

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

**Minimização do efeito de anomalia em redes
IEEE 802.11 usando SNR para controlar o CW**

Autora: Débora Meyhofer Ferreira

Orientador: Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub

Co-orientador: Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, área de concentração: **Engenharia de Telecomunicações e Telemática.**

Banca Examinadora

Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub (presidente) FEEC / Unicamp
Prof. Dr. Paulo Cardieri FEEC / Unicamp
Prof. Dr. Ailton Akira Shiona UNESP / Ilha Solteira

Campinas, SP
2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

F41m Ferreira, Débora Meyhofer
Minimização do efeito da anomalia em redes IEEE 802.11
usando SNR para controlar o CW. / Débora Meyhofer
Ferreira. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientadores: Michel Daoud Yacoub, Omar Carvalho
Branquinho

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Desempenho. I.
Branquinho, Omar Carvalho. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. III. Título.

Título em Inglês: WLAN 802.11 anomaly mitigation using SNR to Control
Backoff Contention Window

Palavras-chave em Inglês: IEEE 802.11, CW, WLAN, Performance

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Paulo Cardieri, Ailton Akira Shiona

Data da defesa: 30/07/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidata: Débora Meyhofer Ferreira

Data da Defesa: 30 de julho de 2007

Título da Tese: "Minimização do Efeito da Anomalia em Redes IEEE 802.11 Usando SNR para Controlar o CW"

Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub (Presidente):  _____

Prof. Dr. Ailton Akira Shinoda:  _____

Prof. Dr. Paulo Cardieri:  _____

Resumo

A Ethernet existe há mais de 20 anos e a “*wireless ethernet*” (ethernet sem fio), conhecida como o padrão 802.11, há mais de sete anos. Extensões do padrão original, tais como o 802.11g, foram criados para garantir maiores taxas de transmissão. No entanto, existem condições que afetam o seu desempenho. Um desses casos, conhecido como *performance anomaly*, ou anomalia de desempenho, ocorre quando em uma rede infraestruturada existem estações móveis (STAs) transmitindo com taxas diferentes. Nesse caso, uma STA a uma taxa baixa ocupa o canal por um longo período, degradando o desempenho das demais estações e comprometendo o funcionamento de toda a rede. Esse trabalho constata e quantifica essa anomalia e determina um método de priorizar as STAs com uma taxa de transmissão alta, objetivando a redução do efeito da anomalia. Essa priorização é feita alterando-se a janela de contenção de acordo com a relação sinal ruído da STA. O mecanismo é modelado matematicamente e avaliado através de simulação com o software Network Simulator.

Abstract

Ethernet exists more than 20 years and the wireless Ethernet, known as IEEE 802.11, for more than seven years. Extensions of the original standard, as IEEE 802.11g, are been created to guarantee higher transmission rates. However, some conditions there are that affect the performance of the network. One of them, known as Performance Anomaly, occurs when in an infrastructured WLAN stations (STAs) operate at different rates. In such a case, the low rate STA rate captures the channel for a long time, penalizing the higher rate stations, thence degrading the performance of the network. This work substantiates and quantifies such an anomaly and proposes a method to mitigate the effect of it, prioritizing the higher STAs. This mitigation is is carried out using Signal to Noise Ratio as a criterion to control the Contention Window variation. The mechanism is modeled mathematically and evaluated by means of simulation using the software Network Simulator.

“Mas, pela graça de Deus, sou o que sou”

I Co 15:10a

Agradecimentos

A Deus Pai, Deus Filho Jesus e Deus Espírito Santo por todas as bênçãos concedidas.

Ao meu marido José Ferreira Neto e às minhas lindas filhas Rebeca e Júlia por todo tempo compartilhado com esse trabalho.

Aos meus pais Frederico e Dione pelo amor e pela participação em todas as fases da minha vida.

Ao Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho que sempre investiu e acreditou em mim.

Ao Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub pela paciência, tranquilidade e competência na correção desse trabalho.

A todos que contribuíram de alguma forma com esse trabalho, em especial Tâmara Rosini e André Leon S. Gradvohl.

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Siglas	xvii
Lista de Símbolos	xxi
Trabalhos Publicados	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivos e metodologia	4
1.3 Estrutura da dissertação	4
2 Visão Geral da WLAN	7
2.1 PWLAN	10
2.2 Padrão IEEE 802.11	11
2.2.1 Camada Física	13
2.2.2 Camada de Enlace	14
2.2.3 Descrição Básica da MAC	15
2.2.3.1 DCF	17
2.2.3.2 Fallback versus SNR	18
3 MAC - a fonte do problema	21
3.1 Princípio de Funcionamento	21
3.1.1 Backoff Aleatório e Exponencial	23
3.2 Descrição da Anomalia	25
3.3 Estimativa da Anomalia	29
4 Proposta de melhoria	39
4.1 Equacionamento da Proposta	40

5 Simulação	45
5.1 O Simulador	45
5.2 Configuração e Cenários	46
5.3 Resultados Obtidos	47
5.3.1 Anomalia	49
5.3.2 Priorização	51
5.3.3 Influência da Quantidade de Estações	54
6 Conclusão	59
6.1 Trabalhos Futuros	60
Referências Bibliográficas	61
A Calculo da Eficiência	65
B Script de Simulação	71

Lista de Figuras

2.1 Conexão de rede sem fio com rede cabeada	6
2.2a Rede Infraestrurada	8
2.2b Rede Ad-Hoc	8
2.3 Grupo de Serviço Estendido	9
2.4 Relação Camadas 802.11 com OSI	12
2.5a Terminal escondido	15
2.5b Terminal exposto	15
3.1 Funcionamento da MAC	23
3.2 Evolução dos tempos de acesso	24
3.3 Áreas de variação da taxa	26
3.4 Taxa de transmissão versus alcance	28
3.5 Cenário utilizado para demonstrar o e feito da anomalia	30
3.6 Tomada do canal por 2 estações	31
3.7 Cenário utilizado (com anomalia)	34
3.8 Vazão	35
3.9a Arquitetura FAT	35
3.9b Arquitetura THIN	37
4.1 Tomada do Canal com priorização	44
5.1 Relação entre C++ e TCL	46
5.2 Resultado com duas estações iguais	48

5.3 Resultado com duas estações diferentes	49
5.4 Fallback nas duas estações	50
5.5 Fallback em apenas uma estação	50
5.6 Desempenho com priorização	51
5.7 Variando CW estação ruim	52
5.8 Variando CW estação boa	52
5.9 Priorização de estações na mesma taxa	53
5.10 Cenário com 4 estações (3:1)	54
5.11 Resultado com anomalia (3:1)	55
5.12 Cenário com 4 estações (1:3)	56
5.13 Resultado com anomalia (1:3)	56
5.14 Priorização das estações boas (3:1)	57

Lista de Tabelas

2.1 Características do Padrão 802.11b	13
3.1 Valores de Slot Time e CW para padrão 802.11b	24
3.2 Especificações WLAN ambiente semi-aberto	27
3.3 Especificações WLAN ambiente aberto e ambiente fechado	27
3.4 Eficiência	31
4.1 Janela de Contenção e tempo de duração	41
4.2 Resultados de Simulação	44
A1 Valor dos Parâmetros	66
A2 Cálculo dos Tempos	67
A3 Eficiência	68
A4 Tempo Médio de CW	68
A5 T_T com valores parciais de CW	69

Lista de Siglas

ACK – Acknowledgement

AP – Access Point

ARF – Auto Rate Fallback

BER – Bit Error Rate

BSS – Basic Service Set

CBR – Constant Bit Rate

CSMA – Carrier Sense Multiple Access

CSMA/CA – CSMA with collision avoidance

CSMA/CD – CSMA with collision detection

CTS – Clear to Send

CW – Contention Window

DARPA – Defense Advanced Research Projects

DCF – Distributed Coordination Function

DIFS – DCF IFS

DS – Distribution System

DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum

EIFS – Extended IFS

ESS – Extended Service Set

ETS – European Telecommunication Society

FCC – Federal Communication Commission

FHSS – *Frequency Hoping Spread Spectrum*

GPRS – *General Packet Radio Service*

IBSS – *Independent BSS*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IFS – *Inter Frame Space*

IP – *Internet Protocol*

ISM – *Industrial, Scientific and Medical*

ISO – *International Organization for Standardization*

LAN – *Local Area Network*

LLC – *Logical link Control*

MAC – *Medium Access Control*

MAN – *Metropolitan Network*

NOAH – *Non Ad-Hoc Routing Agent*

NS – *Network Simulator (simulador de rede)*

OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

OSI – *Open System Interconnection*

OTCL – *Object Oriented Tool Command Language*

PCF – *Point Coordination Function*

PDA – *Personal Digital Assistent*

PIFS – *PCF IFS*

PWLAN – *Public WLAN*

QoS – *Quality of Service*

RF – *Rádio Frequência*

RTS – *Request to Send*

SNR – *Signal to noise ratio*

STA – *Estação Móvel*

TCL – *Tool Command Language*

UDP – *User Datagram Protocol*

W – *Estação Cabeada*

WAN – *Wide Network*

WLAN – *Wireless LAN*

Lista de Símbolos

- B_{Tn} – Bits transmitidos pela STA n
- C_n – Proporção de tempo da STA n
- c_w - Tamanho da janela de contenção
- R_{Tn} – Vazão da STA n
- R_n – Taxa de transmissão da STA n
- R_m – Vazão média
- T_T – Tempo total de Transmissão
- T_n – Tempo de transmissão da STA n
- β – Relação de CW
- ρ_n – Eficiência da STA n

Trabalhos Publicados

- FERREIRA, D. M. ; YACoub, M. D.; BRANQUINHO, O. C. ; REGGIANI, N. A Cross-Layer Approach to Mitigating 802.11 MAC Anomaly Using SNR to Control Backoff Contention Windows. In: International Workshop on Telecommunications - IWT07, 2007, Brazil – Santa Rita Sapucaí – MG.

- FERREIRA, D. M. ; BRANQUINHO, O. C. ; REGGIANI, N. . 802.11 Mac Anomaly Mitigation Proposal using SNR to Control Backoff Contention Window. In: International Conference on Wireless and Mobile Communications, 2006, Bucharest. Anais do Evento

Capítulo 1

Introdução

Na década de 80, a abertura dos mercados mundiais para buscar se adaptar às novas tendências da era da globalização que emergiam, juntamente à propulsão de alguns países ricos para a conquista de novos mercados consumidores, gerou um grande arranque em desenvolvimento tecnológico no mundo: a área de telecomunicações não podia ser diferente.

Iniciou-se então uma corrida tecnológica que abrangia todos os segmentos da comunicação: enlaces em Rádio-Frequência (RF), Óptico, Satélite, e outros.

Uma das maiores iniciativas de avanço nas comunicações pessoais ocorreu entre as décadas de 70 e 80, quando foi lançado nos EUA o primeiro serviço de telefonia móvel analógico, com número limitado de canais disponíveis para atender uma fatia seleta de usuários. Logo que entrou em operação, tamanho foi o sucesso que logo gerou listas de espera para novas linhas, causando enorme pressão da sociedade para o aprimoramento e expansão da nova tecnologia.

Algum tempo mais tarde, com o surgimento da internet, todos os ramos das telecomunicações começaram a convergir suas plataformas para prover serviços via *Internet Protocol* (IP – Protocolo Internet).

Embora parecessem promissoras e de ganhos inestimáveis, as redes móveis, assim como outros segmentos em RF, são tecnologias que necessitam de planejamento e maturidade para a sua implantação, devido principalmente ao alto custo envolvido em sua infra-estrutura básica de operação.

Paralelamente a este panorama sobre a evolução das redes móveis, surge uma nova tecnologia, sem nenhuma concorrência direta com o setor celular, mas que, devido à

grandiosidade de suas promessas e aceitação de mercado, gerou uma possibilidade a mais: são as assim conhecidas WLANs (*Wireless LAN* - Redes locais sem fios).

As WLANs surgiram na tentativa de se propiciar flexibilidade no acesso às redes de dados de um ambiente qualquer de trabalho, além de torná-lo mais limpo e livre dos cabos. Obviamente que a taxa de dados praticada em ambientes que utilizam tecnologia sem fio deve ser razoável, pois de nada adiantaria a despoluição e flexibilidade no ambiente de trabalho, sem manter a tradicional funcionalidade das redes fixas conhecidas e utilizadas há tanto tempo.

O mais interessante das redes sem fio é sua tamanha semelhança com a infraestrutura das redes móveis. Os *Access Points* (AP – Pontos de Acesso), elementos centralizadores das WLANs, muito se assemelham com as estações rádio base (ERB) nos sistemas móveis, inclusive pelo fato de a cobertura apresentar-se sob a forma de células. Suas maiores vantagens são, até então, as altas taxas de dados, que são compartilhadas entre um número razoável de usuários, baixo custo de implementação e operação nas faixas ISM (*Industry, Scientific and Medical* - faixas de frequências não licenciadas, operando em 2,4GHz e 5GHz), onde não há necessidade de autorização para exploração de serviços, apenas se devem respeitar os níveis de potência das máscaras espectrais preestabelecidas pelas agências reguladoras (ANATEL, Agência Nacional de Telecomunicações, no caso específico do Brasil).

Além dessas vantagens, as redes sem fio podem funcionar em ambientes internos (*indoor*) como escritórios, residências, lojas, e outros ou em ambientes externos (*outdoor*) como lugares abertos ou interligações de prédios e apresentam aplicações tanto residenciais quanto corporativas. Inicialmente eram encontradas principalmente na substituição de cabos em empresas e pequenos escritórios. Atualmente, a busca por mobilidade tem se tornado cada vez mais a principal razão da popularização desses sistemas.

Nos últimos anos, as WLANs oferecidas por operadoras ou provedores aos usuários de *laptops* ou PDAs (*Personal Digital Assistents* – assistente pessoal digital), em locais públicos, passaram a fazer parte do dia-a-dia dos usuários mundialmente. A aplicação da WLAN em lugares públicos passou a ser conhecida como PWLAN (*Public WLAN*) e os pontos de acesso à Internet como *hotspots*.

Segundo [STAL], o impacto das comunicações sem fio, incluindo o padrão IEEE 802.11, foi e continuará sendo profundo. Muito poucas invenções foram capazes de afetar o mundo dessa maneira. Além disso, os padrões que definem como os equipamentos de comunicação sem fio interagem estão rapidamente convergindo e logo se criará uma rede sem fio global com a capacidade de oferecer uma grande variedade de serviços.

1.1 Motivação

Juntamente com a popularização de equipamentos portáteis, tem-se uma crescente necessidade do oferecimento de conexões com qualidade e velocidade. As WLANs criaram um otimismo no meio tecnológico; no entanto, o que parecia ser muito promissor mostrou-se na prática não tão eficiente.

O padrão IEEE 802.11, o mais popular atualmente para WLANs, provou não ser tão eficiente assim [BIAN] [EDUA]. Em redes infraestruturadas (presença de elemento centralizador) onde existem estações operando com diferentes taxas de transmissão, há uma perda de desempenho devido a um efeito chamado de anomalia de desempenho. A anomalia existe desde que o padrão IEEE 802.11 foi originalmente publicado e desenvolvido em 1995, uma vez que inicialmente já existiam duas taxas distintas (1Mbps e 2Mbps). No entanto, a anomalia foi apenas detectada e registrada na literatura como tal em 2003 [HEUS]..

Desde então algumas propostas têm surgido para reduzir o seu efeito, porém a maioria delas utilizando-se do padrão IEEE 802.11e.

A anomalia se torna mais grave a partir do momento que existe uma maior diferença entre as taxas de transmissão das estações. No caso do padrão IEEE 802.11b, o pior caso é quando existem estações a 11Mbps e pelo menos uma estação transmitindo a 1Mbps. No caso do padrão 802.11g seriam estações a 54Mbps com estações a 1Mbps, taxas extremas em cada um dos padrões citados.

A motivação para o desenvolvimento desse trabalho foi desenvolver uma estratégia que reduzisse a anomalia utilizando o próprio padrão IEEE 802.11b ou o IEEE 802.11g, já que esses são os padrões mais em uso atualmente.

1.2 Objetivos e Metodologia

A maioria dos trabalhos existentes na literatura não estuda as injustiças que podem ocorrer em cenários com estações transmitindo com diferentes taxas. Outros trabalhos apontam o problema, sem propor soluções [HEUS] e [BRAN].

Assim, o principal objetivo desse estudo é propor solução para a questão discutida, definindo critérios que aproveitem melhor o desempenho das estações de maior taxa.

Por meio de uma análise teórica e simulação, a presente dissertação analisa o problema da ocupação do canal. É desenvolvido um controle de prioridade, tentando diminuir o efeito da anomalia sobre a rede, o que é verificado através de simulação.

Inicialmente, propõe-se um equacionamento para a anomalia, assim como também para a priorização da estação boa e uma conseqüente redução da anomalia. Em seguida são feitas simulações com diferentes cenários utilizando o software NS (*Network Simulator*) [NS].

1.3 Contribuições e Estrutura da Dissertação

As principais contribuições dessa dissertação são:

- Estudo e levantamento dos problemas inerentes ao efeito da anomalia em redes 802.11;
- Proposta de um mecanismo de priorização para reduzir o efeito da anomalia;
- Verificação dos fenômenos e validação da proposta através de simulação com software livre NS [NS].

Os demais capítulos e os apêndices desta dissertação são esboçados a seguir.

Capítulo 2

Define os conceitos básicos sobre as estruturas das WLANs atuais assim como as características principais das PWLANs.

Capítulo 3

Apresenta os conceitos específicos sobre o funcionamento da MAC (*Medium Access Control*) e também todo o princípio que gera a anomalia nesse tipo de sistema. Esse capítulo também modela matematicamente a anomalia.

Capítulo 4

Apresenta a sugestão de reverter o quadro da anomalia através da alteração da Janela de Contenção (*CW – Contention Window*).

Capítulo 5

Apresenta vários cenários que foram utilizados para as simulações e também os resultados obtidos.

Capítulo 6

Conclui a dissertação.

Apêndice A

Descreve todas as funcionalidades e cálculos referentes ao cálculo da eficiência das estações sem fio (STA).

Apêndice B

Apresenta um script resumido em TCL, utilizado como base nos cenários simulados nessa dissertação.

Capítulo 2

Visão Geral da WLAN

Uma WLAN não é um substituto de uma rede LAN, mas uma rede que proporciona mobilidade e baixo custo, devido à troca de cabos por ondas de rádio [BAHA].

Pode-se dizer que uma WLAN converte pacotes de dados em ondas de rádio ou infravermelho e os envia para outros dispositivos sem fio ou para um AP que serve como uma conexão para uma LAN cabeada (Figura 2.1).

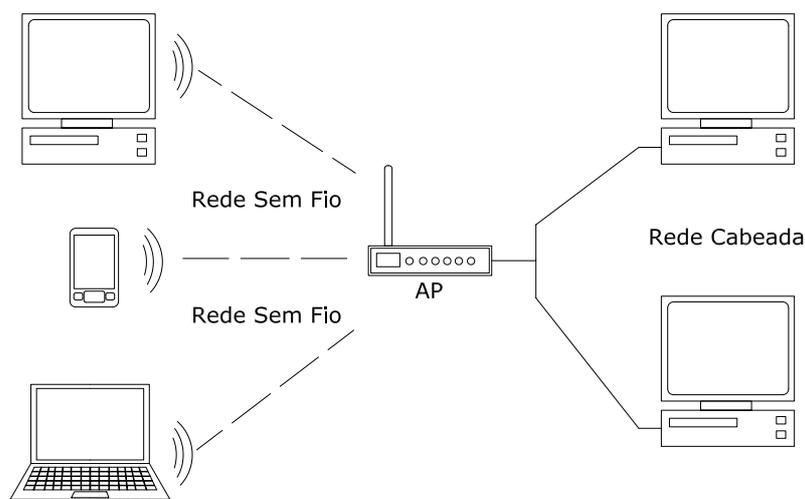


Fig. 2.1- Conexão de uma rede sem fio com uma rede cabeada

De acordo com a arquitetura da rede, as WLANs podem ser divididas em duas classes [CHAN]: distribuídas e centralizadas, também conhecidas como *ad-hoc* e infraestruturado, respectivamente.

No modo infraestruturado, existem as regiões denominadas BSS (*Basic Service Set* - Grupo de Serviço Básico) que estão dentro do alcance de um AP (também chamado de

rádio base), e toda comunicação entre estações é feita através deste AP. Ou seja, as estações que desejam comunicar-se ou alcançar um nó da rede fixa, primeiramente, transmitem ao AP que, então, direciona o tráfego para seu destino.

Em redes infraestruturadas, a transmissão é realizada através de comunicação *broadcast* e pode ser captada por todos os dispositivos da rede. O enlace é compartilhado entre as estações, sendo portanto, um canal de múltiplo acesso, normalmente temporal. (Figura 2.2a).

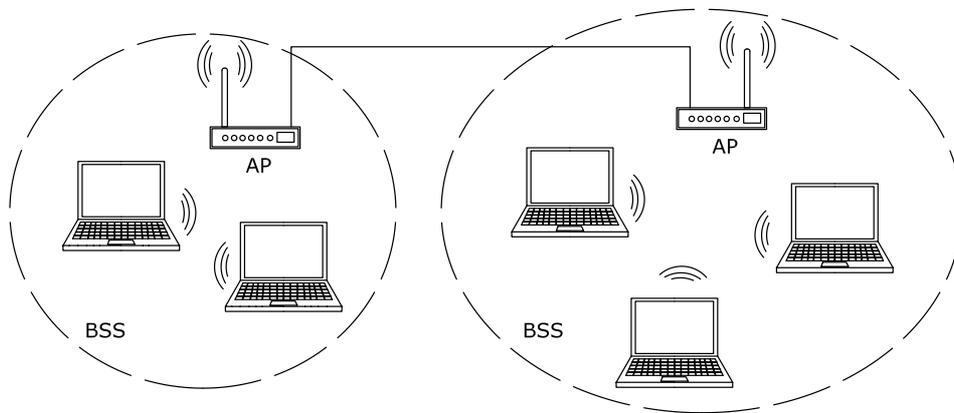


Fig. 2.2. a) Rede Infraestruturada

No modo *ad-hoc*, as estações comunicam-se diretamente entre si (Figura 2.2b), sem o intermédio de um AP.

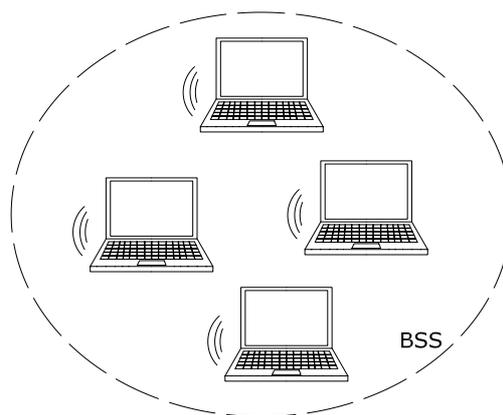


Fig. 2.2. b) Rede ad-hoc

O padrão IEEE 802.11 estabelece como unidade organizacional fundamental o BSS. Porém, quando o BSS não se conecta a nenhuma outra rede, é chamado de Grupo de Serviço independente ou iBSS (*Independent BSS*). Nesse caso, cada membro é capaz de se comunicar diretamente com outro formando uma rede ad hoc.

Quando o BSS se conecta a outra rede através do AP ele é chamado de infraestrutura BSS (*infrastructure BSS*). Mais de um BSS podem ser agrupados através de um Sistema de Distribuição (DS - *Distribution System*), principalmente para permitir o aumento da área de cobertura. Nesse caso, os BSSs agrupados formam um Grupo de Serviço Estendido (ESS - *Extended Service Set*). O ESS expande os limites da cobertura para vários BSSs; assim as estações em um ESS podem se mover de um BSS para outro de forma transparente. A Figura 2.3 ilustra a situação.

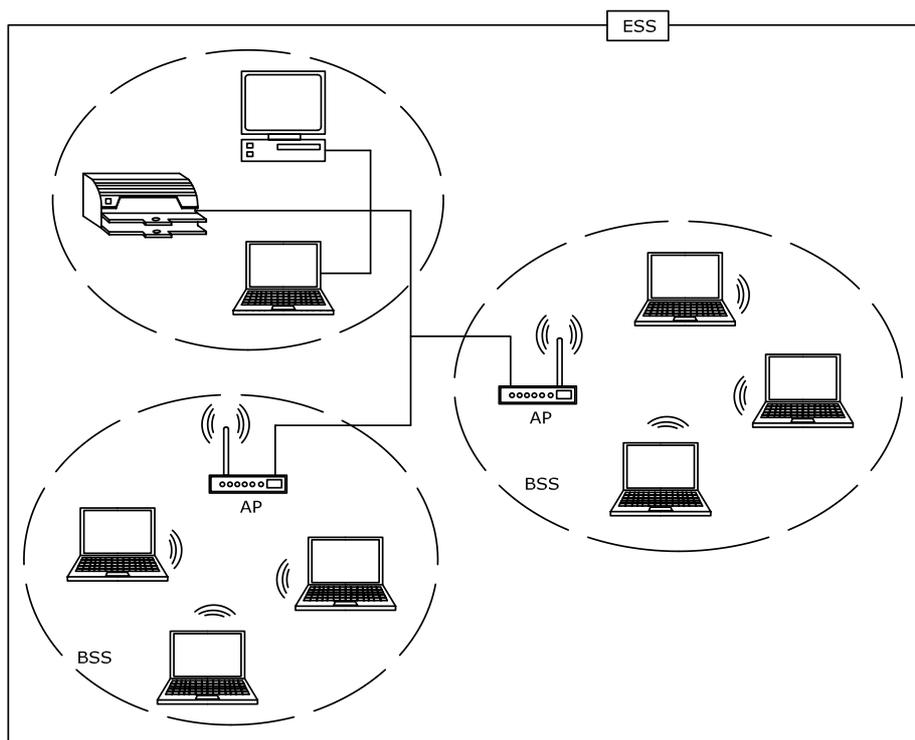


Fig.2.3: Grupo de Serviço Estendido

2.1 PWLAN

Com o objetivo de estimular o uso das redes sem fio, em 1985 o FCC (*Federal Communications Commission*) modificou parte do espectro de frequências, criando faixas para que os equipamentos pudessem operar sem a obrigatoriedade de uma licença. Essa alteração fez com que os equipamentos tivessem os preços acessíveis e mais usuários pudessem adquiri-los.

Com essa popularização, surgiram as conhecidas redes locais públicas (PWLAN – *Public WLAN*) popularmente conhecidas como *hot-spot* e encontradas em aeroportos, cafés, restaurantes e hotéis. Os maiores usuários desse tipo de rede ainda são os executivos.

No Brasil, a principal rede de hot spots é da empresa Vex, antiga Pointer Networks. A Vex atua na implantação e operação dos *hot spots*, deixando para seus parceiros, operadoras de telecomunicações e provedoras de acesso à Internet, a comercialização de serviços. No início de 2007, estavam em operação no país, *hot spots* em mais de 40 aeroportos do Brasil. Na grande São Paulo são mais de 320 pontos de acesso e em Campinas aproximadamente 25 pontos, segundo dados da empresa operadora [VEX].

Operadoras móveis, visando uma atuação mais forte junto aos usuários corporativos, podem combinar os sistemas celulares e PWLAN, uma vez que é possível equipar laptops com ambas as interfaces aéreas, sendo muito comum encontrarmos no mercado placas que operam com WLAN e por exemplo GPRS (transmissão de dados por celular). Essa solução não integra os dois sistemas, mas possibilita que o usuário no primeiro momento possa escolher a rede e a velocidade que pretende trabalhar.

É nesse tipo de rede pública que mais se encontram problemas quanto a garantir qualidade nos acessos. Nela encontra-se uma variedade de equipamentos, de qualidades diversas e em variadas distâncias do AP. Isso faz com que o funcionamento todo da rede se degrade, pois basta um único usuário ter sua taxa de transmissão reduzida para que todos os outros usuários do mesmo AP também a tenham (isso é a anomalia). Por isso, o grande interesse da aplicação da sugestão proposta nessa dissertação é nesse tipo de rede, mas não exclusivamente.

2.2 Padrão IEEE 802.11

Com o interesse crescente em redes sem fio após 1990, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) propôs uma padronização. Na época em que se iniciou o processo de padronização das WLANs, a Ethernet já dominava o mercado das LANs e por esse motivo o comitê de padronização optou por tornar o novo padrão totalmente compatível com a Ethernet acima da camada de link de dados [TANE]. Além disso, o foco era para substituir os produtos baseados em tecnologias proprietárias [BAHA] por padrões comuns a qualquer arquitetura.

No padrão OSI (*Open System Interconnection* – Interconexão de Sistemas Abertos) da ISO (International Organization for Standardization – Organização internacional de padronização) [ISO], um modelo dividido em 7 camadas hierárquicas, pode-se considerar que os protocolos de camada superior (camada 3 ou 4 e superiores) são independentes da arquitetura de rede e aplicáveis às LANs, MANs e WANs.

Como uma das metas fundamentais de projeto do IEEE 802.11 era fornecer serviços compatíveis com as redes IEEE 802.3 (Ethernet) as discussões e padronizações relativas às WLANs concentraram-se principalmente nas camadas inferiores do modelo OSI. A relação das camadas do padrão IEEE 802.11 relacionadas com as camadas do modelo OSI podem ser vistas na Figura 2.4.

Em 1997 foi lançada a primeira versão do IEEE 802.11 e atualmente existe mais um padrão no mercado: HiperLan/2 [ETSI] (lançado em 1996 em substituição ao HiperLan/1).

A Hiperlan, acrônimo de High Performance Radio LAN, foi definida pelo ETSI – *European Telecommunication Standards Institute* em 1991 em sua primeira versão. A principal diferença de operação entre os dois padrões está na camada MAC. O padrão HiperLan/2 tem a camada MAC desenvolvida com base na telefonia celular (utiliza TDMA dinâmico). A camada MAC do IEEE 802.11 baseia-se no padrão Ethernet de compartilhamento de canal (CSMA).

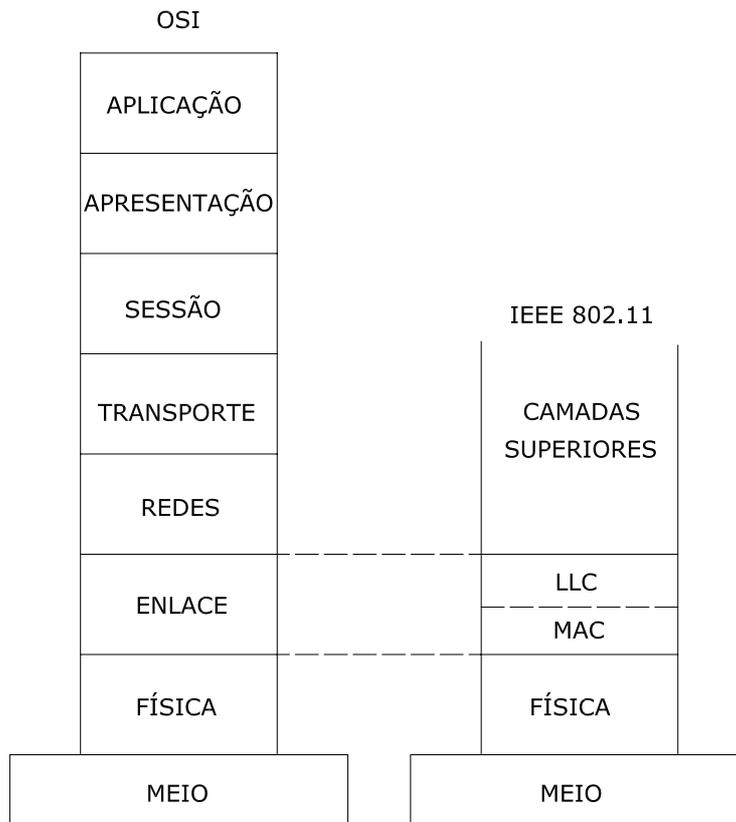


Fig. 2.4: Relação do IEEE 802.11 com o modelo ISO/OSI.

2.2.1 Camada Física (PHY)

As principais funções dessa camada são:

- Codificação e decodificação de sinais;
- Geração/remoção de parâmetros (preamble) para sincronização;
- Recepção e transmissão de bits;
- Especificações do meio de transmissão.

Originalmente, o padrão IEEE 802.11 operava com FHSS (*Frequency Hoping Spread Spectrum*) e DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) e oferecia apenas duas taxas de dados na camada física: as transmissões eram feitas em 1Mbps ou 2Mbps.

No entanto, em 1999 o IEEE padronizou duas extensões de taxas mais altas:

- IEEE 802.11a [IEEE2], baseada na tecnologia OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) com taxas de dados até 54Mbps.
- 802.11b [IEEE3] baseada na tecnologia DSSS com taxas de 5,5 e 11Mbps

Em 2003, o padrão IEEE 802.11g, uma extensão da camada física do padrão IEEE 802.11b para suportar taxas de até 54Mbps, foi oficializado usando também a técnica de multiplexação OFDM. Ou seja, utiliza a modulação do padrão IEEE 802.11a e banda do padrão IEEE 802.11b.

Todos esses padrões utilizam faixas de frequências não licenciadas, ou seja, a banda ISM operando nas frequências de 2,4 GHz (padrão b/g) e 5 GHz (padrão a), de acordo com a Tabela 2.1.

Há ainda a possibilidade de transmissão por infravermelho (IR – *infrared*). Atualmente, esse tipo de transmissão é a menos utilizada devido sofrer interferência da iluminação ambiente e interrupção por obstrução da passagem da luz.

Tabela 2.1: Características do Padrão IEEE 802.11

Padrão IEEE	Taxa de Transmissão de Dados	Limites de Frequência	Modulação
802.11b	até 11Mbps	2.4GHz – 2.485GHz	DSSS
802.11a	até 54Mbps	5.1GHz – 5.8GHz	OFDM
802.11g	54Mbps	2.4GHz – 2.485GHz	OFDM

Algumas características em comum desses padrões são:

- Possuem a mesma habilidade para reduzir a taxa de transmissão de dados quando necessário;
- Permitem trabalhar no modo ad-hoc e no modo infraestruturado;
- Utilizam a mesma estrutura para camada de enlace e superiores.

2.2.2 Camada de Enlace

O padrão IEEE 802 define duas camadas separadas, o LLC (*Logical Link Control*) e a MAC (*Media Access Control*), para a camada de enlace de dados do modelo OSI. No entanto, em redes sem fio existem muitas diferenças em relação ao protocolo Ethernet, devido à complexidade do ambiente sem fio em comparação a um sistema fisicamente conectado.

As principais funções da camada LLC são:

- Prover interface para camadas superiores
- Executar controle de fluxo e erro de pacotes.

As principais funções da camada MAC são:

- Prover um serviço de entrega confiável.
- Controlar acesso ao meio de transmissão LAN.

Em redes sem fio existem muitas diferenças em relação ao protocolo Ethernet, e é na subcamada MAC que estão as principais.

2.2.3 Descrição Básica da MAC

Duas questões novas surgem nas WLANs: o problema do terminal escondido e o do terminal exposto.

Terminal escondido:

Para exemplificar, considera-se a Figura 2.5a. Uma estação A está transmitindo para B, porém C também deseja transmitir para B, mas está fora do alcance de A. Isto faz com

que C não saiba que uma transmissão já se encontra em andamento e transmita seu pacote, ocasionando uma colisão em B.

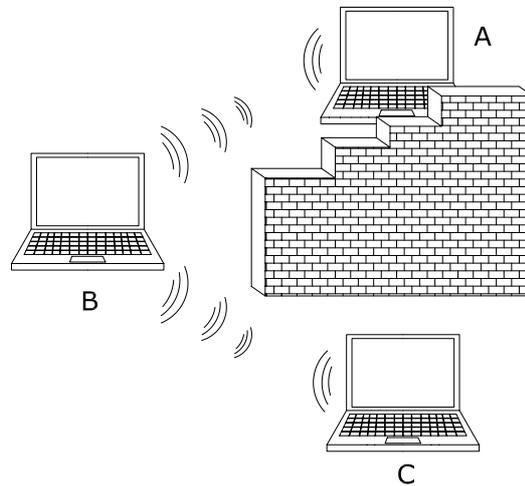


Fig.2.5.a Terminal escondido

Terminal Exposto:

Considere a Figura 2.5b. Uma estação B está dentro do alcance de C e transmitindo para A. Neste caso, a estação C deixa de transmitir para D por detectar portadora no canal. Na realidade, esta transmissão poderia ter sido realizada sem que houvesse colisão (D está fora do alcance de B, assim como A fora do alcance de C), causando a diminuição da eficiência no acesso ao meio.

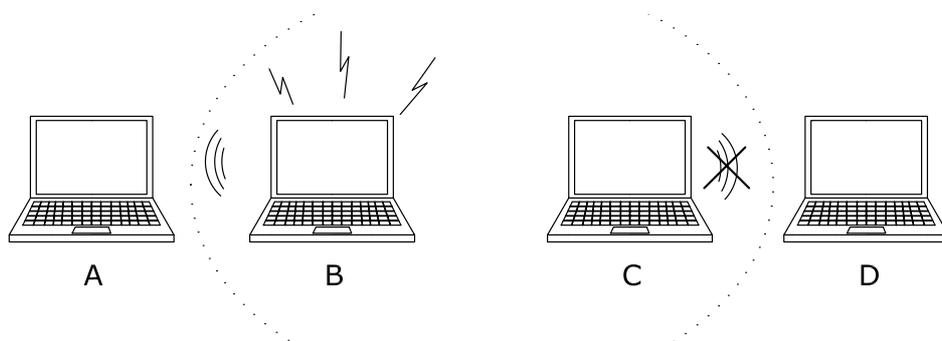


Fig. 2.5.b Terminal Exposto

Além desses problemas, tem-se que a maioria dos rádios é *half-duplex*, ou seja, ou transmitem ou recebem, não podendo fazer isso simultaneamente. Como consequência disso, não era eficaz para as WLANs utilizarem o mesmo protocolo de acesso que as redes Ethernet.

Isso quer dizer que, quando se fala de protocolos de acesso ao meio, existe o interesse em encontrar uma forma eficiente de compartilhar um dos principais recursos de uma rede de telecomunicações: o meio de transmissão.

Existem muitos algoritmos para alocar um canal de acesso múltiplo. No entanto, pode-se dizer que tudo começou com o protocolo ALOHA [TANE]. Esse protocolo em suas várias versões evoluiu para o método CSMA utilizado atualmente [KLEI] e [BIAN].

A idéia básica de um sistema ALOHA é permitir aos usuários que transmitam sempre que tiverem dados.

O avanço desse método ocorreu em 1972, com a proposta de dividir o tempo em intervalos discretos, cada intervalo correspondendo a um quadro. Esse método foi chamado de *slotted ALOHA*.

Surgem em seguida os protocolos com detecção de portadora – CSMA. Muitas adaptações dele já foram vistas e aplicadas, entre elas os conhecidos CSMA persistente e não persistente [TANE]. Atualmente, a maioria das redes locais utiliza o CSMA com detecção de colisão (CSMA/CD – *CSMA with collision detection*).

Nesse protocolo, o processo de transmissão é interrompido assim que se detecta a colisão. Para isso, a estação transmite e escuta o canal ao mesmo tempo, tentando fazer com que o tempo de ação, caso ocorra a colisão, seja o menor possível. Infelizmente em redes sem fio seria muito caro fazer com que as estações tenham esta habilidade de transmitir e escutar simultaneamente, por isto a detecção de colisão não é implementada.

Devido à detecção da colisão não ser eficiente para um canal sem fio, um mecanismo para prevenção de colisões é usado, já que em redes sem fio também existe o problema de estações ocultas (escondidas) e expostas. Surge então o CSMA/CA (*CSMA with Collision Avoidance*) [IEEE1] [CROW]. Nesse método, cada estação determina quando

acessar o meio, utilizando um esquema “escute antes de transmitir” (também conhecido como “sentir” o meio).

O CSMA/CA é utilizado pelo modo de operação DCF da camada MAC, a ser detalhada no Capítulo 3. A camada MAC define dois modos de acesso ao canal:

- um método distribuído básico (que é obrigatório): na Função de Coordenação Distribuída (*Distributed Coordination Functions* - DCF), essa decisão é realizada individualmente pelos pontos da rede;
- um método centralizado (opcional): também chamada de função pontual (*Point Coordination Function* - PCF), no qual a decisão de quando transmitir é centralizada em um ponto especial que determina qual estação deve transmitir e em que momento (evita teoricamente a ocorrência de colisões). Essa opção, devido a sua complexidade, não está implementada nos equipamentos atuais.

2.2.3.1 Função de Coordenação Distribuída (DCF)

No DCF, cada estação determina quando acessar o meio utilizando o protocolo CSMA/CA com reconhecimento. O DCF trabalha semelhantemente à função CSMA/CD da tecnologia de rede local cabeada (Padrão Ethernet 802.3), apenas com uma diferença: o protocolo CSMA/CD do Ethernet controla as colisões quando elas ocorrem, enquanto que o protocolo CSMA/CA do padrão sem fio apenas tenta evitar que as colisões ocorram.

A utilização dessa função distribuída é obrigatória para todas as estações e pontos de acesso nas configurações Ad Hoc e com infra-estruturada.

No método CSMA/CA, pode ocorrer colisões e esse método não garante a entrega correta dos dados. Com isso, uma estação após transmitir um quadro, necessita de um aviso de recebimento que deve ser enviado pela estação destino. Para isso, a estação que enviou o quadro aguarda um tempo (*timeout*) pelo aviso de recebimento do quadro por parte da estação destino. Caso esse aviso não chegue no tempo considerado, a estação origem realiza novamente a transmissão do quadro.

Em função da existência de estações escondidas, é acrescentado opcionalmente ao método CSMA/CA com reconhecimento um mecanismo opcional que envolve a troca de quadros de controle RTS (*Request To Send*) e CTS (*Clear To Send*) antes da transmissão de quadros de dados.

Nesse mecanismo, uma estação, antes de efetivamente transmitir os dados, transmite um quadro de controle RTS, que carrega uma estimativa da duração no tempo da futura transmissão do quadro de dados. A estação de destino, em resposta ao quadro de controle RTS, envia um quadro de controle CTS avisando que está pronta para receber os dados. Só então a estação transmissora envia o quadro de dados, que deve ser respondido com um reconhecimento (ACK) enviado pela estação receptora. O quadro RTS possui basicamente as funcionalidades de reservar o meio para a transmissão do quadro de dados e de verificar se a estação de destino está pronta para receber o quadro de dados.

2.2.3.2 Mecanismo de Fallback versus SNR.

Atualmente, os padrões IEEE 802.11 apresentam diferentes taxas máximas para transmissão de dados.

Muitos fenômenos afetam a qualidade do sinal transmitido e conseqüentemente as taxas de dados: atenuação, desvanecimento, interferência de outras fontes de radiação, etc.

A qualidade de transmissão pode ser alterada apenas temporariamente quando, por exemplo, alguém se desloca no ambiente, fecha uma porta ou move objetos de lugar. No entanto, existem oscilações duráveis quando, por exemplo, muda-se a estação móvel de sala, afastando-se do AP. Nesse caso, a atenuação aumenta, tendo um efeito definitivo sobre a energia do sinal de rádio. Isso faz com que diminua a SNR (*Signal to Noise Ratio*) e aumente o BER (*Bit error rate*).

Como quanto maior a taxa de transmissão de dados, maior a probabilidade de erro, existe o mecanismo de adaptação de taxa: automaticamente um algoritmo diminui a taxa de transmissão de dados, até que a taxa de erros (BER) também diminua para um valor aceitável.

O algoritmo mais conhecido é o ARF - *Auto Rate Fallback Algorithm* [KAME] que altera a taxa de dados em que a estação está transmitido, normalmente baseada na SNR ou valores estatísticos (vazão, taxa de erro, retransmissão, etc.)

No ARF, cada estação que envia pacotes estará apta a usar uma taxa de transmissão maior após um número fixo de transmissões com sucesso em uma dada taxa, e conseqüentemente também diminuirá de taxa após duas transmissões sem sucesso.

Independentemente do algoritmo, todos os padrões possuem uma adaptação de taxa dinâmica. Assim, essa adaptação de taxas é uma técnica amplamente utilizada em redes sem fio para alterar as transmissões com a variação de qualidade do canal. De maneira geral, as informações sobre o canal são utilizadas para tomar decisões sobre a mudança de taxa. Podemos relacionar essa adaptação com a SNR.

Em relação à MAC, detalha-se no Capítulo a seguir os principais efeitos referentes à anomalia.

Capítulo 3

MAC – A Origem do Problema

Diversos fatores influenciam o desempenho de uma rede IEEE 802.11, nesse trabalho especificamente considerando as redes IEEE 802.11b infra-estruturada. Na busca por possíveis propostas de melhoria do desempenho dessas redes, muitas situações tem sido exploradas. Constatou-se, no entanto, que uma das principais fontes de problema são a MAC e seu método de acesso CSMA/CA.

3.1 Princípio de Funcionamento

Como já comentado no Capítulo 2, as redes Ethernet utilizam-se do método de acesso CSMA/CD. No caso das WLANs tem-se então o CSMA/CA [IEEE1] [CROW] .

Segundo [KURO] os principais motivos para a utilização desse protocolo são:

- para detectar colisão seria necessário enviar e receber pacotes ao mesmo tempo; como a potência de transmissão é pequena, o hardware para detecção seria muito caro;
- ainda que fosse possível enviar e receber pacotes simultaneamente, há o problema dos terminais escondidos e expostos e do desvanecimento do sinal.

No CSMA/CA, a prioridade no acesso ao meio sem fio é controlado através do uso de intervalos de tempo entre *frames* - IFS (*Interframe Spacing*). Os intervalos de tempos IFS são períodos obrigatórios de tempo nos quais o canal permanece ocioso. Além disso, quatro variações de IFS são definidos no padrão IEEE 802.11, para fornecer diferentes níveis de prioridade para diferentes tipos de pacotes. Estes são representados por:

- SIFS: *Short* IFS (IFS curto).

O SIFS é utilizado para prioridades extremamente altas de pacotes. O CTS e o ACK são exemplos destes pacotes. O tempo SIFS é calculado de maneira que a estação transmissora seja capaz de alterar o seu modo de transmissão para o modo recepção e, assim, ser capaz de decodificar o pacote que irá receber em seguida.

- DIFS: *Distributed Coordination Function* IFS (Função Coordenada de Distribuição de IFS).

Deve ser utilizado pelas estações que operam sob a função de coordenação DCF. É utilizado tanto para a transmissão *de frames* de dados quanto de gerenciamento. Assim, se um ACK e um pacote de dados estiverem esperando simultaneamente pela ociosidade do canal, o ACK será transmitido antes do pacote de dados. Isso ocorre porque o primeiro espera um tempo SIFS, que é menor que o tempo DIFS esperado pelo segundo.

- PIFS: *Point Coordination Function* IFS (Função Coordenada no Ponto IFS).

Deve ser utilizado somente pelas estações que operam sob a função PCF, para ganhar prioridade de acesso ao meio e assim favorecer aplicações em tempos reais, por exemplo.

- EIFS: *Extended* IFS (IFS Estendido).

É um parâmetro de assistência para congestionamentos e é usado na ocorrência de erros. Disponibiliza tempo suficiente a uma outra STA para reconhecer o pacote reenviado antes que a STA transmita novamente.

Os valores reais do IFS são especificados pela camada física. A camada física tem um parâmetro chamado de *slot time*. O PIFS é igual ao SIFS + *slot time*. Já o DIFS é igual ao SIFS + 2 *slot time*. No entanto o EIFS, apesar de derivado do SIFS e DIFS, inclui em seu cálculo o valor do tempo de preâmbulo e também do ACK.

A Figura 3.1 [STAL] apresenta a lógica de funcionamento da MAC em relação aos tempos de acesso e escuta do canal.

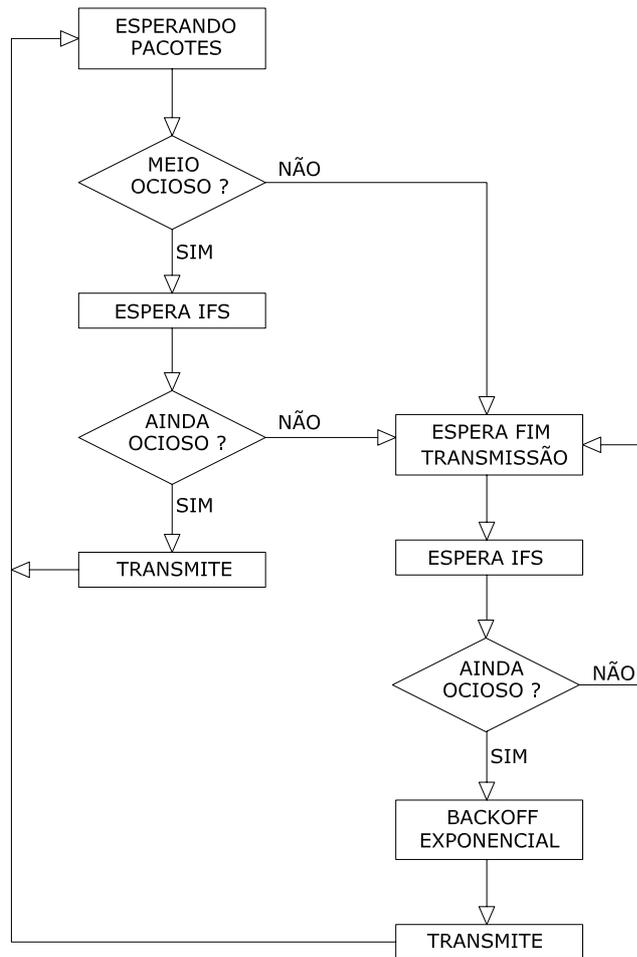


Fig. 3.1 Funcionamento da MAC

3.1.1 *Backoff* Aleatório e *Backoff* Exponencial Binário

Por razões de eficiência, o DCF utiliza uma escala discreta de tempo de *backoff*. Assim, no caso de a estação encontrar o canal ocupado, ela tem de esperar por algum tempo antes de tentar sentir novamente o canal. Este período é chamado de tempo de *backoff*. O tempo imediatamente seguinte a um DIFS é dividido em *slots* e uma estação só pode transmitir no início de cada *slot*. O *slot* de tempo depende da camada física e influirá nos cálculos de tempo de permuta entre os estados de recebimento e transmissão, assim como no tempo de sinalização à MAC o estado do canal. Portanto, colisões só ocorrem no caso em que dois ou mais terminais escolham o mesmo *slot* de tempo para iniciar a transmissão.

A tabela 3.1, indica os valores do *slot time* e de CW para cada camada física:

Tabela 3.1: Valores do *slot time* e de CW para o padrão IEEE 802.11

Camada Física	<i>Slot Time</i> (β)	CW_{\min}	CW_{\max}
FHSS	50 μ s	16	1024
DSSS	20 μ s	32	1024
IR (<i>Infrared</i>)	8 μ s	64	1024

Na Figura 3.2 podemos verificar a temporização da MAC, quanto aos tempos vistos (IFS e suas variações) e a CW.

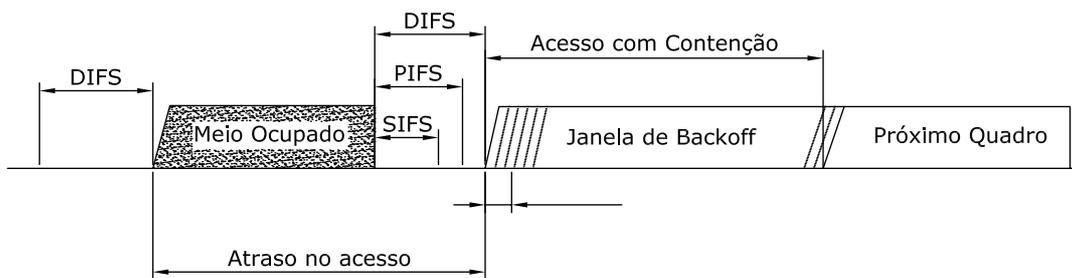


Fig. 3.2 Evolução dos tempos para acesso

O tempo de *backoff* é selecionado aleatoriamente no padrão IEEE 802.11 e por isso ele é conhecido como *Backoff* Aleatório. Esta é a garantia de que duas estações, cada qual podendo ter abandonado juntas o canal, não o acessem novamente juntas. O período é gerado por um gerador de números aleatórios ao longo de todo o tempo em que a estação esteja no *backoff*.

A cada transmissão de pacote, o tempo de *backoff* é escolhido uniformemente no intervalo $[0, cw - 1]$, onde $cw - 1$ representa o tamanho de CW e seu valor inicial é CW_{\min} . Após cada tentativa falha na transmissão (ACK não recebido pela STA transmissora), cw é dobrado $[16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024]$ até o valor de CW_{\max} .

Ao determinar uma transmissão falha, tendo como consequência a necessidade de retransmissão, a STA gera um número aleatório no intervalo $[0, \beta \times (2^{i+j} - 1)]$, onde $i \geq 1$ é o número de transmissões para o mesmo pacote, e j depende da camada física (por exemplo, se a camada física for DSSS, então $j = 4$ se for FHSS, $j = 3$).

Assim, considerando DSSS como o padrão dessa dissertação, a primeira colisão irá gerar um período de *backoff* no intervalo $[0, 31\beta]$; a segunda colisão gera um número no intervalo $[0, 63\beta]$; a terceira entre $[0, 127\beta]$ e assim sucessivamente. Segundo [OHAR] esse intervalo é o que é chamado de Janela de Contenção - CW.

Pode-se dizer então que o período de *backoff* exponencial pode ser interpretado como sendo uma janela temporal com a qual uma estação é permitida concorrer pela transmissão. O contador de backoff é decrementado à medida que o canal permanece ocioso. Quando uma transmissão é detectada, este contador é paralizado. Quando o contador atinge zero, a estação transmite o pacote. Se essa transmissão for bem sucedida, o valor de cw é reinicializado com o valor de CW_{\min} . Caso contrário, o pacote deverá ser retransmitido, tendo cw o dobro do seu valor anterior.

É importante destacar que o mecanismo de backoff exponencial minimiza, mas não elimina, a chance de duas ou mais STAs transmitirem ao mesmo tempo, gerando colisões no canal.

3.2 Descrição da Anomalia

As redes WLAN IEEE 802.11b possibilitam a operação em quatro taxas de transmissão (1Mbps, 2Mbps, 5,5Mbps e 11Mbps) na camada física, estabelecendo regiões de cobertura para cada taxa como mostrado na Figura 3.3 de forma hipotética através de círculos concêntricos ao AP. Essas áreas hipotéticas baseiam-se na Tabela 3.2.

Considera-se que no centro da figura esteja o AP e a partir dele cada região apresenta uma intensidade do sinal recebido dele. Conseqüentemente, devido ao mecanismo de *fallback*, cada região apresentará uma taxa de transmissão, que vai diminuindo conforme a STA vai se afastando do AP.

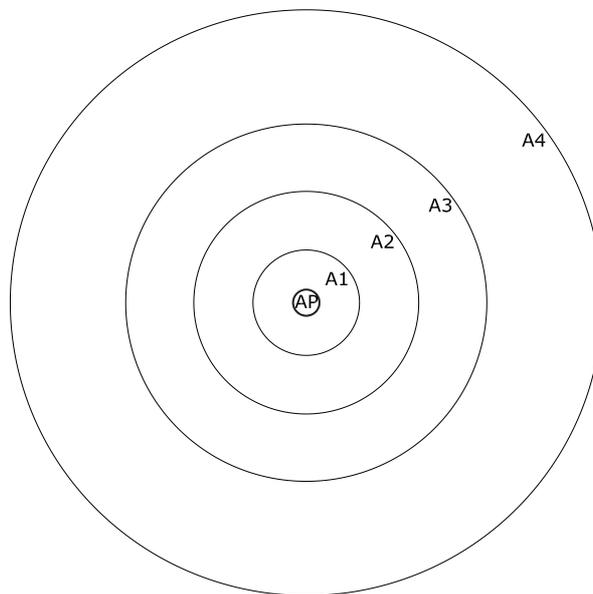


Fig.3.3 Áreas de variação da taxa de transmissão

Em [PROX], observam-se dados práticos sobre uma rede WLAN disponível no mercado. Estes dados estão sumarizados para ambiente semi-aberto na Tabela 3.2. O ambiente semi-aberto é o mais adequado para representar redes PWLAN, como no caso de uma praça de alimentação de um shopping ou de um aeroporto.

Isso também pode ser verificado através de cálculos uma vez que o tipo de ambiente é tabelado para um certo valor μ e o cálculo desse valor envolve os valores de sensibilidade e da distância de alcance de cada equipamento nas diversas taxas.

A sensibilidade do equipamento está relacionada com a taxa de bits errados (BER). No caso da Wlan, o valor de BER é sempre máximo de 10^{-5} . Como esse valor é função do SNR que por sua vez está relacionado com a potência transmitida / recebida e a taxa de dados, para que o valor de BER não ultrapasse o limite permitido é feita a degradação da taxa de transmissão.

Na Tabela 3.3, existe um comparativo para o mesmo equipamento, porém considerando ambiente fechado (como escritório, por exemplo) e ambiente aberto (sem barreiras).

Apesar de os valores serem consideravelmente diferentes, sempre à medida que a distância entre as estações e o AP aumenta, diminui-se a potência média do sinal percebida pelo receptor (atenuação do sinal enviado) e conseqüentemente a taxa de transmissão.

Tabela 3.2: Especificações WLAN para ambiente semi-aberto

	Ambiente semi-aberto				
	Taxa [Mbps]	Sensibilidade [dBm]	Raio [m]	Área [m ²]	Área %
A1	11	-82	50	7850	19
A2	5,5	-87	70	7536	18
A3	2	-91	90	10048	24
A4	1	-94	115	16093	39

Tabela 3.3: Especificações WLAN para ambiente fechado e aberto

	Taxa [Mbps]	Ambiente Aberto		Ambiente Fechado	
		Raio [m]	Área [m ²]	Raio [m]	Área [m ²]
A1	11	160	80422	25	1963
A2	5,5	270	229015	35	3848
A3	2	400	502640	40	5026
A4	1	550	950303	50	7853

Considerando as quatro áreas existentes ao redor do AP, o decaimento da taxa de transmissão ocorrerá em função da atenuação do sinal: começando em A1 com 11Mbps (região mais próxima do AP), até chegar em A4 com 1Mbps (região mais distante do AP, porém ainda com conexão) ou passar de A4, porém nesse caso sem conseguir se comunicar com o AP. Esse princípio de funcionamento também pode ser observado na Figura 3.4:

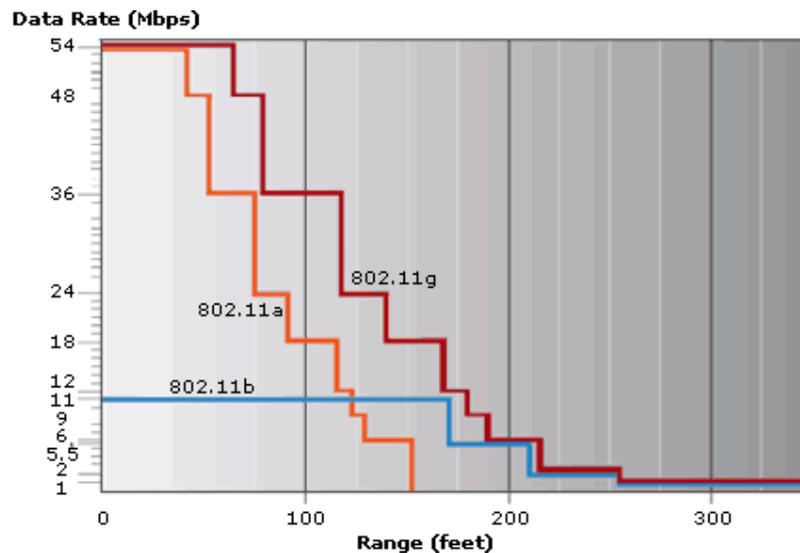


Figura 3.4: Taxa de transmissão versus alcance

Pode-se também considerar a mudança de taxa não em função da distância, mas sim em relação ao ruído existente no ambiente ou ao efeito de multi-percursos, que indiretamente estão relacionados com a distância.

Os ruídos causam distorções nos sinais e são os maiores limitantes do desempenho de sistemas de comunicação. Geralmente são impostos pelas características do meio físico ou provenientes de interferências de sinais indesejáveis. A quantidade de ruído presente numa transmissão é medida em termos da razão entre a potência do sinal e a potência do ruído (SNR).

Já o efeito de multi-percurso ocorre quando a trajetória do sinal entre TX (Transmissor) e RX (Receptor) percorre caminhos de comprimentos desiguais. A recepção destes sinais produz um sinal distorcido. Quanto maior a diferença temporal de chegada,

maior é a produção de erros devido à interferência entre símbolos. Este efeito é tanto pior quanto maior for a taxa de transmissão e a distância do AP. Nesse caso, torna-se perceptível a necessidade do mecanismo de fallback: como na maioria das vezes não é possível modificar a distância, muda-se então a taxa de transmissão em uma tentativa de melhoria.

Assim, é de grande importância a localização da estação, já que isso influencia diretamente a sua taxa de transmissão. Isso ainda é mais complicado quando se fala em PWLAN, que por se localizar em ambientes semi-abertos e com os mais diferentes tipos de pessoas acessando está mais sujeita aos fatores de ruído e multi-percurso.

O grande problema de uma rede com taxas de transmissão diferenciadas é o que causa o efeito chamado de anomalia. A anomalia na camada MAC é também conhecida como anomalia de desempenho e reflete a justiça de acesso à rede, considerando uma estação com probabilidade de acessar o canal independentemente da posição e da taxa de dados de transmissão.

Devido ao método de CSMA/CA atribuir igual probabilidade de acesso ao meio para todas as estações, observa-se que em longos períodos de tempo, a captura do canal tende a ser alternada entre todas as estações presentes na rede. O grande problema disso é que, ao longo desse tempo, para transmitir quantidades iguais de dados, uma estação com taxa de transmissão mais baixa toma o canal por mais tempo que uma estação com a taxa máxima. Isso foi primeiramente demonstrado por [HEUS]. Nesse trabalho, foi usado um modelo analítico e a hipótese considerada é de a rede estar saturada. Assim, foi demonstrado que, se existem dois terminais com taxas diferentes, a vazão de saturação de qualquer um dos terminais da rede será igual ao do terminal de menor taxa.

3.3 Estimativa de Anomalia na Camada MAC

Essa anomalia demonstrada por [HEUS] pode ser quantificada de maneira simplificada considerando dois pares de estações sem fio conectadas conforme a Figura 3.5, onde W (*wired* - cabeado) representa a estação fixa cabeada.

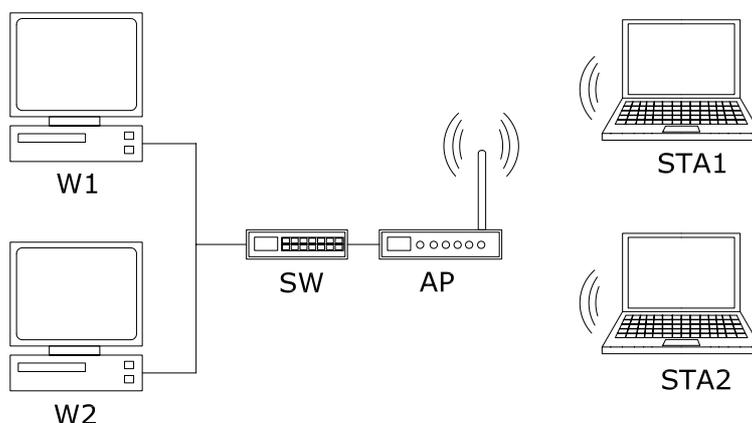


Fig 3.5 Cenário utilizado para demonstrar o efeito da anomalia

Nessa estrutura, todas as STAs estão sob a cobertura de um único AP. Cada estação sem fio comunica-se com uma estação fixa correspondente através do AP e de uma *Switch*, que é um aparelho que repassa os dados do computador de origem somente ao computador de destino.

Para efeito de demonstração, será considerado o padrão IEEE 802.11b. No entanto, como já foi dito, as considerações feitas podem ser ampliadas para os padrões IEEE 802.11g e também IEEE 802.11a já que por padronização a MAC é a mesma.

A camada física utiliza DSSS (*direct-sequence spread spectrum*). Como especificado no padrão IEEE 802.11b, a taxa de cabeçalho na camada física é sempre 1 Mbps. Além disso, supõe-se tráfego de descida (*downlink*) usando CBR (*constant bit rate* – taxa de bits constante). Com essas duas condições, as STAs tem dados para serem enviados o tempo todo.

A eficiência no processo analisado é de acesso assíncrono da MAC, utilizando o protocolo CSMA/CA. Essa eficiência é diferente para cada taxa de dados da camada física como pode ser verificado na Tabela 3.4 e os cálculos para obtenção dela podem ser verificados no Apêndice 1.

Tabela 3.4: Eficiência

Taxa na camada 1 (Mbps)	Eficiência (ρ_n)	Taxa real (Mbps)
11	69,5%	7,6
5,5	80,9%	4,4
2	90,4%	1,8
1	93,0%	0,9

Pode-se afirmar que cada estação sem fio tomará o canal alternadamente para a transmissão de dados. Supondo que ambas as estações tenham pacotes do mesmo tamanho (composto por n bits, representados por B_{T_n}) para transmitir, transmitindo no entanto com taxas diferentes, pode-se ilustrar essa situação de acordo com a Figura 3.6:

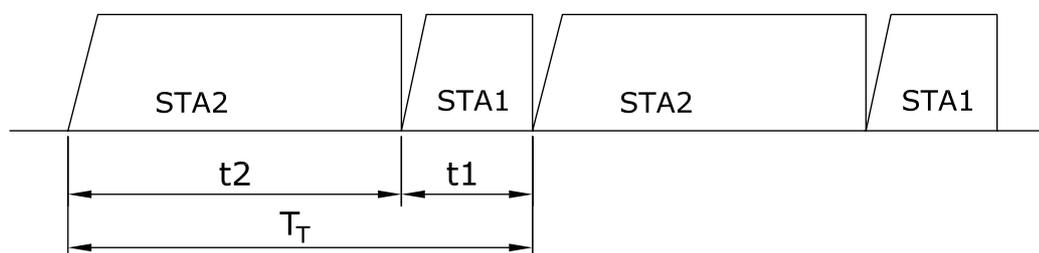


Fig. 3.6. Tomada do canal por 2 estações (por T_T)

Nesse caso, observa-se que STA1 irá transmitir o pacote dela e apenas após terminar é que a STA 2 poderá iniciar a transmissão do seu pacote. Assim, apesar da quantidade de informação ser a mesma, as STAs demoram tempos diferentes para transmiti-la. O tempo total de transmissão é a soma dos tempos que cada STA ocupa o canal, isto é

$$T_T = T_1 + T_2 \quad (3.1)$$

A vazão (R_{TN}) de cada estação sem fio (STAn) pode ser determinada por:

$$R_{Tn} = \frac{B_{Tn}}{T_T} \quad (3.2)$$

onde B_{Tn} é o total de bits transmitidos pela STAn e T_T é o tempo total considerado na transmissão. O total de bits transmitidos é dado por:

$$B_{Tn} = \rho_n R_n T_n \quad (3.3)$$

Onde ρ_n é a eficiência, R_n é a taxa de transmissão, T_n é o tempo de transmissão da estação n. O tempo T_n pode ser calculado para cada estação como:

$$T_n = T_T C_n \quad (3.4)$$

onde C_n representa a proporção de tempo de transmissão da estação n.

Manipulando as equações:

$$R_{Tn} = \rho_n R_n C_n \quad (3.5)$$

Com o tráfego CBR, o fator C_n pode ser obtido analisando a proporção de tempo que cada estação ocupa o canal em função de sua taxa na camada física.

Consideram-se um longo período de observação, probabilidade igual de tomada do canal por cada STA e uma transmissão simples da mesma quantidade de dados para cada STA; assim, a probabilidade de tomada do canal é tal que o par com taxa mais baixa ocupa o canal por mais tempo.

Inicialmente, para exemplificar consideram-se duas estações transmitindo na mesma taxa. Se ambas as estações têm a mesma quantidade de dados para transmitir e uma estação só transmitirá após o término da transmissão da outra, temos que o canal ficará ocupado por dois tempos iguais. Assim,

$$C_1 = \frac{1}{2} \quad C_2 = \frac{1}{2} \quad (3.6)$$

Se forem consideradas ambas as estações transmitindo a 11Mbps e usando o fator de eficiência da Tabela 3.4, a vazão de cada estação sem fio será:

$$R_{T1} = 3,82Mbps \quad e \quad R_{T2} = 3,82Mbps$$

Se as estações transmitissem a 1Mbps teríamos a vazão de cada uma dado por:

$$R_{T1} = 465kbps \quad e \quad R_{T2} = 465kbps .$$

No entanto, para verificar o efeito da anomalia, basta mudar o valor de uma das estações e considerar uma estação lenta (1Mbps) e uma estação rápida (11Mbps) ambas querendo transmitir a 11Mbps conforme a Figura 3.7, onde a STA2 se afasta do AP.

Na média, essa proporção é que o par com a estação de 1Mbps ocupará o canal 11 vezes mais tempo que a estação a 11Mbps; assim:

$$C_1 = \frac{1}{12} \quad C_2 = \frac{11}{12} \quad (3.7)$$

Usando novamente o fator de eficiência da Tabela 3.4, a vazão de cada estação sem fio será aproximadamente:

$$R_{T1} = 630kbps \quad e \quad R_{T2} = 850kbps$$

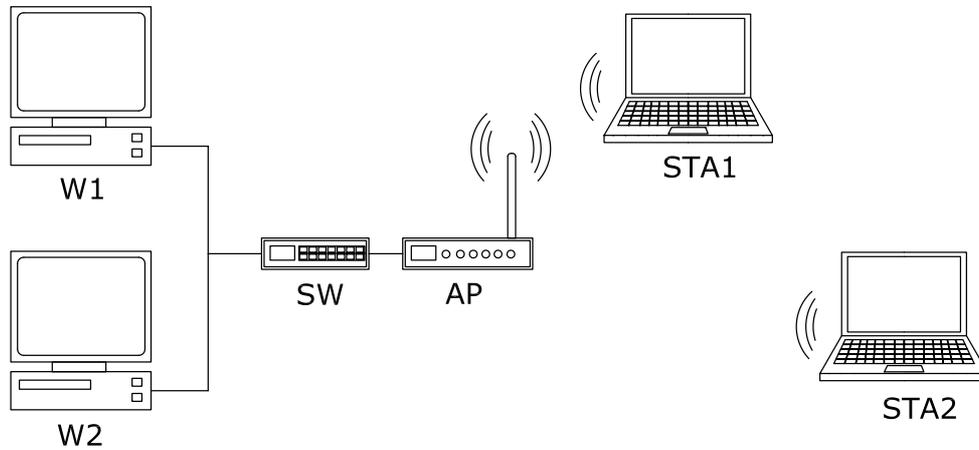


Fig 3.7 Cenário utilizado com anomalia

A diferença na vazão é causada pela eficiência de dados que é menor para a estação STA₁. É interessante observar que essa estação com a taxa de dados de 11Mbps na camada física tem uma vazão menor que a STA₂ que opera a 1Mbps. Esta é a anomalia em função de um esquema assíncrono de acesso promovido pelo CSMA/CA.

Considerando-se uma vazão média do sistema STA1-W1 e STA2-W2 chega-se a:

$$R_m = \frac{R_{T1} + R_{T2}}{2} \quad (3.8)$$

Generalizando essa consideração para n estações, tem-se:

$$R_m = \sum_{i=1}^N \frac{R_{Ti}}{n} \quad (3.9)$$

Percebe-se que no caso de uma estação rápida (11Mbps) e outra lenta (1Mbps) tem uma vazão média de 623,9 kbps, apenas um pouco a mais do que se ambas estivessem a 1Mbps.

Assim, na Figura 3.8 é apresentado a vazão para a combinação de estações em áreas diferentes (e conseqüentemente taxas de transmissão diferentes), sendo perceptível o efeito da anomalia, já que a estação de 11Mbps está sempre com menor vazão.

É fácil perceber que o problema se torna ainda mais sério quando o número de estações lentas aumenta na rede.

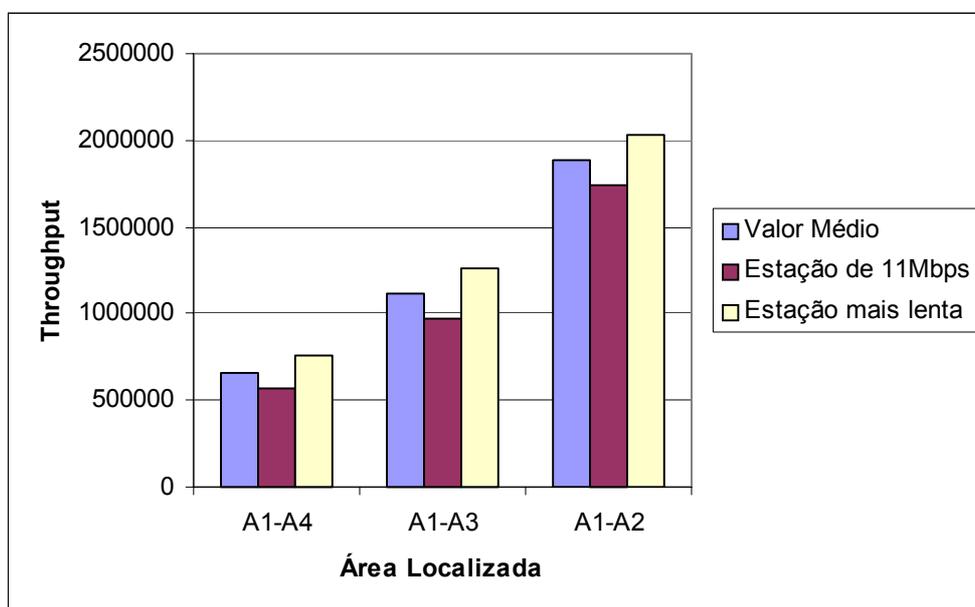


Fig. 3.8 Vazão

A anomalia pode ser facilmente observada como pode ser verificado em alguns trabalhos. Um deles [BRAN] desenvolve uma comparação entre as tecnologias FAT e THIN (arquiteturas proprietárias). Nesse trabalho é perceptível a existência da anomalia (arquitetura FAT – Figura 3.9a) e uma possível eliminação da anomalia (arquitetura THIN – Figura 3.9b).

Através desses experimentos fica claro que em arquiteturas proprietárias já existem mecanismos para a redução do efeito da anomalia e uma conseqüente melhoria de desempenho.

Pelas Figuras 3.9a e 3.9b pode-se observar que a duração da simulação é de 600s, e que em cada linha do gráfico é inserida mais uma STA1.

Assim, na primeira linha do gráfico tem-se apenas uma estação de 11Mbps transmitindo dados. Após 20s, inicializa-se outra estação de 11Mbps, e o mesmo em t=40s. Em t=60s, inicia-se então a transmissão de uma estação a 1Mbps. Nesse instante pode-se observar a diferença entre as duas arquiteturas: na Figura 3.9a. acontece a anomalia, e todas as transmissões são influenciadas; já na Figura 3.9b, as primeiras estações (11Mbps) permanecem inalteradas mesmo com o início da transmissão da estação de 1Mbps.

Isso também comprova que em arquiteturas proprietárias já existem possíveis soluções para a anomalia. No capítulo a seguir será apresentada a sugestão para minimizar a anomalia através de CW.

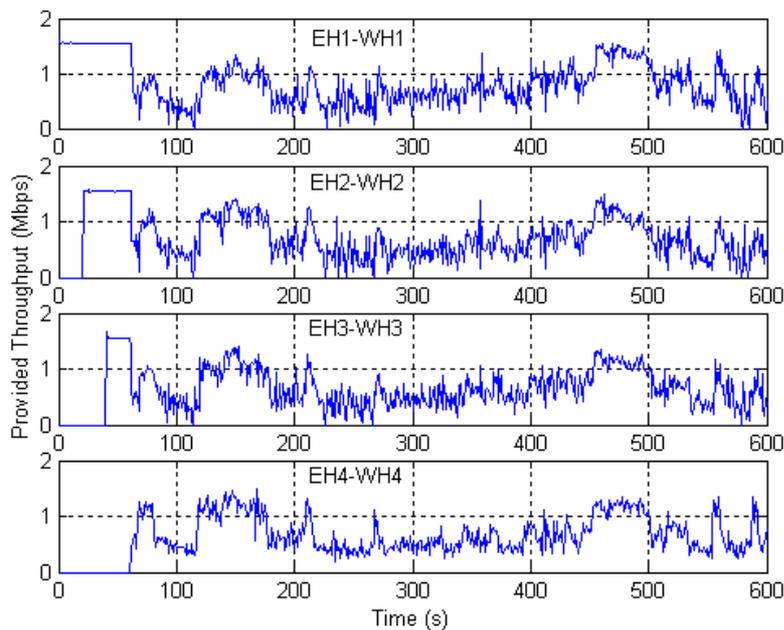


Fig. 3.9a: Arquitetura FAT [BRAN]

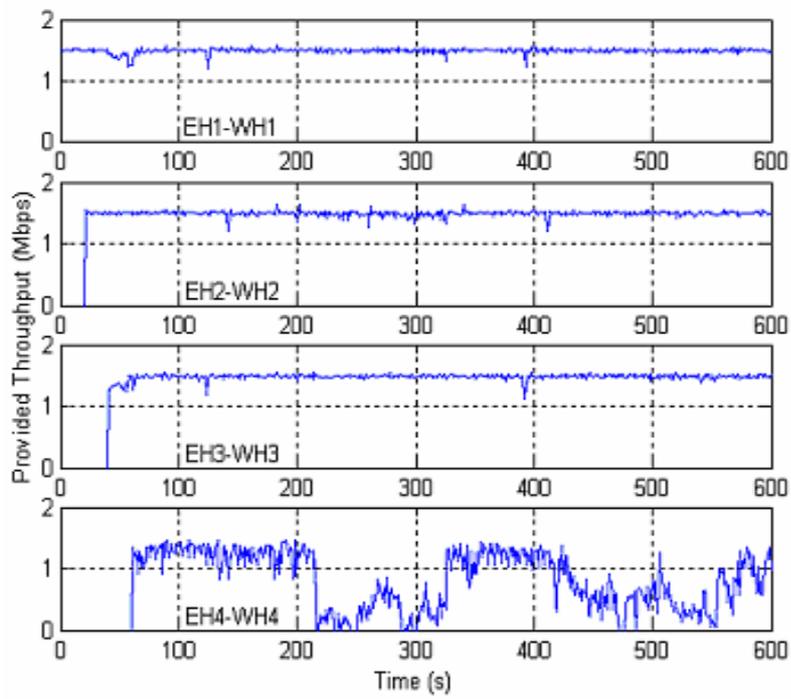


Fig. 3.9b: Arquitetura THIN [BRAN]

Capítulo 4

Proposta de Melhoria

A busca de técnicas para melhorar a qualidade de serviço em redes WLAN vem acontecendo há um bom tempo [IEEE4], [FREI]. As técnicas mais utilizadas concernem a alteração de parâmetros de tempo da rede para priorização de tráfego. Porém, estas estratégias se tornam praticamente inúteis caso o desempenho da rede na camada física não atenda a parâmetros mínimos de qualidade.

Com a anomalia, pode-se dizer que esses parâmetros não são atingidos. Sendo assim, é necessário primeiramente resolver esse problema para depois pensar em serviços específicos (VoIP, Vídeos, etc.) assim como em aumento de QoS.

Alguns trabalhos como [CARV] e também [KIM] tentaram resolver a anomalia através de QoS. Considerando que a qualidade de serviço está relacionada com as camadas superiores do protocolo do modelo OSI enquanto que o método de acesso está na MAC, não se considera essa uma abordagem completa para resolução do problema. Aceita-se, sim, que esse problema do compartilhamento do canal se encontra nas camadas inferiores do protocolo. Assim, uma vez garantida a taxa de transmissão nas camadas inferiores, aí sim é possível abordar a QoS nas camadas superiores. Um outro motivo que não justifica apenas essa abordagem é que a parte de QoS está relacionada com o padrão IEEE 802.11e, padrão esse que ainda não se encontra no mercado.

Outro trabalho que tentou resolver a anomalia foi [IANN] que utiliza o princípio de fragmentação encontrado antigamente em vários APs. Porém, como essa opção deixou de existir nos APs mais atuais, a abordagem não mais resolve o problema da anomalia.

A proposta desse trabalho de mestrado para reduzir a anomalia, utiliza-se do conceito de SNR para controlar a variação da janela de contenção e assim priorizar a estação com melhor SNR, e conseqüentemente melhor taxa.

4.1 Equacionamento da Proposta

Como visto no Capítulo 2, sabe-se que toda vez que a SNR começa a piorar, o mecanismo de *fallback* entra em ação, degradando a taxa de transmissão de dados. Sendo assim, é possível identificar a estação com baixa relação SNR de acordo com a taxa em que está transmitindo e vice-versa.

Neste item, propõe-se uma estratégia para solucionar a anomalia, diferenciando estações com altas taxas daquelas com baixas taxas através da SNR. Conseqüentemente pode-se alterar o valor da janela de contenção e assim priorizar estações com melhores condições utilizando esse parâmetro.

O mecanismo de *backoff* insere um tempo de contenção (CT – *contention time*) através de CW . Esse CT é o tempo que cada estação sem fio espera para acessar a WLAN e transmitir os dados e está relacionado com a duração da CW , já que

$$CT = CW \times slottime \quad (4.1)$$

Como o valor de CW varia entre um valor mínimo ($CW_{\min} = 31$) até um valor máximo ($CW_{\max} = 1023$), através de um incremento exponencial binário já visto no Capítulo 3, na Tabela 4.1 apresentam-se os valores de CT , considerando-se as CWs intermediárias.

Em [AAD1], é apresentado um esquema de diferenciação de serviço entre estações com taxas iguais utilizando variação na janela de contenção. Nesse caso, o valor da janela de contenção é modificado de acordo com a prioridade da estação.

Assim, o valor de CW ao invés de variar entre $[0, \beta \times (2^{i+j} - 1)]$, passará a variar no intervalo $[0, (p^{i+j} - 1)]$, onde p é um valor de prioridade que substitui o exponencial binário.

Já a idéia básica da priorização através da CW, aqui apresentada, é fazer com que a estação de 11Mbps passe a utilizar sempre $cw = CW_{\min}$, enquanto que as demais estações que transmitem a taxas menores utilizem $cw = CW_{\max}$.

Em princípio, o mecanismo de exponencial binário seria então trocado por um mecanismo fixo que a partir da SNR estabeleceria a grandeza da CW para valores pré-estabelecidos.

Tabela 4.1: Janela de contenção e tempo de duração

	Janela (cw)	CT (ms)
CWmin	32	6,20E-04
CW1	64	1,26E-03
CW2	128	2,54E-03
CW3	256	5,10E-03
CW4	512	1,02E-02
CWmax	1024	2,05E-02

Esses valores podem também variar de acordo com a política de gerenciamento da rede. Um exemplo poderia ser, no caso das redes IEEE 802.11b, usar para a taxa de 11Mbps (melhor SNR) o valor de $cw = 32$. A partir do momento em que a SNR piore, e conseqüentemente o mecanismo de *fallback* entre em ação diminuindo a taxa, pode haver um acréscimo na CW, até que a estação chegue em 1Mbps e esteja com o valor de $cw=1023$.

Considerando o cenário utilizado no Capítulo 3 (Figura 3.7) com uma estação transmitindo a 11Mbps e outra a 1Mbps, tem-se então uma estação com CW=32 (boa SNR)

que será definida com $n=1$ ou STA_1 , e outra com $CW=1024$ (SNR ruim) definida como STA_2 .

Considerando então a relação entre cw da estação ruim (CW_{\max}) e cw da estação boa (CW_{\min}), aqui definida como α :

$$\alpha = \frac{CW_{\max}}{CW_{\min}} \quad (4.2)$$

tem-se para esse caso que $\alpha = \frac{1023}{31} = 33$.

Adaptando a Equação 3.1, tem-se agora que T_T é a soma do tempo que cada estação transmitirá ponderado em 33 vezes para a estação mais rápida, ou seja:

$$T_T = \alpha(T_1) + (T_2) \quad (4.3)$$

onde T_1 é o tempo da estação de 11Mbps e T_2 o da estação a 1Mbps.

Pode-se dizer então que STA_2 tenderá a transmitir 33 vezes mais lentamente que a estação STA_1 , ou seja a cada transmissão da estação mais lenta, têm-se 33 transmissões da estação de 11Mbps:

$$T_T = 33 \times T_1 + 1 \times T_2 \quad (4.4)$$

Para o cálculo dos bits transmitidos, adaptando-se 3.3, tem-se então que a quantidade de bits também fica ponderada para STA_1 . Assim:

$$B_{T_n} = \rho_n R_n T_n \times 33 \quad (4.5)$$

A proporção de tempo que cada estação ocupará o canal (Equação 3.4) também será modificada, favorecendo a estação com boa SNR (STA₁). As novas proporções serão dadas por:

$$C_1 = \frac{\alpha T_1}{\alpha T_1 + T_2} \text{ e } C_2 = \frac{T_2}{\alpha T_1 + T_2} \quad (4.6)$$

Com essa nova consideração, pode-se afirmar que a vazão da STA₁ no sistema com priorização será calculado por:

$$R_{T1} = \rho_1 R_1 \frac{T_1}{T_1 + \frac{T_2}{\alpha}} \quad (4.7)$$

Enquanto isso, para a STA₂ tem-se:

$$R_{T2} = \rho_2 R_2 \frac{T_2}{\alpha T_1 + T_2} \quad (4.8)$$

Utilizando então as novas equações e considerando $CW_{\min}=32$ and $CW_{\max}=1024$ para o mesmo cenário, pode-se chegar a vazão do sistema com priorização que será:

$$R_{T1} = 3,38Mbps \quad \text{e} \quad R_{T2} = 137kbps$$

o que é bem diferente dos valores anteriormente encontrados.

Esses novos valores modificam os tempos que cada estação toma o canal (Figura 3.6), conforme a Figura 4.1:

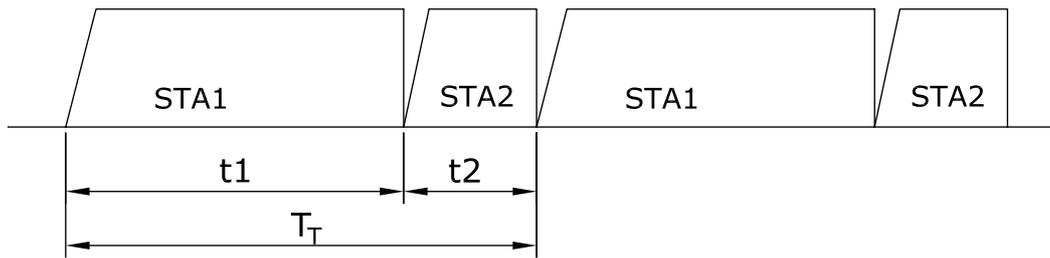


Fig. 4.1 Tomada do canal com priorização

Apesar da considerável piora da STA₂, a priorização favorece uma melhora do desempenho da rede como um todo, conforme a Tabela 4.2. Além disso, é possível a utilização de valores intermediários na priorização para melhorar a STA boa e também não prejudicar tanto a STA ruim.

Tabela 4.2: Resultados da Simulação

Estação	Com anomalia [Kbps]	Com priorização [Kbps]
STA1	638	3400
STA2	853	137
Vazão Média	740	1768

Considerando a vazão média, tem-se para esse caso um valor de $R_m = 1768$ Mbps, demonstrando um fator de acréscimo de aproximadamente 2,5, valor esse obtido também através das simulações conforme serão vistos no Capítulo 5.

Capítulo 5

Simulações

As definições do Capítulo 3 e o mecanismo proposto no Capítulo 4 são aqui validados para verificar se realmente cumprem com os objetivos a que se propõem, qual seja melhorar o desempenho de uma rede, reduzindo o efeito da anomalia.

Para tanto utiliza-se o simulador de eventos discretos NS-2 com as adaptações necessárias para permitir a criação dos cenários anteriormente utilizados. Os resultados são apresentados ao longo desse capítulo.

5.1 O simulador

Em todos os experimentos simulados nessa dissertação utilizou-se o software NS-2 versão 2.29 [NS1]. O software NS (*Network Simulator*) é um simulador de redes de código aberto, concebido em Berkeley e apoiado pelo DARPA (*Defense Advanced Research Projects*) e amplamente utilizado pela comunidade acadêmica, tendo muitos de seus resultados já verificados e validados por ela.

Uma característica importante desse *software* está relacionada ao fato de utilizar duas linguagens para programação: 1) a linguagem base de sua estrutura é C++, uma linguagem compilada tradicional e capaz de implementar de maneira robusta a manipulação de bytes e pacotes de dados; 2) a linguagem é OTCL (*Object Oriented Tool Command Language*) e é utilizada como linguagem de interface com o usuário devido ao fato de ser interpretada e assim simplificar o processo de criação e ajuste dos cenários de simulação. Veja a Figura 5.1.

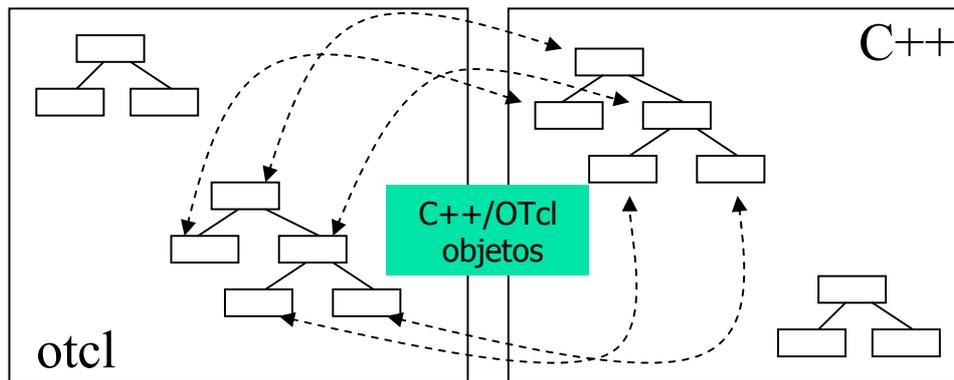


Fig.5.1. Relação entre C++ e oTCL

Apesar de originalmente ter sido criado para plataforma Unix e similares como o Linux, atualmente é possível utilizar o NS com sistema operacional Windows, através de softwares como o cygwin (emulador que permite trabalhar com o linux dentro do Windows e vice-versa) [CYGW].

Uma vantagem do NS é que além de ser específico para simulação de redes cabeadas (*wired*), com opções de configuração de transporte, filas, QoS, e outras, também é muito completo para simulação de WLANs. Além disso, por ser um simulador de eventos discretos toda atividade física é transformada em evento; assim, esses eventos são enfileirados e processados de acordo com sua ocorrência de escalonamento.

Além disso, o NS possui como opção de pré-processamento o gerador de tráfego e topologia. Como visualizador, tem o NAM que é um visualizador da topologia gerada e do tráfego rodado pela rede. O software permite como pós-processamento a geração de gráficos e tabelas com informações do processamento que podem ser facilmente analisadas através de linguagens como PERL [PERL], AWK[AWK] ou o próprio TCL.

5.2 Configurações e Cenários de Simulação

Para as simulações desse trabalho, foi anexado ao software NS original um agente de roteamento chamado NOAH (*Non Ad-Hoc Routing Agent*) [NOAH] que simula redes infraestruturadas já que o software em sua configuração original possui apenas protocolos de rede *ad hoc*.

O script base para as simulações feitas encontra-se no Apêndice 2. Nessa estrutura usada, todas as estações estão sob a cobertura de um AP. Cada estação sem fio comunica-se com uma estação fixa correspondente através do AP. As estações fixas possuem enlace de 100Mbps, para escoar o fluxo sem se tornar o gargalo da rede. O tráfego pode ser de subida (*uplink*) quando é das estações cabeadas para as STAs ou vice-versa, chamado então de descida (*downlink*). Nas simulações usa-se *downlink*, já que nas aplicações atuais é a maior necessidade do usuário. Utilizou-se o protocolo de transporte UDP usando taxa de bits constante (CBR – *constant bit rate*); esse tráfego foi gerado com 11Mbps e pacotes de 1500 bytes.

No Cenário 1, foram utilizadas 2 estações: ambas transmitindo a 11Mbps, mostrando o perfeito compartilhamento do canal no caso de taxas iguais. No resultado seguinte, uma das estações passou a transmitir a 1 Mbps. Ambos os cenários feitos para validarem os modelos dos Capítulos 3 e 4.

No Cenário 2, aumentou-se o número de estações a 11Mbps na razão de 3:1 (três estações boas e uma estação ruim). Seqüencialmente foi simulado o inverso (1:3).

Em seguida, foi feita a alteração na MAC possibilitando a modificação do funcionamento dela de maneira a priorizar a estação com a taxa mais alta de acordo com a sugestão do Capítulo 4. Os Cenários foram então testados novamente com a proposta sugerida.

Existe ainda um fator que poderia ser considerado: distância. No entanto, para efeito de cálculos, testes e simulações, supuseram-se todas as estações no alcance do AP. Caso alguma se distancie, isso afetará a SNR e portanto indiretamente considerada no efeito.

5.3 Resultados obtidos

Nesse Cenário 1, utilizou-se uma simulação com duração de 42,5s. A primeira estação, N(0), está com uma relação SNR boa, apresentando então uma taxa nominal de 11Mbps e inicia o tráfego aos 2,5s de simulação.

Nesse instante é possível observar a eficiência da estação de 11Mbps, com uma vazão máxima de aproximadamente 7,5Mbps. Tem-se então 20s depois o início da transmissão de dados da estação N(1) que também está a 11Mbps nominal.

É possível perceber o perfeito compartilhamento do canal por ambas as estações, como demonstrado na Figura 5.2.

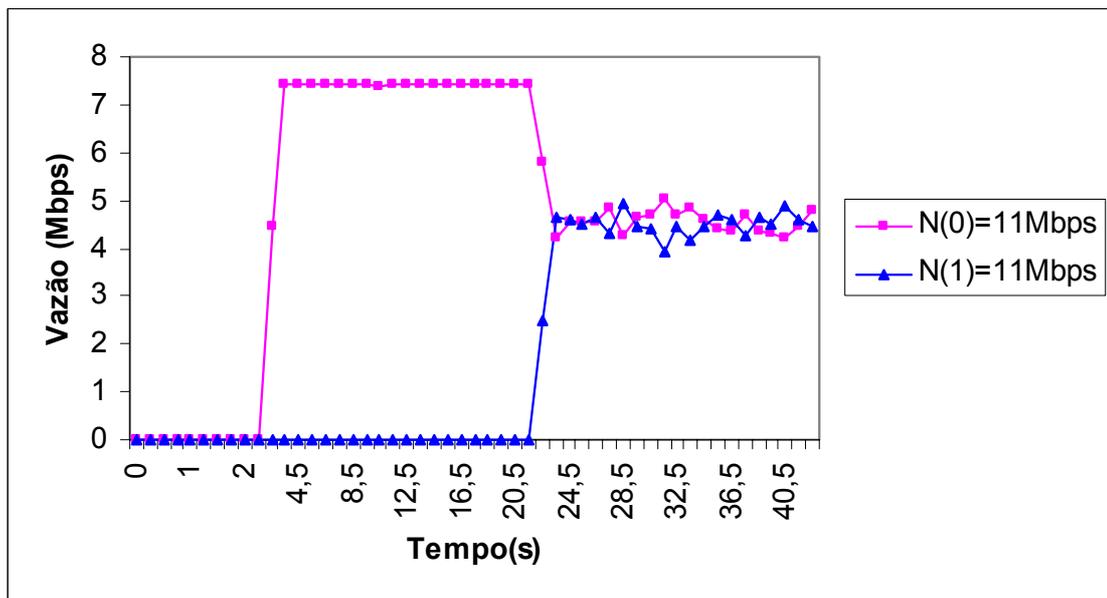


Fig. 5.2: Resultado com duas estações iguais

Já no Cenário 2, considera-se que uma das estações (N(1)) afastou-se do AP, piorando sua SNR. Nesse caso, o mecanismo de *fallback* entra em ação degradando sua taxa até 1Mbps. É possível, através do gráfico, perceber o efeito nocivo da anomalia.

Enquanto apenas N(0) estava transmitindo, o resultado é idêntico ao do Cenário 1. No entanto, quando N(1) inicia sua transmissão a 1Mbps, automaticamente todo o desempenho da rede se degrada, fazendo a estação com boa SNR (N(0)) transmitir praticamente na mesma taxa de N(1) como pode ser verificado na Figura 5.3. Isso é a anomalia de desempenho da MAC da IEEE 802.11 e confirma através de simulação modelagem do Capítulo 3 e Capítulo 4.

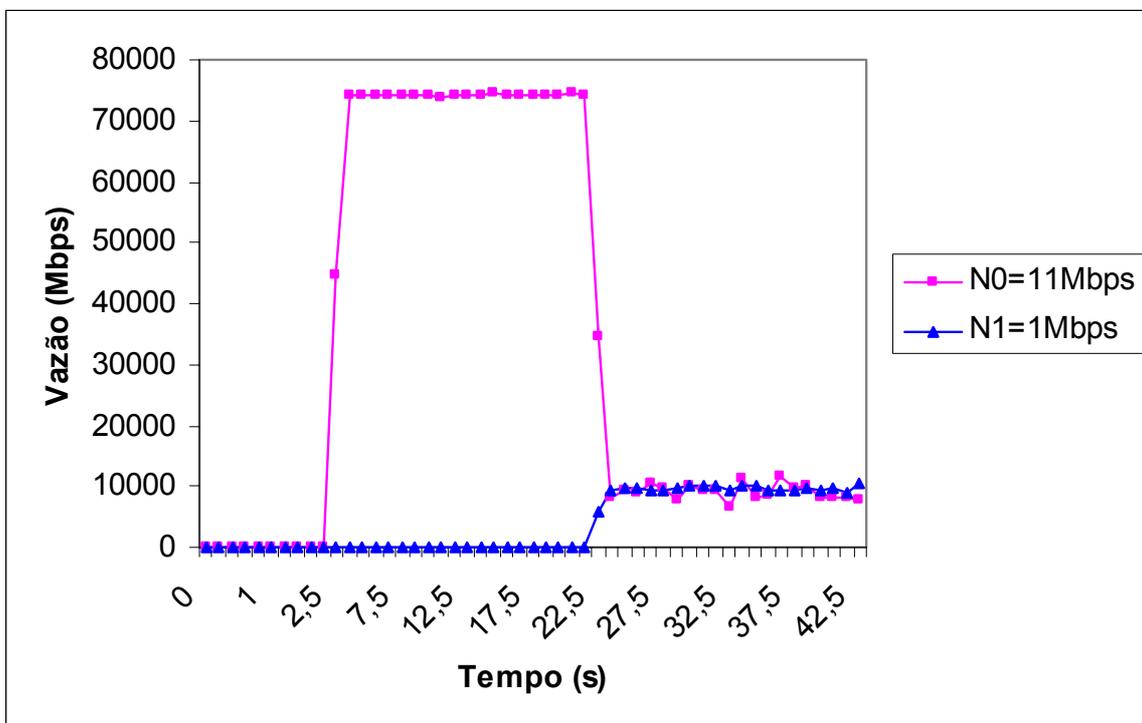


Fig.5.3: Resultado com duas estações diferentes

5.3.1 Anomalia

O cenário a seguir apresenta inicialmente duas estações transmitindo a 11Mbps. Na Figura 5.4, ambas as estações vão se afastando do AP e tem a SNR degradada, apresentando uma queda das taxas. Na Figura 5.5, apenas uma das estações se afasta do AP, degradando sua taxa.

Pode-se, no entanto, observar um fato curioso: em ambos os casos, a variação do valor da vazão das estações tem um comportamento semelhante. Isso é anomalia.

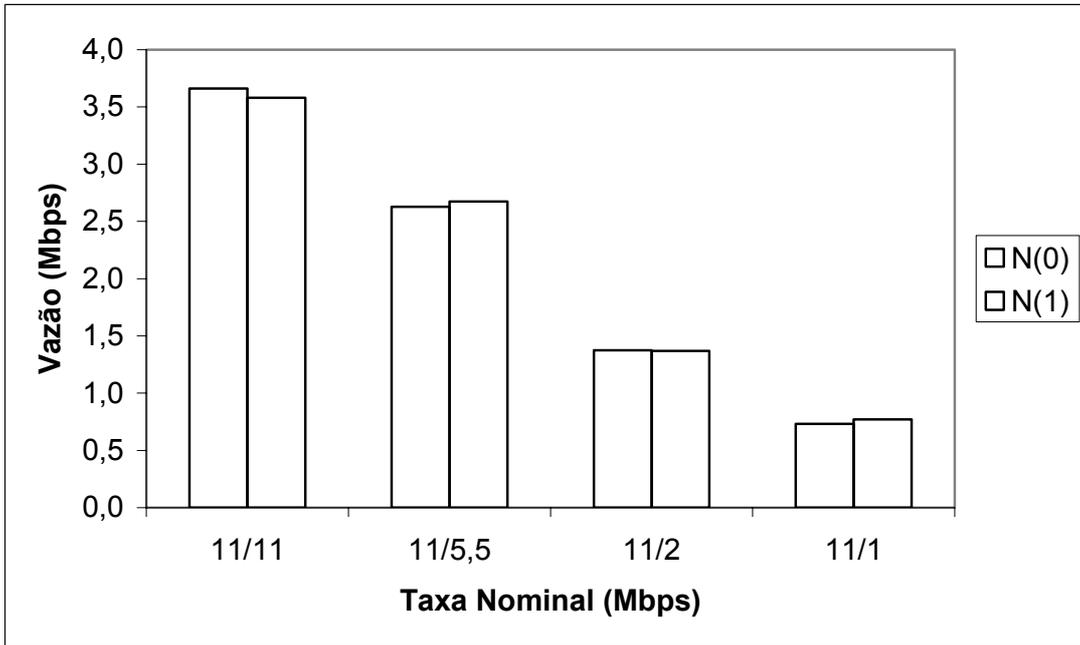


Fig. 5.4 Fallback das duas

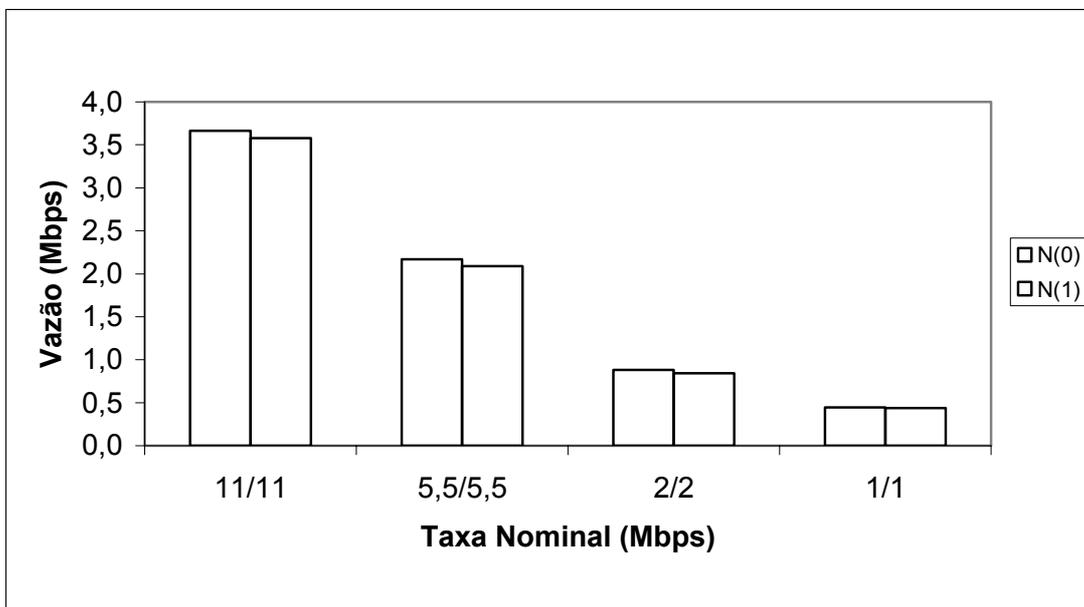


Fig. 5.5 Fallback de uma

5.3.2 Sugestão de Priorização

A Figura 5.6 apresenta o resultado da priorização para o caso extremo considerado nessa dissertação: N(0) está transmitindo a 11Mbps e fica com $CW = 31$, enquanto que N(1) está transmitindo com a taxa nominal de 1 Mbps. É perceptível a melhora do desempenho de N(0).

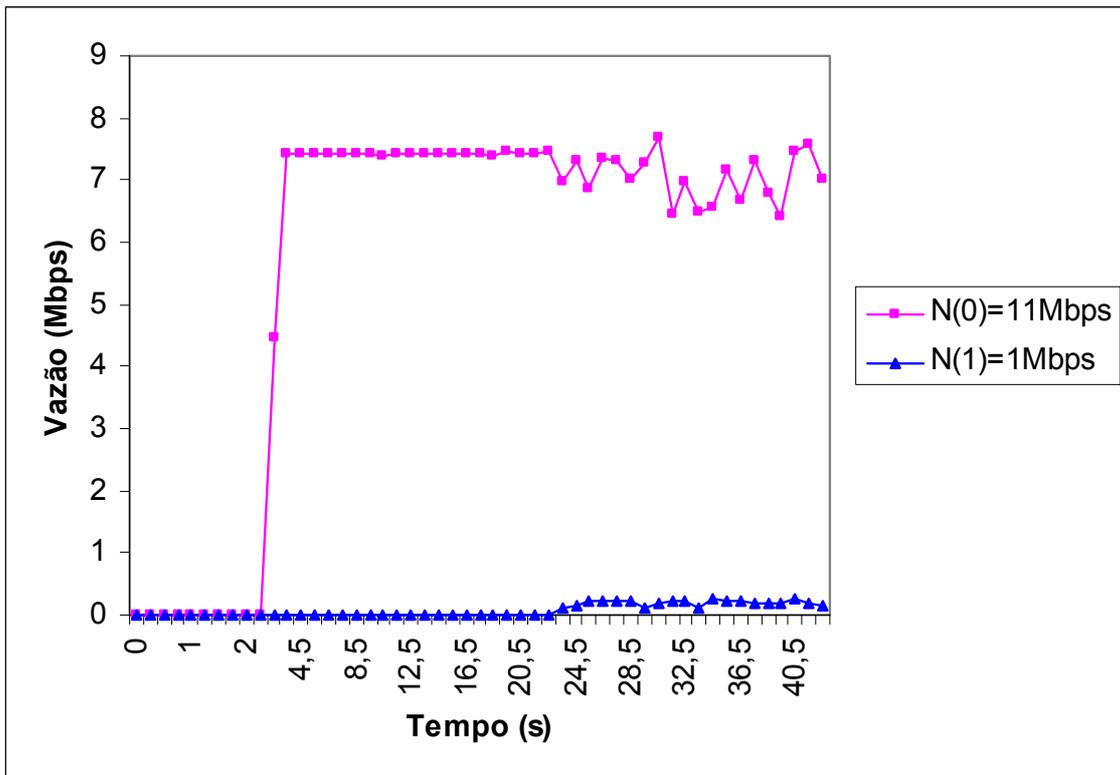


Fig 5.6: Desempenho com priorização

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam os resultados obtidos através da priorização de estação, variando o valor de CW .

No primeiro caso, manteve-se a estação de boa SNR com $CW=31$ e foi-se dobrando o valor de CW para estação N(1) até se chegar ao valor máximo ($cw=1024$). Pode-se verificar uma melhoria no desempenho da estação N(0) em contrapartida à piora da estação N(1).

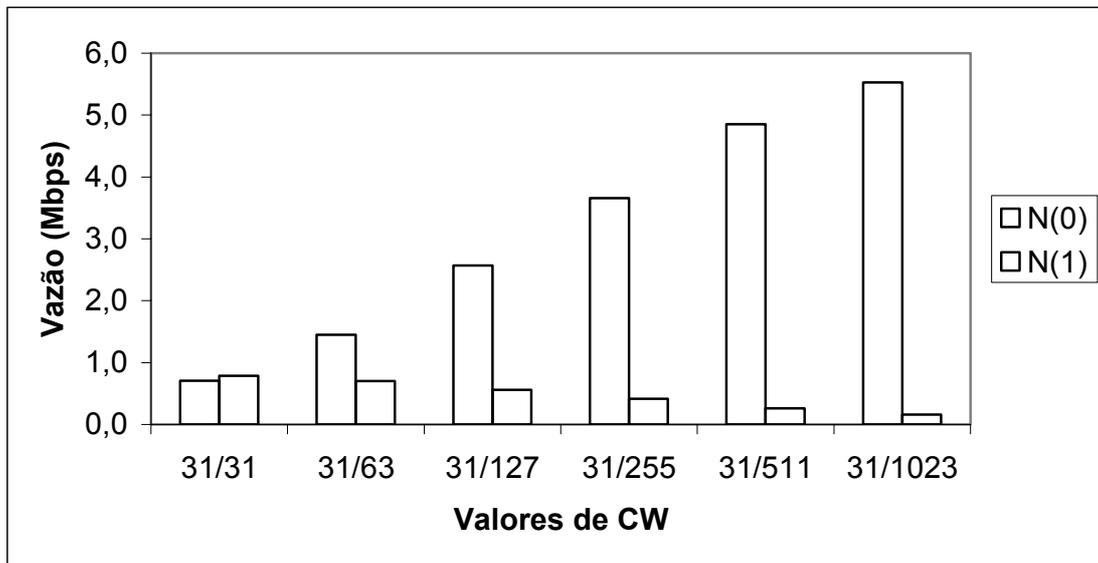


Fig. 5.7: Variando CW da estação ruim

Já no segundo caso, manteve-se o CW de N(1) fixo ($cw=1024$) e foi-se aumentado CW de N(0) até chegar ao pior caso, onde $CW_{min}(boa)=CW_{min}(ruim)=1023$.

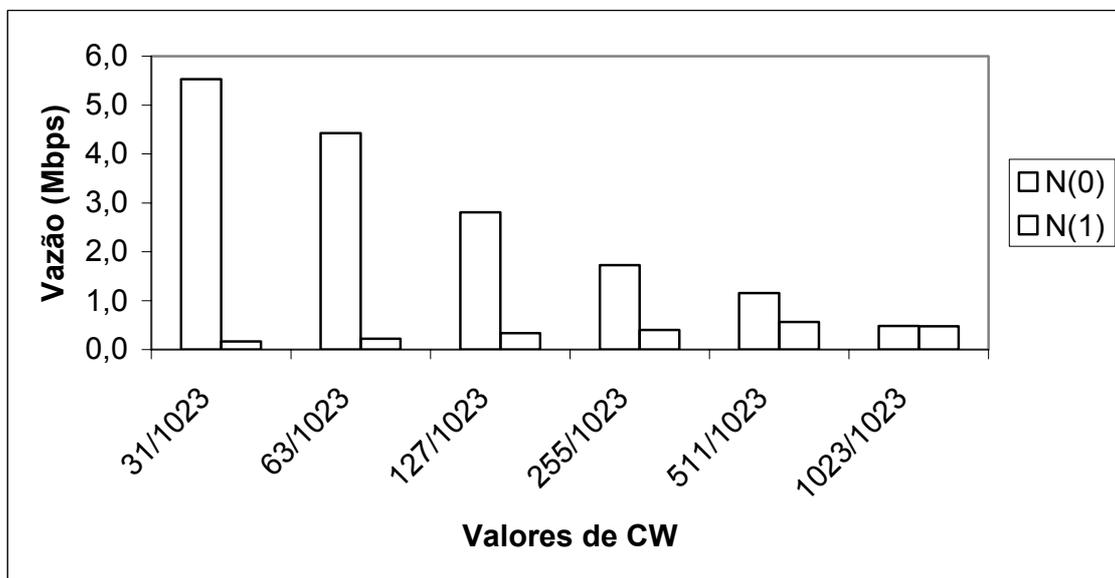


Fig. 5.8: Variando CW da estação boa

Observa-se que há uma degradação de desempenho da estação boa. Neste caso volta-se ao efeito da anomalia. Com os valores intermediários de cw pode-se inclusive obter-se outras políticas de acesso, consideradas mais justas pelo administrador da rede, não degradando totalmente a estação de menor taxa.

É possível também, através dessa proposta de variação de cw , inclusive priorizar estações de iguais taxas assim como foi proposto por [AAD1] e pode ser observado na Figura 5.9.

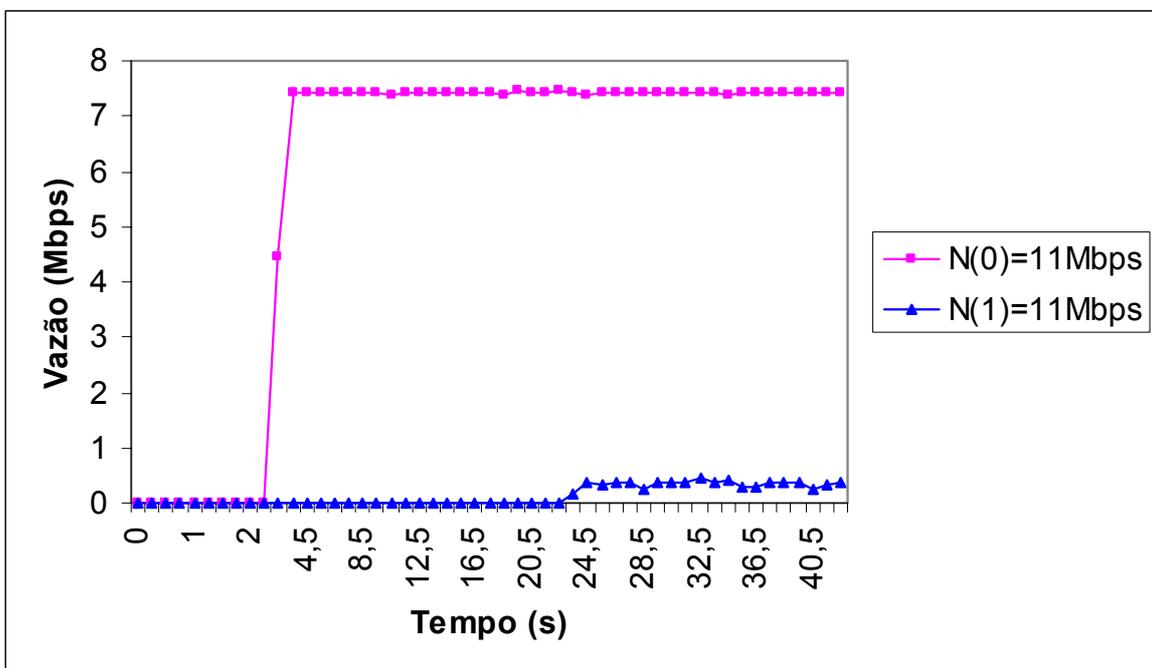


Fig 5.9: Priorização de estações transmitindo na mesma taxa

Neste caso, manteve-se $N(0)$ com $cw=32$ enquanto $N(1)$ estava com $cw =1024$. Porém, tanto $N(0)$ quanto $N(1)$ tinham boa SNR e estavam transmitindo a 11Mbps. Devido ao cw houve uma priorização de $N(0)$.

É possível perceber que existem outras combinações para a relação $CW_{\min}(\text{boa})$ e $CW_{\max}(\text{ruim})$. Inclusive, como já foi proposto em [KIM], a anomalia poderia ser minimizada através da diferenciação de serviços, utilizando uma variação apenas de CW_{\min}

inversamente proporcional à taxa de transmissão. Nessa proposta, é utilizado para a estação ruim $CW_{\min} = 32(11/x)$, onde $x = 1, 2$ ou $5,5$ (que são as taxas de transmissão possível da IEEE 802.11b) e para a estação boa sempre $CW_{\min}=32$. Obviamente que isso ajuda, mas limita muito pouco a CW_{\min} e não aproveita o valor máximo de CW que permanece o mesmo para todas as taxas. Além disso, a taxa de transmissão escolhida é devido a diferenciação de serviço, sem se preocupar com a taxa real que a estação alcançaria devido a SNR.

Na prática, os valores de CW poderiam ser determinados pelo gerente da rede, objetivando o desempenho desejado e a vazão requerida.

5.3.3 Influência da quantidade de estações

Nos dois próximos cenários, têm-se quatro estações transmitindo e iniciando suas transmissões em intervalos de 20s. Na Figura 5.10 observa-se três estações boas e apenas uma ruim (3:1). Nesses cenários, para efeito de simulação foi feita uma pequena variação no valor de cw , fazendo com as estações priorizadas tivessem valores próximos ao cw mínimo, porém não valores idênticos.

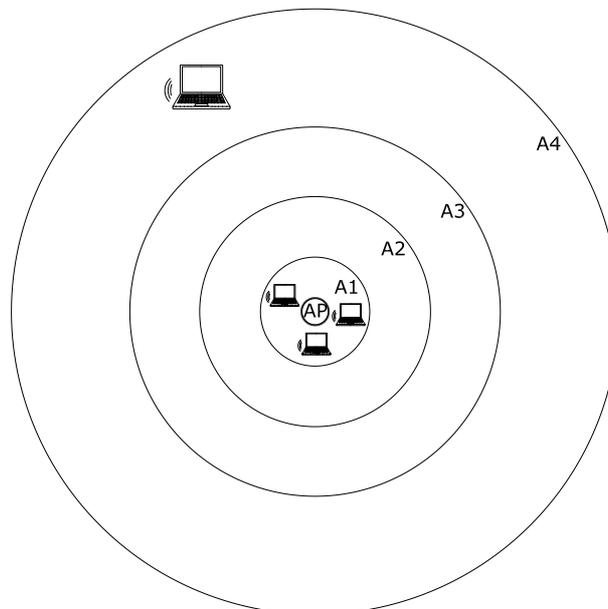


Fig 5.10 Cenário com 4 estações (3:1)

Inicialmente, o sistema apresenta apenas uma STA transmitindo a 11Mbps. Seqüencialmente em intervalos de 20s, começam a compartilhar o canal outras duas estações de 11Mbps. No entanto, quando a quarta estação começa a transmitir com uma taxa de 1Mbps, é possível verificar na Figura 5.11 a anomalia no sistema, deteriorando inclusive a taxa das três STAs boas.

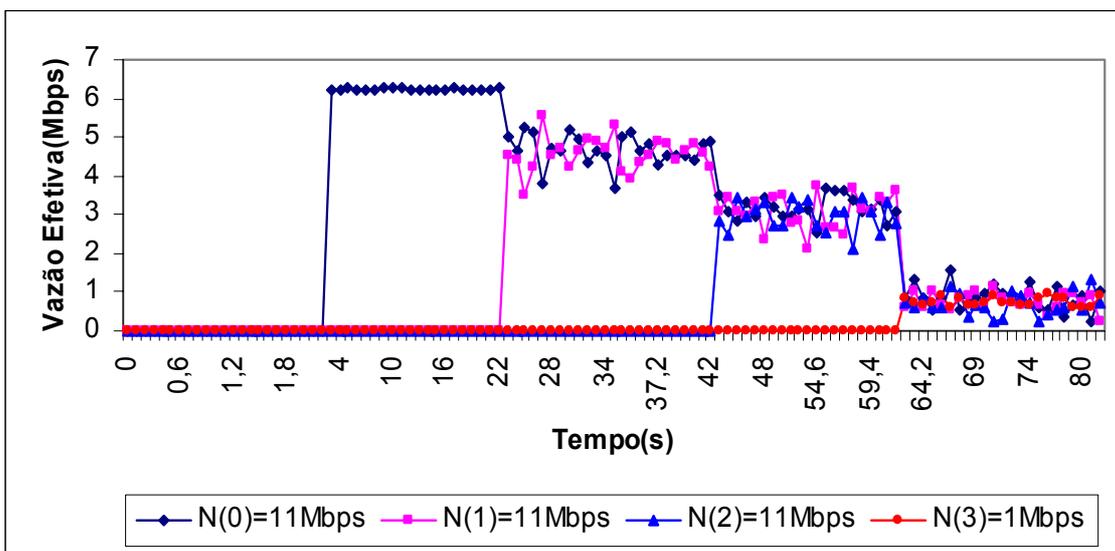


Fig. 5.11 Resultado com anomalia 3:1

Na Figura 5.12 tem-se o inverso: três estações ruins e apenas uma boa.

Seguindo o mesmo princípio de funcionamento do cenário anterior, a Figura 5.13 apresenta os resultados das três STAs ruins com apenas uma boa. Pode-se verificar a sensível piora do sistema como um todo e afirmar que de maneira geral o resultado final (quando a última estação inicia a transmissão) é ainda pior.

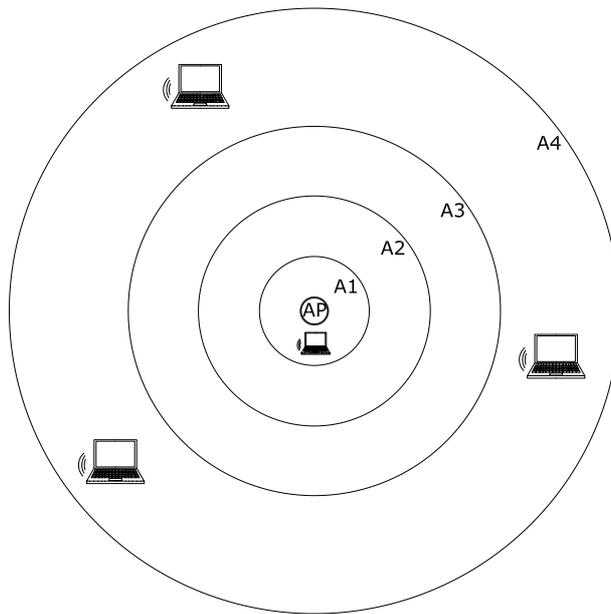


Fig 5.12 Cenário com 4 estações (1 boa e 3 ruins)

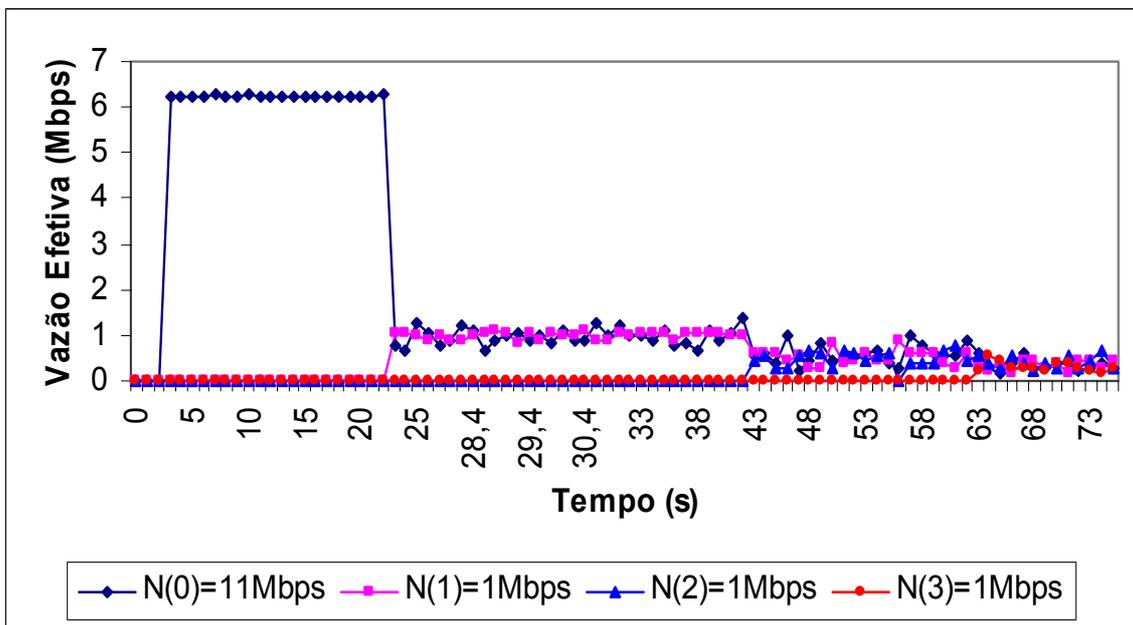


Fig 5.13: Resultado com anomalia (1:3)

Na Figura 5.14 utiliza-se o cenário da Figura 5.10, porém com o mecanismo de priorização em ação. Pode-se observar que com o início da transmissão das STAs boas o canal é compartilhado e quando inicia-se a transmissão da estação ruim, a situação permanece praticamente inalterada.

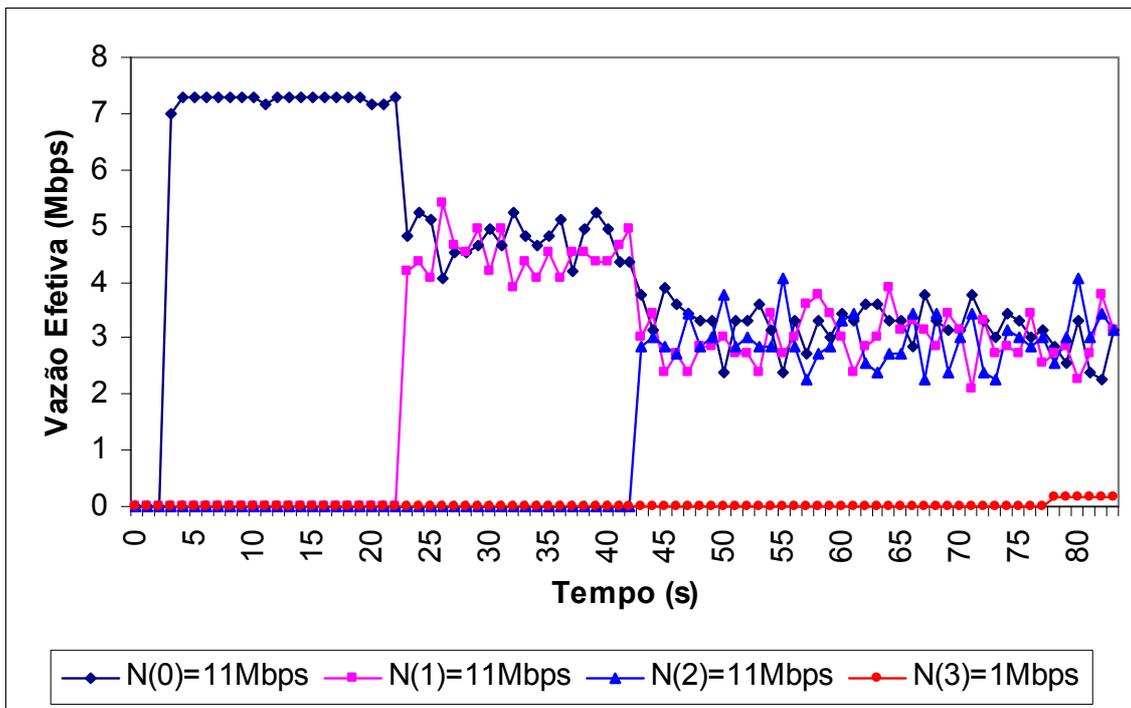


Fig 5.14: Priorização das estações boas (3:1)

De maneira semelhante, a priorização pode ser feita para o cenário 1:3 e para quaisquer outros cenários criados.

Capítulo 6

Conclusão

Com a popularização das redes, tem-se procurado oferecer cada vez mais altas taxas de transmissão. No entanto, problemas têm surgido e devem ser resolvidos para garantir a qualidade dos acessos à uma rede sem fio: esse é o caso da anomalia de desempenho existentes nas WLANs.

Nessa anomalia, STAs transmitindo com altas taxas quando na presença de STAs transmitindo com baixas taxas reduzem sua taxa de transmissão para valores ainda inferiores que as estações com taxas baixas. Isso causa uma degradação do desempenho de toda a rede.

Alguns poucos trabalhos existentes comentam sobre a anomalia existente no padrão IEEE 802.11. Outros, menos, se propõe a melhorar esse quadro de desempenho. No entanto, todos eles enfocam em uma abordagem de QoS (utilizando padrão IEEE 802.11e) sem se preocuparem com os padrões existentes no mercado; tampouco consideram que se as camadas inferiores do protocolo não garantirem o acesso das estações boas, de nada adiantaria falar em QoS.

Sendo assim, de nada adiantaria utilizar aplicações em tempo real, como áudio e vídeo, se nas camadas inferiores não houver uma garantia mínima da qualidade do sinal oferecido. Nessa busca, esse trabalho propôs um mecanismo para aliviar o efeito da anomalia.

Para isso acontecer, foi proposta uma alteração da MAC. Essa proposta sugere alterar o valor da CW para garantir que a estação que está transmitindo com uma melhor taxa, tome o canal por mais tempo que uma estação que não esteja com a taxa tão boa.

Por fim, o trabalho faz a validação matemática do modelo proposto utilizando o simulador NS. As simulações foram feitas tanto para os casos com anomalia, quanto para os casos em que o mecanismo da MAC adaptada estava em ação. Foi possível verificar a grande aproximação dos valores obtidos matematicamente e simulados.

Obviamente, baseado nesse conceito, é possível estabelecer outras políticas para determinar CW_{min} e CW_{max} . Porém, a idéia principal foi mostrar que é possível reduzir a anomalia e que de nada adiantaria falar em QoS sem garantir taxas adequadas com boa SNR.

6.1 Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se o estabelecimento de uma política de acesso, utilizando-se de outros valores de CW para as STAs.

Durante a avaliação do mecanismo de priorização, não foram explorados cenários onde as STAs sofressem perdas devido a colisão. Assim sendo, é importante investigar o emprego da priorização com o efeito da colisão.

Outra questão relacionada com a priorização de STAs, está na implementação física do mecanismo. Para tanto, é importante um estudo sobre os Firmwares dos APs existentes no mercado, assim como a melhor forma de modifica-los.

Referências Bibliográficas

- [AWK] <http://www.gnu.org/software/gawk/manual/gawk.html> em 05/2007
- [BAHA] Bahai, Ahmad R. S.; Saltzber, Burton R.; Ergen, Mustafa; Multi-Carrier Digital Communications: Theory and Applications of OFDM -2nd Ed., Springer.
- [BIAN1] G. Bianchi, “ Performance analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function”. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, VOL 18, N0 3 ,pag.535- 547, Março 2002
- [BRAN] *O. C. Branquinho, C. Correa, N. L. S. da Fonseca, Avaliação de Redes WLAN IEEE 802.11b com Arquiteturas Fat e Thin, XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES – 2004*
- [CARV] CARVALHO, Celso Barbosa e REZENDE, José Ferreira, Seleção Dinâmica de Parâmetros de QoS na Resolução da Anomalia de Performance do IEEE 802.11b, XXI Simpósio Brasileiro De Telecomunicações-Sbt'04, 06-09 De Setembro De 2004, Belém, Pa.
- [CHAN] A. Chandra, C. Gummalla, e J. O. Limb. *Wireless Medium Access Control Protocols*. IEEE Communications Surveys, URL: <http://www.comsoc/pubs/surveys>, 2000
- [CROW] Crow, Brian e Widjaja, Indra; Prescott, Sakai. IEEE802.11 Wireless Local Area Networks, IEEE Communications Magazine, September 1997
- [CYGW] <http://www.cygwin.com> em 05/2007
- [EDUA] http://www.ravel.ufrj.br/arquivosPublicacoes/csma_ca_eduardo.pdf em 05/2007
- [ETSI] European Telecommunications Standards Institute, ETSI TS 101 761-1. Broadband Radio Access Networks (BRAN): HIPERLAN Type 2, 2000

- [FREI] Juliana Freitag, Nelson L. S. da Fonseca, O. C. Branquinho, *Differentiation of Services in Network 802.11 on Degradation of the Transmission Rate*, 5th Wireless Communication Workshop and Mobile Computing – *WCSF 2003*, São Lourenço, MG, 27 a 30 de Outubro de 2003. Atheros Communications, Inc “Methodology for Testing Wireless LAN Performance”, 2003.
- [HEUS] Heusse, Martin e Rousseau, Franck; Berger-Sabbatel, Gilles; Duda, Andrzej. Performance Anomaly of 802.11b, IEEE INFOCOM 2003
- [IANN] IANNONE, Luigi è FDIDA, Serge, SDT.11b : Un Schéma à Division de Temps pour éviter l’anomalie de la couche MAC 802.11b em https://www-rp.lip6.fr/site_npa/site_rp/publications/652-cfip05-std11b-iannone-final.pdf em 05/2007
- [IEEE1] Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, IEEE Standard 802.11, 1999
- [IEEE2] Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 5GHz Band*, IEEE Standard 802.11a, 1999
- [IEEE3] Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2,4GHz Band*, IEEE Standard 802.11b, 1999
- [IEEE4] http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tge_update.htm em 05/2007
- [ISO] ISO/IEC 7498-1:1994 em http://www.sigcomm.org/standards/iso_stds/OSI_MODEL/ISO_IEC_7498-1.TXT em 05/2007
- [KAME] A. Kamerman e L. Monteban, WaveLAN-II: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band, *Bell Labs Technical Journal*, p. 118-133, 1997
- [KIM] KIM, Hyogon, YUN, Sangki, KANG, Inhey, BAHK, Saewoong. Resolving 802.11 Performance Anomalies through QoS Differentiation. *IEEE Communications Letters*, vol. 9, No. 7, July 2005
- [KLEI] FA Tobagi, L Kleinrock, Packet Switching in Radio Channels: Part I--Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics, No.12, - *IEEE Transactions on Communication*, 1975
- [KURO] James F. Kurose e Keith W. Ross em *Redes de Computadores e a Internet: uma abordagem top-down*, 3. edição, Pearson, p.404

- [NOAH] <http://icapeople.epfl.ch/widmer/uwb/ns-2/noah> em 05/2007
- [NS1] http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/User_Information
- [OHAR] Bob Ohara e Al Petrick em IEEE Handbook, A Designer Companion p.25/26
- [PERL] <http://www.perl.com/> em 05/2007
- [PROX1] http://www.proxim.com/learn/library/datasheets/bg-2000_port.pdf em 05/2007
- [CARV] CARVALHO, Celso Barbosa ; de REZENDE, J. F. . Seleção Dinâmica de Parâmetros de QoS na Resolução da Anomalia de Performance do IEEE 802.11b. In: XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2004, Belém. SBT'2004, 2004
- [STAL] Staalings, William. Wireless Communications and Networking. Prentice Hall – 2002.
- [TANE] Tanenbaum, Andrew S.; Redes de Computadores – 4. Ed. – Campus
- [VEX] <http://www.vexbr.com.br> em 05/2007

Apêndice A

Cálculo da Eficiência

Um protocolo é um conjunto de regras que são utilizadas para possibilitar a troca de informações entre camadas – pares localizadas em máquinas diferentes da rede [TANE]. Assim, uma mensagem M produzida em uma camada, é passada para a camada inferior, que acrescenta um cabeçalho e encaminha o resultado para a próxima camada.

Desta forma, a vazão efetiva de cada estação é influenciada pelos cabeçalhos dos protocolos utilizados na comunicação. A esse conjunto de cabeçalhos dá-se o nome de *overhead* (sobrecarga), enquanto aos dados efetivamente transmitidos de *payload*.

O mesmo ocorre no padrão IEEE 802.11. O quadro MAC do IEEE 802.11, como mostrado na Figura A.1, consiste em um cabeçalho (*header*) MAC, o corpo do quadro e o campo FCS (*frame check sequence*). Os números na figura representam o número de bytes de cada campo.



Figura A.1: Quadro MAC de uma rede IEEE 802.11.

Pode-se a partir desse quadro verificar que somente uma fração do tempo total de ocupação do meio é utilizada para a transmissão efetiva de dados.

Conforme [CARV], pode-se inicialmente considerar o tempo de transmissão total (T_T) como uma composição:

$$T_T = t_{tr} + t_{ov} \quad (A.1)$$

onde t_{tr} é o tempo gasto na transmissão dos dados efetivamente e t_{ov} é o tempo gasto na com overheads do protocolo.

Os tamanho do pacote de dados transmitidos pode variar de de 0 a 2312, o que influenciará diretamente no t_{tr} . Nessa dissertação utilizou-se um pacote de tamanho intermediário (1500 bytes). Sendo assim: $t_{tr} = 1500 \times 8 / R$ e a MPDU = tamanho_pacote + 34 bytes.

Além disso, tem-se que:

$$t_{ov} = DIFS + t_{pr} + SIFS + t_{pr} + t_{ack} \quad (A.2)$$

Tabela A.1: Valor dos parâmetros

t_{pr}	Varia de acordo com a taxa de bits da estação (depende do PLCP = <i>Physical Layer Control Protocol</i>) sendo 192 μ s para PLCP longo e 96 μ s para PLCP curto.
SIFS	Short Inter Frame Space = 10 μ s.
DIFS	Distributed Inter Frame Space = 50 μ s.
t_{ack}	Tem 14 bytes (112 bits). Depende da taxa de transmissão: $t_{ack} = \frac{14 \times 8}{R}$

De acordo com a taxa nominal da estação, tem-se os valores para T_T :

Tabela A.2: Cálculo dos Tempos (ms)

	11 Mbps	5,5 Mbps	2 Mbps	1 Mbps
t_{ack}	1,02E-05	2,04E-05	5,60E-05	1,92E-04
t_{ov}	4,54E-04	4,64E-04	5,00E-04	6,36E-04
t_{tr}	1,12E-03	2,23E-03	6,14E-03	1,23E-02
T_T	1,57E-03	2,70E-03	6,64E-03	1,29E-02

Pode-se então calcular a eficiência (ρ) de cada estação:

$$\rho = \frac{t_{tr}}{T_T} \times \frac{1500}{1534} \quad (\text{A.3})$$

A taxa efetiva que cada uma das taxas nominais irá apresentar é dado então por:

$$R_{real} = R \times \rho \quad (\text{A.4})$$

A tabela A.3 demonstra claramente que a eficiência diminui conforme a taxa de transmissão aumenta.

Tabela A.3: Eficiência

	11 Mbps	5,5 Mbps	2 Mbps	1 Mbps
ρ	6,95E-01	8,09E-01	9,04E-01	9,30E-01
R_{real}	7,64E+06	4,45E+06	1,81E+06	9,30E+05

Cálculo da taxa efetiva utilizando o valor médio de CW

Para tornar o calculo ainda mais preciso, pode-se considerar no cálculo do tempo total , o tempo da janela de contenção:

$$T_T = t_{tr} + t_{ov} + t_{CW} \quad (\text{A.5})$$

Como o cw varia exponencialmente de 32 a 1024, obtém-se vários valores parciais de CW. Considera-se a tabela a seguir (*time slot* com duração de 20 μ s):

Tabela A.4: Tempo médio de CW

	CW	t_{CW}	t_{CW} médio
CWmin	31	6,20E-04	3,10E-04
CW1	63	1,26E-03	6,30E-04
CW2	127	2,54E-03	1,27E-03
CW3	255	5,10E-03	2,55E-03
CW4	511	1,02E-02	5,11E-03
CWmax	1023	2,05E-02	1,02E-02

Com isso, chega-se a um novo tempo total para cada estação, considerando agora a variação de CW:

Tabela A.5: T_T (ms) usando valores parciais de CW

	11Mbps	5,5Mbps	2Mbps	1Mbps
CWmin	1,88E-03	3,01E-03	6,95E-03	1,32E-02
CW1	2,20E-03	3,33E-03	7,27E-03	1,35E-02
CW2	2,84E-03	3,97E-03	7,91E-03	1,42E-02
CW3	4,12E-03	5,25E-03	9,19E-03	1,55E-02
CW4	6,68E-03	7,81E-03	1,17E-02	1,80E-02
CWmax	1,18E-02	1,29E-02	1,69E-02	2,31E-02

Substituindo esses valores na Tabela A.3 podem-se obter valores mais precisos da eficiência. Como esses valores dependem agora de CW, ao ser utilizada a sugestão de priorização, a eficiência também vai ser alterada.

Apêndice B

Script Base para simulações

```
set rate_tx(0) 11Mb ;#taxa de transmissao CBR$ de N(0)
set rate_tx(1) 11Mb ;#taxa de transmissao CBR$ de N(1)
set datar(0) 11Mb ;#dataRate do N(0)
set datar(1) 1Mb ;#dataRate do N(1)
set backoff(0) 31 ;#valor minimo da janela de backoff
set backoff(1) 1023 ;#valor maximo da janela de backoff
set opt(chan) Channel/WirelessChannel ;# channel type
set opt(prop) Propagation/Shadowing ;# radio-propagation model
set opt(netif) Phy/WirelessPhy ;# network interface type
set opt(mac) Mac/802_11 ;# MAC type
set opt(ifq) Queue/DropTail/PriQueue ;# interface queue type
set opt(ll) LL ;# link layer type
set opt(ant) Antenna/OmniAntenna ;# antenna model
set opt(ifqlen) 100000 ;# max packet in ifq
set opt(adhocRouting) NOAH ;# routing protocol
set opt(start) 1.0 ;# time to start simulation
set opt(cbr_start) 2.0 ;# time to start cbr
set opt(cbr_stop) 12.0 ;# time to stop cbr
set opt(stop) 13.0 ;# time to stop simulation
set num_wired_nodes 3
set num_wl_nodes 2
Agent/UDP set packetSize_ 1500
set opt(packetSize) 1500
set opt(delay) 100ms
Phy/WirelessPhy set freq_ 2.4e9
```

```

Phy/WirelessPhy set bandwidth_          11Mb
Mac/802_11 set basicRate_              1Mb
Mac/802_11 set CWMin_                  31
Mac/802_11 set CWMax_                  1023
Mac/802_11 set SlotTime_               0.000020      ;# 20us
Mac/802_11 set SIFS_                   0.000010      ;# 10us
Mac/802_11 set PreambleLength_         72            ;
Mac/802_11 set PLCPHeaderLength_       48            ;# 48 bits
Mac/802_11 set PLCPDataRate_           2.0e6         ;# 1Mbps
Mac/802_11 set RTSThreshold_           4000          ;# bytes
Mac/802_11 set ShortRetryLimit_        7            ;
Mac/802_11 set LongRetryLimit_         4            ;
Mac/802_11 set bandwidth_              11.0Mb

```

```

set ns_ [new Simulator]
$ns_ color 1 Blue
$ns_ color 2 Red
$ns_ node-config -addressType hierarchical
AddrParams set domain_num_ 2
lappend cluster_num 1 2
AddrParams set cluster_num_ $cluster_num
lappend eilastlevel $num_wired_nodes 1 $num_wl_nodes
AddrParams set nodes_num_ $eilastlevel

```

```

$ns_ use-newtrace
set tracefd [open twov4.tr w]
set namtrace [open twov4.nam w]
$ns_ trace-all $tracefd
$ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $opt(x) $opt(y)
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $opt(x) $opt(y)
set god [create-god [expr $num_wl_nodes + 1]]
for {set i 0} {$i < $num_wired_nodes} {incr i} {
    set w($i) [$ns_ node "0.0.$i"]
    $w($i) set X_ $xw($i)
    $w($i) set Y_ $yw($i)
    $w($i) set Z_ $zw($i)
}

```

```

$ns_ node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
    -llType $opt(ll) \
    -macType $opt(mac) \
    -ifqType $opt(ifq) \
    -ifqLen $opt(ifqlen) \
    -antType $opt(ant) \
    -propType $opt(prop) \
    -phyType $opt(netif) \
    -channelType $opt(chan) \
    -topoInstance $topo \
    -wiredRouting ON \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace OFF \
    -macTrace ON

set BS [$ns_ node 1.0.0]
$BS random-motion 0
$BS set X_ $x(BS)
$BS set Y_ $y(BS)
$BS set Z_ $z(BS)
$ns_ node-config -wiredRouting OFF
Mac/802_11 set RTSThreshold_          3000;
for {set i 0} {$i < $num_wl_nodes} {incr i} {
    Mac/802_11 set dataRate_          $datar($i);
    Mac/802_11 set CWMin_             $backoff($i);
    Mac/802_11 set CWMax_             $backoff($i);
    set n($i) [$ns_ node "1.1.$i"]
    $n($i) base-station [AddrParams addr2id [$BS node-addr]]
    $n($i) set X_ $x($i)
    $n($i) set Y_ $y($i)
    $n($i) set Z_ $z($i)
}
for {set i 0} {$i < $num_wl_nodes} {incr i} {
$ns_ duplex-link $w($i) $w($num_wl_nodes) 100Mb $opt(delay) DropTail
    set udp($i) [new Agent/UDP]
    $ns_ attach-agent $n($i) $udp($i)
    set sink($i) [new Agent/LossMonitor]
    $ns_ attach-agent $w($i) $sink($i)
    $ns_ connect $udp($i) $sink($i)
}

```

```

set cbr($i) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr($i) attach-agent $udp($i)
$cbr($i) set packetSize_ $opt(packetSize)
#$cbr($i) set rate_ $rate_tx
}

$udp(0) set class_ 1
$udp(1) set class_ 2
$cbr(0) set rate_ $rate_tx(0)
$cbr(1) set rate_ $rate_tx(1)
$ns_ duplex-link $w($num_wl_nodes) $BS 100Mb $opt(delay) DropTail
$ns_ duplex-link-op $w(0) $w($num_wl_nodes) orient right-down
$ns_ duplex-link-op $w(1) $w($num_wl_nodes) orient right-up
proc plotarVazao {} {
    global opt num_wl_nodes sink rate_tx n datar
    global taxa ;
    for {set i 0} {$i < $num_wl_nodes} {incr i} {
        set vazao($i) [expr [$sink($i) set bytes_]*8 / ($opt(stop) -2.0)]
        puts "vazao($i) = $vazao($i) n($i)==> $datar($i)
            CBR=$rate_tx($i) Mbps"
    }
}

for {set i 0} {$i < $num_wl_nodes} {incr i} {
    $ns_ at $opt(cbr_start) "$cbr($i) start"
    $ns_ at $opt(cbr_stop) "$cbr($i) stop"
}

for {set i 0} {$i < $num_wl_nodes} {incr i} {
    $ns_ initial_node_pos $n($i) 2
}

for {set i 0} {$i < 2 } {incr i} {
    $ns_ at $opt(stop) "$n($i) reset";
}

$ns_ at $opt(stop) "$BS reset";
$ns_ at $opt(stop) "plotarVazao"
$ns_ at $opt(stop) "finish"
$ns_ at $opt(stop) "puts \"NS EXITING...\""; $ns_ halt"
proc finish {} {
    global ns_ tracefd namtrace

```

```

        close $tracefd
        close $namtrace
    }
proc dump_node_info {} {
    global tracefd num_wired_nodes num_wl_nodes
    set s1 ""
    for {set i 0} {$i < $num_wired_nodes} {incr i} {
        set s1 "$s1 $i"
    }
    set s2 ""
    for {set i 0} {$i < $num_wl_nodes} {incr i} {
        set j [expr $i + 1 + $num_wired_nodes]
        set s2 "$s2 $j"
    }
    puts $tracefd "w:$s1"
    puts $tracefd "bs: $num_wired_nodes"
    puts $tracefd "m:$s2"
    puts $tracefd ""
}
dump_node_info
$ns_ run

```