{-5}$	3060
	Perda (%)	1.22	$2.7938 \cdot 10^{-3}$	3060
	Atraso (ms)	2.95	$4.8943 \cdot 10^{-2}$	4500
63	MOS	2.1	$8.7617 \cdot 10^{-4}$	1400
	Perda (%)	2.50	$5.37179 \cdot 10^{-6}$	1480
	Atraso (ms)	3.8	$7.0330 \cdot 10^{-5}$	1512
127	MOS	1.8	$8.7617 \cdot 10^{-5}$	1488
	Perda (%)	2.43	$5.3719 \cdot 10^{-5}$	1432
	Atraso (ms)	7.46	$7.0330 \cdot 10^{-3}$	1603
ns-2 padrão	MOS	2.8	$0.16664 \cdot 10^{-1}$	1230
	Perda (%)	0.54	$0.07232 \cdot 10^{-1}$	1502
	Atraso (ms)	0.32	$1.20903 \cdot 10^{-2}$	1500

5.2 Experimentos para $L_{retry} = 5$

Na Figura 5.4, é possível observar que o cenário em que $CW_{min} = 31$ obteve os melhores resultados, exceto para 8 chamadas simultâneas, onde o melhor foi o ns2-padrão. Apesar de ambos utilizarem $CW_{min} = 31$, a diferença está no algoritmo de *backoff* e nos intervalos de tempo SIFS e DIFS. Essas alterações fazem com que a vazão aumente e a

avaliação da chamada seja favorecida. Diferentemente dos cenários avaliados na Seção anterior em que $L_{retry} = 3$, o aumento do número de retransmissões favoreceu o cenário em que CW_{min} apresenta valores maiores, haja vista os resultados para $CW_{min} = 15$ que foram os piores obtidos por causa da quantidade maior de retransmissões permitidas, fato que é evidenciado pelas diferenças no valor do MOS.

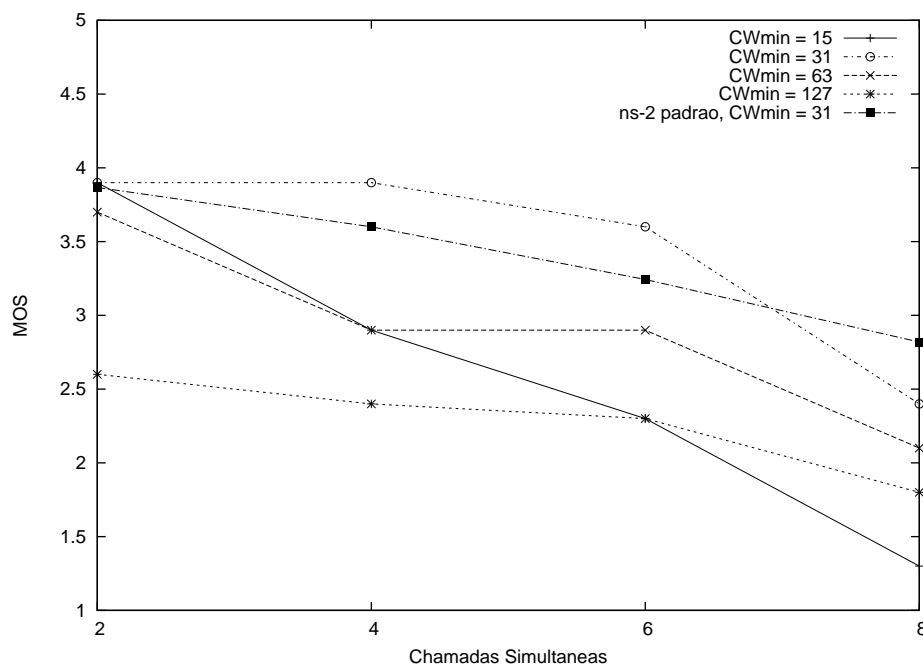


Figura 5.4: MOS do $L_{retry} = 5$

O resultado inesperado para essa rodada de experimentos foi o cenário em que $CW_{min} = 127$, que, apesar de apresentar valores abaixo do mínimo aceitável, ainda consegue apresentar um resultado melhor do que os cenários em que $CW_{min} = 15$ e $CW_{min} = 63$.

A explicação para a performance ruim do cenário em que $CW_{min} = 15$ pode também ser vista na Figura 5.5. Podemos ver que a partir de 4 chamadas simultâneas, a taxa de perdas cresce muito rapidamente. Para 6 chamadas simultâneas, isso acontece por causa da alta competição dos 12 nós pelo meio, o que resulta em colisão. O valor mais elevado de L_{retry} contribui de forma negativa porque um nó que terá os seus quadros descartados atrapalha os demais nós porque está utilizando o canal em vão. A menor taxa de perdas

é obtida quando $CW_{min} = 63$ porque mesmo com o aumento do número de usuários o intervalo $[0, CW]$ é grande o suficiente para que os nós escolham diferentes valores para a janela de *backoff*. No entanto, a baixa taxa de perdas e os atrasos também baixos (Figura 5.6) não são refletidos no valor do MOS. Nas Tabelas 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 são mostrados os valores plotados nos gráficos.

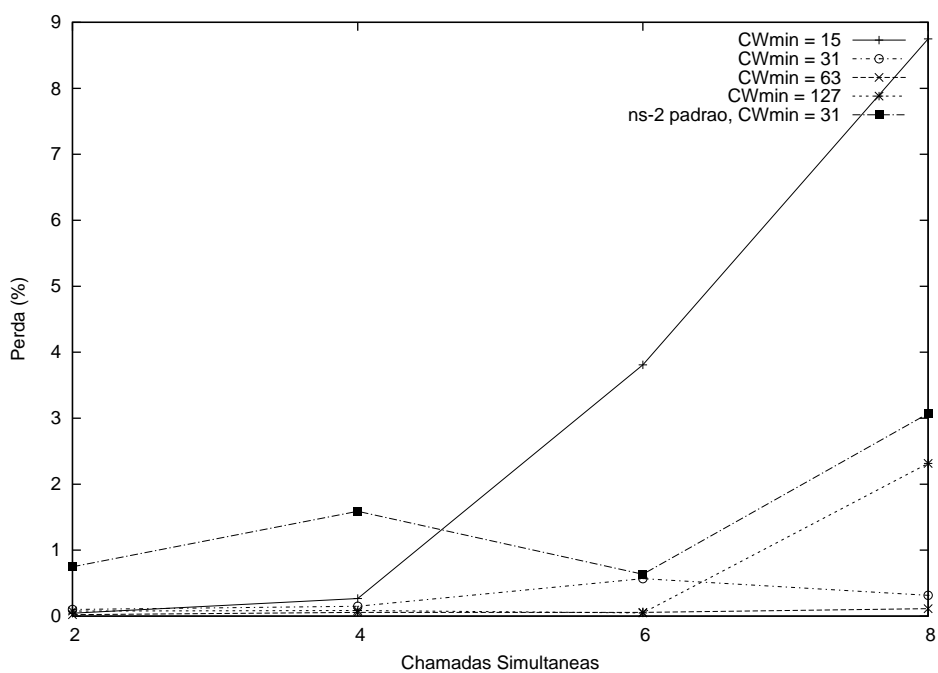


Figura 5.5: Perda do $L_{retry} = 5$

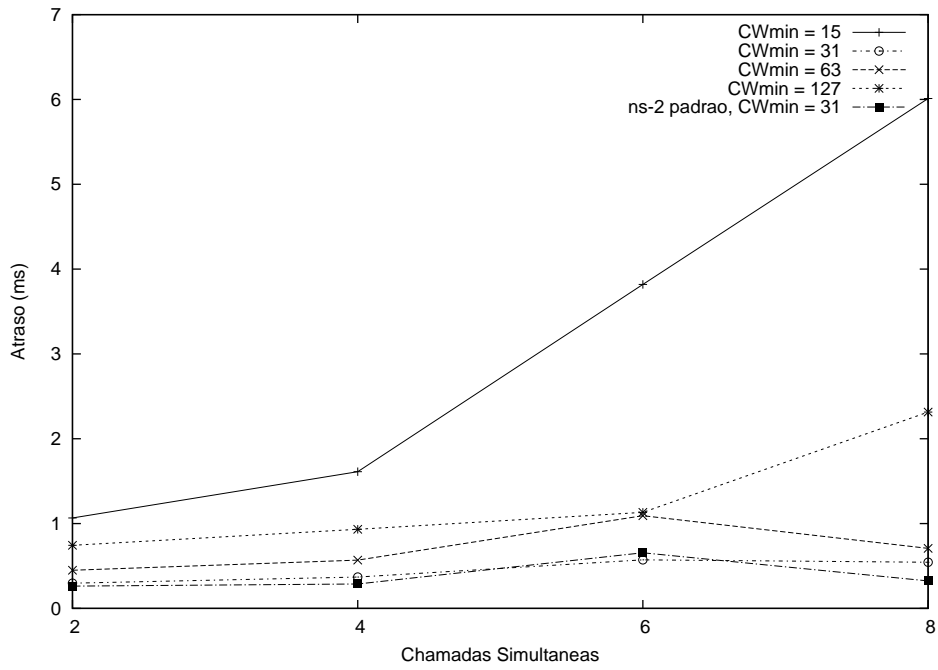


Figura 5.6: Atraso do $L_{retry} = 5$

Tabela 5.5: Resultados para $L_{retry} = 5$ com 2 chamadas simultâneas

CW_{min}	Params.	\bar{X}	δ	n
15	MOS	3.9	0.0302106	1600
	Perda (%)	0.04	0.0315876	1100
	Atraso (ms)	1.06	0.00257201	2192
31	MOS	3.9	$2.5153 \cdot 10^{-1}$	1340
	Perda (%)	0.10	0.0273953	1440
	Atraso (ms)	0.29	$2.36718 \cdot 10^{-3}$	1500
63	MOS	3.7	$1.82621 \cdot 10^{-2}$	1500
	Perda (%)	0.02	$1.93212 \cdot 10^{-3}$	1200
	Atraso (ms)	0.44	$1.81014 \cdot 10^{-3}$	1812
127	MOS	2.6	0.07215	2004
	Perda (%)	0.07	0.01282	1230
	Atraso (ms)	0.74	0.00332	3100
ns-2 padrão	MOS	3.8	0.04832	1200
	Perda (%)	0.74	0.01149	1500
	Atraso (ms)	0.26	0.002541	2092

Tabela 5.6: Resultados para $L_{retry} = 5$ com 4 chamadas simultâneas

CW_{min}	Params.	\bar{X}	δ	n
15	MOS	2.9	0.06119	1800
	Perda (%)	0.26	0.03808	1400
	Atraso (ms)	1.61	0.00023	4651
31	MOS	3.9	0.0243316	1542
	Perda (%)	0.14	0.0228864	1546
	Atraso (ms)	0.36	$9.50811 \cdot 10^{-4}$	1530
63	MOS	2.9	0.037701	1780
	Perda (%)	0.05	0.0208069	1600
	Atraso (ms)	0.56	$7.5367 \cdot 10^{-4}$	3192
127	MOS	2.4	0.07215	2034
	Perda (%)	0.08	0.01282	4189
	Atraso (ms)	0.93	$3.32 \cdot 10^{-3}$	3254
ns-2 padrão	MOS	3.6	0.04832	3390
	Perda (%)	1.58	0.01149	2176
	Atraso (ms)	0.28	0.06119	10170

Tabela 5.7: Resultados para $L_{retry} = 5$ com 6 chamadas simultâneas

CW_{min}	Params.	\bar{X}	δ	n
15	MOS	2.3	0.21882	3040
	Perda (%)	3.80	0.05875	2300
	Atraso (ms)	3.81	0.68534	3100
31	MOS	3.6	0.11046	2760
	Perda (%)	0.56	0.21275	3050
	Atraso (ms)	0.57	0.05595	1192
63	MOS	2.9	$0.10461 \cdot 10^{-5}$	6439
	Perda (%)	0.05	0.12431	1980
	Atraso (ms)	1.09	0.21660	8136
127	MOS	2.3	0.80043	4651
	Perda (%)	0.04	0.04114	1760
	Atraso (ms)	1.13	0.56530	4086
ns-2 padrão	MOS	3.2	0.63256	16128
	Perda (%)	0.63	0.38098	2457
	Atraso (ms)	0.65	0.09717	1378

Tabela 5.8: Resultados para $L_{retry} = 5$ com 8 chamadas simultâneas

CW_{min}	Params.	\bar{X}	δ	n
15	MOS	1.3	0.12714	6340
	Perda (%)	8.74	0.43129	1300
	Atraso (ms)	6.01	0.08325	5400
31	MOS	2.4	0.9268	2800
	Perda (%)	0.31	0.07829	2400
	Atraso (ms)	0.54	0.01641	6192
63	MOS	2.1	0.17815	255028
	Perda (%)	0.11	0.02560	102122
	Atraso (ms)	0.70	0.38054	77046
127	MOS	1.8	$3.8 \cdot 10^{-4}$	49059
	Perda (%)	2.31	0.48525	44163
	Atraso (ms)	2.31	$9.2 \cdot 10^{-4}$	49029
ns-2 padrão	MOS	2.8	0.57057	8136
	Perda (%)	3.07	$4.1 \cdot 10^{-4}$	67545
	Atraso (ms)	0.32	$8.2 \cdot 10^{-4}$	58884

5.3 Experimentos para $L_{retry} = 7$

Nesta rodada, para 6 e 8 chamadas simultâneas, não há nenhum valor do MOS acima de 3,5 (Figura 5.7). O que significa que a rede não suporta mais do que 4 ligações com qualidade aceitável nessa configuração. É importante lembrar que L_{retry} padrão definido em [23] é 7.

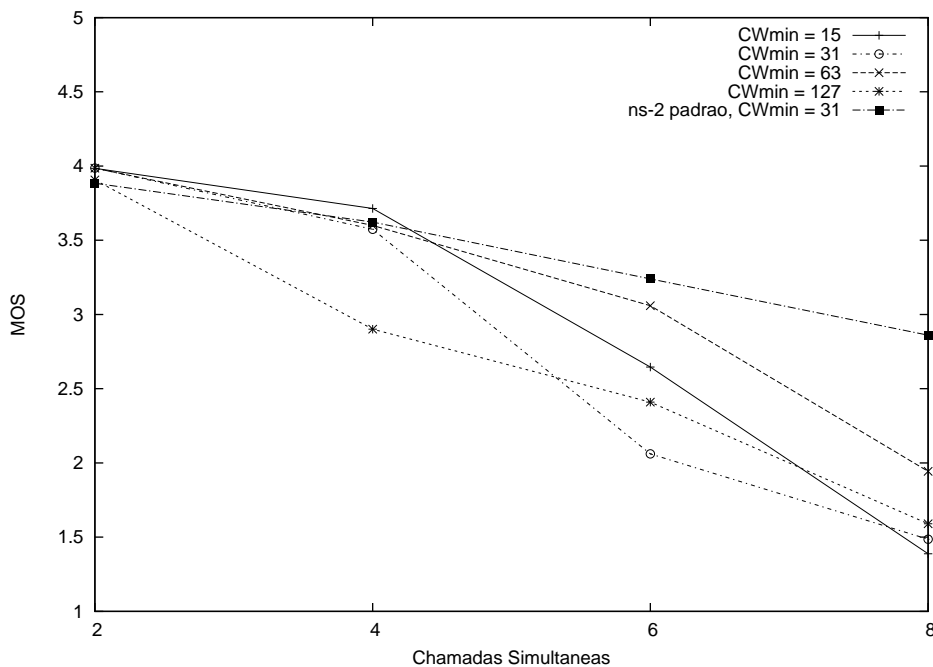


Figura 5.7: MOS do $L_{retry} = 7$

Com exceção do cenário utilizando o ns2 padrão, a queda do MOS é mais acentuada do que para $L_{retry} = 3$ e $L_{retry} = 5$. Isso acontece pelo mesmo motivo já explicado na Seção anterior, o nó transmite tantas vezes quantas permitidas, mas é descartado ao chegar no destino, o que torna todo o processo de disputa e retransmissão inúteis.

Os cenários em que $CW_{min} = 15$ e $CW_{min} = 31$ apresentam os piores resultados. Isso mostra que, com o aumento do número de usuários, para altos valores de L_{retry} , o uso de valores pequenos de CW_{min} não apresenta vantagens. A baixa performance se dá por causa do algoritmo de *backoff* modificado, já que após sucessivas retransmissões, o aumento da janela de *backoff* é muito lento em comparação com o algoritmo original. Nos momentos em que há muitas colisões (o que pode ser visto através das perdas na Figura 5.8), a providência que os nós deveriam tomar - aumentar as suas janelas de *backoff* para se distribuírem melhor na linha de tempo - é prejudicada pelo algoritmo proposto, que a cada retransmissão incrementa apenas de um a janela de *backoff*. Esse fato se evidencia na diferença entre os resultados dos cenários em que $CW_{min} = 31$ e o ns-2 padrão.

Para o atraso (Figura 5.9), o comportamento é similar. O cenário com o ns-2 padrão é o que obtém os melhores resultados. Quando $CW_{min} = 127$, o atraso é muito alto porque por causa de CW_{min} , ou seja, um nó que deseja transmitir deve escolher um número aleatório dentro do intervalo $[0, CW]$ - para a primeira iteração, $CW = CW_{min}$. Apesar de a escolha ser aleatória, através dos resultados, podemos *inferir* que quanto maior o limite superior do intervalo, maior a chance de o algoritmo de *backoff* selecionar um número mais próximo desse limite. Caso se utilizasse o algoritmo padrão de *backoff*, os resultados seriam ainda piores, pois após a primeira retransmissão, CW iria aumentar para 255 em vez de 128.

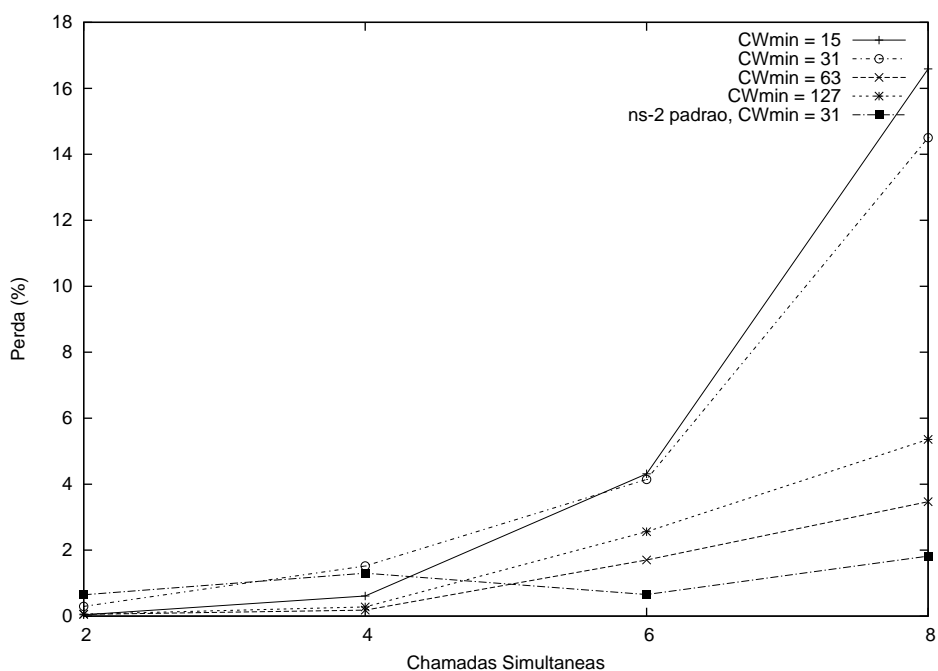


Figura 5.8: Perda do $L_{retry} = 7$

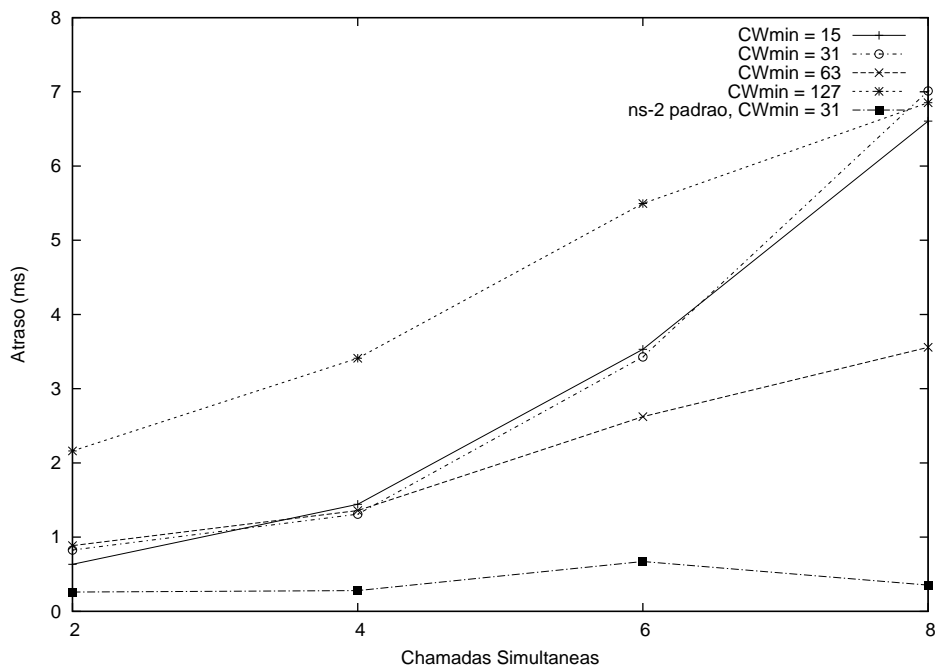


Figura 5.9: Atraso do $L_{retry} = 7$

As melhores estimativas para o atraso foram obtidas no cenários que utilizaram o ns-2 padrão. Assim como no caso da perda (Figura 5.8), o algoritmo de *backoff* original funcionou a favor dos resultados. As Tabelas 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 mostram os valores plotados nos gráficos.

Tabela 5.9: Resultados para $L_{retry} = 7$ com 2 chamadas simultâneas

CW_{min}	Params.	\bar{X}	δ	n
15	MOS	3.9	0.1719	2802
	Perda (%)	0.04	0.343555	1987
	Atraso (ms)	0.63	0.2303	2950
31	MOS	3.9	0.00025417	2502
	Perda (%)	0.29	0.05179	2840
	Atraso (ms)	0.82	0.0070506	1920
63	MOS	3.9	0.16564	2200
	Perda (%)	0.05	0.7432	2500
	Atraso (ms)	0.88	0.0862116	5192
127	MOS	3.9	0.557767	2670
	Perda (%)	0.06	0.03106	2311
	Atraso (ms)	2.16	0.0220901	1292
ns-2 padrão	MOS	3.8	0.025443	4280
	Perda (%)	0.64	0.0679953	2690
	Atraso (ms)	0.26	0.1524	1220

Tabela 5.10: Resultados para $L_{retry} = 7$ com 4 chamadas simultâneas

CW_{min}	Params.	\bar{X}	δ	n
15	MOS	3.7	0.018771	3802
	Perda (%)	0.60	0.584503	3540
	Atraso (ms)	1.44	0.1452	2220
31	MOS	3.5	0.613496	2980
	Perda (%)	1.51	0.3436	3900
	Atraso (ms)	1.30	0.434782	2240
63	MOS	3.5	0.4830	3200
	Perda (%)	1.51	0.9345	2680
	Atraso (ms)	1.35	0.79365	2332
127	MOS	2.9	0.37453	2508
	Perda (%)	0.27	0.71428	4100
	Atraso (ms)	3.41	0.41152	3040
ns-2 padrão	MOS	3.6	0.38022	3310
	Perda (%)	1.30	0.52083	2370
	Atraso (ms)	0.27	0.35211	2390

Tabela 5.11: Resultados para $L_{retry} = 7$ com 6 chamadas simultâneas

CW_{min}	Params.	\bar{X}	δ	n
15	MOS	2.6	0.35211	2120
	Perda (%)	4.31	0.418410	3100
	Atraso (ms)	3.53	0.45662	1322
31	MOS	2.06	0.543478	3100
	Perda (%)	4.14	0.30581	2090
	Atraso (ms)	3.42	0.38022	4590
63	MOS	3.0	0.43478	4504
	Perda (%)	1.70	0.27932	1290
	Atraso (ms)	2.62	0.7575	1322
127	MOS	2.4	0.2967	2400
	Perda (%)	2.55	0.29673	2210
	Atraso (ms)	5.49	0.6535	3602
ns-2 padrão	MOS	3.2	0.598802	2500
	Perda (%)	0.65	0.431034	2750
	Atraso (ms)	0.67	0.8333	1192

Tabela 5.12: Resultados para $L_{retry} = 7$ com 8 chamadas simultâneas

CW_{min}	Params.	\bar{X}	δ	n
15	MOS	1.3	0.78740	2550
	Perda (%)	16.59	0.409836	2900
	Atraso (ms)	6.60	0.69444	2020
31	MOS	1.48	0.49751	2600
	Perda (%)	14.5	0.3773584	2870
	Atraso (ms)	7.01	0.26076	2302
63	MOS	1.94	0.28855	2980
	Perda (%)	3.46	0.26633	2730
	Atraso (ms)	3.55	0.43478	1802
127	MOS	1.5	0.52083	3560
	Perda (%)	5.35	0.78747	2500
	Atraso (ms)	6.85	1.36986	1752
ns-2 padrão	MOS	2.8	0.40816	3630
	Perda (%)	0.34	2765	3640
	Atraso (ms)	0.35	0.40816	2600

5.4 Considerações gerais sobre os experimentos

Em nenhuma das rodadas de experimentos o atraso ultrapassou o limite máximo recomendado para chamadas VoIP que é de $170ms$.

O intervalo SIFS não foi variado em nenhum dos experimentos pois não se mostrou uma abordagem que trouxesse resultados interessantes. Essa decisão foi embasada em [24] que afirma que diante de um conjunto grande de opções, devemos escolher a menor e a maior e realizar experimentos com elas. A diferença expressiva nos resultados é um indicativo de que é interessante realizar experimentos para mais valores intermediários do intervalo. No caso dos experimentos apresentados neste trabalho seguimos essa abordagem que mostrou que a variação do intervalo SIFS não apresentaria diferenças significativas no resultados.

De acordo com os resultados apresentados, podemos verificar que somente em dois casos (ambos com duas chamadas simultâneas) o cenário no qual $CW_{min} = 127$ obteve resultados satisfatórios ($MOS \geq 3,5$). Isso demonstra que a adoção desse valor para

CW_{min} é impraticável em uma rede em que se pretende implantar um serviço confiável de voz sobre IP.

Ainda nas Figuras 5.1, 5.4 e 5.7 é possível notar que existe um *trade-off* entre o valor de L_{retry} e o valor de CW_{min} . No cenário em que $L_{retry} = 5$ e $CW_{min} = 31$, o valor do MOS é o melhor obtido para 4 e 6 chamadas simultâneas dentre todos os experimentos. No entanto, quando o número de retransmissões vai para $L_{retry} = 7$, o cenário que obtém os melhores resultados (de forma geral) é quando o ns-2 padrão ($CW_{min} = 31$) é utilizado. Portanto deve haver um equilíbrio entre essas duas variáveis para que se obtenha o melhor desempenho.

Em todos os casos é possível determinar um ponto a partir do qual o valor do MOS decai e, ao mesmo tempo, esse valor é ultrapassado por outra configuração. Isso poderia ser evitado com ajustes em tempo de execução no valor de CW_{min} e L_{retry} e os valores apresentados neste trabalho poderiam ser utilizados como referência na tomada de decisões.

5.4.1 Experimentos com tráfego de fundo

Foram realizados experimentos com tráfego de fundo para todos os cenários apresentados acima, no entanto, os resultados não apresentaram diferenças significativas que justificassem sua apresentação e discussão. Em todos os cenários, dois nós eram escolhidos ao acaso para trocarem tráfego HTTP, um dos nós atuava como servidor e outro como cliente.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou otimizações que podem ser realizadas na camada MAC das redes 802.11 afim de melhorar o desempenho de chamadas de voz em *backbones* em malha sem fio. Primeiramente, realizou-se um estudo profundo sobre o funcionamento dos diversos protocolos que compõem a camada MAC para, depois identificar os pontos críticos e, então, propor melhorias.

A grande limitação das redes 802.11 (com ênfase nas extensões *a*, *b* e *g*) é a falta de suporte adequado para tráfego de tempo real. Essa falta de suporte faz com que os nós que manipulam esse tipo de tráfego sejam severamente punidos em caso de retransmissões e, no momento, em que esses nós mais precisam que a vazão da rede aumente, ela *tende* a ser diminuída drasticamente.

O padrão IEEE 802.11 é o padrão de redes sem fio mais popular e acessível mundialmente. Uma preocupação deste trabalho foi fazer algumas modificações para que fosse possível incorporar ao padrão as otimizações apresentadas aqui. Essa abordagem é a mesma adotada por projetos como o [14], que disponibiliza *firmwares* baseados no sistema operacional Linux que podem ser instalados em diversos roteadores disponíveis no mercado. Ou seja, eliminaríamos a necessidade de adquirir novos equipamentos, como no caso do 802.11e.

Este trabalho se diferencia da extensão 802.11e, que é uma extensão lançada exclusivamente para garantir qualidade de serviço na camada MAC, por ter como foco apenas a qualidade final de chamadas VoIP e não se preocupando com outros tipos de tráfego.

Dois pontos importantes, e que foram fundamentais para este trabalho, precisam ser destacados: a abordagem dos aspectos de credibilidade em trabalhos de simulação e as diversas melhorias efetuadas no simulador ns-2 no decorrer do desenvolvimento do trabalho. Grande parte dos trabalhos encontrados na literatura não mencionam, e nem levam em consideração, aspectos importantes que *devem* ser seguidos quando se utiliza a simulação como metodologia de avaliação de desempenho. A ausência desses cuidados coloca em xeque os resultados de grande parte dos trabalhos apresentadas em conferências importantes, mais detalhes em [43].

Apesar de o ns-2 ser o simulador de código aberto mais completo e mais utilizado pela comunidade científica, são necessárias diversas melhorias, principalmente no que diz respeito as camadas de rede e física. Protocolos erroneamente implementados, modelos simples para representar cenários complexos e a falta de algoritmos básicos da camada MAC, como o algoritmo de seleção de taxas. Além disso, a inclusão, e constante manutenção, de um módulo que implementa chamadas VoIP e calcula o MOS através do modelo E. Todas essas modificações podem ser encontradas em forma de *patch* em [20]. Esse dois pontos combinados geraram a publicação de 3 artigos científicos [48, 38, 39] e um *journal* [47], todos de circulação internacional.

No primeiro momento, é natural pensar que diminuir os intervalos de tempo que os nós devem esperar para realizar transmissões, o resultado seria sempre positivo. No entanto, como os resultados mostram, essa suposição nem sempre é verdadeira. A performance depende de outros fatores como a quantidade máxima de retransmissões permitidas, a

quantidade de usuários disputando o acesso ao meio, entre outros. Além disso, temos diversos outros fatores que estão contemplados na camada física e sobre os quais não temos controle total, tais como a interferência, as condições do canal, que são regidos por processos estocásticos.

Os resultados mostram um *trade-off* entre os valores mínimos da janela de *backoff* (CW_{min}), o número máximo de retransmissões permitidas (L_{retry}) e o número de chamadas simultâneas (ou número de usuários). Deve haver um equilíbrio entre esses parâmetros para que a rede possa suportar o máximo de chamadas simultâneas possível mantendo o valor mínimo do MOS. E como é possível verificar nos gráficos, não existe um cenário nem configuração definitivas.

Apesar de os resultados mostrados aqui nem sempre apresentarem vantagens sob a camada MAC original, foi possível obter um conjunto de casos em que utilizar o nosso esquema é mais vantajoso. De posse desse conjunto, é possível tomar decisões de acordo com a situação em que a rede se encontrar.

Para trabalhos futuros, sugerimos um mecanismo de monitoração da rede que pudesse regular dinamicamente o tamanho mínimo da janela de *backoff* (CW_{min}) e a quantidade máxima de retransmissões (L_{retry}) de acordo com a qualidade das chamadas no momento, sempre visando manter o patamar mínimo aceitável para o valor do MOS.

REFERÊNCIAS

- [1] Projeto medqos. Disponível em <http://medqos.sourceforge.net>. Acessado em 06.10.2009.
- [2] A. Agência Nacional de Telecomunicações. *Resolução 397 de 06/04/2005: Regulamento sobre condições de uso de radiofrequências da faixa de 2.400 MHz a 2.483,5 MHz por equipamentos utilizando tecnologia de espalhamento espectral ou tecnologia de multiplexação ortogonal por divisão de frequência*, Abril 2005.
- [3] D. Aguayo, J. Bicket, S. Biswas, G. Judd, and R. Morris. Link-level measurements from an 802.11b mesh network. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 34(4):121–132, 2004.
- [4] Akaroa-2. Project akaroa-2, acessado em 17/12/2007. In http://www.cosc.canterbury.ac.nz/research/RG/net_sim/simulation_group/akaroa/, 2007.
- [5] G. F. Amorim. Análise de desempenho de protocolos de roteamento com diferenciação de serviços em redes de comunicação móvel ad hoc. Master's thesis, Instituto Militar de Engenharia, IME, 2002.

- [6] G. Bianchi. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, 2000.
- [7] G. Bianchi, L. Fratta, and M. Oliveri. Performance evaluation and enhancement of the csma/ca MAC protocol for 802.11 wireless lans. In *7th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC'96*, 1996.
- [8] L. Cai, Y. Xiao, X. Shen, L. Cai, and J. W. Mark. VoIP over wlan: Voice capacity, admission control, qos, and MAC. *International Journal of Communication Systems*, 2006.
- [9] F. Cali, M. Conti, , and E. Gregori. IEEE 802.11 protocol: Design and performance evaluation of an adaptive backoff mechanism. *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, 2000.
- [10] F. Cali, M. Conti, and E. Gregori. Dynamic tuning of the IEEE 802.11 protocol to achieve a theoretical throughput limit. *IEEE/ACM Transactions On Networking*, Dezembro 2000.
- [11] Y. Cheng, X. Ling, L. Cai, W. Song, W. Zhuang, X. Shen, and A. Leon-Garcia. Statistical multiplexing, admission region, and contention window optimization in multiclass wireless lans. *Wireless Networks*, 2009.
- [12] M. Ergen. IEEE 802.11 tutorial. Technical report, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California Berkeley, 2002.
- [13] G. Ewing, K. Pawlikowski, and D. McNickle. Spectral analysis for confidence in-

terval estimation under multiple replication in parallel. In *European Simulation Multiconference, ESM'2000*, 2002.

- [14] Freifunk. Freifunk, acessado em 03/06/2009. In <http://start.freifunk.net/>, 2007.
- [15] L. Galvao. Implementação do modelo e para avaliação objetiva da qualidade da fala em redes de comunicação VoIP. Master's thesis, Universidade Federal do Amazonas, Brasil, 2004.
- [16] L. Galvao, A. F. Lima, J. N. de Souza, and E. de Souza Mota. A framework for network quality monitoring in the VoIP environment. international journal of network management. *International Journal of Network Management*, 17(4):263–274, 2007.
- [17] S. Ganguly, V. Navda, K. Kim, A. Kashyap, D. Niculescu, R. Izmailov, S. Hong, and S. Das. Performance optimizations for deploying VoIP services in mesh networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006.
- [18] M. Gast. *802.11 Wireless Networks. The Definitive Guide*. O'Reilly, 2002.
- [19] D. Gokhale, S. Sen, K. Chebrolu, and B. Raman. On the feasibility of the link abstraction in (rural) mesh networks. In *27th IEEE Conference on Computer Communications, INFOCOM*, 2008.
- [20] GRM. Computer networks and multimedia group, acessado em 17/12/2009. In <http://grm.dcc.ufam.edu.br>, 2007.
- [21] N. Gupta and P. R. Kumar. A performance analysis of the 802.11 wireless lan medium access control. *Communications in Information and Systems.*, Setembro 2004.

- [22] T. Henderson, S. Roy, S. Floyd, and G. Riley. Ns-3 project goals. In *Proceedings of Workshop on ns-2: the IP Network Simulator.*, 2006.
- [23] IEEE 802.11 Workgroup. *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, 2003.
- [24] R. Jain. *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*. Wiley- Interscience, 1991.
- [25] R. Jurdak, C. V. Lopes, and P. Baldi. A survey, classification and comparative analysis of medium access control protocols for ad hoc networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2004.
- [26] P. K. and J.-S. R. Jeong, H.-D. J. Lee. On credibility of simulation studies of telecommunication networks. *IEEE Communications Magazine*, 9(4):50–61, 2005.
- [27] A. Kashyap, S. Ganguly, S. R. Das, and S. Banerjee. VoIP on wireless meshes: Models, algorithms and evaluation. In *26th IEEE International Conference on Computer Communications, INFOCOM'07*, 2007.
- [28] D. Kotz, C. Newport, R. S. Gray, J. Liu, Y. Yuan, and C. Elliott. Experimental evaluation of wireless simulation assumptions. In *MSWiM '04: Proceedings of the 7th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, Venice, Italy, 2004. ACM.
- [29] A. M. Law and M. McComas. Secrets of successful simulation studies. In *Proc. 1991 Winter Simulation Conference.*, 1991.

- [30] P. L'Ecuyer. Software for uniform random number generation: distinguishing the good and the bad. In *Winter Simulation Conference*, pages 95–105, 2001.
- [31] M. H. Manshaei, G. R. C. C. Barakat, and T. Turetletti. Performance analysis of the IEEE 802.11 MAC and physical layer protocol. In *6th IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, 2005. WoWMoM, 2005*.
- [32] A. Marshall, T. Martin, and J. You. Performance analysis of a MAC protocol for multiple services in cellular broadband networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 1999.
- [33] M. Matsumoto and T. Nishimura. Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator. In *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation*, 1998.
- [34] K. Medepalli and F. A. Tobagi. On optimization of csma/ca based wireless lans: Part i - impact of exponential backoff. *Proceedings of IEEE ICC*, 2006.
- [35] V. Mhatre. Enhanced wireless mesh networking for ns-2 simulator. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 37(3):69–72, 2007.
- [36] E. Mota. *Performance of Sequential Batching-based Methods of Output Data Analysis in Distributed Steady-state Stochastic Simulation*. PhD thesis, Technical University of Berlin, 2002.
- [37] E. Mota, A. Wolisz, and K. Pawlikowski. Getting speedup with accuracy in simulation experiments of communication networks. In *Proceeding of High Performance Computing*, 1999.

- [38] A. Nascimento, S. Queiroz, E. Mota, L. Galvao, and E. Nascimento. Influence of propagation modeling on VoIP quality performance in wireless mesh network simulation. In *Proceedings of IEEE/ACM Modeling, Analysis and Simulation of Computers and Telecommunication Systems, MASCOTS'08*, 2008.
- [39] A. Nascimento, S. Queiroz, E. Mota, L. Galvao, and E. Nascimento. Influence of routing protocol on VoIP quality performance in wireless mesh backbone. In *1st International Workshop on Future Multimedia Network. Proceedings of NGMAST, Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies.*, 2008.
- [40] A. W. Network. Athens wireless network. Disponível em <http://www.awmn.net/cms/node>. Acessado em 06.10.2009.
- [41] ns 3 project. www.nsnam.org/wiki/index.php/ns3wirelessphy. In *Ns-3 WirelessPhy*, 2007.
- [42] K. Pawlikowski. Steady-state simulation of queueing processes: survey of problems and solutions. *ACM Computing Surveys*, 22(2), 1990.
- [43] K. Pawlikowski. Do not trust all simulation studies of telecommunications networks. *International Conference on Information Networking*, pages 899–908, 2003.
- [44] T. M. Pereira and C. B. Westphall. Diferenciação de serviços na camada de acesso ao meio em redes sem fio ad hoc. In *XXV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação*, 2005.
- [45] J. F. Pimentel, R. L. de Lacerda Neto, W. C. F. Jr., F. R. P. Cavalcanti, and J. C. M. Mota. *Avaliação de Desempenho do Padrão IEEE 802.11a em Ambiente Outdoor*. XI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2004.

- [46] R. J. Punnoose, P. V. Nikitin, and D. D. Stancil. Efficient simulation of ricean fading within a packet simulator. In *Vehicular Technology Conference*, Sept. 2000.
- [47] S. Queiroz, A. Nascimento, E. Mota, L. G. ao, and E. Nascimento. Comparative analysis of routing protocols for VoIP in a wireless mesh backbone: a user perspective. *Internation Journal of Internet Protocol Technology, IJIPT*, vol. 3, n. 4, p. 216-223, 2008.
- [48] S. Queiroz, A. Nascimento, E. Mota, A. Oliveira, L. Galvao, and E. Silva. Impact evaluation of radio propagation models on performance parameters of application layer in wireless mesh backbone simulation. In *Proceedings of 13th IEEE Symposium on Computers and Communications, ISCC'08*, 2008.
- [49] T. S. Rappaport. *Wireless Communication Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, 15th edition, 1996.
- [50] D. S. Reddy. Correct, efficient, and realistic wireless network simulations. Master's thesis, Georgia Institute of Technology, 2007.
- [51] X. S. and T. Saadawi. Does the ieee 802.11 MAC protocol work well in multihop wireless ad hoc networks? In *IEEE Communications Magazine*, 2001.
- [52] V. R. S. Kumar and J. Deng. Medium access control protocols for ad hoc wireless networks: A survey. *Ad-hoc Networks*, 2003.
- [53] L. Scalia and I. Tinnirello. Differentiation mechanisms for heterogeneous traffic integration in IEEE 802.11 networks. In *BroadWin 2004*, 2004.
- [54] J. C. M. Severiano. IEEE 802.11b MAC layer's influence on VoIP quality para-

meters. Master's thesis, Institute of Microelectronic and Information Technology (IMIT), Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2004.

- [55] J. L. Sobrinho, R. de Haan, and J. E. Brazio. Why RTS-CTS is not your ideal wireless LAN multiple access protocol. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2005.
- [56] J. Song and L. Trajkovic. Enhancements and performance evaluation of wireless local area networks.
- [57] V. Sridhara and S. Bohacek. Realistic propagation simulation of urban mesh networks. *Comput. Networks*, 51(12):3392–3412, 2007.
- [58] W. Stallings. IEEE 802.11: Wireless lans from a to n. In *IT Professional*, vol. 6, no. 5, 2004.
- [59] G. L. Stuber. *Principles of Mobile Communication*. Kluwer Academic Publishers, 15th edition, 2001.
- [60] A. Tang, J.-W. Lee, J. Huang, M. Chiang, and A. Calderbank. Reverse engineering MAC. In *4th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*, 2006.
- [61] Y. Tay and K. Chua. A capacity analysis for the IEEE 802.11 MAC protocol. *Wireless Networks* 7, 2001.
- [62] L. Thiele, M. Peter, and J. Volker. Statistics of the ricean K-factor at 5.2 GHz in an urban macro-cell scenario. In *Proc. 17th IEEE Intern. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2006)*, Helsinki, Finland, 2006.

- [63] M. Veeraraghavan, N. Cocker, and T. Moors. Support of voice services in IEEE 802.11 wireless LANs. In *IEEE International Conference on Computer Communications, INFOCOM'01*, 2001.
- [64] B. H. Walke, S. Mangold, and L. Berlemann. *IEEE 802 Wireless Systems: Protocols, Multi-Hop Mesh/Relaying, Performance and Spectrum Coexistence*. Wiley, 2007.
- [65] S.-C. Wang and A. Helmy. Performance limits and analysis of contention-based IEEE 802.11 MAC. In *31st IEEE Conference on Local Computer Networks*, 2006.
- [66] X. Wang, A. Patil, and W. Wang. VoIP over wireless mesh networks: challenges and approaches. In *2nd Annual International Workshop on Wireless Internet*, 2006.
- [67] A. Warriar and I. Rhee. Rethinking wireless MAC architecture for quality of service support - design and implementation. Technical report, Department of Computer Science, North Carolina State University.
- [68] M. C. Weigle. Improving confidence in network simulations. In *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation*, 2006.
- [69] P. Wireless. *Certified Wireless Network Administrator*. Planet3 Wireless, 2002.
- [70] H. Xia. Effects of medium access control on the capacity of mobile ad hoc networks. Master's thesis, Graduate Faculty of North Carolina State University, 2005.
- [71] Y. Xiao. Performance analysis of priority schemes for IEEE 802.11 and IEEE 802.11e wireless lans. *IEEE Transactions On Wireless Communications*, July 2005.
- [72] J. Yee and H. Pezeshki-Esfahani. Understanding wireless LAN performance trade-offs. *Communication Systems Design*, 2001.

- [73] J. Yeo and A. Agrawala. Capacity and variability analysis of the IEEE 802.11 MAC protocol. Technical report, Department of Computer Science, University of Maryland, 2003.
- [74] Z. Ying, A. A.L., and J. L. A QoS enabled MAC protocol for multi-hop ad hoc wireless networks. In *Conference Proceedings of the 2003 IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference*, 2003.
- [75] H. Zhai and Y. Fang. Performance of wireless LANs based on IEEE 802.11 MAC protocols. In *14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003. PIMRC 2003*, 2003.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)