

MECANISMO DE CONTROLE DE PRIORIDADE PARA MELHORIA DE  
DESEMPENHO DE REDES INFRA-ESTRUTURADAS IEEE 802.11

Celso Barbosa Carvalho

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

Aprovada por:

---

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

---

Prof. Aloysio de Castro Pinto Pedroza, Dr.

---

Prof. Markus Endler, Dr. Rer. Nat.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2005

CARVALHO, CELSO BARBOSA

Mecanismo para Melhoria de Desempenho  
de Redes Infra-Estruturadas IEEE 802.11  
[Rio de Janeiro] 2005

XVI, 77 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,  
M.Sc., Engenharia Elétrica, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de Ja-  
neiro, COPPE

1. Comunicação sem fio
2. QoS
3. Controle de Prioridade

I. COPPE/UFRJ    II. Título (série)

*Aos meus pais, irmãos e namorada pela compreensão e ajuda prestada durante o período dedicado a este trabalho.*

# Agradecimentos

Agradeço à Deus pela oportunidade de ingressar no mestrado e pela saúde e força para concluir este trabalho.

Ao professor José Ferreira de Rezende pela dedicação, amizade e excelente orientação a mim creditados. Durante os trabalhos guiou-me com paciência e zelo, inserindo-me com êxito na pesquisa acadêmica.

À Mariana, pela dedicação e amor durante o período de pesquisa. Nesse tempo, leu e revisou, pacientemente, todos os originais, desde artigos para simpósios, até o texto desta dissertação.

Ao Grupo de Teleinformática e Automação (GTA) da COPPE, pela disponibilização de equipamentos e por terem tão bem me recebido durante minhas estadas no Rio de Janeiro.

Aos colegas de trabalho por partilharem minha carga de tarefas nos momentos necessários.

À equipe de suporte à redes do CESF/FUCAPI, e ao amigo Sandro Monteiro da UFAM, pela simpatia e pronta ajuda na recuperação de dados, disponibilização de equipamentos e configuração de *links* de rede que foram utilizados na pesquisa.

Por fim, agradeço ao apoio institucional e/ou financeiro da SUFRAMA, FUCAPI, UFAM e COPPE/UFRJ, em especial à coordenação do curso de mestrado entre-instituições, representada pelos professores Eduardo Antônio Barros da Silva, da COPPE e Marly Guimarães Costa, da UFAM.

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

MECANISMO DE CONTROLE DE PRIORIDADE PARA MELHORIA DE  
DESEMPENHO DE REDES INFRA-ESTRUTURADAS IEEE 802.11

Celso Barbosa Carvalho

Março/2005

Orientador: José Ferreira Rezende

Programa: Engenharia Elétrica

O Padrão IEEE 802.11 de redes locais sem fio é uma das tecnologias mais promissoras de acesso à redes fixas, como a Internet e seus serviços, e inicialmente suportava taxas de 1Mbps e 2Mbps. Extensões do padrão original, tais como o IEEE 802.11b/e, foram criadas para garantir maiores taxas de transmissão e suporte a Qualidade de Serviço(QoS), que são requisitos importantes. Em uma rede IEEE 802.11b, uma estação móvel (STA) ao se afastar do AP ou enfrentar condições adversas do meio, muda sua modulação e conseqüentemente reduz sua taxa de transmissão de 11Mbps para 5.5Mbps, 2Mbps ou 1Mbps. Neste cenário, foi observado que uma STA ao transmitir com uma taxa de bits menor, ocupa o canal por um longo período, degradando a performance de vazão das outras STAs e ferindo os requisitos citados anteriormente. O presente trabalho constata esta "anomalia" e utiliza o suporte a QoS da extensão 802.11e para determinar diferentes probabilidades de acesso ao meio para as STAs, de acordo com suas taxas. É, portanto, desenvolvido um mecanismo de controle de prioridade que emite parâmetros de priorização para as STAs com a intenção de minimizar o problema de partilha de banda. O mecanismo é avaliado por meio de simulações e validado através de um índice de justiça, baseado na literatura científica pertinente, e que foi adaptado para a situação onde há a presença de STAs transmitindo com taxas distintas.

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

PRIORITY CONTROL MECHANISM FOR PERFORMANCE IMPROVEMENT  
IN INFRA-STRUCTURED IEEE 802.11 WIRELESS NETWORKS

Celso Barbosa Carvalho

March/2005

Advisor: José Ferreira Rezende

Department: Electrical Engineering

The IEEE 802.11 standard is one of the most promising wireless technologies for mobile access to internet and its services. Extensions of the original standard were created to provide important requirements such as: higher transmission data rates and Quality of Service(QoS) support. In an IEEE 802.11b wireless LAN, a station when getting far from the access point, changes its modulation and so reduce its transmission bit rate from 11Mbps to 5.5Mbps, 2Mbps or 1Mbps. In such a case, it was observed that a STA transmitting with a lower bit rate, captures the channel for a long term what penalizes the faster STAs and brakes the above related requirements. With this in mind, this work investigates this “anomalia” and defines rules that benefit higher rate transmitting stations. We use the QoS support of IEEE 802.11e to implement the established rules in a priority control mechanism that determine different channel access probability to STAs, in accordance with their data rates. At last, the implemented mechanism is validated with a fairness index expression from the literature.

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos e Metodologia . . . . .	3
1.3 Trabalhos Relacionados . . . . .	4
1.4 Organização do Trabalho . . . . .	5
<b>2 O Padrão IEEE 802.11</b>	<b>6</b>
2.1 Descrição Geral da Arquitetura . . . . .	7
2.2 Camada Física . . . . .	8
2.2.1 <i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i> . . . . .	8
2.2.2 <i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> . . . . .	9
2.2.3 Infravermelho . . . . .	11

2.3	Extensões da camada Física . . . . .	11
2.3.1	Esquemas de modulação do 802.11b . . . . .	12
2.3.2	Formato do Frame PLCP do 802.11 . . . . .	13
2.4	Camada MAC . . . . .	15
2.4.1	DCF ( <i>Distributed Coordination Function</i> ) . . . . .	15
2.4.2	Fragmentação e RTS/CTS opcionais . . . . .	18
2.4.3	PCF ( <i>Point Coordination Function</i> ) . . . . .	19
2.5	Extensões da camada MAC . . . . .	20
2.5.1	EDCF ( <i>Enhanced Distributed Coordination Function</i> ) . . . . .	21
2.5.2	HCF ( <i>Hybrid Coordination Function</i> ) . . . . .	23
2.5.3	Quadros do MAC 802.11 . . . . .	24
	Formato do quadro de Dados MAC . . . . .	25
	Formato dos quadros de Controle . . . . .	27
2.5.4	Conclusões do Capítulo . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Performance do IEEE 802.11b</b>	<b>29</b>
3.1	<i>Overhead</i> de Protocolo . . . . .	29
3.2	Influência da taxa de transmissão das STAs . . . . .	32
3.3	Influência do Fator Distância . . . . .	34
3.4	Simulações . . . . .	34
3.4.1	Resultados Obtidos . . . . .	37
3.4.2	Conclusões do Capítulo . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Mecanismo de Controle de Prioridade</b>	<b>43</b>



<i>SUMÁRIO</i>	ix
4.1 Critérios de Priorização . . . . .	44
4.2 Algoritmos Utilizados . . . . .	46
4.2.1 Utilização e efeitos dos Parâmetros CWmin e AIFS . . . . .	50
4.3 Índice de Justiça . . . . .	52
4.3.1 Conclusões do Capítulo . . . . .	54
<b>5 Simulações e Resultados Obtidos</b>	<b>55</b>
5.1 O simulador NS ( <i>Network Simulator</i> ) . . . . .	55
5.2 Preparação do ambiente de Simulação . . . . .	56
5.3 Cenários de Simulação e modelos de tráfego . . . . .	58
5.4 Resultados Obtidos . . . . .	59
5.5 Avaliação dos Resultados . . . . .	63
5.5.1 Conclusões do Capítulo . . . . .	68
<b>6 Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>70</b>
6.1 Conclusões . . . . .	71
6.2 Trabalhos Futuros . . . . .	73
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>74</b>

# Lista de Figuras

2.1	Arquitetura de uma rede 802.11 <i>ad hoc</i> . . . . .	7
2.2	Arquitetura de uma rede 802.11 infra-estruturada . . . . .	8
2.3	Técnica de FHSS . . . . .	9
2.4	Canais não sobrepostos do 802.11 (FSSS) em 2.4GHz . . . . .	11
2.5	Esquema de modulação utilizando CCK . . . . .	12
2.6	Formato do <i>frame</i> PLCP longo [1] . . . . .	14
2.7	Formato do <i>frame</i> PLCP curto [1] . . . . .	15
2.8	Arquitetura do protocolo IEEE 802.11 . . . . .	16
2.9	Espaços entre quadros e procedimento de <i>backoff</i> do 802.11 . . . . .	17
2.10	Protocolo com utilização das mensagens de RTS/CTS . . . . .	19
2.11	Fragmentação de pacotes no DCF . . . . .	19
2.12	Função de coordenação centralizada . . . . .	20
2.13	STA do 802.11e com múltiplas TC e seus respectivos parâmetros de QoS . . . . .	21
2.14	EDCF: Múltiplas instâncias de backoff disputando a transmissão . . . . .	23
2.15	Função HCF do 802.11e: Super <i>frame</i> formado de um CFP e um CP . . . . .	24
2.16	Componentes de um quadro MAC . . . . .	25

2.17	Formato do quadro de dados MAC . . . . .	25
2.18	Formato dos quadros de controle MAC . . . . .	27
3.1	Transmissão com sucesso de um frame no 802.11b[Anom] . . . . .	31
3.2	Vazão das STAs transmitindo nas quatro (04) taxas do 802.11b utilizando o acesso básico (sem RTS/CTS) . . . . .	32
3.3	Quadro de tamanho T sendo transmitido por STAs de diferentes taxas	33
3.4	Captura de pacotes . . . . .	35
3.5	Cenários 1 e 2 de simulações . . . . .	36
3.6	Cenário 3 de simulações . . . . .	37
3.7	Todas as STAs a 30m do AP ( <i>downlink</i> ) . . . . .	38
3.8	STA de taxa variável a 150m do AP ( <i>downlink</i> ) . . . . .	38
3.9	Todas as STAs a 30m do AP ( <i>uplink</i> ) . . . . .	39
3.10	STA de taxa variável a 150m do AP ( <i>uplink</i> ) . . . . .	39
3.11	Uma STA a 11Mbps - De uma (01) a dezoito (18) STAs de taxa variável ( <i>uplink</i> ) . . . . .	40
3.12	Uma STA de taxa variável - De uma (01) a dezoito (18) STAs de taxa 11Mbps ( <i>uplink</i> ) . . . . .	41
3.13	Uma STA a 11Mbps - De uma (01) a dezoito (18) STAs de taxa variável ( <i>downlink</i> ) . . . . .	41
3.14	Uma STA de taxa variável - De uma (01) a dezoito (18) STAs de taxa 11Mbps ( <i>downlink</i> ) . . . . .	42
4.1	Vazão agregada da rede e vazão das TCs existentes para um número crescente de STAs de menor vazão ( <i>uplink</i> ) . . . . .	47
4.2	Mecanismo de Controle de prioridade localizado no AP . . . . .	48

4.3	Modulos <i>ajustar Prioridade</i> , <i>permitir Reducao</i> e <i>necessita Elevar</i> . . .	49
4.4	Modulo de Ajuste de Contenção . . . . .	50
4.5	Generalização do mecanismo de controle de prioridade para $n$ cate- gorias de tráfego . . . . .	51
4.6	Utilização do parâmetro AIFS no critério de priorização . . . . .	51
5.1	Pacote de ACK modificado para possibilitar taxa simétrica . . . . .	57
5.2	Cenário utilizado na avaliação do mecanismo de controle de Priori- dade (ex: 4 STAs de diferentes taxas) . . . . .	59
5.3	Vazão agregada das TCs e vazão agregada da rede obtidas com me- canismo e tráfego <i>uplink</i> . . . . .	65
5.4	Vazão agregada das TCs e vazão agregada da rede obtidas com me- canismo e tráfego <i>uplink</i> . . . . .	65

# Lista de Tabelas

2.1	Codificação DBPSK para 1Mbps . . . . .	10
2.2	Codificação DQPSK para 2Mbps . . . . .	10
2.3	802.11b: Taxas, codificações e modulações . . . . .	13
2.4	Valores de IFSs( <i>Inter frame Spaces</i> ) do 802.11b . . . . .	17
3.1	Máxima vazão alcançada por uma STA em uma rede IEEE 802.11b de acordo com sua taxa . . . . .	32
5.1	Vazões média e Agregada Obtidas com a utilização do Mecanismo utilizando ambos critérios de priorização( <i>uplink</i> ) . . . . .	60
5.2	Vazões média e Agregada Obtidas com a utilização do Mecanismo utilizando ambos critérios de priorização( <i>downlink</i> ) . . . . .	61
5.3	Vazões média e Agregada Obtidas sem a utilização do mecanismo ( <i>uplink</i> e <i>downlink</i> ) . . . . .	61
5.4	Vazões Obtidas com utilização do mecanismo em cenário com trans- missão simultânea em 4 taxas ( <i>uplink</i> ) . . . . .	62
5.5	Vazões Obtidas sem utilização do Mecanismo em cenário com trans- missão simultânea em 4 taxas ( <i>uplink</i> ) . . . . .	63
5.6	Índice de Justiça obtido para cada um dos critérios de priorização e fases de simulação das tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 . . . . .	67

5.7 Índice de Justiça obtido para cada um dos critérios de priorização e  
fases de simulação das tabelas 5.4 e 5.5 . . . . . 68

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

Nos últimos anos o mercado de comunicações sem fio tem experimentado um crescimento repentino. As tecnologias sem fio alcançam ou são capazes de alcançar virtualmente qualquer área do planeta. Centenas de milhões de pessoas trocam informações diariamente utilizando *paggers*, telefones celulares e outros produtos sem fio. A tendência à mobilidade tem promovido também uma grande expansão no mercado de WLANs (*Wireless Local Networks*). Estas redes proporcionam acesso à informação de maneira rápida e transparente, destacando-se dentre as tecnologias disponíveis o padrão IEEE 802.11, devido a sua popularidade, altas taxas de transmissão e baixo custo. Estimativas de mercado indicam [2] que a quantidade de *hot spots* existentes ao redor do mundo cresceu de cerca de 9.3 milhões, ao final de 2003, para um número em torno de 30 milhões ao final de 2004. Além da grande difusão, diversas aplicações podem ser desenvolvidas aproveitando as características das tecnologias sem fio. Aplicadas a área médica, os profissionais da saúde podem obter registros ou sinais vitais dos pacientes em tempo real; em aplicações industriais, trabalhadores de chão de fábrica podem sensoriar, diagnosticar e resolver problemas em equipamentos; em *hot spots*, usuários podem utilizar aplicativos multimídia, de acesso móvel a informações ou jogos em rede. Com os exemplos citados, percebe-se a grande aceitação, popularidade e possibilidade de desenvolvimento de aplicações

para as tecnologias de rede sem fio. Sendo assim, grandes esforços têm sido empregados por parte de pesquisadores e fabricantes em identificar e resolver problemas que possam degradar a performance de vazão das redes desta tecnologia, uma vez que algumas das aplicações anteriormente comentadas necessitam de grande largura de banda. Um exemplo de diminuição de desempenho pode ser observado nos sistemas sem fio em geral (incluindo-se as redes IEEE 802.11) com o aumento da distância entre os pontos em comunicação ou na presença de condições adversas no meio, tais como interferências e/ou ruídos. Nestas condições, há uma diminuição da relação sinal/ruído e, conseqüentemente elevação da taxa de erros dos pacotes transmitidos pelas estações móveis (STAs). Esta degradação de desempenho é solucionada através do uso de esquemas de modulação mais robustos, que têm como inconveniente a diminuição das taxas de transmissão das STAs. Para as redes IEEE 802.11b, que é o objeto deste estudo, são previstas as taxas de 11Mbps, 5.5Mbps, 2Mbps e 1Mbps. O decréscimo da taxa das STAs em função da distância ou de condições desfavoráveis do meio, cria situações pouco estudadas e que podem ainda alterar a performance da rede. Uma destas alterações de desempenho foi observada em [3], para o caso de uma rede 802.11b infra-estruturada com acesso ao meio através do modo DCF (*Distributed Coordination Function*). Nesta situação, existem circunstâncias onde podem ocorrer injustiças no compartilhamento de banda. Tais injustiças ocorrem em cenários onde uma STA, ao estar longe do AP (*Access Point*), baixa sua taxa de 11Mbps para 5.5Mbps, 2Mbps ou 1Mbps. Nesse cenário, caso exista na rede pelo menos uma STA transmitindo a taxa de 1Mbps, isso ocasionará a diminuição da vazão das STAs de maior taxa para um valor próximo ao da STA mais lenta. A razão deste problema é o método de acesso CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) que atribui igual probabilidade de acesso ao meio para todas as STAs, o que pode penalizar as STAs mais rápidas pelo fato da STA de mais baixa taxa capturar o canal por um maior período de tempo.



## 1.2 Objetivos e Metodologia

Extensões do 802.11 original, tais como os padrões 802.11b/e, foram desenvolvidas pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) com objetivos de promover melhoramentos do protocolo. O 802.11b oferece taxas de 11Mbps e 5.5 Mbps, em acréscimo às taxas de 1Mbps e 2Mbps já existentes originalmente; o 802.11e possibilita o suporte à Qualidade de Serviço (*Quality of Service-QoS*) através de parâmetros definidos na especificação do protocolo. Diversos trabalhos têm avaliado o desempenho do MAC 802.11 e da extensão IEEE 802.11e, denominada de MAC *Enhancements for Quality of Service*, analisando métricas como vazão e/ou atraso. No caso específico do 802.11e, é também verificada a diferenciação promovida pela divisão do tráfego de cada STA entre diversas categorias de tráfego (TCs - *Traffic Categories*). No entanto, tais abordagens não retratam um cenário realista de operação das redes 802.11, uma vez que o efeito de diferentes distâncias e taxas para as STAs são desconsideradas e/ou não investigadas.

Desta forma, a maioria dos trabalhos existentes na literatura não estuda as injustiças que podem ocorrer em cenários com STAs transmitindo com diferentes taxas ou apenas apontam para o problema, sem propor soluções, como Heusse et. al [3]. Assim, a relevância deste estudo seria o de propor soluções para a questão discutida, definindo critérios que aproveitem o melhor desempenho das STAs de maior taxa, e desta maneira, ir ao encontro das definições de justiça.

Por meio de simulações, a presente dissertação analisa o problema de ocupação do canal, verificando o impacto da variação da distância e quantidade de STAs, que transmitem com diferentes taxas, sobre a vazão individual das STAs e vazão agregada da rede. Faz-se uso, ainda, da extensão IEEE 802.11e para determinar diferentes parâmetros de QoS (*QoS Parameter Set*) para as STAs, de acordo com seus tempos de transmissão. É, portanto, desenvolvido a partir da proposta de [4] um mecanismo de controle de prioridade, que torna o AP (*Access Point*) capaz de selecionar dinamicamente os parâmetros de priorização para as STAs, transmitindo com diferentes taxas. Para tanto, utiliza-se a extensão IEEE 802.11e, com atribuição de diferentes valores de AIFS (*Arbitrary Interframe Space*) e CWmin (*Contention*

*Window*), a fim de diminuir o privilégio das STAs de menor taxa. Deseja-se, com isso, que uma STA que possua taxa de comunicação maior acesse mais vezes o canal, compensando o longo período que a STA mais lenta o ocupa.

## 1.3 Trabalhos Relacionados

Vários trabalhos existentes na literatura analisam a performance de vazão alcançada pelo MAC 802.11. Em [5], [6], [7] e [8] são apresentados modelos analíticos para computar a vazão de saturação do protocolo. Entretanto, os trabalhos relacionados não consideram em suas análises a presença de STAs transmitindo com diferentes taxas em uma rede 802.11.

Em [3] verifica-se o desempenho do MAC 802.11b, considerando STAs com taxas diferentes; a “anomalia” de performance para o método de acesso DCF é identificada por meio de fórmulas matemáticas que expressam a vazão efetiva de dados disponível na rede e, experimentos que constatarem o problema através de medidas de vazão. Contudo, não foram analisados os efeitos da existência de diferentes distâncias entre as STAs e AP, além de não propor solução para o problema identificado.

Em [9] são realizados experimentos com atribuição de diferentes parâmetros do MAC 802.11 para as STAs. O trabalho objetiva investigar quais os valores de parâmetros que mantêm a diferenciação de serviços para as STAs de mesma prioridade, independente de suas taxas e distâncias do AP. Entretanto, o artigo não propõe mecanismos de atribuição dinâmica dos parâmetros de QoS para estas condições.

Diversos trabalhos ([10], [11], [12], [13] e [14]) realizam experimentos de simulação onde são atribuídos diferentes valores de parâmetros de QoS para tráfegos de diferentes categorias e requisitos distintos. Eles objetivam constatar a diferenciação oferecida pelo MAC IEEE 802.11e.

Em [4] desenvolve-se um mecanismo de controle de carga que, de acordo com a situação de tráfego na rede, seleciona os parâmetros de QoS do MAC 802.11e, propondo uma solução para a configuração do QoS *Parameter Set*, que é deixado

em aberto na especificação do protocolo e nos artigos comentados nos parágrafos anteriores.

Em [15] avalia-se o impacto da variação de taxa e distância das STAs na constatação da “anomalia”. Na mesma pesquisa é desenvolvido e avaliado um mecanismo dinâmico de controle de prioridade baseado em [4], que seleciona os parâmetros de QoS do IEEE 802.11e para priorizar as STAs de acordo com suas taxas. No entanto, tal mecanismo não considera em seu critério de priorização os tempos efetivos de ocupação do canal ou a quantidade de STAs presentes na rede.

Como será visto nos próximos capítulos, a presente dissertação combina as análises feitas por [3] e [15] ao constatar a “anomalia”, considerando as variáveis distância entre STAs e AP, e ainda a quantidade de STAs transmitindo e suas respectivas taxas. Esta pesquisa tem como contribuições: definir, avaliar e debater critérios considerados mais justos na partilha de banda, em redes 802.11, na presença da “anomalia” de desempenho. Além disso, avalia-se o mecanismo de priorização desenvolvido utilizando cenários com convivência simultânea de STAs transmitindo nas quatro taxas do 802.11b, tal como possível em uma rede do tipo *hot spot*.

## 1.4 Organização do Trabalho

Para abordar tais assuntos, dividiu-se este trabalho da seguinte forma: o capítulo 2 faz uma revisão bibliográfica do padrão 802.11, abordando as arquiteturas de rede existentes e características das camadas físicas e MAC dos protocolos 802.11 b/e; o capítulo 3 investiga a “anomalia” da camada MAC 802.11 e realiza simulações através do NS-2 (*Network Simulator*) para ilustrar o problema; o capítulo 4 apresenta o mecanismo de controle de prioridade utilizado para minimizar a “anomalia”, assim como um índice de justiça (*fairness index*) definido em [16] e que foi utilizado para verificar a eficiência dos mecanismos propostos; o capítulo 5 apresenta simulações com e sem a utilização do mecanismo de controle de prioridade, avaliando os resultados obtidos através do índice de justiça; e finalmente, o capítulo 6 traz as conclusões e trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## O Padrão IEEE 802.11

O padrão 802.11 foi criado em 1997 pelo grupo 11 do comitê responsável pela família de protocolos 802 do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Em seu escopo são definidas as PHY (*physical layer*) e MAC (*Medium Access Control*) correspondentes às camadas física e de enlace do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) da ISO (*International Organization for Standardization*). Em 1999 duas extensões foram lançadas: o padrão IEEE 802.11b, que define transmissões de até 11Mbps na banda ISM em 2.4GHz; e o padrão IEEE 802.11a, que utiliza o esquema de modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), suportando taxas de até 54Mbps na banda de 5GHz. Novas extensões foram definidas e outras continuam em desenvolvimento com o propósito de oferecer melhorias relacionadas a segurança ou maiores taxas de dados, por exemplo. Dentre estas novas extensões pode-se citar o IEEE 802.11g que provê taxas de até 54Mbps na banda de 2.4GHz e também usa o sistema de codificação OFDM; e o IEEE 802.11e, que ainda se encontra em desenvolvimento, e é capaz de oferecer QoS em redes WLAN. O 802.11a e 802.11g não são escopo do presente trabalho, e por isso não serão comentados em detalhes.

Para explicar o padrão 802.11, este capítulo apresenta na seção 2.1 as arquiteturas de rede existentes para o protocolo. Nas seções 2.2 e 2.3 são descritas características específicas da camada física do protocolo 802.11 e da extensão 802.11b. Por fim, as seções 2.4 e 2.5 trazem uma breve revisão bibliográfica das camadas MAC

802.11 e 802.11e.

## 2.1 Descrição Geral da Arquitetura

De acordo com [17], o padrão 802.11 define duas arquiteturas de operação: *ad hoc* e infra-estruturada. Na primeira, também chamada de IBSS (*Independent Basic Service Set*), uma STA pode comunicar diretamente com uma outra dentro de sua faixa de alcance (figura 2.1). A troca de informação entre duas STAs que não podem se comunicar diretamente é realizada através de STAs intermediárias que atuam como roteadores num caminho de múltiplos saltos.

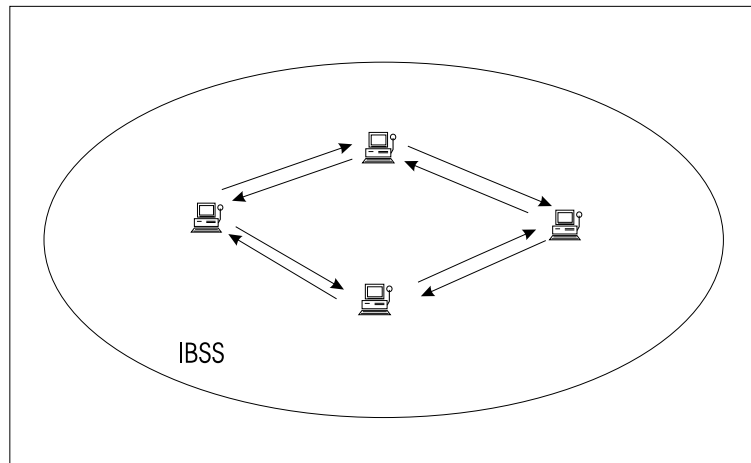


Figura 2.1: Arquitetura de uma rede 802.11 *ad hoc*

No modo infra-estruturado (figura 2.2), todo o tráfego na rede é coordenado pelo AP. Ele geralmente é conectado a um DS (*Distribution System*) que o interliga a outros APs e redes cabeadas. Na configuração centralizada, se duas STAs desejam comunicar ou alcançar um nó na rede fixa, elas transmitem ao nó coordenador que direciona o tráfego para o seu destino. A área de cobertura do AP é chamada de BSS (*Basic Service Set*) e um conjunto de BSSs conectados através de um DS é definido como um ESS (*Extended Service Set*). Dentro de um ESS, as STAs possuem mobilidade podendo, assim, deslocarem-se entre BSSs sem perda de comunicação.

A arquitetura também define o conceito de portal, que é um dispositivo que

interconecta uma WLAN 802.11 com outras LANs 802, tal como ilustrado na figura 2.2.

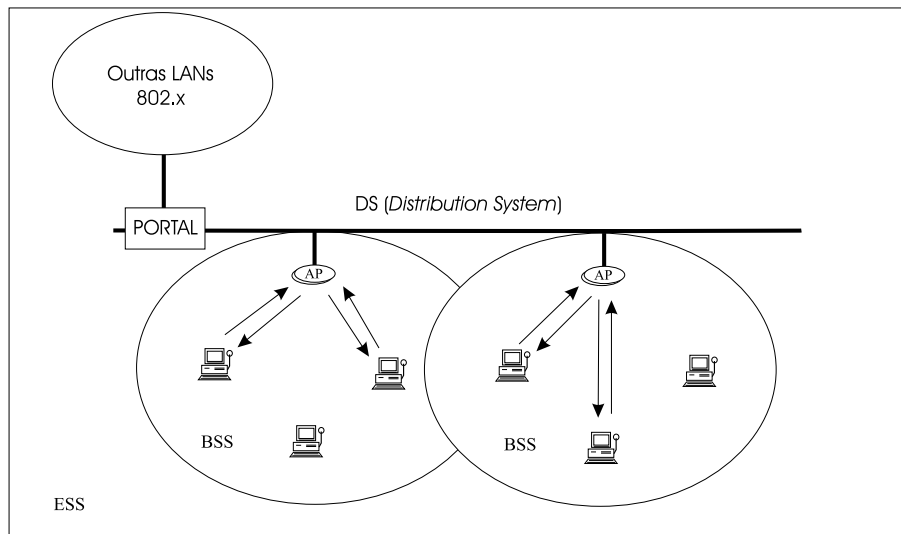


Figura 2.2: Arquitetura de uma rede 802.11 infra-estruturada

## 2.2 Camada Física

O padrão 802.11 define três tipos de camadas físicas, segundo [17]. São elas: o FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), o DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) e o IR (*Infra-Red*). As duas primeiras utilizam técnicas de espalhamento espectral e trabalham na banda ISM (*Industrial Scientific and Medical*) de 2.4GHz. O terceiro tipo de camada é baseado no uso de sistema infra-vermelho. Todas as camadas disponibilizam taxas de 1Mbps e 2Mbps e são comentadas nos próximos tópicos.

### 2.2.1 *Frequency Hopping Spread Spectrum*

O FHSS trabalha na banda ISM, que vai de 2.400 a 2.4835 GHz. A técnica consiste em transmitir os dados em diversos canais através de saltos em frequências pseudo-aleatórios (figura 2.3). Tanto nos EUA como em quase toda a Europa estão

disponíveis 79 canais separados por 1MHz, sendo o primeiro canal centrado em 2,402GHz. São estabelecidos três conjuntos de frequências de saltos, cada um com um total de 26 frequências. Estes grupos tem como objetivo evitar colisões entre STAs transmitindo em um mesmo conjunto de frequências e permitem a existência de até três BSSs em uma mesma área geográfica.

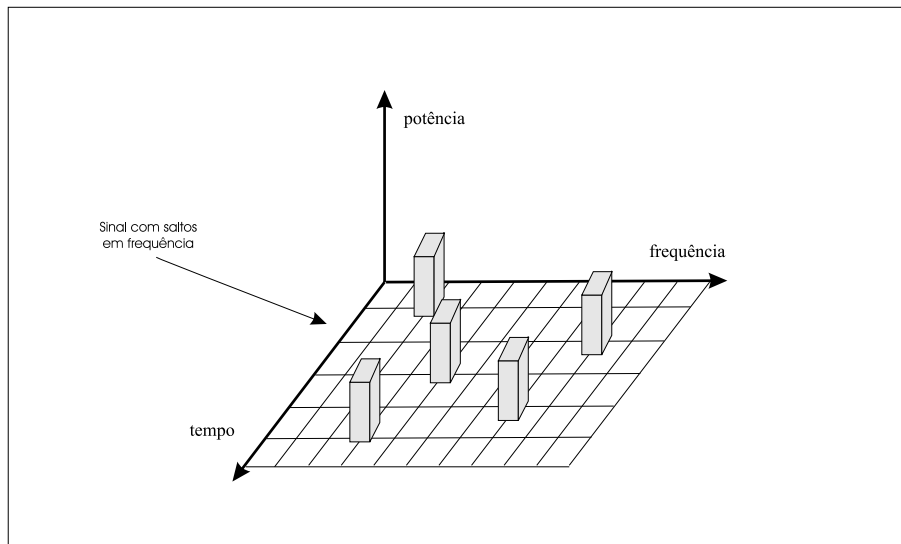


Figura 2.3: Técnica de FHSS

A taxa de 1Mbps utiliza modulação GFSK (*Gaussian Shift Keying*) de dois níveis, onde o 1 e 0 lógicos são codificados, respectivamente, usando as frequências  $F_c + f$  e  $F_c - f$ . A taxa de 2Mbps utiliza GFSK de quatro níveis, com codificação de 2bits de uma única vez, utilizando quatro frequências.

### 2.2.2 *Direct Sequence Spread Spectrum*

O método DSSS consiste no espalhamento espectral do sinal a ser transmitido através de um código PN (*pseudo-noise*) e o sinal resultante, antes da transmissão, é aplicado a um modulador M-PSK (*M-Phase Shift Keying*). O código PN é formado por uma sequência de 0s e 1s com propriedades ortogonais e com taxa maior que a taxa de bits dos dados. Na demodulação é utilizada a mesma sequência PN para decodificar o sinal transmitido.

A taxa de transmissão de 1Mbps é baseada na modulação DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*) que transmite 1 bit por símbolo. Para a taxa de 2Mbps é utilizado modulador DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*), resultando em 2 bits por símbolo transmitido. Ambas as técnicas são diferenciais e, portanto, desconsideram a fase absoluta do sinal. São consideradas as mudanças de fase do sinal, como apresentado nas tabelas (2.1) e (2.2).

<i>BitdeEntrada</i>	Mudança de Fase(+j $\omega$ )
0	0
1	$\pi$

Tabela 2.1: Codificação DBPSK para 1Mbps

<i>BitsdeEntrada</i>	Mudança de Fase(+j $\omega$ )
00	0
01	$\pi/2$
10	$\pi$
11	$3\pi/2(-\pi/2)$

Tabela 2.2: Codificação DQPSK para 2Mbps

Antes da fase de modulação é feito o espalhamento espectral utilizando uma sequência PN chamada de código *barker*, que é composta de 11 bits e dada por: +1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1. Cada sequência de 11 bits codifica, então, 1 ou 2 bits de acordo com a taxa de transmissão utilizada.

Para o esquema DSSS o padrão define um total de 14 canais de transmissão, os quais são parcialmente sobrepostos. Como a largura de banda do sinal transmitido está em torno de 22MHz e a largura de banda na faixa de 2.4GHz é de 83.5MHz, pode-se acomodar 3 canais sem sobreposição de acordo com a figura 2.4



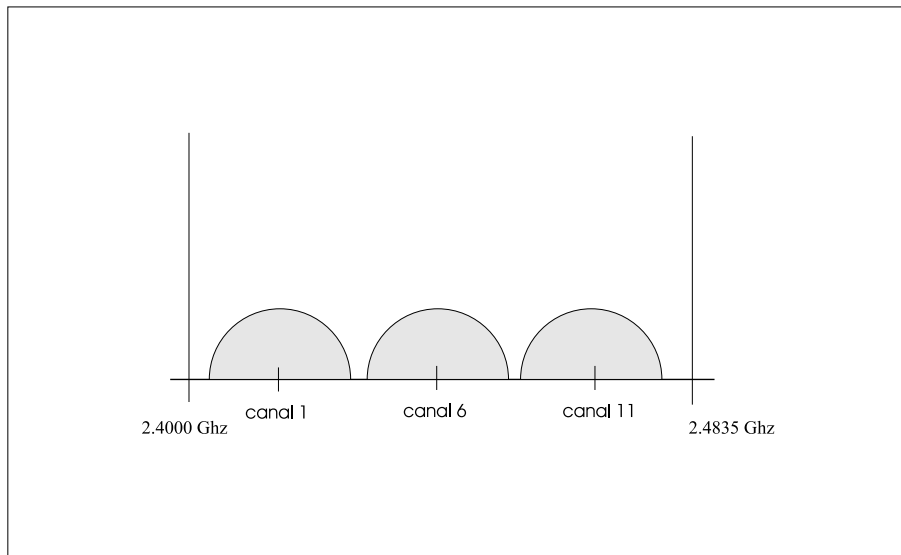


Figura 2.4: Canais não sobrepostos do 802.11 (FSSS) em 2.4GHz

### 2.2.3 Infravermelho

A camada física infravermelho é a menos utilizada e difundida do padrão 802.11. Ela utiliza ondas com comprimento na faixa de 850nm a 950nm e foi projetada somente para uso *indoor*. A especificação IR (*infrared*) foi criada para permitir tanto comunicação refletida como em visada direta. A taxa básica de transmissão de 1Mbps utiliza modulação 16-PPM (*Pulse Position Modulation*) que mapeia 4 bits de dados em um código de 16 bits a transmitir. A taxa de 2Mbps utiliza modulação 4-PPM a qual mapeia 2 bits em um código de 4 posições.

## 2.3 Extensões da camada Física

Extensões da camada física do 802.11 foram especificadas para permitir maiores taxas de transmissão. Exemplos destas extensões são o IEEE 802.11b, IEEE 802.11a e IEEE 802.11g. As duas últimas permitem taxas de até 54Mbps utilizando a técnica de multiplexação OFDM, sendo que o 802.11a trabalha na banda de 5GHz e o 802.11g na faixa de 2.4GHz. Estas duas especificações não são objetos desta dissertação e, portanto, não serão comentadas em detalhes.

De acordo com [18], a extensão 802.11b, também chamada de *Higher Rate*, possibilita taxas de transmissão de 5.5Mbps e 11Mbps em adição às taxas já existentes. Ela utiliza um novo método de codificação chamado de CCK (*Complementary Code Keying*) para permitir estas taxas, tal como comentado nos tópicos a seguir.

### 2.3.1 Esquemas de modulação do 802.11b

O 802.11b trabalha na faixa de 2.4GHz e utiliza o DSSS com código *Barker* para disponibilizar as taxas de 1Mbps e 2Mbps, tal como no 802.11 original. As duas novas taxas são conseguidas através da técnica de codificação CCK (*Complementary Code Keying*). O CCK é formado por um conjunto de 64 palavras código, com propriedades ortogonais, o que permite que até 6 bits sejam representados por palavra código ( $2^6 = 64$ ). Os dados a serem transmitidos são, assim, “espalhados” através do código *Barker* obtendo-se coleções de dados chamadas *chips*. Estas coleções são em seguida moduladas utilizando o DQPSK que permite adicionar mais 2 bits por símbolo a ser transmitido. De acordo com a figura (2.5), para as taxas de 11Mbps e 5.5Mbps, respectivamente, um total de 6 ou 2 bits de dados são espalhados utilizando o código CCK. O DQPSK adiciona então mais 2 bits por símbolo, o que resulta em 8 ou 4 bits por símbolo transmitidos nas taxas comentadas.

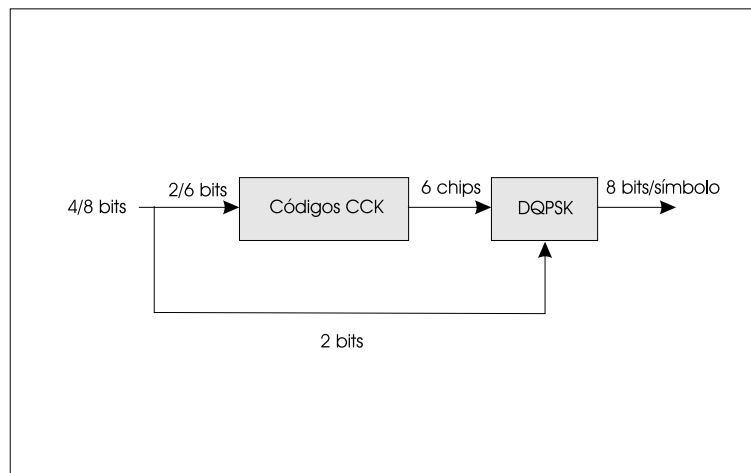


Figura 2.5: Esquema de modulação utilizando CCK

Ambos os esquemas *Barker* (1Mbps e 2Mbps) e CCK (5.5Mbps e 11Mbps) trans-

mitem com taxas de sinalização (*taxa de chips*) de 11Mbps. No primeiro, cada grupo de 11 *chips* é transmitido a 1MSímbolo/s (1MSps), o que resulta na taxa de sinalização comentada. No esquema CCK é mantida a mesma taxa de sinalização, contudo, há um aumento da taxa de símbolo para o valor de 1,375Mbps, uma vez que 8 bits são transmitidos por símbolo. Desta maneira, as taxas de 11Mbps e 5.5Mbps da codificação CCK podem ser obtidas a partir da multiplicação da taxa de símbolo pela quantidade de bits transmitidos por símbolo (ex:  $1,375 \times 8 = 11$  e  $1,375 \times 4 = 5.5$ ).

As modulações e codificações utilizadas no 802.11b com suas respectivas taxas de transmissão, aparecem resumidas na tabela 2.3 ([19]).

<i>Taxa de dados</i>	Tamanho do código	Modulação	Taxa de símbolo	Bits/símbolo
1Mbps	11( <i>Barker</i> )	DBPSK	1MSps	1
2Mbps	11( <i>Barker</i> )	DQPSK	1MSps	2
5.5Mbps	8(CCK)	DQPSK	1.375MSps	4
11Mbps	8(CCK)	DQPSK	1.375MSps	8

Tabela 2.3: 802.11b: Taxas, codificações e modulações

### 2.3.2 Formato do Frame PLCP do 802.11

A camada física do 802.11 é dividida em duas subcamadas: a PMD (*Physical Medium Dependent*) e a PLCP (*Physical Layer Convergence Protocol*). A primeira trata dos esquemas de codificação descritos na seção (2.3.1), enquanto a subcamada PLCP disponibiliza interfaces com a camada MAC, além de prover o sinal de CCA (*Clear Channel Assesment*), que tem a tarefa de informar se o meio está em uso ou não.

A unidade de dados gerada pela subcamada PMD é chamada de PPDU (*PHY Protocol Data Unit*), enquanto o *frame* de dados gerado pela subcamada PLCP é conhecido por PSDU (*PLCP Service Data Unit*). Uma PSDU possui um preâmbulo e um cabeçalho, e no 802.11b são definidos dois tipos de cabeçalhos e preâmbulos: o PLCP longo inter-opera com a especificação DSSS “antiga”, cujas taxas básicas são de 1Mbps e 2Mbps; o PLCP curto é opcional e utilizado em aplicações que

necessitam de altas taxas de transmissão e desconsideram a comunicação com STAs que trabalham utilizando o PLCP longo.

O PLCP longo (2.6) consiste em um preâmbulo (PLCP *preamble*) de 144 bits e em um cabeçalho (*header*) de 48 bits, os quais são sempre transmitidos a taxa de 1Mbps. Os primeiros 128 bits do preâmbulo são utilizados para sincronização, enquanto Os próximos 16 bits tem a função de marcar o início do quadro (*frame*) e estão contidos em um campo chamado de SFD (*Start Frame Delimiter*). Os 48 bits seguintes compõe o cabeçalho PLCP e estão divididos em 4 campos: 1) o campo *signal* (8bits) indica a taxa de transmissão dos dados (11, 5.5, 2 ou 1Mbps); 2) o campo *service* (8 bits) é reservado para uso futuro; 3) o campo *length* indica o tamanho do *payload*; 4) o campo CRC realiza a verificação de erros.

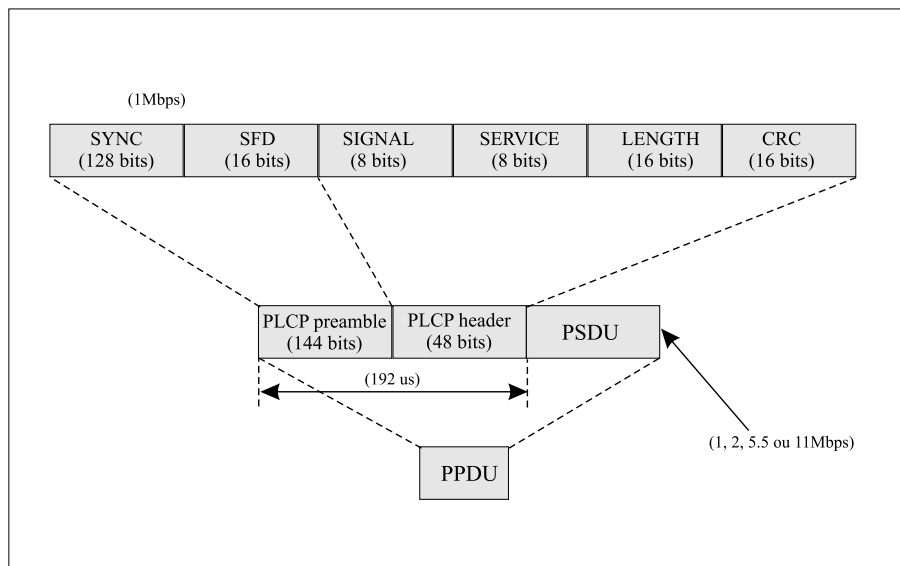


Figura 2.6: Formato do *frame* PLCP longo [1]

O preâmbulo e cabeçalho PLCP curto (2.7) diferem do longo nos seguintes aspectos: os bits de SYNC são 56, somando um total de 72 bits no preâmbulo, os quais são transmitidos à taxa de 1Mbps; o *header* possui os mesmos campos e quantidades de bits do PLCP longo, no entanto, é transmitido à taxa de 2Mbps. A PSDU no PLCP curto pode ser transmitida nas taxas de 2Mbps, 5.5Mbps e 11Mbps.

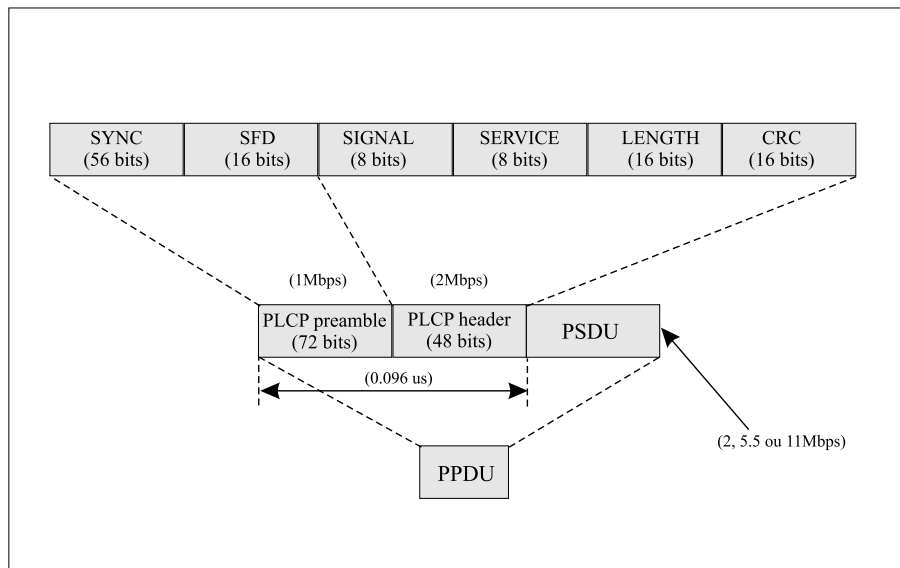


Figura 2.7: Formato do *frame* PLCP curto [1]

## 2.4 Camada MAC

O MAC 802.11 é responsável por funções de alocação de canal, endereçamento, fragmentação e remontagem de quadros. A camada define dois modos de acesso ao canal (figura 2.8), o DCF (*Distributed Coordination Function*) e o PCF (*Point Coordination Function*). O primeiro é executado de maneira distribuída nas STAs e utiliza o protocolo CSMA/CA para disputa de acesso ao meio, enquanto o segundo utiliza um nó coordenador chamado PC (*Point Coordinator*), que controla a transmissão das STAs através de um esquema de eleição. O DCF é de uso obrigatório e pode ser empregado como método de acesso único. Em uma segunda configuração ambos, DCF e PCF, são multiplexados no tempo em um quadro (superquadro), que é formado por um CP (*Contention Period*) e um período CFP (*Contention Free Period*).

### 2.4.1 DCF (*Distributed Coordination Function*)

No DCF cada STA determina individualmente quando acessar o meio, utilizando um esquema de *listen-before-talk* definido no protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense*

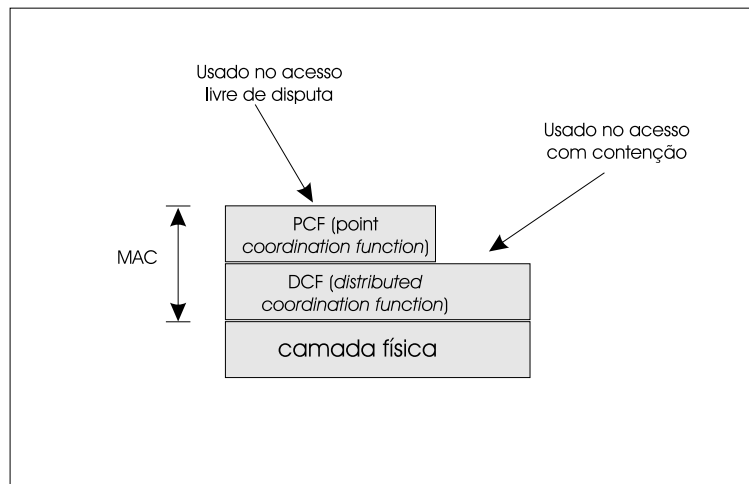


Figura 2.8: Arquitetura do protocolo IEEE 802.11

*with Multiple Access with Collision Avoidance*). De acordo com o protocolo (representado na figura 2.9), uma STA pode transmitir imediatamente caso perceba que o meio está livre por um período de tempo maior ou igual a DIFS (*Distributed Inter Frame Space*) ou EIFS (*Extended IFS*). O primeiro temporizador é usado caso o último pacote detectado no meio tenha sido recebido sem erros pela STA, caso contrário, espera-se por EIFS para a transmissão. O intervalo EIFS é necessário para que outra STA tenha tempo hábil para confirmar a correta recepção de um pacote de dados (envio de um ACK), que para esta STA foi interpretado incorretamente.

A STA de destino, ao receber o quadro transmitido, espera por um intervalo de  $10\mu\text{s}$  chamado de SIFS (*Short Interframe Space*), respondendo com uma mensagem de ACK. Uma vez que o valor de SIFS é sempre menor que DIFS, a STA receptora ganhará a disputa sobre as demais STAs e assim conseguirá transmitir a confirmação de recebimento de quadro (ACK).

Caso o meio esteja ocupado após a espera inicial, a STA transmissora esperará por mais um período de DIFS, no qual o meio deve estar livre, e iniciará um procedimento de *backoff*, adiando sua transmissão por um período de tempo que é computado através de uma variável uniformemente distribuída entre 0 e  $CW_{min}$  (*Congestion Window*). O período de espera é calculado através do produto do tempo de um *slot* ( $20\mu\text{s}$ ) pelo valor sorteado da variável uniforme. O temporizador

de *backoff* é decrementado em unidades de um *slot time* caso não haja transmissões no meio. O decremento é interrompido caso o meio se torne ocupado, reiniciando após DIFS, caso volte a ficar livre. Quando o temporizador alcança o valor zero, a STA pode transmitir seu quadro, esperando um ACK dentro de um temporizador específico.

Caso o ACK não retorne no tempo esperado, a STA transmissora subentende que ocorreu uma colisão ou que o pacote foi recebido com erros. Nesta situação, seus procedimentos *backoff* e retransmissão são chamados. Para cada nova colisão o valor de  $CW_{min}$  é aumentado ( $CW_{min} = (CW_{min} * 2) + 1$ ) até o valor limite  $CW_{max}$ , com o propósito de diminuir a probabilidade de novas colisões. No 802.11b,  $CW_{min}$  possui valor inicial 31 e  $CW_{max}$  assume o valor 1023.

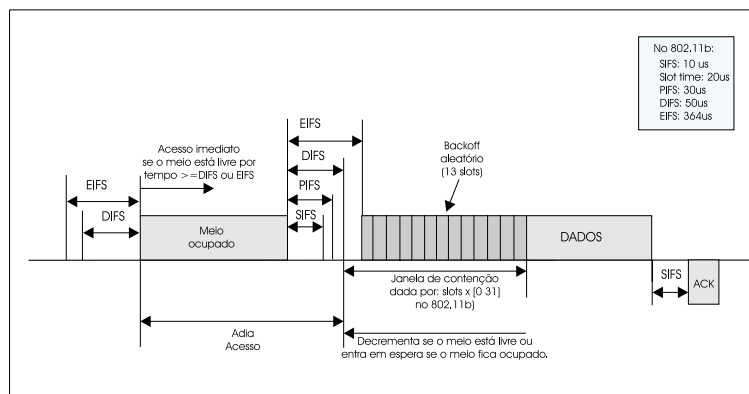


Figura 2.9: Espaços entre quadros e procedimento de *backoff* do 802.11

Apresenta-se na tabela 2.4, um resumo dos valores e expressões com as quais são obtidos os espaços entre quadros (*interframe spaces*) do 802.11b. A constante *SlotTime* tem valor  $20\mu s$  no protocolo em questão.

$IFS_s$	Expressão	Tempo
$SIFS$	***	$10\mu s$
$PIFS$	$SIFS + SlotTime$	$30\mu s$
$DIFS$	$SIFS + 2 * SlotTime$	$50\mu s$
$EIFS$	$SIFS + ACK_{(time)} + PLCP PreambleAndHeader_{(time)} + DIFS$	$364\mu s$

Tabela 2.4: Valores de  $IFS_s$  (*Inter frame Spaces*) do 802.11b

De acordo com a tabela anterior, percebe-se que EIFS é dado pelo tempo necessário para transmitir um pacote de ACK (112 bits), após a espera de SIFS, com seu respectivo preâmbulo e cabeçalho PLCP à taxa de 1Mbps. É necessário, ainda, a espera adicional de DIFS de acordo com o especificado no protocolo.

### 2.4.2 Fragmentação e RTS/CTS opcionais

Como opção ao protocolo DCF básico, descrito na seção 2.4.1, existe um segundo esquema que implementa um mecanismo de RTS/CTS (*Request to Send/Clear to Send*) para resolver o problema de terminais escondidos. Este problema ocorre em cenários onde uma STA não é capaz de detectar a transmissão de outras STAs devido as características limitadas de propagação do sinal no meio sem fio. Nestas condições, esta mesma STA (terminal escondido) inicia sua transmissão, causando interferências na STA receptora. Assim, o mecanismo adicional (2.10) implementa a troca das mensagens de RTS/CTS entre transmissor e receptor, o que garante que haverá reserva do canal para a comunicação. Os quadros de controle RTS/CTS incluem informações de duração dos pacotes de dados e ACK que serão posteriormente transmitidos. Assim, as STAs que estão na faixa de alcance do transmissor ou do receptor ajustam seus NAVs (*Network Allocation Vectors*) ao escutarem as mensagens de RTS/CTS. Desta maneira, estas outras STAs adiarão suas transmissões pelo tempo em que o meio estiver ocupado. Este mecanismo, apesar de representar um *overhead* pela troca das duas mensagens, é útil no caso de se ter grandes quadros de dados com tamanho maior que um limiar (*RTSthreshold*).

Uma terceira variação do DCF (figura 2.11) permite a fragmentação dos pacotes de dados para minimizar as perdas decorrentes de colisões. Este ganho acontece pois pacotes de dados menores podem ser retransmitidos, ocupando o canal por um período curto de tempo, quando comparado com um quadro de dados de tamanho integral. Nesta configuração do DCF, os fragmentos de pacotes são transmitidos em rajadas (*burst*) e reconhecidos individualmente através de mensagens de ACK. Após cada reconhecimento, o transmissor espera por SIFS e envia um próximo fragmento. O procedimento de *backoff* é realizado somente antes do primeiro fragmento.



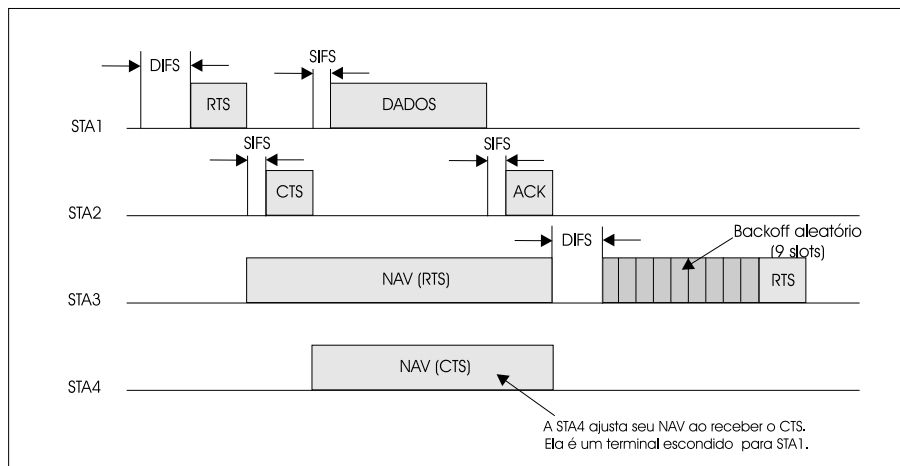


Figura 2.10: Protocolo com utilização das mensagens de RTS/CTS

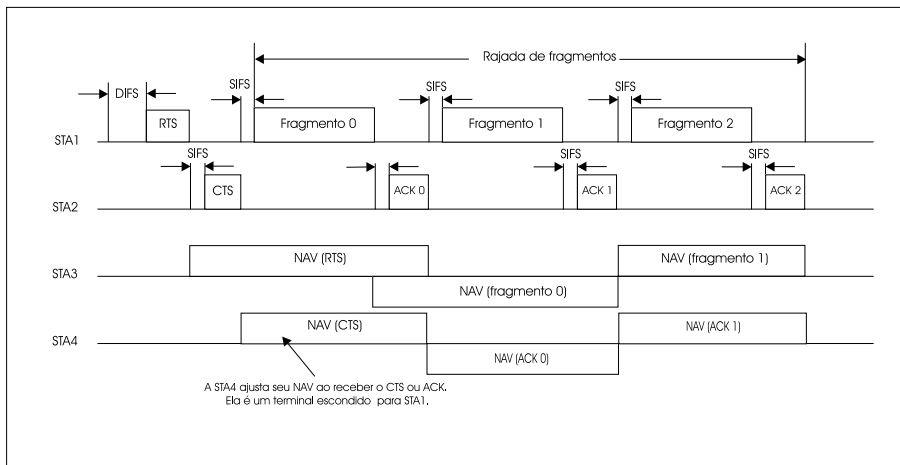


Figura 2.11: Fragmentação de pacotes no DCF

### 2.4.3 PCF (*Point Coordination Function*)

A função de coordenação centralizada (PCF) implementa um mecanismo de eleição coordenado por um PC (*Point Coordinator*), que geralmente é o próprio AP. O protocolo utiliza superquadros (*superframes*) que são compostos por períodos com (CP-*Contention Period*) e sem contenção (CFP-*Contention Free Period*) alternados no tempo. Conforme apresentado na figura 2.9, o PCF possui prioridade em relação ao DCF, uma vez que é iniciado após um período de PIFS (*Point Coordination Function-IFS*) de duração menor que DIFS. Após este período, o coordenador transmite um quadro de gerenciamento conhecido como *beacon* que tem a função de manter a

sincronização entre as STAs (figura 2.12). Transcorrido mais um período de SIFS, o AP atribui Oportunidades de Transmissão (TXOP) para STAs que estão em sua lista de eleição (*polling*). Ao eleger uma STA, o PC aproveita a transmissão de seu quadro de *beacon* para enviar dados para a STA em questão, da mesma maneira que a STA consultada transmite de uma única vez seus quadros de dados e ACK para o AP. Caso o AP não receba resposta à sua consulta, ele elegerá a próxima STA na lista ou encerrará o CFP transmitindo um chamado CF-End.

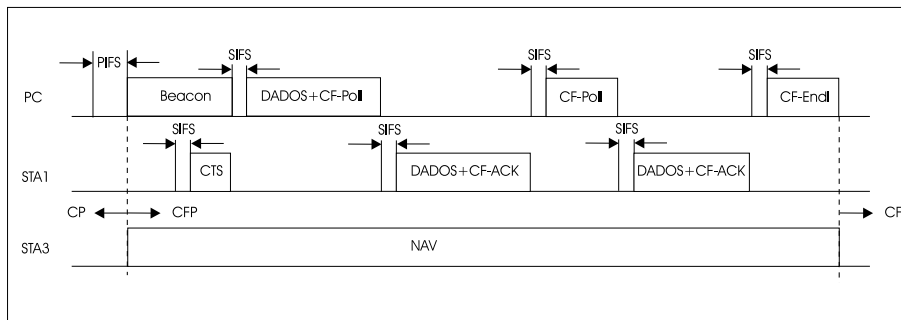


Figura 2.12: Função de coordenação centralizada

Embora o PCF possua base para QoS, uma vez que pode privilegiar as STAs que estão em sua lista de eleição, tal suporte é limitado devido a problemas no protocolo. Pode-se citar que existem atrasos imprevisíveis decorrentes do tempo desconhecido de transmissão das STAs eleitas.

## 2.5 Extensões da camada MAC

A extensão 802.11e [20] trata-se de uma evolução do 802.11 original com suporte a QoS. Nela é introduzido um mecanismo chamado de HCF (*Hybrid Coordination Function*) que incorpora dois métodos de acesso ao meio. O primeiro, baseado em contenção, é chamado de EDCF (*Enhanced Distributed Coordination Function*) e o segundo, livre de disputa, tem como base um mecanismo de eleição. O EDCF pode ser usado como método único de acesso, ou multiplexado em um superquadro juntamente com um período livre de disputa. A estação coordenadora é conhecida como HC (*Hybrid Coordinator*), e de maneira similar ao 802.11, geralmente reside

no AP. Os dois novos métodos de acesso são descritos nas próximas subseções.

### 2.5.1 EDCF (*Enhanced Distributed Coordination Function*)

O suporte a QoS no EDCF é conseguido através da introdução de múltiplas TCs (*Traffic Categories*). Conforme figura 2.13, os frames de dados das camadas superiores chegam ao MAC com uma prioridade que é mapeada em uma TC. Cada STA possui até 8 TCs, que são parametrizadas com seus próprios valores de  $CW_{min}$ ,  $CW_{max}$  e  $AIFS$  (*Arbitrary Interframe Space*), e realizam procedimentos de *backoff* independentes.

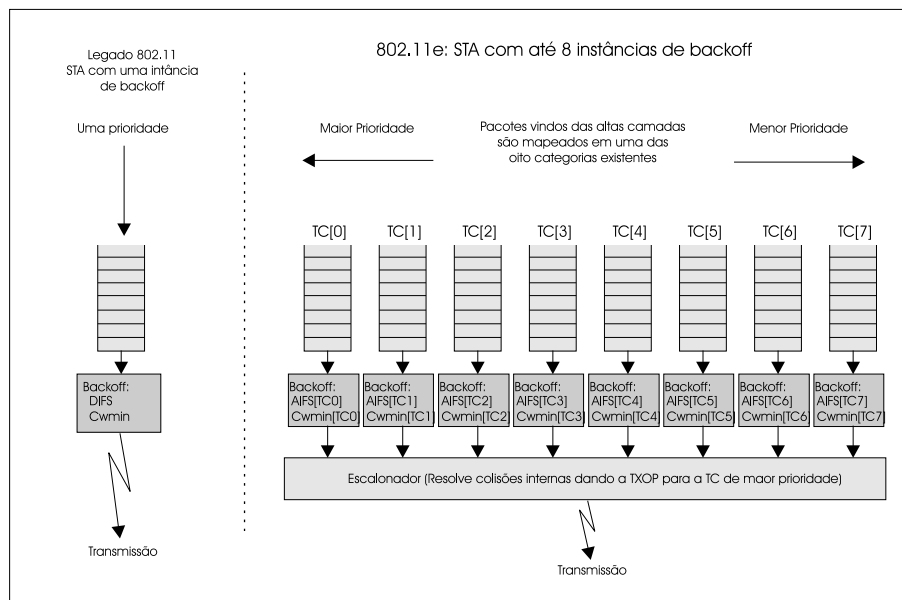


Figura 2.13: STA do 802.11e com múltiplas TC e seus respectivos parâmetros de QoS

Os valores de parâmetros utilizados em cada TC são determinados pelo HC e emitidos para as STAs da rede. Com isso, um mesmo conjunto de parâmetros destinados à uma TC é usado por instâncias de *backoff* localizadas em STAs diferentes. Durante o período com contenção, cada entidade de *backoff* disputa por uma Oportunidade de Transmissão (TXOP-*Transmission Opportunity*), que é um intervalo de tempo no qual uma STA tem o direito de transmitir e é definida por um

tempo de início e uma duração. No EDCF, se o meio estiver livre por um período maior ou igual a  $AIFS[TC]$  (*Arbitrary Interframe Space*), uma STA pode iniciar sua transmissão imediatamente, mas se estiver ocupado, a STA esperará até o final da transmissão corrente. A variável  $AIFS[TC]$  possui valor sempre maior ou igual a DIFS, de maneira que as STAs do EDCF não tenham prioridade sobre as do legado DCF. O valor de  $AIFS[TC]$ , pode ser aumentado para as TCs existentes de acordo com a seguinte expressão:

$$AIFS[TC] = SIFS + N * SlotTime, \text{ sendo que } AIFS[TC] \geq 2$$

Na expressão acima,  $N$  é o número de *slots* utilizados e quanto maior o seu valor, menor será a prioridade da TC em questão. O parâmetro *SlotTime* é uma constante que define a duração de um *slot*.

Na situação onde o meio encontra-se ocupado, após a espera inicial, a STA esperará por um período adicional de  $AIFS[TC]$  (no qual o meio deve estar livre) e iniciará um procedimento de *backoff* com intervalo de espera entre  $([1, CW_{min}[TC] + 1]) * SlotTime$ . Para cada tentativa de transmissão mal sucedida, um novo valor de  $CW$  é calculado utilizando um fator de persistência ( $PF[TC]$ ). O valor da nova  $CW$  é calculado utilizando a seguinte expressão, até o valor  $CW_{max}$ :

$$CW_{novo}[TC] = (CW_{antigo}[TC] + 1) * PF - 1$$

Uma colisão ocorrida entre múltiplas TCs, dentro de uma STA, é resolvida dando-se a TXOP para a TC mais prioritária. Neste caso, a TC que possui prioridade menor entrará em *backoff*. Existe ainda a possibilidade de um quadro sofrer uma colisão externa com o quadro de uma outra STA, neste caso, também é realizado o procedimento de *backoff* para as STAs envolvidas.

Além dos parâmetros tradicionais comentados anteriormente, uma nova variável foi adicionada ao *QoS Parameter Set* do EDCF. No novo protocolo, diferentes valores de  $TXOP_{limit}$  podem ser atribuídas para as TCs existentes. Assim, um valor maior deste parâmetro permitirá que uma TC transmita pacotes de dados consecutivos

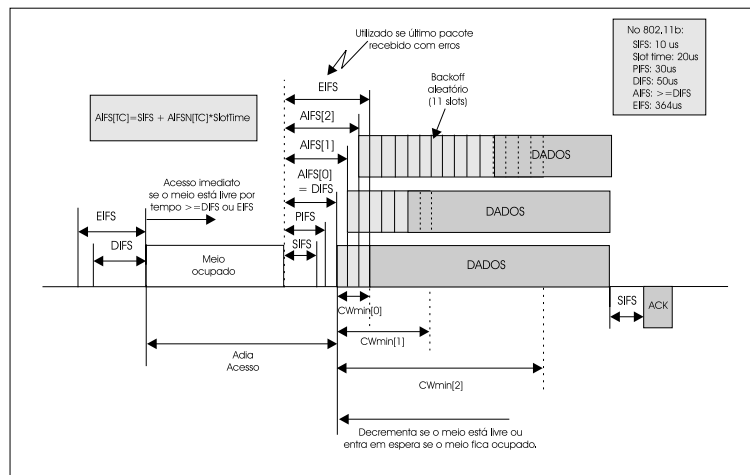


Figura 2.14: EDCF: Múltiplas instâncias de backoff disputando a transmissão

sem a realização de *backoff*.

### 2.5.2 HCF (*Hybrid Coordination Function*)

O HCF (*Hybrid Coordination Function*) trabalha de maneira bastante similar ao PCF. Ele é baseado em um mecanismo de eleição localizado no HC. No entanto, neste protocolo o coordenador híbrido possui alta prioridade e pode iniciar um período CFP a qualquer momento durante um CP. Assim, no decorrer de um CP, uma TC pode transmitir em duas situações distintas: 1) tal como definido nas regras do EDCF, a TC disputa a transmissão, após esperar por AIFS[TC] mais um *backoff* aleatório; 2) a TC recebe um *frame* de eleição chamado QoS CF-Poll que é proveniente do HC. Este quadro de eleição pode ser transmitido pelo coordenador após um período PIFS, sem a necessidade de espera adicional por uma janela de contenção.

Durante o CFP, uma TC, localizada em uma STA, pode transmitir se o HC lhe atribuir a TXOP através da transmissão de um quadro de QoS CF-Poll. No caso de tráfego em *downlink*, os dados podem ser transmitidos livremente do HC para as STAs sem a necessidade de eleição.

Durante o período de uma TXOP, uma STA pode transmitir múltiplos pacotes separados por intervalos de SIFS. O HC determina a máxima duração da TXOP de

cada TC utilizando o parâmetro  $TXOP_{limit}$  que é transmitido através do sinal de *beacon*.

A figura 2.15 ilustra um exemplo de superquadro do HCF. O superquadro inicia com a transmissão de um sinal de *beacon* pelo HC. Durante o CFP, as instâncias de *backoff* só transmitem se forem eleitas pelo HC. Em seguida, inicia-se um CFP que é encerrado através de um quadro de *CF-End*. Em uma terceira fase explicitada na figura, as entidades de *backoff* disputam o meio utilizando as regras do EDCF. Na quarta e última fase, o HC elege uma STA para transmitir durante o CP. Assim, esta STA pode transmitir múltiplos quadros durante sua TXOP.

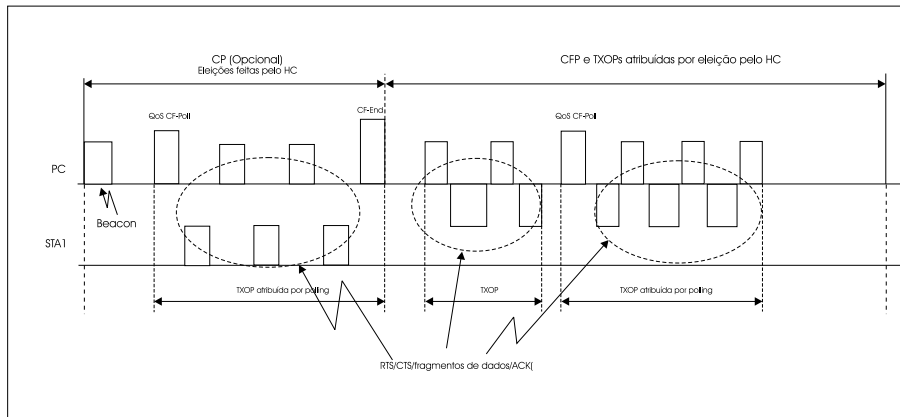


Figura 2.15: Função HCF do 802.11e: Superframe formado de um CFP e um CP

### 2.5.3 Quadros do MAC 802.11

No MAC 802.11 existem três tipos principais de formato de quadros [21] que são:

- Quadros de Dados (*Data Frames*): usado para a transmissão de dados.
- Quadros de Controle (*Control Frames*): usados para controlar o acesso ao meio. Como exemplos citam-se o RTS, CTS e ACK.
- Quadros de Gerência (*Management Frames*): usados para trocar informações de gerência, tais como autenticação e desautenticação de STAs em uma BSS.

Todos os quadros MAC são compostos de uma estrutura básica conforme abaixo e figura 2.16.

- Cabeçalho MAC (*MAC Header*): engloba informações de controle, duração e sequência dos quadros transmitidos.
- Dados-Informação (*Frame Body*): possui tamanho variável e contém informações específicas de acordo com o tipo de quadro.
- Verificação de Sequência (*Frame Check Sequence-FCS*): contém código CRC (*Cyclic Redundancy Code*) de 32 bits.

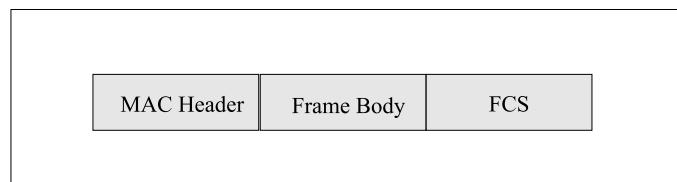


Figura 2.16: Componentes de um quadro MAC

### Formato do quadro de Dados MAC

Na figura 2.17 é representado o formato geral de um quadro MAC. Conforme [17] a mesma figura é utilizada para representar o formato do quadro de dados MAC.

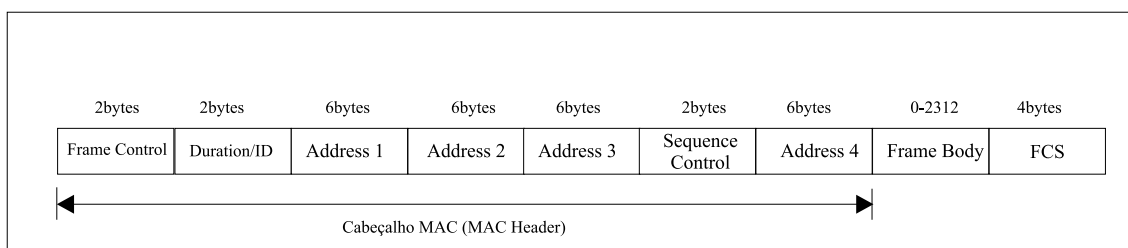


Figura 2.17: Formato do quadro de dados MAC

O primeiro campo (*Frame Control*) possui comprimento de dois (02) *bytes* e é dividido em vários subcampos, os quais transportam informações específicas, tais como:

- Versão do Protocolo (*Protocolo Version*): versão do protocolo 802.11(2 bits).
- Tipo (*Type*): transporta informações de tipo (ex: Dados, Controle ou Gerência) e subtipo de quadro (dois (02) bits para tipo e quatro (04) para subtipo).
- Campos (*ToDS* e *FromDS*): possui valor um (01) se quadro é destinado ou originado no DS(1 bit).
- Mais Fragmentos (*More Fragments*): usado em quadros de dados ou de gerência indicando que existe um próximo (quando em 1) fragmento a ser transmitido (1 bit).
- Campo *Retry*: em 1, indica que o quadro atual é uma retransmissão de um quadro anterior (1 bit).
- Campo *Power Management*: em 1 indica que a STA está em modo de economia de energia e em zero indica que a STA está em modo ativo. (1 bit)
- Campo *More Data*: usado pelo AP para indicar a uma STA que existem mais quadros destinados a ela. (1 bit)
- Campo WEP: indica (1-sim, 0-não) que o corpo do quadro está criptografado de acordo com o algoritmo WEP. (1 bit)
- Campo *Order*: em 1, indica que está se usando a classe de serviço *StrictlyOrdered*, onde os usuários não podem aceitar mudança de ordem das mensagens recebidas.(1 bit)

Os outros campos do quadro de dados MAC (figura 2.17) são:

- *Duration/ID*: em mensagens controle (*Power Save Poll*) representa o ID de associação de uma STA; em outras mensagens armazena o tempo de duração do NAV. (2 bytes)
- *Address-1, 2, 3 e 4*: tem tamanho de 6 bytes. *Address-1* indica o destino da mensagem; *Address-2* indica origem da mensagem; *Address-3* indica a fonte original da mensagem (quando o campo *FromDS* está em 1) ou representa o



destinatário que deve ser alcançado no DS (quando o campo *ToDS* está em 1); *Address-4* usado quando um quadro precisa ser enviado de AP para outro passando pelo DS, em ambos os casos, os campos *FromDS* e *ToDS* são usados conforme caso 3.

- *Sequence Control*: representa a ordem de diferentes fragmentos pertencentes ao mesmo quadro e reconhece duplicação de quadros (2 bytes).
- *Frame Body*: mensagem enviada dentro do quadro. (0-2312 bytes)
- FCS (*Frame Check Sequence*): código de CRC de 4 bytes.

### Formato dos quadros de Controle

Os quadros de RTS, CTS e ACK aparecem representados na figura 2.18. Neles, os campos RA (6 bytes) e TA (6 bytes) armazenam, respectivamente, o endereço do originador das mensagens de RTS/CTS/ACK e o endereço de destino para o caso de mensagens RTS.

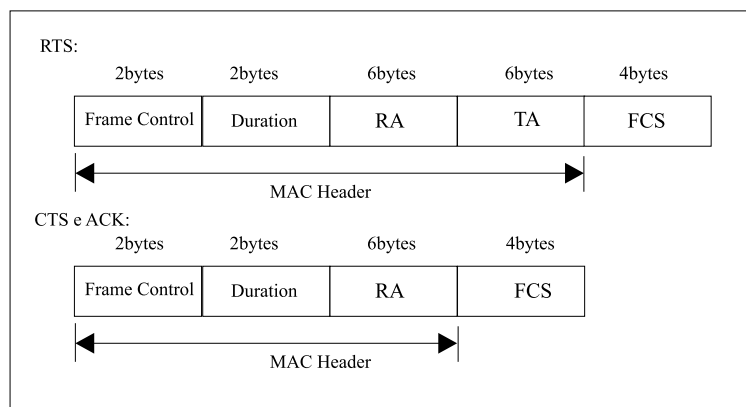


Figura 2.18: Formato dos quadros de controle MAC

O campo de duração (*Duration*), no caso de mensagens RTS, armazena o tempo (em  $\mu s$ ) necessário para transmissão dos próximos quadros de dados (ou gerência), CTS, ACK e mais três (03) intervalos de SIFS. Para o caso de mensagens de CTS, o campo de duração recebe o tempo contido no quadro RTS anterior, menos o

tempo necessário para transmitir um CTS, mais seu intervalo de SIFS. Por fim, para mensagens ACK, o campo de duração possui valor zero, caso o valor contido no campo *More Fragments* do quadro de controle anterior seja igual a zero; caso contrário, o campo de duração armazenará o valor contido no quadro anterior, menos o tempo de transmissão de um ACK mais seu respectivo intervalo SIFS. seja

Os quadros de gerência não foram utilizados nos experimentos de simulação realizados neste trabalho, e portanto, não será mostrados em detalhes.

#### 2.5.4 Conclusões do Capítulo

Este capítulo descreveu, de maneira abreviada, as arquiteturas de operação do protocolo 802.11, os tipos de camadas físicas existentes com seus respectivos esquemas de modulação, o funcionamento dos protocolos de controle de acesso ao meio (MAC) e, também, os formatos de quadros utilizados nas camadas físicas e MAC do 802.11. Com tal levantamento teórico foi possível entender os seguintes aspectos a respeito do protocolo: a maneira como são disponibilizadas as taxas de transmissão existentes no 802.11b, que trata-se do protocolo para o qual deseja-se minimizar a “anomalia” de desempenho de taxas; o modo de funcionamento do protocolo MAC 802.11 e da extensão do protocolo conhecida 802.11e, a qual será utilizada no desenvolvimento de em um mecanismo para reduzir os efeitos da “anomalia”; quais são os formatos de quadros e/ou mensagens utilizadas pela camada MAC e física do 802.11 e que podem representar *overhead* de protocolo e, desta maneira, influenciar a performance de transmissão das STAs e da rede.

# Capítulo 3

## Performance do IEEE 802.11b

Diversos fatores influenciam a *performance* de vazão de uma rede IEEE 802.11b infra-estruturada. Podem-se citar a distância entre STAs e AP, a quantidade de STAs existentes com suas respectivas taxas de transmissão e o *overhead* de protocolo.

Nas próximas seções serão realizadas análises e/ou simulações que verificam a *performance* protocolo 802.11b através da variação dos parâmetros comentados.

### 3.1 *Overhead* de Protocolo

Segundo [22], um protocolo é um acordo que define como acontecerá a comunicação entre as partes envolvidas. Tais regras são utilizadas para possibilitar a troca de informações entre camadas-pares localizadas em máquinas diferentes na rede. 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 maneira, a vazão efetiva das STAs é influenciada pelo *overhead* dos protocolos utilizados na comunicação.

O 802.11b, assim como qualquer arquitetura de rede, é formado por um conjunto de protocolos e desta maneira, suas camadas MAC e PHY acrescentam *overhead* às mensagens, tal como apresentado nas seções 2.3.2 e 2.5.3.

Sendo assim, pode-se verificar que somente uma fração do tempo total que uma STA ocupa o meio é utilizada para a transmissão efetiva de dados.

Conforme as análises de [3], [7], [8], e [23], ao considerar-se uma STA transmitindo em uma rede 802.11b, tem-se que o tempo total de transmissão com sucesso de um quadro de dados, quando utilizado o esquema básico de acesso do DCF, é dado por:

$$t_{tr}^{taxa_i} = t_{quadro}^{taxa_i} + t_{ov} \quad (3.1)$$

Onde  $t_{quadro}^{taxa_i}$  é o tempo de transmissão de um quadro MAC e  $t_{ov}$  é o tempo gasto com *overheads* de protocolo. A partir da expressão (3.1) e desmembrando-se as variáveis  $t_{quadro}^{taxa_i}$  e  $t_{ov}$ , tem-se que:

$$t_{tr}^{taxa_i} = DIFS + 2 * t_{PrAndH} + t_{quadro}^{taxa_i} + 2 * t_{prop} + SIFS + t_{ACK} + t_{E[CW_{min}]} \quad (3.2)$$

$$t_{quadro}^{taxa_i} = \frac{8 * (L_{MAC\_HEADER} + L_{Dados} + L_{CRC})}{taxa_i} \quad (3.3)$$

$$t_{dados}^{taxa_i} = \frac{8 * L_{Dados}}{taxa_i} \quad (3.4)$$

Sendo que os tempos relacionados nas equações acima (figura 3.1) são dados por:

- $t_{E[CW_{min}]}$  - tempo médio gasto em contenção ( $((CW_{min} + 1)/2) * slottime$ )
- $t_{PrAndH}$  - tempo de transmissão do preâmbulo e cabeçalho PLCP longo ( $192\mu s$ ), conforme seção 2.3.2
- $t_{ACK}$  - tempo de transmissão do ACK ( $112\mu s$ ) (seção 2.5.3)
- $t_{prop}$  - tempo de propagação no meio ( $1\mu s$ )
- $t_{quadro}^{taxa_i}$  - tempo de transmissão do quadro MAC
- $t_{dados}^{taxa_i}$  - tempo de transmissão dos dados (informação).

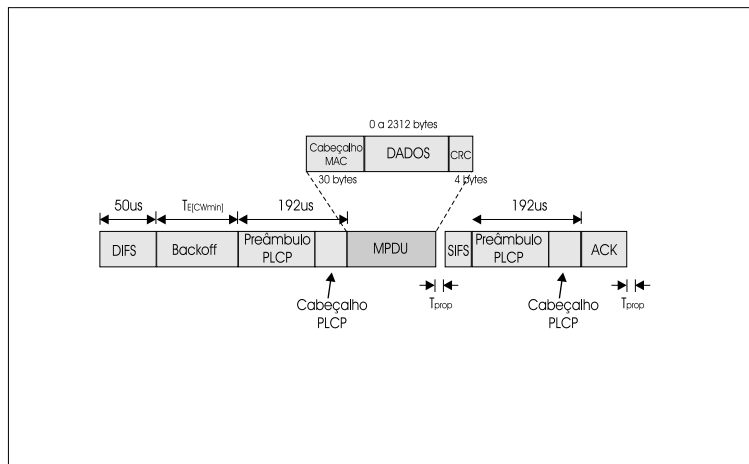


Figura 3.1: Transmissão com sucesso de um frame no 802.11b[Anom]

As constantes  $L_{MACHeader}$  (30 bytes) e  $L_{CRC}$  (4 bytes) (seção 2.5.3) são, respectivamente, o cabeçalho e o campo de verificação de erros de quadro da camada MAC. A variável  $L_{dados}$  representa o tamanho (em bytes) do pacote de dados que está sendo transmitido.

Conforme equações anteriores, nota-se que a vazão útil de dados medida acima da camada MAC é dada por:

$$V_{UTIL} = \frac{8 * L_{dados}}{t_{tr}} \quad (3.5)$$

Assim, apresenta-se na tabela (3.1) a máxima vazão alcançada por uma STA que transmite múltiplos pacotes de 2312 bytes nas quatro (4) taxas de transmissão disponíveis no 802.11b. As colunas 2 e 3 da tabela mostram, respectivamente, as vazões máxima calculada e medida (média) no intervalo entre 15s e 95s, conforme figura 3.2

Salienta-se que os dados de vazão mostrados anteriormente, foram obtidos sem a utilização das mensagens de RTS/CTS. Caso este protocolo fosse usado, menor seria a vazão máxima conseguida devido ao aumento do *overhead* de protocolo.

$Taxa(bps)$	Vazão Calculada	Vazão Média Medida
11M	7.15M	7.18M
5.5M	4.31M	4.31M
2M	1.80M	1.79M
1M	0.94M	0.93M

Tabela 3.1: Máxima vazão alcançada por uma STA em uma rede IEEE 802.11b de acordo com sua taxa

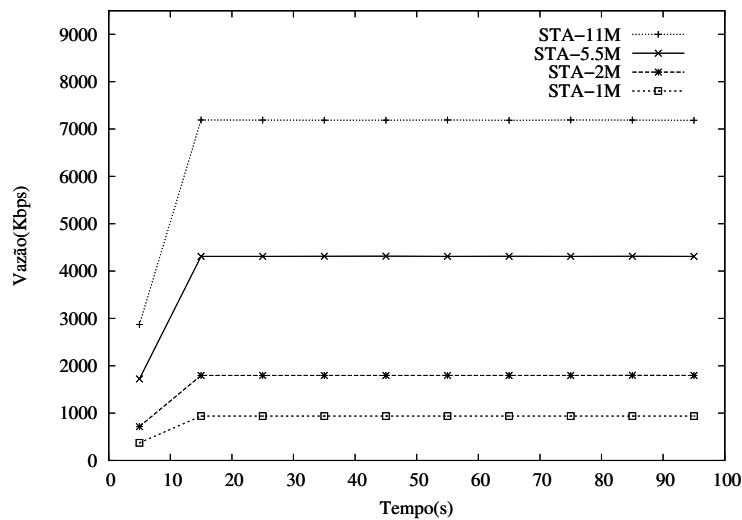


Figura 3.2: Vazão das STAs transmitindo nas quatro (04) taxas do 802.11b utilizando o acesso básico (sem RTS/CTS)

## 3.2 Influência da taxa de transmissão das STAs

Conforme comentado, além do fator *overhead*, a performance de vazão da rede sofre influência da diminuição da taxa de transmissão de dados das STAs. Tal degradação de desempenho pode ser facilmente percebida ao considerar-se o cenário de duas (2) STAs transmitindo pacotes de tamanho  $T$ . Uma vez que o CSMA/CA atribui igual probabilidade de acesso ao meio para todas as STAs, observa-se que em períodos longos de tempo, a captura do canal tende a ser alternada entre as STAs presentes, tal como mostrado na figura 3.3. Na situação ilustrada, a STA-1 transmitirá seu pacote de tamanho  $T$  e esperará o término da transmissão da STA-2 para iniciar o envio de um novo pacote. Portanto, a STA-1 esperará períodos de

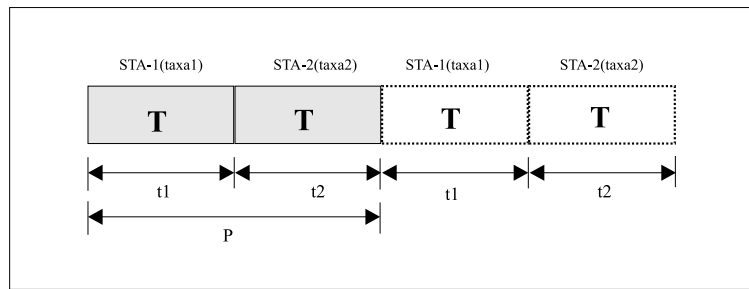


Figura 3.3: Quadro de tamanho T sendo transmitido por STAs de diferentes taxas

tamanho P iguais a  $t_1$  mais  $t_2$  para transmitir seus pacotes.

Assim, considerando-se somente o envio do pacote de dados (sem o *overhead* do protocolo 802.11), tem-se que a vazão total da rede e vazão individual das STAs será dada, respectivamente, por:

$$Vazao_{total} = \frac{2T}{\frac{T}{taxa_1} + \frac{T}{taxa_2}}$$

$$Vazao_{individual} = \frac{T}{\frac{T}{taxa_1} + \frac{T}{taxa_2}}$$

Atribuindo-se, como exemplo, os valores 11Mbps e 1Mbps para as variáveis  $taxa_1$  e  $taxa_2$  tem-se que as vazões total da rede e individual das STAs serão iguais a 1,83Mbps e 0,91Mbps. Em um segundo exemplo, assumindo-se que ambas variáveis  $taxa_1$  e  $taxa_2$  possuem valor igual a 11Mbps, os valores resultantes das vazões total e individual seriam, respectivamente iguais 11Mbps e 5.5Mbps.

Assim, percebe-se que a presença de uma STA de taxa inferior reduz a performance de vazão da rede, e portanto, das demais STAs.

O problema torna-se ainda mais sério a medida que eleva-se a quantidade de STAs de menor taxa. Isto pode ser facilmente percebido, ao considerar-se o exemplo extremo de uma (01) STA de maior taxa e um número crescente de STAs de taxa inferior, transmitindo pacotes de tamanho T. Conforme a expressão abaixo, sendo  $taxa_1$  e  $taxa_2$  respectivamente a maior e a menor taxa, e n a quantidade total de STAs, percebe-se que a vazão total de envio de dados tende para o valor da taxa

das STAs de menor taxa.

$$V_{azao_{total}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n.T}{T \cdot \left( \frac{1}{taxa_1} + \frac{n-1}{taxa_2} \right)} = taxa_2 \quad (3.6)$$

### 3.3 Influência do Fator Distância

A medida que aumenta-se a distância entre STAs e AP diminui-se a potência do sinal percebida no receptor, devido a perdas de propagação no meio. Tal afastamento causa efeitos como o da captura de pacotes ou o *fallback*, que é a diminuição da taxa das STAs com o aumento da distância.

Conforme figura 3.4, o efeito de captura do MAC 802.11 especifica que se uma STA recebe duas transmissões simultâneas (passos A e B), a primeira pode ser entendida se o seu nível de potência for maior que o nível de potência da outra (passo C), por um valor maior ou igual a um limiar de captura, ajustado em 10 por padrão no NS-2. Por outro lado, se a relação entre a potência do primeiro pacote e a potência do segundo for menor que 10, ambos são descartados, acontecendo então uma colisão (passo D).

Na próxima seção descrevem-se os cenários de simulação utilizados para exemplificar a “anomalia” através de experimentos com o NS-2[24], sendo que nestes experimentos são, também, apresentados os efeitos da captura de pacotes sobre a vazão das STAs da rede.

### 3.4 Simulações

Nos experimentos realizados neste capítulo utilizou-se o NS-2 versão 2.26, ao qual foi anexado o agente NOAH (*Non Ad Hoc Routing Agent*-[25]). Tal procedimento foi necessário, uma vez que o NS original possui somente protocolos de redes *Ad hoc*, o que não permite simular redes infra-estruturadas. Instrumentou-se o MAC 802.11 com código que permitisse a análise de seu funcionamento em situações onde existem STAs transmitindo com diferentes taxas e distâncias do AP. Além disso,



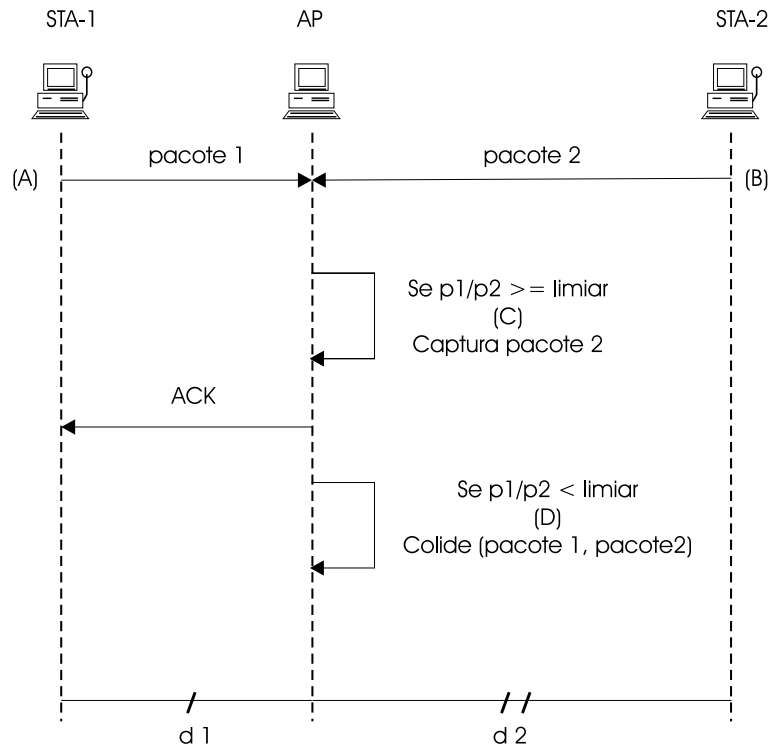


Figura 3.4: Captura de pacotes

alterou-se a camada MAC de maneira a possibilitar a existência de enlaces de taxa simétrica entre subida (*uplink*) e descida (*downlink*), assumindo-se, assim, que o AP transmite dados para as STAs com a mesma taxa com a qual recebe pacotes originados delas.

Nas simulações utilizou-se três (03) cenários distintos com o AP conectado a um nó fixo através de enlace de 100Mbps (capaz de escoar os fluxos sem se tornar o gargalo) e 2ms de retardo. Nos cenários 1 e 2 (figura 3.5) foram utilizadas (04) quatro STAs transmitindo a 11Mbps e uma (01) cuja taxa pode assumir os valores de 11Mbps, 5.5Mbps ou 2Mbps, sendo que no cenário 1 todas as STAs estão a 30m de raio do AP e no outro existe uma STA a 120m de distância do AP. A primeira situação foi necessária para visualizar-se os efeitos da “anomalia” sem a influência do fator distância, enquanto que o emprego do segundo cenário foi utilizado para observar os efeitos do afastamento das STAs em relação ao AP.

O cenário 3 (figura 3.6) foi dividido em duas configurações distintas com o objetivo de verificar a variação da quantidade de STAs de maior e menor taxa sem

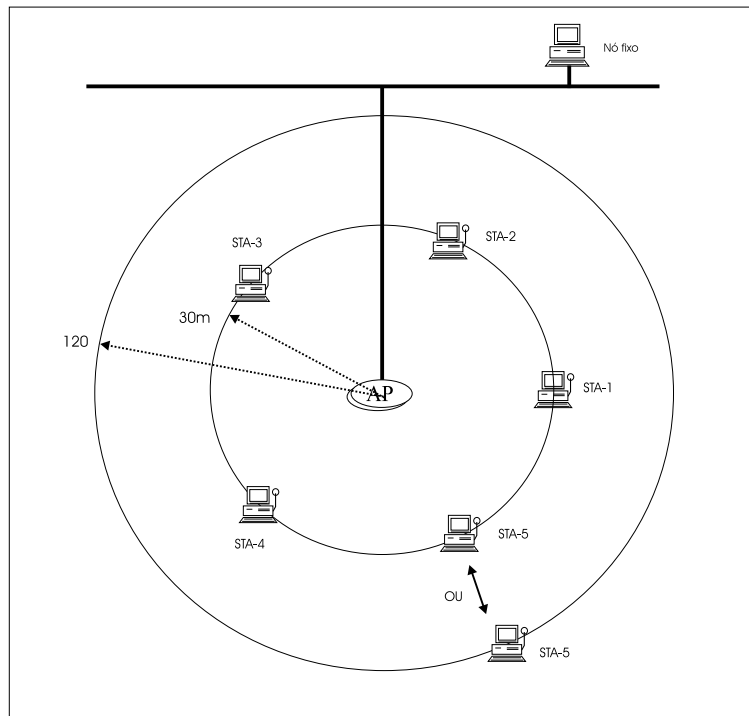


Figura 3.5: Cenários 1 e 2 de simulações

a influência do fator distância. Na primeira configuração fixou-se em um (01) a quantidade de STAs transmitindo a 11Mbps e variou-se de um (01) a dezoito (18) a quantidade de STAs transmitindo com taxa variável (ex: 5.5Mbps). Para a segunda configuração, de maneira oposta, fixou-se a quantidade de STAs de taxa variável e variou-se a quantidade de STAs transmitindo a 11Mbps. Em ambas configurações todas as STAs estão igualmente espaçadas na circunferência de 30m de raio do AP.

Nos cenários 1 e 2 foram realizadas simulações de 400 segundos, anexando a cada STA uma fonte CBR (*Constant Bit Rate*) e protocolo de transporte UDP, com o objetivo de simplificar a análise dos resultados devido ao comportamento constante do tráfego. O tráfego da fonte foi gerado com taxa de 2Mbps e pacotes de 2312 bytes, no sentido *downlink* e *uplink*, uma vez que foi considerada a simetria de taxas na comunicação entre STAs e AP. Nos aspectos acima, o terceiro cenário difere dos dois primeiros, uma vez que foram realizadas simulações de 200s, com tráfego somente em *uplink*, variando-se em cada experimento a quantidade de STAs de maior ou menor taxa conforme comentado anteriormente.

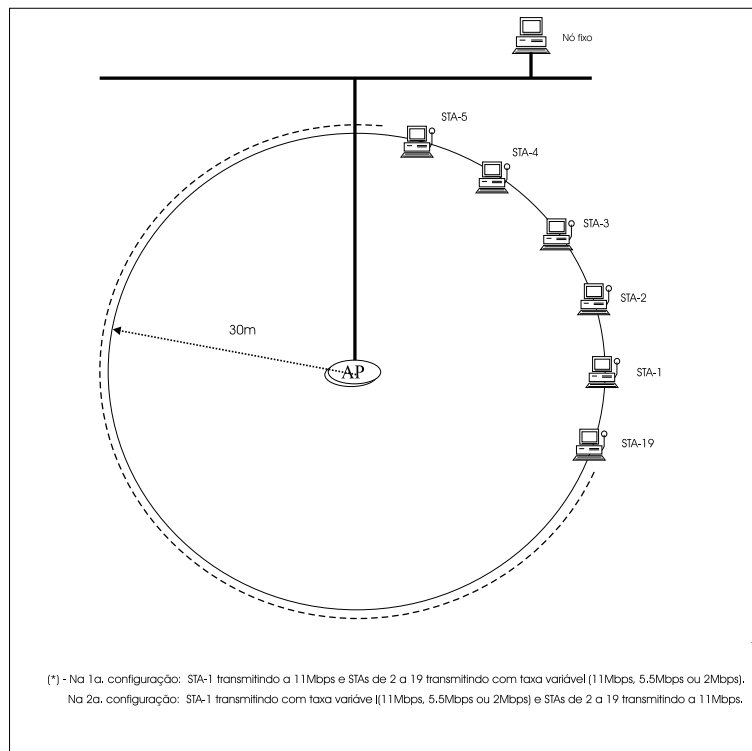


Figura 3.6: Cenário 3 de simulações

### 3.4.1 Resultados Obtidos

Conforme figura 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10 percebe-se que a medida que diminui-se a taxa de transmissão de uma das STAs para os valores de 5.5Mbps e 2Mbps, há um decréscimo da vazão de todas as outras para um valor próximo ao da STA de menor taxa. Comparando-se os resultados obtidos nas figuras 3.7 e 3.8 percebe-se que para tráfego em *downlink* obtêm-se curvas de vazão muito parecidas, independente da distância ao AP da STA de taxa variável. Isto ocorre, pois nesta condição não existem colisões nos receptores (STAs), uma vez que existe um único originador de tráfego (AP) que gerencia internamente a transmissão dos fluxos para cada um dos seus destinos.

Confrontando-se os resultados obtidos nas figuras 3.9 e 3.10 percebe-se que para tráfego em *uplink* existe uma menor vazão da STA de taxa variável (STA-5) quando ela encontra-se afastada do AP. Isto acontece, pois na situação onde a STA encontra-se distante, seus pacotes são capturados no receptor (AP), e ele responde normal-

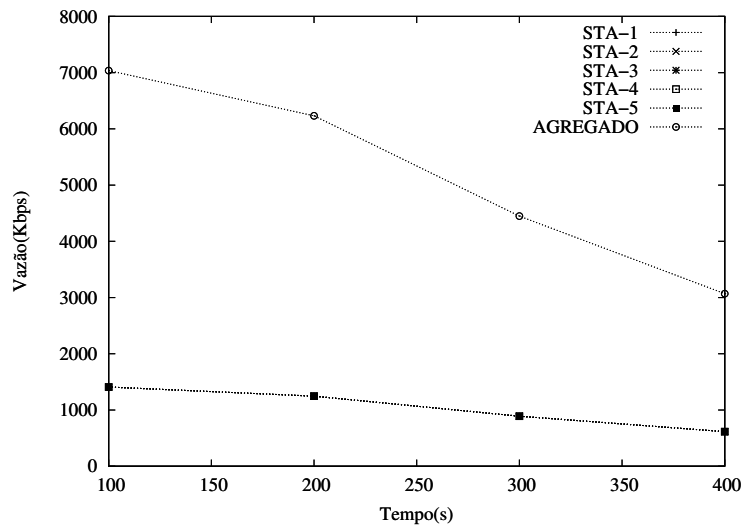


Figura 3.7: Todas as STAs a 30m do AP (*downlink*)

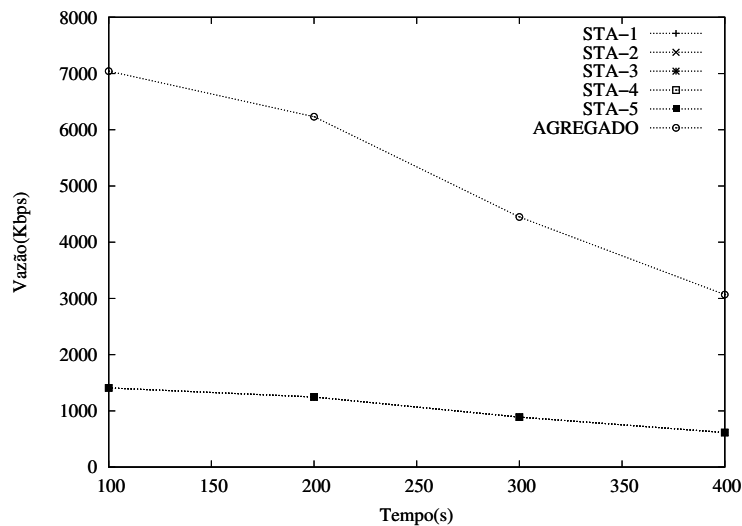


Figura 3.8: STA de taxa variável a 150m do AP (*downlink*)

mente com um ACK para as STAs mais próximas. Conforme figura 3.10, este evento, além de aumentar a vazão individual das STAs que estão menos distantes do AP, também aumenta a vazão agregada da rede.

Comparando-se a figuras 3.9 com as figuras 3.7 ou 3.8, nota-se que para tráfego em *uplink* existem menores valores de vazão agregada para os quatro pontos traçados nas curvas. Isto deve-se ao fato de haver perda na vazão devido a existência de colisões no receptor (AP).

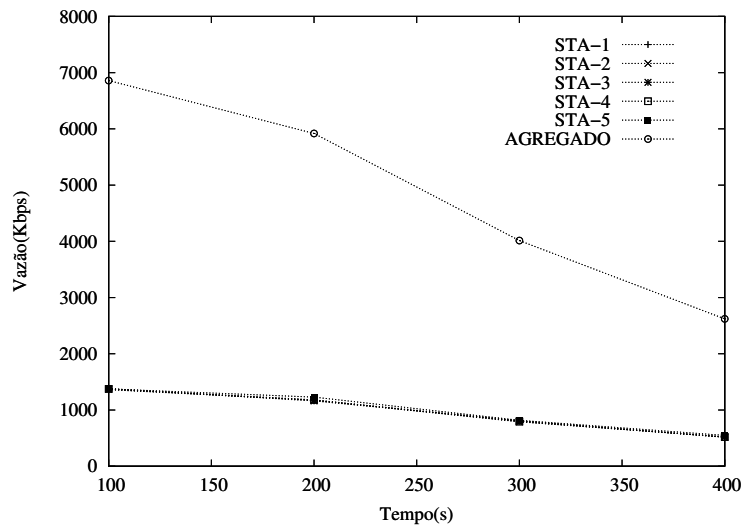


Figura 3.9: Todas as STAs a 30m do AP (*uplink*)

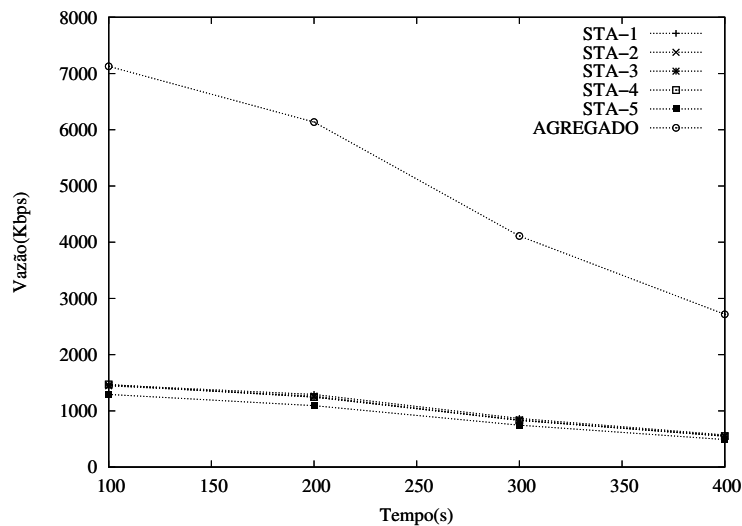


Figura 3.10: STA de taxa variável a 150m do AP (*uplink*)

Comparando-se os resultados obtidos nas figuras 3.11 e 3.12 percebe-se que há um decréscimo mais rápido da vazão média (curvar pontilhadas) das STAs ao fixar-se em um (01) a quantidade de STAs transmitindo a 11Mbps e aumentar-se a quantidade de STAs transmitindo com taxas menores. Isto se deve ao fato de que a degradação de performance torna-se mais acentuada com o aumento da quantidade de STAs de menor taxa e, de forma contrária, é amortizada na condição onde existem maior quantidade de STAs de melhor desempenho.

Percebe-se na figura 3.11 que a vazão agregada da rede diminui ao aumentar-se a quantidade de STAs de menor taxa conforme previsto e explicitado na equação 3.5. Ao fixar-se a quantidade de STAs de menor taxa (5.5Mbps e 2Mbps) e aumentar-se a quantidade de STAs transmitindo a 11Mbps (figura 3.12), tem-se que a vazão agregada (curvas cheias) sofre menor influência (diminuição de desempenho) da única STA de menor taxa existente na rede.

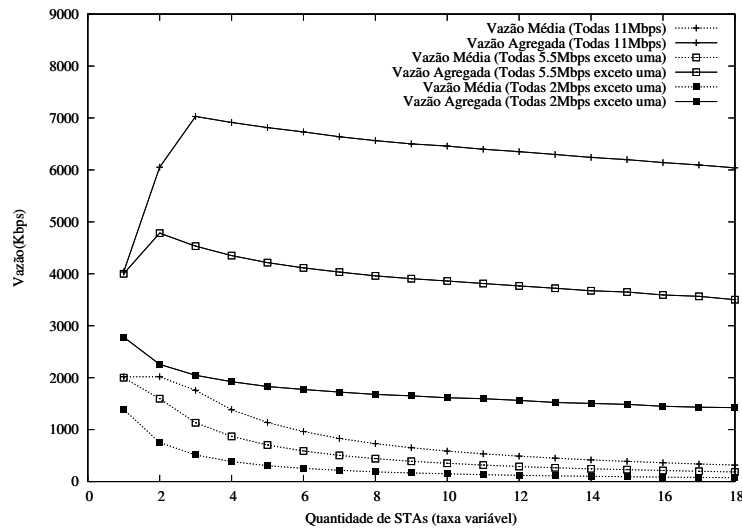


Figura 3.11: Uma STA a 11Mbps - De uma (01) a dezoito (18) STAs de taxa variável (*uplink*)

Nas figuras 3.11 e 3.12 percebe-se que a vazão agregada da rede possui valor máximo (acima de 7Mbps) quando existem quatro (04) STAs transmitindo a 11Mbps (primeira curva cheia de cima para baixo). A partir deste ponto existe um decréscimo da vazão agregada a medida que aumenta-se a quantidade de STAs, mesmo quando todas possuem taxa de 11Mbps. Isto acontece pois, para ambas figuras, o tráfego foi gerado em *uplink* e assim, com o aumento da quantidade de STAs, aumenta-se também a quantidade de colisões e conseqüentemente reduz-se a vazão da rede.

Na figura 3.13 observa-se a diminuição gradativa da vazão agregada da rede, a medida que aumenta-se a quantidade de STAs de menor taxa (segunda e terceira curvas cheias de cima para baixo). Tal decréscimo de vazão é menos acentuado que o observado na figura 3.11, uma vez que para tráfego em *downlink* não existe diminuição de desempenho devido a colisões de pacotes. Visualiza-se ainda que o

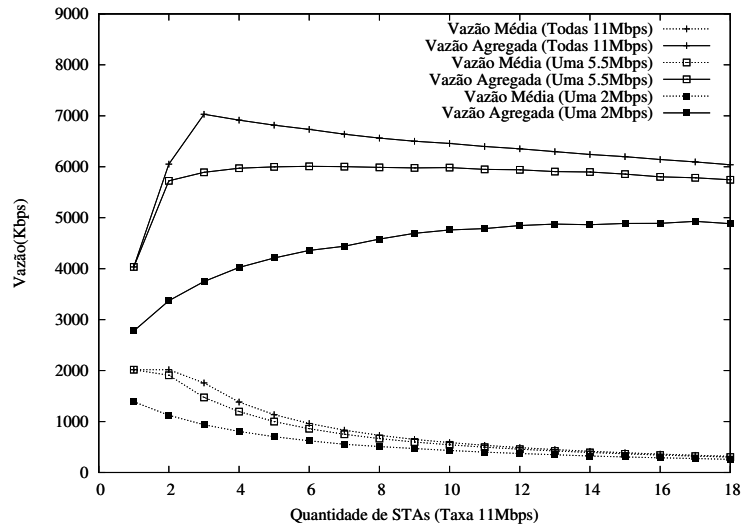


Figura 3.12: Uma STA de taxa variável - De uma (01) a dezoito (18) STAs de taxa 11Mbps (*uplink*)

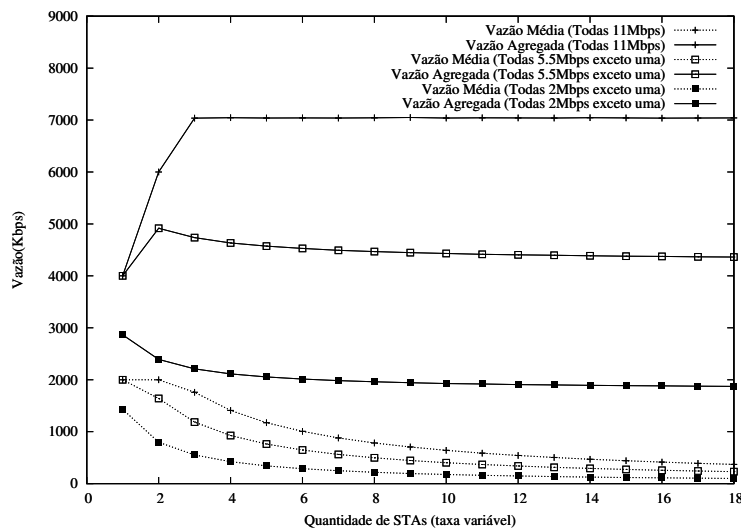


Figura 3.13: Uma STA a 11Mbps - De uma (01) a dezoito (18) STAs de taxa variável (*downlink*)

aumento da quantidade de STAs de menor taxa faz com que a vazão agregada vá em direção aos valores máximos de vazão de uma STA de taxa  $t$  conforme tabela 3.1, e conforme apresentado na equação 3.5.

Visualiza-se na figura 3.14 os efeitos do aumento da quantidade de STAs de maior taxa, mantendo-se fixo em um (01) a quantidade de STAs de menor taxa com

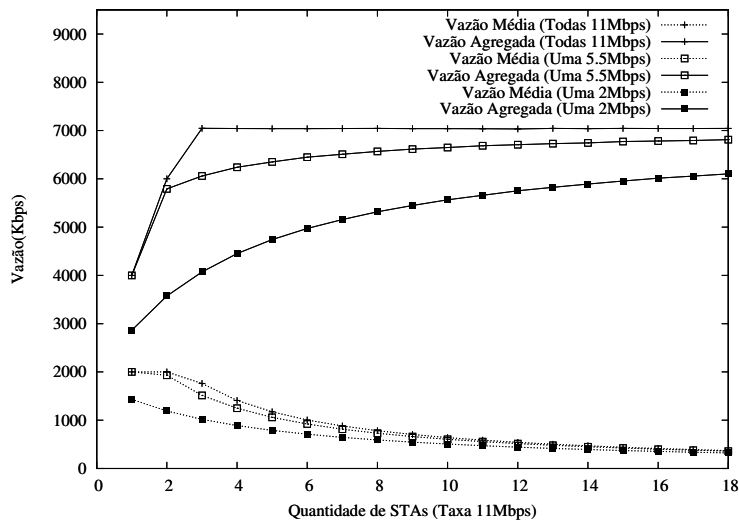


Figura 3.14: Uma STA de taxa variável - De uma (01) a dezoito (18) STAs de taxa 11Mbps (*downlink*)

tráfego gerado em *downlink*. Nesta condição, nota-se que a medida que eleva-se a quantidade de STAs de maior taxa (11Mbps) eleva-se também a vazão agregada da rede, que tenderá para o máximo valor de vazão das STAs transmitindo a 11Mbps, conforme tabela 3.1.

### 3.4.2 Conclusões do Capítulo

De acordo com os resultados obtidos neste capítulo, comprova-se os efeitos da degradação de performance de uma rede 802.11, na presença de STAs transmitindo com taxa reduzida. Constatou-se que tais efeitos tendem a se tornar mais evidente a medida que aumenta-se a quantidade de STAs de menor performance, e tendem a ter menor impacto caso a quantidade de STAs de maior taxa seja superior as de menor desempenho. Verificou-se ainda os impactos da variação da distancia e sentido de tráfego (*downlink* ou *uplink*) das STAs para o AP, visualizando-se a “anomalia” e suas particularidades para estas condições.



# Capítulo 4

## Mecanismo de Controle de Prioridade

Neste capítulo descrevem-se os critérios (seção 4.1) e mecanismo de controle de prioridade (seção 4.2) propostos para a diminuição dos efeitos da anomalia de desempenho, além do índice de justiça (seção 4.3) utilizado para verificar a eficiência do mecanismo proposto.

A determinação de justiça no compartilhamento de banda foi tratada em duas partes distintas. Primeiramente, definiu-se critérios de priorização para as STAs transmitindo com diferentes taxas, com o objetivo de fazer um melhor aproveitamento da banda disponível, e os critérios estabelecidos foram então utilizados no desenvolvimento de um mecanismo de controle de prioridade para redes IEEE 802.11b infra-estruturadas e residente no AP. Em segundo lugar, foi escolhido uma fórmula de índice de justiça [3] capaz de expressar em valor quantitativo quão justo é o mecanismo de acordo com os critérios estabelecidos.

O mecanismo desenvolvido tem o objetivo de manter a complexidade do controle de prioridade no AP e, para isso, coleta informações de carga agregada das quatro (04) TCs existentes (uma para cada taxa do 802.11b) para determinar e emitir novos valores de parâmetros de priorização com base nos valores medidos.

Foi assumido que as STAs presentes na rede são compatíveis com a extensão

IEEE 802.11e e, desta maneira, são capazes de interpretar as informações contidas no conjunto de parâmetros de QoS emitido pelo AP no método de acesso com contenção chamado de EDCF. Foi também suposta a existência do protocolo de sinalização do HCF, através do qual os novos valores de parâmetros de QoS são emitidos do AP para as STAs.

## 4.1 Critérios de Priorização

Pode-se considerar de forma análoga, e simplista, a transmissão em uma rede 802.11 ao revezamento de uma modalidade desportiva. As STAs e suas taxas seriam os corredores com seus tempos individuais; o canal de transmissão seria a pista de corrida; e os critérios de priorização seriam comparados ao técnico da equipe, desejando ter um bom aproveitamento de seu time nas competições (vazão total da rede). Nessa situação, o treinador escala seu grupo de atletas para a disputa, baseado nos melhores tempos obtidos por cada um dos seus corredores durante os treinos (maior vazão conseguida por uma STA de taxa  $t$ , conforme tabela 3.1), de maneira a utilizar com maior frequência os corredores mais velozes sem, contudo, excluir seus atletas de menor desempenho, visto que não seria justo tirar-lhes a oportunidade de melhorar seus aproveitamentos.

Assim, tomou-se o exemplo de dois corredores: um mais rápido, que é capaz de percorrer um trajeto AB em 1 hora (ex: STA de taxa 11Mbps) e um mais lento, que percorre o mesmo trajeto em 11 horas (ex: STA de taxa 1Mbps). Se ambos param por (02) duas horas para descanso e troca de equipamentos (*overhead* de protocolo), duas abordagens podem ser tomadas para determinar o quanto o corredor mais veloz é mais rápido que o outro. Se as normas da corrida estabelecerem que devem ser contabilizados os tempos de descanso, o primeiro corredor será  $(11+2)/(1+2)$  vezes mais rápido que o segundo, caso contrário, o mais veloz terá performance  $(11/1)$  vezes superior que o segundo.

De volta ao cenário das redes sem fio e conforme já mencionado, considera-se injusto que as STAs de menor taxa ocupem demasiadamente o canal e atrapalhem o

desempenho de todas as outras. Desta maneira, estabeleu-se critérios de priorização que tem como objetivo determinar maior probabilidade de acesso ao meio para as STAs mais rápidas, de maneira a oferecer-lhes vazões proporcionais aos tempos que elas gastam com suas transmissões e, ainda, sem que se exclua as STAs de menor performance da disputa.

De acordo com as observações anteriores determinou-se e avaliou-se dois critérios distintos para a divisão da banda disponível entre as STAs de maior e menor taxa. O primeiro critério considera o *overhead* de protocolo ao determinar o quanto uma STA de melhor performance é mais rápida que uma mais lenta e, portanto, o quanto esta STA terá vazão superior que a de menor taxa durante a transmissão na rede; o segundo critério não leva isso em consideração.

Assim, para o primeiro critério, utilizou-se a equação 3.2 para estabelecer que qualquer STA de maior taxa tenha vazão  $\alpha$  vezes superior a uma outra STA de menor taxa, sendo  $\alpha$  dado por:

$$\alpha = \frac{t_{tr}^{taxa_j}}{t_{tr}^{taxa_i}}, \text{ tal que } j > i \quad (4.1)$$

Na relação anterior,  $t_{tr}^{taxa_j}$  e  $t_{tr}^{taxa_i}$  são, respectivamente, os tempos gastos (incluindo *overhead* de protocolo) por uma STA mais lenta e uma mais rápida para transmitir seus pacotes. É importante ressaltar que quanto menores forem os índices  $i$  e  $j$ , maior será a taxa das STAs.

O segundo critério utiliza a equação 3.4 para determinar que a relação entre as vazões de uma STA de maior taxa e outra de menor performance tenha valor  $\beta$ , que é dado por:

$$\beta = \frac{t_{dados}^{taxa_j}}{t_{dados}^{taxa_i}} \text{ tal que } j > i \quad (4.2)$$

As variáveis  $t_{dados}^{taxa_j}$  e  $t_{dados}^{taxa_i}$  são, respectivamente, os tempos gastos para transmissão somente dos pacotes de dados e sem o *overhead* de protocolo, conforme representado na equação 3.3. Ambos critérios foram utilizados para determinar o

quanto uma STA, individualmente, deve ter vazão superior a qualquer outra quando a quantidade de STAs da categoria de maior prioridade ( $n_i$ ) for superior a quantidade de STAs de menor prioridade ( $n_j$ ). Esta abordagem foi necessária uma vez que o emprego das relações anteriores na condição contrária ( $n_i \leq n_j$ ) faria com que houvesse um decréscimo gradativo da vazão agregada da rede ao elevar-se a quantidade de STAs de menor taxa.

Esta diminuição de desempenho pode ser percebida, ao utilizar EDCF, a partir da figura 4.1, onde foi considerado o exemplo de uma STA de maior vazão (AIFS igual a 2) transmitindo com um número cada vez maior de STAs de menor vazão (AIFS igual a 6). Para ambas STAs de menor e maior vazão utilizou-se o valor 31 para  $CW_{min}[TC_i]$  ( $i$  igual a 0 e 1). Nesta situação, a vazão agregada da rede (curva cheia) decresce tendendo para o valor de vazão agregada das STAs de menor performance. O número cada vez maior de STAs de menor taxa competindo com a STA mais rápida faz com que haja um decréscimo na vazão da rede, devido ao maior tempo que as STAs mais lentas ocupam o meio ao capturar o canal e, além disso, devido ao maior tempo que é gasto na espera do meio livre quando ocorrem colisões envolvendo pacotes das STAs mais lentas.

Desta maneira, para  $n_i \leq n_j$ , utilizou-se as mesmas relações comentadas anteriormente (equações 4.1 e 4.2) para determinar o quanto a vazão agregada das STAs mais rápidas deve ser maior que as de menor taxa.

## 4.2 Algoritmos Utilizados

O mecanismo de controle de prioridade está localizado no AP e mede periodicamente a carga agregada destinada (*downlink*) ou proveniente (*uplink*) das STAs que podem estar transmitindo com taxas distintas (ex: 11Mbps e 5.5Mbps). Conforme figura 4.2, o AP associa uma TC do EDCF a cada uma das quatro possíveis taxas de transmissão do 802.11b, emitindo para as STAs os novos valores de  $AIFS[TC_j]$ , de acordo com a carga medida das TCs (passos A e C). As STAs, por sua vez, utilizam a TC relacionada a sua taxa de transmissão de dados para enviar seus pacotes de

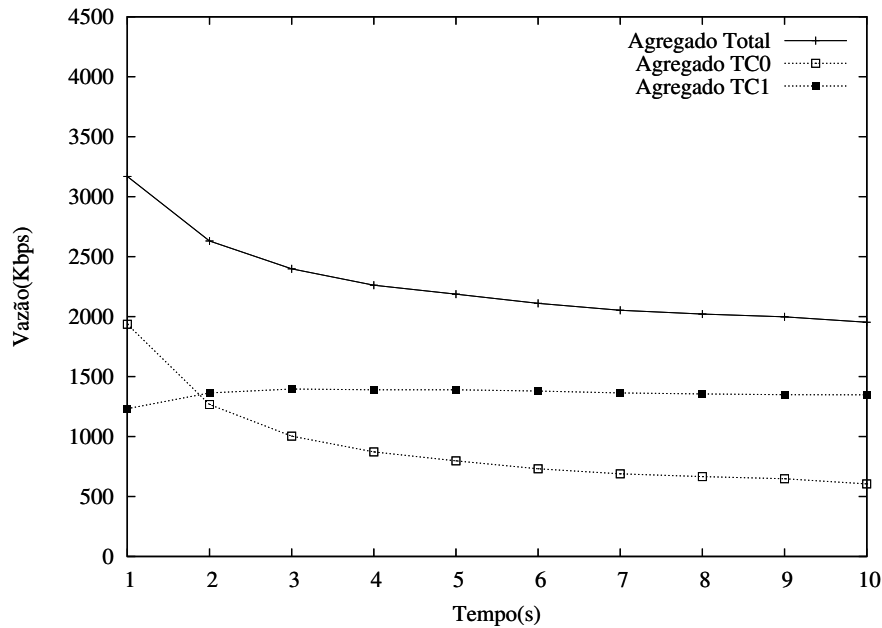


Figura 4.1: Vazão agregada da rede e vazão das TCs existentes para um número crescente de STAs de menor vazão (*uplink*)

dados (passo D). Para tráfego em *downlink*, o AP encaminha os pacotes de dados para as STAs utilizando a TC correspondente à taxa de transmissão de dados da própria STA de destino (ex: taxa 11Mbps- $TC_0$ ). Isto é possível uma vez que as STAs informam suas taxas para o AP em seus pacotes de ACK e ele armazena esta informação em um vetor de estados.

O parâmetro  $CW_{min}[TC]$  não foi utilizado no mecanismo com fins de priorização e sim com a intenção de reduzir a probabilidade de colisões (figura 4.2 passo B). O mecanismo considera apenas a existência de tráfego de melhor esforço, já que a pesquisa tem como objetivo diminuir os efeitos da anomalia, sem prever a priorização para classes de tráfegos distintas (ex: voz e vídeo, por exemplo), cada qual com STAs transmitindo com diferentes taxas.

Conforme figura 4.3, os níveis de priorização das categorias são determinados pelo módulo ajustarPrioridade. Este procedimento recebe como parâmetros ( $TC_i$  e  $TC_j$ ) os valores de índices de duas categorias (ex: 0 e 1), para as quais realizará a diferença de priorização. O procedimento, inicialmente, calcula o valor de duas

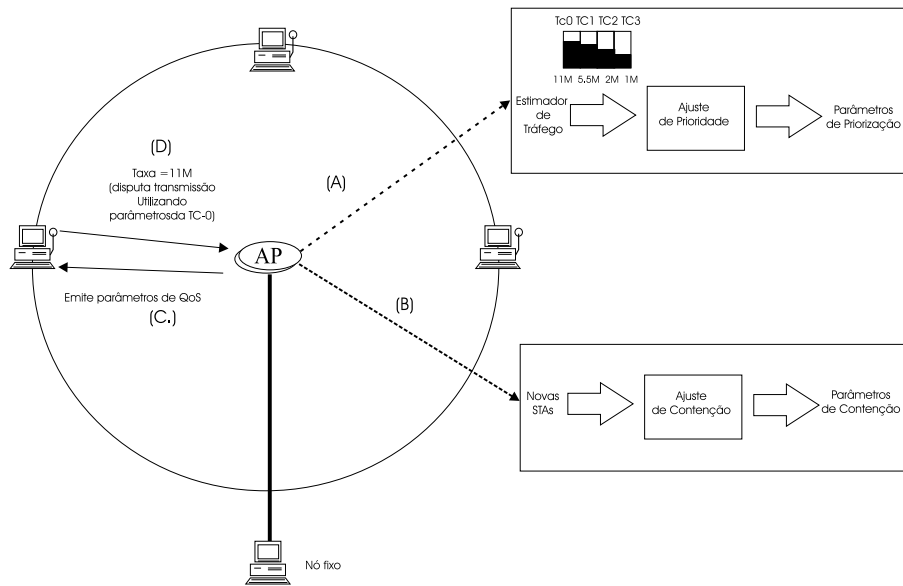


Figura 4.2: Mecanismo de Controle de prioridade localizado no AP

razões, armazenando seus valores em variáveis para, então, fazer uma proporção entre elas. A primeira razão, (variável  $rTempo$  - linhas 02 e 05) indica o quanto uma STA mais rápida é mais veloz que uma de menor prioridade e é dada pela expressão 4.1 ou 4.2, de acordo com o critério de priorização que está sendo avaliado. A segunda variável ( $rVazão$  - linhas 07 e 09) armazena a relação entre as vazões médias medidas das STAs da categoria  $TC_i$  e  $TC_j$ , caso a quantidade de STAs de maior prioridade ( $NSTAs[TC_i]$ ) seja superior a quantidade de STAs da categoria inferior ( $NSTAs[TC_j]$ ). Na condição contrária ( $NSTAs[TC_i] \leq NSTAs[TC_j]$  - linha 08), armazena-se na variável  $rVazao$  a relação entre a vazão agregada das categorias  $TC_i$  e  $TC_j$ . Após a determinação das variáveis comentadas ( $rVazao$  e  $rTempo$ ) e dependendo de seus valores, diminui-se (linha 12) ou eleva-se (linha 14) a prioridade da categoria  $TC_j$ . As funções  $permitirReducao(TC_j)$  e  $necessitaElevar(TC_j)$  atuam verificando se o tráfego das STAs de menor prioridade alcançou um valor considerado mínimo no mecanismo (variável  $vMinimo$ ), ou se as STAs de maior prioridade alcançaram a maior vazão possível gerada em suas fontes CBR. Nestas situações limites, estes procedimentos impedem a redução de tráfego ( $permitirReducao$ -linhas 02 e 04) ou forçam o aumento da vazão das STAs de menor prioridade (módulo  $necessitaElevar$ -linha 02). A redução ou elevação de prioridade são realizadas, res-

pectivamente, com a soma ou subtração de um *slottime* da variável  $AIFS[TC_j]$ , tal como apresentado na expressão 4.3; verifica-se ainda, se esta variável não ultrapassou o valor mínimo permitido no protocolo 802.11 (AIFS igual a 2).

$$AIFS[TC_j] = AIFS[TC_j] \pm 1 \quad (4.3)$$

```

ajustarPrioridade(TC_i, TC_j){
    /*n igual a 4 (uma para cada taxa do 802.11.b)*/
01: Se criterio == 1
02:   rTempo=T_tr[TC_j]/T_tr[TC_i];          /*Critério 1- relação 4.1*/
03: Senão
04:   rTempo=T_dados[TC_j]/T_dados[TC_i];    /*Critério 2- relação 4.2*/
05:
06: Se (NSTAs[TC_i] > NSTAs[TC_j]) || tráfegoDownlink /*Observações dos gráficos 4.1 e 4.2*/
07:   rVazão=(aGreg[TC_i]/NSTAs[TC_i])/(aGreg[TC_j]/NSTAs[TC_j]);
08: Senão
09:   rVazão=aGreg[TC_i]/aGreg[TC_j];
10:
11: Se rVazão < rTempo AND permitirRedução(TC_j)
12:   baixarPrioridade(TC_j);
13: Se rVazão > rTempo OR necessitaElevar(TC_j)
14:   elevarPrioridade(TC_j);
15:
16: emitirParâmetrosQoS( );
}

permitirRedução (TC_j){
01: Se aGreg[TC_j]/NSTAs[TC_j] < vMínima
02:   return 0;
03: Senão Se aGreg[TC_j] == taxaFonte[TC_j]
04:   return 0;
05:
06: return 1;
}

necessitaElevar(TC_j){
01: Se aGreg[TC_j]/NSTAs[TC_j] < vMínima
02:   return 1;
03:
04: return 0;
}

```

Figura 4.3: Modulos *ajustarPrioridade*, *permitirReducao* e *necessitaElevar*

O ajuste de contenção (mostrado na figura 4.4) é realizado através do procedimento  $ajustarCWmin(TC_i)$ . A função recebe como parâmetro o índice da categoria que admitiu novas fontes, e nela é verificado se o produto de uma variável  $K$  (utilizado valor 2) pela quantidade total de STAs presentes na rede é maior (linha 02) ou menor (linha 5) que o valor de  $cwMinAtual TCs$  existentes. Caso o valor comparado seja maior que a variável  $cwMinAtual$  mais um (01), eleva-se a janela de contenção mínima atual conforme linha 03; caso contrário (linha 05), reduz-se o

valor da variável *cwMinAtual* (linha 06). Os ajustes da variável *cwMinAtual* comentados têm como objetivo deixar a probabilidade de escolha de um *slot* próximo a  $K/totalSTAs$ . Para o caso de aumento ou diminuição da janela de contenção mínima, verifica-se se o novo valor ajustado (variável *cwMinAtual*) não ultrapassou os limites mínimo (linha 08) ou (linha 10) máximo definidos no mecanismo. Após definição do novo valor de *cwMinAtual*, atribui-se o valor determinado para as variáveis correspondentes a janela de contenção mínima de cada TC existente (linha 14).

Em ambos os procedimentos, *ajustarPrioridade(TC<sub>j</sub>)* e *ajustarCWmin(TC<sub>i</sub>)*, os novos valores de *AIFS[TC<sub>j</sub>]* e *CWmin[TC<sub>i</sub>]* são emitidos para as STAs através do procedimento *emitirParametrosQoS()*.

```

ajustarCWmin(TC_i){
01: cwMinAtual = cwMin(TC_i);
02:   Se (K*totalSTAs) > (cwMinAtual+1)
03:     cwMinAtual=cwMinAtual*2+1;
04:   Senão
05:     Se (K*totalSTAs <= (cwMinAtual+1)*1/2)
06:       cwMinAtual=(cwMinAtual-1)/2;
07:
08:   Se cwMinAtual < 7
09:     cwMinAtual = 7;
10:   Se cwMinAtual > 1023
11:     cwMinAtual = 1023;
12:
13:   Para TC_j de 0 a 3           //04 Tcs existentes
14:     cwMin[TC_j]=cwMinAtual;
15:
16:   emitirParâmetrosQoS( );
}

```

Figura 4.4: Modulo de Ajuste de Contenção

O algoritmo de controle de prioridade, mostrado na figura 4.3, foi generalizado para o caso de  $n$  ( $n$  de 0 a 3) categorias de tráfego, e é apresentado na figura 4.5.

### 4.2.1 Utilização e efeitos dos Parâmetros CWmin e AIFS

Conforme observado em [26], ambos os parâmetros *CWmin* e *AIFS* controlam o tempo de espera de uma STA para acessar o meio, porém, existem diferenças a se-



```

controlarPrioridade(n){
    /*n igual a 4 (uma para cada taxa do 802.11.b)*/
01: Para cada categoria i, i de 0 até (n-2)
02:   Se existeCategoria(i){ /*Verifica a existência de STAs das categorias*/
03:     Para j de (i+1) até (n-1){
04:       Se existeCategoria(j){
05:         ajustarPrioridade(i,j);
06:         break; /*Sai do laço-Para*/
07:       }
08:     }
09:   }
10: }

```

Figura 4.5: Generalização do mecanismo de controle de prioridade para  $n$  categorias de tráfego

rem consideradas entre os dois parâmetros. O *AIFS* controla a parte determinística de espera e com ele é possível acrescentar (ou decrementar) um *slot* de cada vez, tornando o controle de prioridade mais preciso. O parâmetro  $CW_{min}$ , além de controlar a parte estatística da espera, é menos preciso, uma vez que cresce assumindo valores que são potências de dois (02) subtraídos de uma (01) unidade.

Devido às características citadas e conforme já comentado anteriormente, utilizou-se os parâmetros *AIFS* e  $CW_{min}$ , respectivamente, para determinar a priorização de acesso ao meio para as categorias de tráfego (algoritmo da figura 4.3), e para ajustar a contenção com o objetivo de diminuir a probabilidade de colisões de pacotes na rede (algoritmo da figura 4.4).

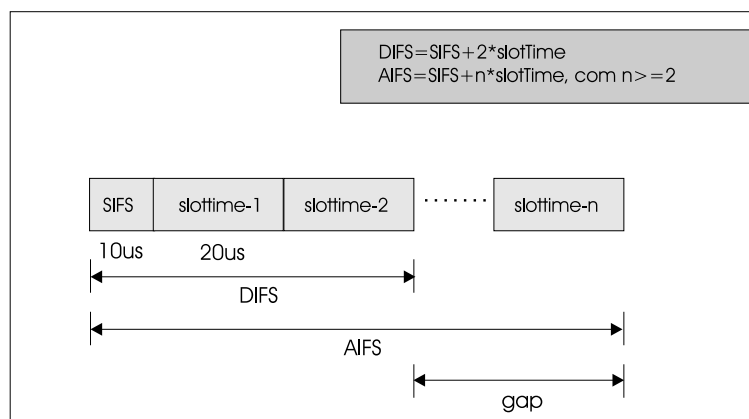


Figura 4.6: Utilização do parâmetro AIFS no critério de priorização

Uma segunda particularidade no uso do parâmetro *AIFS* para o mecanismo proposto está relacionada ao critério de priorização expresso na relação 4.1. Neste critério considera-se o valor de *DIFS* para determinar o quanto uma STA de taxa superior é mais veloz que uma de taxa reduzida no 802.11 puro (sem EDCF). Sendo assim, utiliza-se o *gap* entre *DIFS* e *AIFS* representado na figura 4.6 para propiciar a diferenciação entre as categorias de tráfego, e não para determinar qual deverá ser a relação entre os tempos de transmissão de STAs de maior e menor taxa, conforme expresso na equação 4.1.

De maneira contrária, e uma vez que o parâmetro *CWmin* não foi utilizado com fins de priorização, considerou-se os novos valores de *CWmin* calculados através do módulo de ajuste de contenção (figura 4.4) para determinar o quanto uma STA de categoria  $TC_i$  é mais veloz que uma de categoria  $TC_j$ , conforme equação 4.1.

### 4.3 Índice de Justiça

Neste trabalho, assim como em [27], [28], [29] e [30], avalia-se o mecanismo proposto utilizando a fórmula de índice de justiça (*fairness index*-FI) proposta por [16] e que é largamente empregada na literatura para determinar métricas quantitativas de justiça no compartilhamento de recursos.

Desta maneira, os dados de vazão obtidos nos experimentos foram aplicadas na fórmula de índice de justiça, (*fairness index*-FI) apresentada na equação a seguir:

$$fairness\ index = \frac{(\sum_{i=0}^{N-1} x_i)^2}{N * \sum_{i=0}^{N-1} (x_i)^2} \quad (4.4)$$

Aqui, assim como em [15] e [31], e de maneira diferente de [32] e [33], assume-se abordagem onde não são consideradas as STAs individualmente, para determinar os valores de índice de justiça, e sim considera-se a existência das vazões média e/ou agregada das categorias de tráfego (TCs) existentes. Desta maneira, na equação acima, N é a quantidade de TCs envolvidas e  $x_i$ , conforme critérios estabelecidos na seção 4.1 que são relativos a quantidade de STAs de maior e menor taxa, é dado

por:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{se } \frac{Agreg_i}{n_i} = taxaFonte_i \\ T_i/O_i, & \text{se } n_i > n_j \\ Agreg_i/O_i, & \text{se } n_i \leq n_j \end{cases}$$

Nota-se um novo critério para determinação de  $x_i$  e que aparece como primeira opção nas expressões acima. Nele atribui-se o valor um (01) à variável  $x_i$  quando a média das vazões das STAs de uma categoria é igual à taxa da fonte destas STAs, deixando claro que o mecanismo é justo, uma vez que as STAs da categoria em questão conseguem escoar toda a vazão de suas fontes.

Na equação anterior,  $taxaFonte_i$  é a taxa da fonte (ex:CBR),  $T_i$  e  $Agreg_i$  são, respectivamente, a vazão média obtida por uma STA da categoria  $i$  e a vazão agregada das STAs de tal categoria. As variáveis  $n_i$  e  $n_j$  são as quantidades de STAs existentes das categorias envolvidas e, por fim, a variável  $O_i$  representa a vazão considerada ótima para o agregado ou para a vazão média das STAs em questão (depende da quantidade de STAs presentes de cada categoria de tráfego), dada como uma fração da banda disponível (variável  $BWAgreg$ ) conforme critérios das equações 4.1 e 4.2, e tal como a seguir:

$$O_i = \begin{cases} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{1}{\frac{t_i}{t_j * n_j}} \cdot BWAgreg & \text{se } n_i > n_j \\ \sum_{j=0}^{N-1} \frac{1}{\frac{t_i}{t_j}} \cdot BWAgreg & \text{se } n_i \leq n_j \end{cases}$$

Na expressão acima,  $t_i$  é o tempo que uma STA da  $TC_i$  ocupa o canal ao transmitir um pacote de tamanho  $T$ , e  $t_j$  são os tempos de ocupação do canal para as STAs de todas as categorias existentes. De acordo com as expressões anteriores, quanto menor o valor de  $t_i$ , maior será a fatia da banda atribuída da categoria. Nos critérios estabelecidos, os valores de  $t_i$  e  $t_j$  podem ser calculados de duas maneiras distintas. Em uma primeira forma considera-se o *overhead* de protocolo para determinar o tempo de transmissão das STAs, e em uma segunda abordagem estes tempos não são considerados ao determinar o quanto uma STA de maior taxa é mais veloz que uma de taxa inferior. As variáveis  $x_i$  e  $O_i$ , da última categoria existente ( $i$  de 0

a 3), são determinadas de acordo com a quantidade de STAs da categoria anterior também existente.

### 4.3.1 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo definiu-se critérios de priorização de acesso ao canal que beneficiam as STAs de maior taxa, de maneira a compensar o longo período que as STAs de menor taxa ocupam o meio para transmitir seus pacotes. Os critérios estabelecidos utilizam a relação entre os tempos de transmissão de uma STA lenta e uma STA de maior taxa para determinar o quão rápido esta última é mais veloz que a outra e, desta maneira, determinar qual será a relação entre as vazões das STAs de maior e menor taxa. Verificou-se, através de resultados de simulação apresentados na figura 4.1, que o uso de tal proporção para um número crescente de STAs de menor desempenho pode ainda diminuir a performance da rede. Assim, sugeriu-se como critério de priorização que na existência de um número de STAs de menor taxa superior a quantidade de STAs de melhor desempenho, limite-se a vazão agregada das STAs de menor taxa a uma fatia de banda, determinando-se que a relação entre as vazões agregadas das STAs maior e menor taxa seja proporcional a relação entre os tempos de transmissão de uma STA de menor taxa e uma STA de maior taxa.

Os critérios de priorização estabelecidos foram implementados em um mecanismo de controle de prioridade (figura 4.3) que utiliza a extensão IEEE 802.11e e seu parâmetro AIFS[TC] para priorizar as STAs de acordo com suas taxas de transmissão. O parâmetro CWmin[TC], devido as suas características estatísticas de controle de tempo de espera de acesso ao canal, foi utilizado em um mecanismo de ajuste de contenção com (figura 4.4) o objetivo de reduzir colisões.

Foi apresentado ainda, no capítulo, um índice de justiça para avaliar o mecanismo de controle de prioridade proposto em sua tarefa de priorizar as STAs de maior taxa de acordo com os critérios estabelecidos.

# Capítulo 5

## Simulações e Resultados Obtidos

Os critérios e mecanismos propostos, e apresentados nas seções 4.1 e 4.2 do capítulo anterior, são, aqui, avaliados para verificar se cumprem os objetivos pretendidos de priorização, possibilitando para as STAs vazões proporcionais aos seus tempos de ocupação do canal.

Para tanto, utiliza-se e apresenta-se, na seção 5.1, o simulador NS-2 com as modificações necessárias para permitir a criação de cenários (seção 5.3) com sobrecarga de tráfego, uma vez que a “anomalia” de desempenho é evidenciada nesta condição. A seção 5.4 apresenta e compara os dados de vazão obtidos com e sem a utilização do mecanismo e, ainda, avalia tais dados através da fórmula de índice de justiça proposta por [16]. Por fim, a seção 5.5 traz as considerações finais do capítulo, fazendo um comparativo entre os critérios de priorização estabelecidos nas equações 4.1 e 4.2 do capítulo precedente.

### 5.1 O simulador NS (*Network Simulator*)

Nas simulações foi empregado o NS-2 (*Network Simulator*) versão 2.26 [34], que trata-se de um simulador de eventos discreto oriundo do projeto VINT (*Virtual InterNetwork Testbed*). Tal projeto é apoiado pelo DARPA (*Defense Advanced Research Projects*) e possui colaboração de centros de pesquisas e universidades, tais

como: USC/ISI (*University of Southern California/Information Sciences Institute*); Xerox PARC (*Palo Alto Research Center*); LBNL (*Lawrence Berkeley National Laboratory*); e UCB (*University of California in Berkeley*).

A escolha do NS possui motivação no fato dele possuir suporte à simulação de um grande número de tecnologias de rede com e sem fio (incluindo o 802.11), além de ser um *software* totalmente gratuito e com código fonte aberto, o que o torna um dos simuladores mais populares e largamente empregado por pesquisadores e universidades.

O código específico do 802.11 que é constante do NS, proporciona suporte somente ao método DCF e tem como origem o Projeto Monarch, desenvolvido na CMU (*Carnegie Mellon University*) e que teve a tarefa de incorporar suporte às redes sem fio e mobilidade ao simulador.

Outra característica importante do NS está relacionada ao uso de duas linguagens para programação. O C++ é utilizado como linguagem de sua estrutura base, uma vez que trata-se de uma linguagem compilada, de uso tradicional, e capaz de implementar de maneira mais robusta a manipulação de bytes e pacotes de dados. A segunda linguagem é chamada de OTCL, (*Object-Oriented Tool Command Language*) e é usada como interface de comandos e configurações devido ao fato de ser interpretada e, desta forma, simplificar o processo de ajustes e criação de cenários de simulações.

## 5.2 Preparação do ambiente de Simulação

Para possibilitar as simulações constantes deste capítulo foram implementadas modificações no NS, tal como a agregação de código que permitisse a simulação de redes infra-estruturadas. Este procedimento foi necessário, visto que o NS original possui somente protocolos de rede *Ad Hoc*. Para promover tal adaptação foi necessário migrar o código do agente NOAH (*Non Ad Hoc Routing Agent*) disponível em [25] da versão 2.1b7 para a versão 2.26 do NS.

Foi também anexado ao código do NS-2.26 a implementação das funcionalidades do EDCF, citadas em [26] para a versão 2.1b8a do simulador. Tal código anexo torna possível a diferenciação para categorias de tráfego (TCs), uma vez que implementa o conceito de múltiplas filas do EDCF, cada qual com instâncias de *backoff* distintas, e que utilizam diferentes valores de parâmetros de QoS (AIFS, CWmin e CWmax).

Para possibilitar a simetria entre tráfegos (*downlink* e *uplink*), foram adicionados dois (02) novos campos ao pacote de ACK (figura 5.1). Nestes campos, as STAs informam suas respectivas taxas de transmissão e endereços MAC (passo A), que são armazenados pelo AP em um vetor de estados (figura 4.2 passo B) e utilizados pelo AP para envio dos dados na mesma taxa de cada STA presente na rede (passo C).

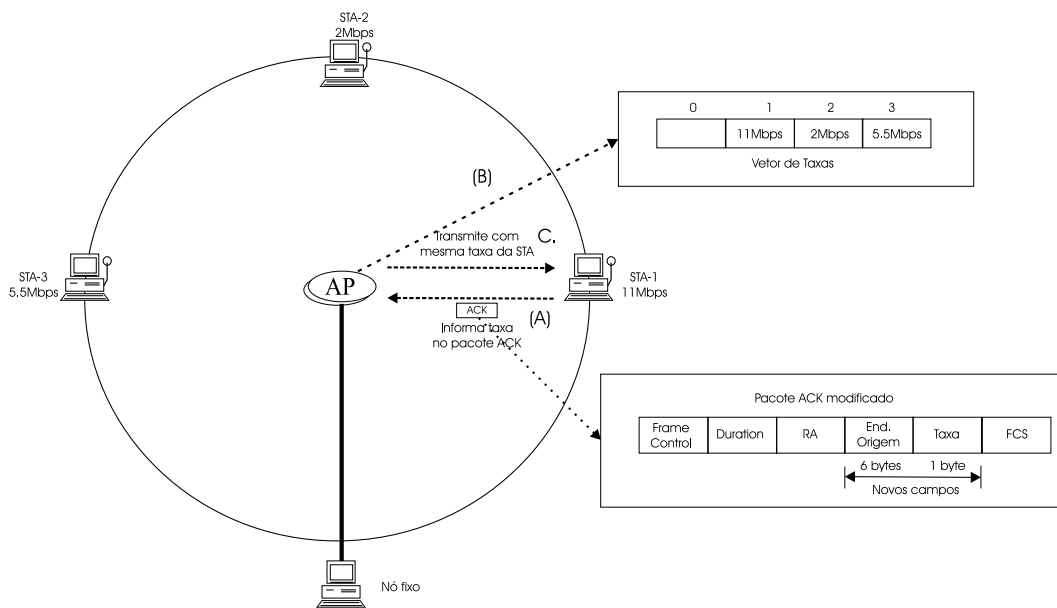


Figura 5.1: Pacote de ACK modificado para possibilitar taxa simétrica

A medição de tráfego utilizada pelo mecanismo de controle de prioridade, para estimar a vazão das TCs existentes, teve implementação na camada MAC 802.11e, tomando como base o campo *prio* do protocolo IP. Desta maneira, os pacotes de dados são originados nas camadas superiores com uma prioridade específica (de 0 a 3) e são contabilizados no AP que, de acordo com as medições realizadas, emite diferentes parâmetros de QoS para as TCs. Assumiu-se, assim, que a taxa de trans-

missão utilizada pela camada MAC pode ser percebida pelas camadas acima que, por sua vez, selecionam uma prioridade específica para a transmissão dos pacotes.

Os mecanismos de ajuste de prioridade e ajuste de contenção, mostrados nas figuras 4.3 e 4.4 ( seção 4.2), foram totalmente implementados em *scripts* OTcl ([35], [36]) gerando arquivo que, na versão capaz de tratar N categorias de tráfego, possui cerca de 1800 linhas de código.

### 5.3 Cenários de Simulação e modelos de tráfego

O cenário de avaliação do mecanismo consiste de um AP localizado no centro de uma circunferência de 250m de raio, e com as STAs (de maior ou menor taxa) aleatoriamente distribuídas dentro deste espaço conforme figura 5.2. O AP está conectado a um nó fixo por um enlace de 100Mbps e 2ms de retardo, de maneira que o *link* com a rede fixa seja capaz de escoar o tráfego destinado ou proveniente das STAs, sem que se torne o gargalo na comunicação. O cenário descrito tem como objetivo representar a situação de um *hot spot* 802.11b *outdoor*, com presença de STAs acessando uma rede fixa como a Internet e, devido ao efeito de *fallback* ou existência de obstáculos, as STAs de maior taxa encontram-se distribuídas de maneira aleatória na BSSS.

As simulações não utilizam as mensagens de RTS/CTS devido ao *overhead* introduzido por esta extensão do protocolo 802.11, o que faz com que haja uma queda no desempenho de vazão das STAs.

Para a geração de tráfego foram empregadas fontes CBR de 2Mbps, com pacotes 2312 bytes (tamanho máximo dos dados em um quadro MAC) e protocolo de nível 4 UDP, tal como na caracterização da “anomalia”. Este tipo tráfego, por sua natureza constante, facilita a análise dos resultados.



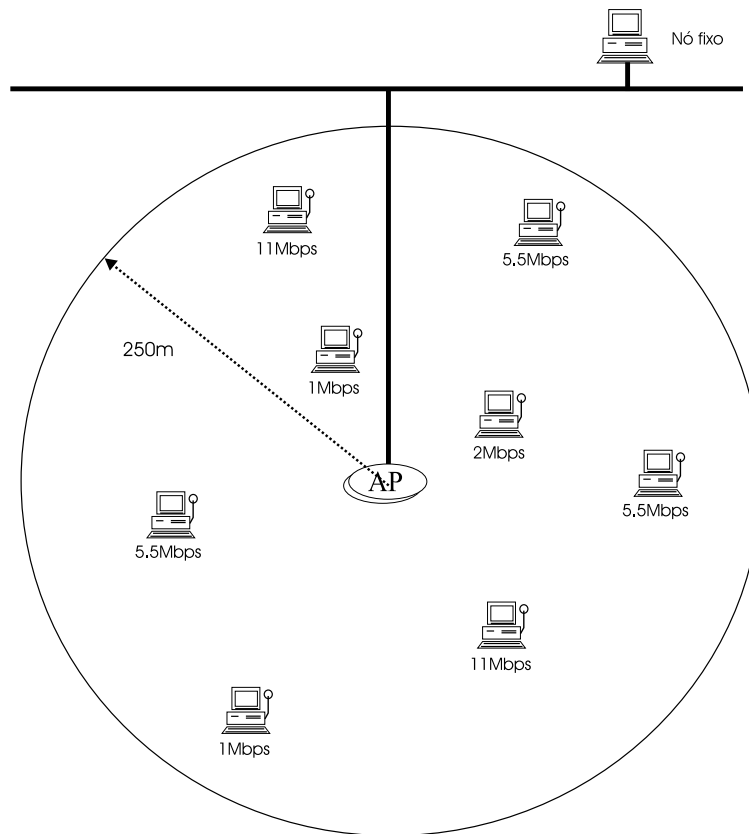


Figura 5.2: Cenário utilizado na avaliação do mecanismo de controle de Prioridade (ex: 4 STAs de diferentes taxas)

## 5.4 Resultados Obtidos

As características acima foram empregadas em duas configurações diferentes do mesmo cenário, sendo que na primeira coexistiram STAs transmitindo em duas taxas distintas e, na segunda havia a presença de STAs transmitindo nas quatro possíveis taxas do 802.11b. Em ambas configurações foram realizados experimentos com e sem a utilização do mecanismo, sendo que no seu uso todas as TCs iniciaram com valor de AIFS igual a 2 e CWmin igual a 7, os quais foram alterados no decorrer dos testes. Em simulações sem a utilização do mecanismo, empregou-se o 802.11 puro, ou seja, sem a existência das múltiplas filas do EDCF e com valores de DIFS e CWmin iniciais, tal como especificados na norma do protocolo [17].

Na primeira configuração foram realizadas simulações com duração de 400s, divididas em quatro intervalos iguais de 100s, e com entrada de STAs separadas de

2s dentro de cada fase. Na primeira etapa foram admitidas quatro (04) STAs da categoria  $TC_0$  (STAs de maior taxa) e uma (01) STA da categoria  $TC_1$ . Para cada uma das três fases seguintes foram admitidas duas (02) STAs da categoria  $TC_1$ , perfazendo um total de 1, 3, 5 e 7 STAs desta TC durante cada uma das fases de simulações.

Foram realizadas dez (10) simulações com e sem a utilização do mecanismo, em *uplink* ou *downlink*, e a média dos dados experimentais, quando as STAs de menor taxa transmitem a 2Mbps, são apresentados em três tabelas. As tabelas 5.1 e 5.2 mostram os resultados obtidos com a utilização do mecanismo, para tráfego *uplink* e *downlink*, empregando ambos critérios de priorização estabelecidos (seção 4.1); na tabela 5.3 são apresentados os dados resultantes de simulações sem a utilização do mecanismo, também em *uplink* e *downlink*.

Com Mecanismo (criterio-1)					
<i>Fase</i>	$BW_{11M}$	$BW_{2M}$	$BW_{Total}$	$V_{11M}$	$V_{2M}$
A1	4645.38	345.10	4990.48	1548.46	345.10
A2	2943.93	752.05	3695.98	981.31	250.68
A3	2873.51	735.14	3608.65	957.83	147.02
A4	3147.75	772.06	3919.82	1049.25	110.29
Com Mecanismo (criterio-2)					
B1	4712.46	330.96	5043.42	1570.82	330.96
B2	3296.69	679.60	3976.29	1098.89	226.53
B3	3294.24	649.79	3944.03	1098.08	129.95
B4	3622.97	672.94	4295.91	1207.65	96.13

Tabela 5.1: Vazões média e Agregada Obtidas com a utilização do Mecanismo utilizando ambos critérios de priorização(*uplink*)

Nas três tabelas comentadas anteriormente, as colunas 2, 3 e 4 mostram as vazões agregadas das STAs que transmitem a 11Mbps e 2Mbps, e a vazão agregada da rede; nas colunas 5 e 6 são relacionadas as médias de vazões das STAs transmitindo a 11Mbps e 2Mbps.

Com Mecanismo (criterio-1)					
<i>Fase</i>	$BW_{11M}$	$BW_{2M}$	$BW_{Total}$	$V_{11M}$	$V_{2M}$
<i>A1</i>	5672.31	491.27	6163.59	1870.77	491.27
<i>A2</i>	3838.03	900.66	4738.7	1297.34	300.22
<i>A3</i>	3869.83	892.64	4762.47	1289.94	178.52
<i>A4</i>	3631.75	893.61	4525.36	1210.58	127.65
Com Mecanismo (criterio-2)					
<i>B1</i>	5714.90	481.28	6196.18	1904.96	481.28
<i>B2</i>	4253.61	797.55	5051.16	1417.87	265.85
<i>B3</i>	4435.83	752.60	5188.44	1478.61	150.52
<i>B4</i>	4166.21	752.21	4918.42	1388.73	107.45

Tabela 5.2: Vazões média e Agregada Obtidas com a utilização do Mecanismo utilizando ambos critérios de priorização (*downlink*)

Sem Mecanismo <i>uplink</i>					
<i>Fase</i>	$BW_{11M}$	$BW_{2M}$	$BW_{Total}$	$V_{11M}$	$V_{2M}$
<i>C1</i>	2758.08	960.14	3718.23	919.36	960.14
<i>C2</i>	1242.91	1252.30	2495.21	414.30	417.43
<i>C3</i>	751.04	1336.67	2087.71	250.34	267.33
<i>C4</i>	582.87	1331.74	1914.61	194.29	190.24
Sem mecanismo <i>downlink</i>					
<i>D1</i>	3034.51	1018.10	4072.62	1018.17	1018.10
<i>D2</i>	1432.23	1432.16	2864.39	477.41	477.38
<i>D3</i>	939.49	1559.05	2494.54	311.83	311.81
<i>D4</i>	694.66	1620.57	2315.23	231.55	231.51

Tabela 5.3: Vazões média e Agregada Obtidas sem a utilização do mecanismo (*uplink* e *downlink*)

Na segunda configuração do cenário de avaliação do mecanismo, simulou-se somente tráfego originado nas STAs e com destino ao AP (*uplink*) e, conforme comentado anteriormente, com a presença de STAs transmitindo nas quatro (04) taxas do 802.11b. Nesta configuração, os experimentos tiveram duração de 600s, também divididos em intervalos iguais de 100s. No primeiro intervalo é admitida uma fonte de cada TC; para o segundo, terceiro, quarto, quinto e sexto intervalos foram usadas, respectivamente, duas (02) STAs das categorias  $TC_3$ ,  $TC_2$ ,  $TC_1$ ,  $TC_0$  e  $TC_0$  novamente.

Com Mecanismo (critério-1)					
<i>Fase</i>	$BW_{11M}$	$BW_{5.5M}$	$BW_{2M}$	$BW_{1M}$	$BW_{Total}$
A1	1019.47	845.66	375.72	203.10	2443.96
A2	1345.96	910.12	374.21	205.25	2836.55
A3	1232.95	814.39	381.88	202.45	2631.69
A4	1354.23	859.91	386.91	211.00	2812.08
A5	1268.06	878.84	370.04	201.13	2718.08
A6	1739.31	722.50	316.10	178.36	2956.29
Com Mecanismo (critério-2)					
B1	1339.05	711.40	355.28	209.96	2615.71
B2	1871.90	962.14	313.55	160.31	3307.91
B3	1669.98	841.59	339.05	167.21	3017.84
B4	1765.52	911.76	332.28	170.36	3179.94
B5	1776.49	900.83	320.39	156.42	3154.14
B6	2180.14	692.37	287.39	144.95	3304.87

Tabela 5.4: Vazões Obtidas com utilização do mecanismo em cenário com transmissão simultânea em 4 taxas (*uplink*)

A média dos resultados de dez (10) simulações com utilização do mecanismo, e aplicando os critérios de priorização 1 e 2 (conforme seção 4.1), são apresentados na tabela 5.4. A tabela 5.5 relaciona os dados conseguidos sem o mecanismo de controle de prioridade. Para ambas tabelas, nas colunas de 2 a 6 são relacionadas, respectivamente, as vazões agregadas das STAs transmitindo a 11Mbps, 5.5Mbps,

2Mbps e 1Mbps e, ainda, a vazão agregada da rede.

Sem Mecanismo - <i>uplink</i>					
<i>Fase</i>	$BW_{11M}$	$BW_{5.5M}$	$BW_{2M}$	$BW_{1M}$	$BW_{Total}$
<i>C1</i>	429.57	444.75	451.74	445.80	1771.86
<i>C2</i>	195.56	193.78	194.37	652.65	1236.37
<i>C3</i>	150.85	154.51	450.87	501.60	1257.84
<i>C4</i>	129.91	356.92	411.37	454.48	1352.69
<i>C5</i>	348.92	357.75	385.12	411.96	1503.77
<i>C6</i>	535.48	333.20	354.54	387.46	1610.69

Tabela 5.5: Vazões Obtidas sem utilização do Mecanismo em cenário com transmissão simultânea em 4 taxas (*uplink*)

## 5.5 Avaliação dos Resultados

Comparando-se as linhas  $A_i$  ou  $B_i$  ( $i$  de 1 a 4) da tabela 5.1 (colunas 2 e 4) com as linhas  $C_i$  ( $i$  de 1 a 4) da tabela 5.3 percebe-se que para tráfego em *uplink*, em ambos critérios de priorização (1 ou 2) e em todas as fases de simulação, o mecanismo proporciona maiores valores de vazão agregada para as STAs de maior taxa e vazão agregada da rede, quando comparado aos dados obtidos sem a utilização do mecanismo. A mesma observação anterior também é visível para tráfego em *downlink* e podem ser percebidas através da comparação das linhas  $A_i$  ou  $B_i$  da tabela 5.2 com as linhas  $D_i$  da tabela 5.3. O mesmo comportamento no caso de STAs transmitindo em *uplink* nas quatro taxas do 802.11b é observado na tabela 5.4, onde maiores valores de vazão das STAs de maior taxa e vazão agregada da rede (colunas 2, 4 e 6) são percebidos, quando comparados aos resultados obtidos sem o mecanismo apresentados nas mesmas colunas da tabela 5.5.

Na tabela 5.1, ao comparar-se as linhas A1 a A4 (critério-1) com as linhas B1 a B4 (critério-2), nota-se que são obtidos menores valores de vazão agregada para as STAs de taxa 11Mbps (coluna 2) e menor vazão agregada da rede ao utilizar-se o primeiro critério de priorização. Isto se deve ao fato do primeiro critério considerar

os tempos de *overhead* de protocolo para determinar o quanto uma STA de maior taxa é mais veloz que uma de taxa inferior (equação 4.1).

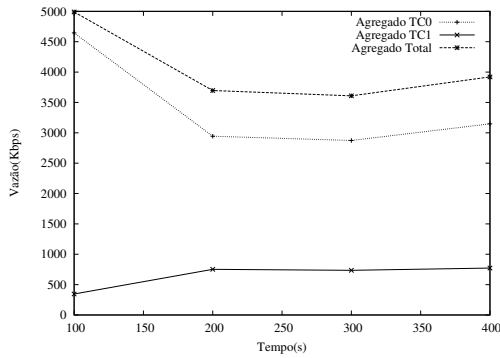
Assim, uma STA que transmite a 11Mbps é  $[t_{2M}+t_X]/[t_{11M}+t_X]$  vezes mais veloz que uma STA de taxa 2Mbps, cujo valor é menor que o considerado para o critério de priorização 2 ( $t_{2M}/t_{11M}$ ), quando assume-se que  $t_X$  como tempo de *overhead* e  $t_{11M}$  como tempo de transmissão do quadro MAC de uma STA transmitindo a 11Mbps. Estas observações são também estendidas para o caso de tráfego *downlink* e podem ser observadas na tabela 5.2, ao comparar-se as linhas  $A_i$  com  $B_i$  (i de 1 a 4).

Nos gráficos das figuras 5.3(a) e 5.3(b) são apresentados, nas curvas pontilhadas, os dados de vazão agregada das STAs transmitindo a 11Mbps e 2Mbps (tabela 5.1, colunas 2 e 3) e vazão agregada da rede (curva cheia) para todas as fases dos experimentos (A1 até A4 e B1 até B4) de ambos critérios de priorização.

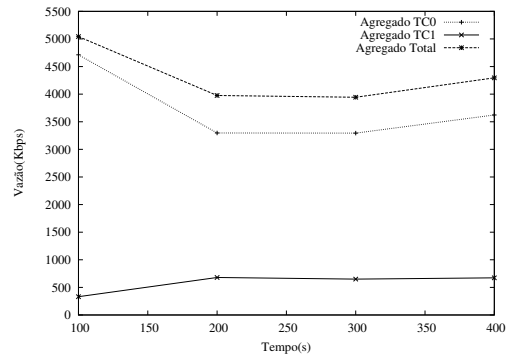
Nestas curvas, percebe-se que mesmo com a utilização do mecanismo de controle de prioridade, na transição entre 100s e 200s, há um decréscimo da vazão agregada das STAs de maior taxa e vazão agregada da rede, ao aumentar-se de um (01) para três (03) a quantidade de STAs de menor taxa. Este decréscimo deixa de ocorrer entre 200s e 300s mesmo com o aumento de três (03) para cinco (05) na quantidade de STAs de menor taxa. Isto ocorre já que considerou-se no mecanismo que para  $n_i \leq n_j$  a vazão agregada das STAs de maior taxa seria superior a vazão agregada das STAs de menor taxa, conforme critérios estabelecidos nas relações 4.1 ou 4.2.

Na última fase de simulação, compreendida entre 300s e 400s, nota-se um aumento da vazão agregada da rede apesar do aumento de cinco (05) para sete (07) na quantidade de STAs de menor taxa. Isto acontece pois, conforme o mecanismo de controle de contenção estabelecido, aumentou-se de 15 para 31 o valor de CWmin das STAs e, assim, elevou-se a vazão agregada da rede pela redução de colisões.

Os comentários do parágrafo anterior, relativos aos intervalos entre 100s e 200s, e entre 200s e 300s das figuras 5.3(a) e 5.3(b), são também válidos para tráfego em *downlink*, conforme gráficos das figuras 5.4(a) e 5.4(b) nos mesmos períodos



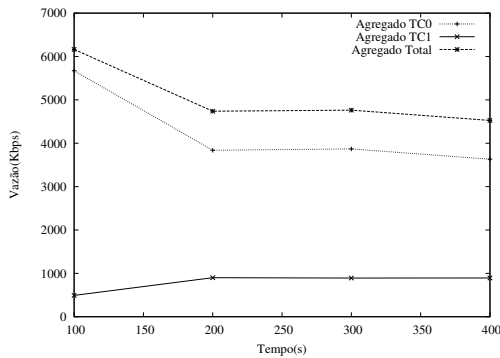
(a) Critério 1 de priorização



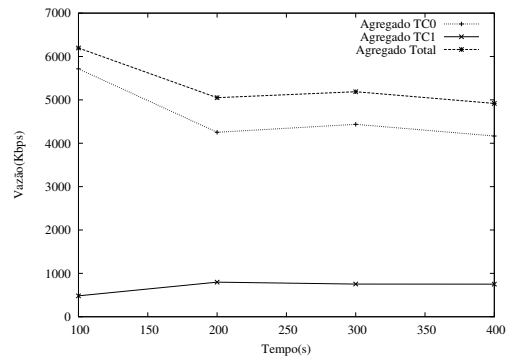
(b) Critério 2 de priorização

Figura 5.3: Vazão agregada das TCs e vazão agregada da rede obtidas com mecanismo e tráfego *uplink*

comentados. No entanto, para o intervalo entre 300s e 400s, contrariamente no tráfego em *uplink*, percebe-se uma diminuição da vazão agregada da rede em ambos os critérios de priorização, conforme figuras 5.4(a) e 5.4(b). Isto ocorre pois o AP já gerencia colisões entre as TCs existentes e o aumento de CWmin, (de 15 para 31) nesta fase, diminuiu a performance de vazão do tráfego descendente.



(a) Critério 1 de priorização



(b) Critério 2 de priorização

Figura 5.4: Vazão agregada das TCs e vazão agregada da rede obtidas com mecanismo e tráfego *uplink*

Comparando-se as fases  $A_i$  e  $B_i$  ( $i$  de 1 a 4) da tabela 5.1 com as mesmas fases  $A_i$  e  $B_i$  da tabela 5.2, percebe-se que para tráfego em *downlink* (tabela 5.2) obtêm-se maiores valores de vazão agregada das STAs de maior taxa (coluna 2) e vazão

agregada da rede (coluna 4) que para tráfego em *uplink* (tabela 5.1). Este resultado é conseguido porque no caso de tráfego no sentido AP para as STAs, o próprio AP gerencia as colisões entre as TCs existentes, dando a TXOP para a TC de maior prioridade, que no caso é a das STAs de maior taxa.

Na tabela 5.1 é possível comparar os ganhos de vazão obtidos com os critérios 1 e 2 (equações 4.1 e 4.2) através do mecanismo de controle de prioridade. Nesta tabela, nas colunas 2 e 3 por exemplo, ao subtrair os dados da linha B2 e A2 ( $3294.24-2873.51=420.73$  e  $679.60-752.05=-72.45$ ) percebe-se que há um aumento de 420.73kbytes para a vazão agregada das STAs de taxa 11Mbps, e um decréscimo de apenas 72.45kbytes para a vazão agregada das STAs de menor taxa, quando utiliza-se o critério 2 de priorização.

A observação anterior tem efeitos nos valores da coluna 4 da tabela 5.1, onde percebe-se a existência de maiores valores da vazão agregada da rede em todas as fases de simulação. Isto pode ser estendido para as simulações de tráfego em *downlink* apresentados na tabela 5.2, ou para existência de STAs transmitindo nas quatro taxas do 802.11b (tabela 5.4). Desta maneira, percebe-se que o critério de priorização 2 faz um melhor aproveitamento da banda total disponível e conclui-se que quanto menor prioridade for dada para as STAs de menor taxa maior será o aproveitamento de vazão da rede.

Os dados de vazão apresentados nas tabelas 5.1 a 5.5 foram aplicados na fórmula de índice de justiça (equação 4.4) a fim de verificar se o mecanismo de controle de prioridade alcançou seus objetivos de priorizar as STAs de maior taxa, de acordo com os critérios estabelecidos nas equações 4.1 e 4.2.

Os valores de FI (*fairness index*) para cada uma das fases e configurações das tabelas citadas no parágrafo anterior são apresentadas nas tabelas 5.6 e 5.7. Valores mais próximos de 1 indicam que a partilha da banda disponível foi realizada de acordo com os critérios de priorização e assim, de uma maneira considerada mais justa.

Nas linhas de 4 a 7 da tabela 5.6, são apresentados os valores de índice para



Com mecanismo				
Fase	<i>uplink</i>		<i>downlink</i>	
	FI(Critério 1)	FI(Critério 2)	FI(Critério 1)	FI(Critério 2)
A1/B1	0.9999	0.9946	0.9973	0.9741
A2/B2	0.9962	0.9960	0.9998	0.9997
A3/B3	0.9961	0.9983	0.9995	0.9988
A4/B4	0.9978	0.9998	0.9998	0.9999
Sem Mecanismo				
C1/D1	0.7129	0.6689	0.7221	0.6760
C2/D2	0.7242	0.6747	0.7221	0.6760
C3/D3	0.6328	0.6011	0.6378	0.6078
C4/D4	0.5938	0.5790	0.5994	0.5774

Tabela 5.6: Índice de Justiça obtido para cada um dos critérios de priorização e fases de simulação das tabelas 5.1, 5.2 e 5.3

experimentos com utilização do mecanismo, em ambos critérios de priorização e nas seguintes situações: as colunas 2 e 3 mostram os resultados obtidos em experimentos com aplicação de tráfego em *uplink* constantes da tabela 5.1; e nas colunas 4 e 5 mostram-se os valores de FI para as fases de simulação da tabela 5.2 (tráfego *downlink*). Nas linhas de 9 a 12 (tabela 5.6) lista-se os valores de FI para as simulações sem a utilização do mecanismo de controle de prioridade constantes da tabela 5.3, sendo que nas colunas 2 e 3 para tráfego em *uplink*, e nas colunas 4 e 5 para tráfego *downlink*.

Na tabela 5.7 (colunas 2 e 3) mostra-se os valores obtidos com a aplicação da fórmula de índice de justiça (equação 4.4) nos dados das fases  $A_i$  e  $B_i$  ( $i$  de 1 a 6) da tabela 5.4; as duas últimas colunas relacionam os valores obtidos de índice de justiça, para os dados de vazão constantes da tabela 5.5, em ambos critérios de priorização.

Comparando-se, em uma mesma coluna da tabela 5.6, as linhas  $A_i/B_i$  com as linhas  $C_i/D_i$ , percebe-se que com a utilização do mecanismo obtêm-se valores mais

próximos de 1 para todas as fases de simulação, quando confrontado com os resultados obtidos sem a utilização do mecanismo de controle de prioridade. O mesmo resultado é conseguido para a situação onde existem STAs transmitindo nas quatro taxas do 802.11b, como pode ser percebido ao realizar uma comparação entre os dados das colunas 2 e 4 da tabela 5.7, e também ao confrontar-se os dados das colunas 3 e 5 da mesma tabela.

<i>Fase</i>	Com mecanismo		Sem mecanismo	
	FI(Critério 1)	FI(Critério 2)	FI(Critério 1)	FI(Critério 2)
<i>A1/B1/C1</i>	0.9531	0.9642	0.6534	0.6076
<i>A2/B2/C2</i>	0.9980	0.9923	0.3852	0.3687
<i>A3/B3/C3</i>	0.9975	0.9848	0.2500	0.4870
<i>A4/B4/C4</i>	0.9999	0.9943	0.2500	0.5360
<i>A5/B5/C5</i>	0.9997	0.9939	0.6221	0.5798
<i>A6/B6/C6</i>	0.9697	0.9799	0.6581	0.6053

Tabela 5.7: Índice de Justiça obtido para cada um dos critérios de priorização e fases de simulação das tabelas 5.4 e 5.5

Observa-se nas tabelas 5.6 e 5.7 que o mecanismo de controle de prioridade alcançou valores de índice de justiça sempre acima do valor 0.95, o que atesta sua precisão ao determinar, segundo os critérios, vazões proporcionais para as suas taxas conforme suas taxas de transmissão, ficando mais próxima das definições de justiça.

### 5.5.1 Conclusões do Capítulo

De acordo com os dados obtidos neste capítulo, verifica-se que o mecanismo de controle de prioridade desenvolvido reduz os efeitos da anomalia de performance de taxas do 802.11b nos cenários de experimentos que foram simulados, uma vez que são obtidos maiores valores de vazão para as STAs de maior taxa e maior vazão agregada da rede para todos os cenários testados. A avaliação do mecanismo utilizando o índice de justiça, constata sua eficiência em obter valores de vazão , para as STAs e/ou categorias de tráfego, próximos dos critérios estabelecidos e,

desta maneira, mais próximos de valores considerados justos.

# Capítulo 6

## Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho teve por objetivos principais investigar a “anomalia” de performance de taxas do IEEE 802.11b e criar um mecanismo de controle de prioridade capaz de minimizar os efeitos da “anomalia”.

Para alcançar o primeiro objetivo, realizou-se no capítulo 3 uma revisão bibliográfica do padrão 802.11. Tal recapitulação serviu de base teórica para examinar por meio de simulações, o problema de performance de vazão estudado, em cenários onde variou-se a taxa, quantidade, distância e/ou o sentido de tráfego entre STA e AP. Para alcançar o segundo objetivo, além da revisão teórica do padrão 802.11e realizada no capítulo 3, definiu-se no capítulo 4 (seção 4.1) critérios de priorização que privilegiassem as STAs, de acordo com suas taxas de transmissão e consequentemente, conforme seus tempos gastos no envio de pacotes. Ainda no capítulo 4 implementou-se os critérios estabelecidos em um mecanismo de controle de prioridade, através do uso da extensão IEEE 802.11e e seus parâmetros de QoS. No capítulo 5 simulou-se o mecanismo proposto, avaliando-se os resultados obtidos com relação aos critérios de vazão estabelecidos e através da fórmula de índice de justiça apresentada na seção 4.3. Por fim, este capítulo traz na seção 6.1 as conclusões sobre o problema investigado e sobre o desempenho do mecanismo de controle de prioridade proposto, e na seção 6.2 sugere-se trabalhos futuros.

## 6.1 Conclusões

Na investigação da “anomalia” de performance feita no capítulo 3 pode-se realizar as seguintes observações:

- a diminuição de taxa de apenas uma STA, reduz a performance de vazão de todas as STAs da rede, conforme observado por [3];
- para tráfego em *downlink* os efeitos da “anomalia” são menos notados que para tráfego *uplink*, uma vez que no 802.11, para tráfego originado no AP, não há degradação de performance relacionada a espera da transição no meio de pacotes colididos. Tais colisões, no caso de envolverem pacotes transmitidos com menor taxa, tem um efeito de diminuição de desempenho muito grande, já que os dados demorarão muito mais tempo para trafegar no meio;
- a variação da distância, além de ser uma das causas da diminuição da taxa das STAs conhecida como *fallback*, também causa no AP a captura dos pacotes originados pelas STAs. A captura de pacotes tem o efeito de diminuição da vazão das STAs que estão afastadas do AP, uma vez que estes pacotes são descartados no seu recebimento;
- o aumento na quantidade de STAs de menor taxa tem como efeito uma maior degradação de performance da rede, uma vez que as STAs de menor taxa ocupam o canal por muito mais tempo e, de forma inversa, no caso do aumento da quantidade de STAs de maior taxa, os efeitos da “anomalia” de performance serão amortizados pela diminuição da componente de vazão das STAs de menor taxa.

O mecanismo de controle de prioridade proposto para minimizar a “anomalia” de performance, e que foi apresentado no capítulo 4, teve como objetivo determinar probabilidades de acesso ao meio para as STAs, de acordo com suas taxas de transmissão. Desta maneira, as STAs de maior taxa puderam acessar mais vezes o canal, compensando o longo período que as STA de taxa reduzida demoram para transmitir seus dados. Para isso, definiu-se dois critérios de priorização que consideram

os tempos gastos pelas STAs para transmissão de pacotes, a fim de determinar o quanto uma STA de maior taxa é mais rápida que uma de taxa reduzida. Ambos critérios tiveram como objetivo proporcionar performances de vazão para as STAs de acordo com suas taxas de transmissão e, assim, aumentar a vazão agregada da rede sem excluir das STAs de menor taxa a oportunidade de transmitir seus pacotes.

De acordo com os dados de simulação apresentados no capítulo 5, verificou-se que o mecanismo de controle de prioridade reduz os efeitos da “anomalia” em cenários com variação do sentido de tráfego (*downlink* ou *uplink*) e distância entre STAs e AP, e/ou a quantidade de STAs transmitindo com diferentes taxas, utilizando ambos critérios de priorização definidos. No mesmo capítulo avaliou-se o mecanismo proposto, novamente com ambos critérios de priorização, utilizando uma fórmula de índice de justiça com a qual foi constatada a eficiência dos algoritmos propostos em sua tarefa de atribuir para as STAs vazões proporcionais aos seus tempos de ocupação do canal.

Na comparação entre os critérios de priorização estabelecidos e que foram implementados no mecanismo de controle de prioridade, percebeu-se que uma maior diminuição na prioridade das STAs de menor taxa, tal como proposto no critério número 2, proporciona um aumento da vazão das STAs de maior taxa e vazão agregada da rede, uma vez que as STAs mais rápidas conseguem fazer um melhor aproveitamento dos tempos de transmissão a elas atribuídos. De acordo com as simulações realizadas, notou-se que não permitir que STAs de menor taxa transmitam seus dados (diminuir de maneira muito grande a probabilidade de acesso ao meio), seria uma das maneiras de anular os efeitos da “anomalia”.

Contudo, considerou-se injusta tal abordagem e, assim, concluí-se que o mecanismo e critérios estabelecidos cumpriram seus objetivos de reduzir a anomalia e perseguir as definições de justiça no compartilhamento de banda em redes 802.11 infra-estruturadas com degradação de desempenho devido a “anomalia” de taxas.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Trabalhos futuros apontam para: estudos dos efeitos da anomalia de performance nos protocolos 802.11a/g; investigação dos atrasos causados pelo maior tempo de transmissão das STAs de menor taxa e avaliação destes retardos em aplicações sensíveis a este requisito tais voz e/ou multimídia; criação de modelos de canal capazes de representar perdas por multipercurso, ruído e/ou interferências, estudando quais os efeitos destes fatores nas estimativas da relação sinal/ruído das STAs e consequente diminuição na taxa de transmissão das STAs.

Pretende-se utilizar o parâmetro TXOP, que regula o tempo que uma STA mantém controle sobre o meio, para implementar um mecanismo de controle de priorização capaz de minimizar as perdas de performance, em função da anomalia, para os protocolos e fatores listados no parágrafo anterior. Tem-se a intenção de estender tal mecanismo, de maneira que ele seja capaz de diferenciar a vazão de STAs pertencentes a diferentes classes de tráfego (vídeo e/ou melhor esforço), cada qual transmitindo com diferentes taxas de transmissão. Pretende-se, ainda, testar tais mecanismos em cenários com mudança dinâmica de taxa das STAs e presença de tráfego *downlink* competindo com tráfego em *uplink*.

# Referências Bibliográficas

- [1] IEEE 802.11b White Paper - [http://www.vocal.com/data\\_sheets/80211b5.htm](http://www.vocal.com/data_sheets/80211b5.htm).  
Página Web consultada em 19/04/05, setembro de 2004.
- [2] Gartner Research - <http://www.gartner.com>. Página Web consultada em 19/04/05, 2005.
- [3] M.HEUSSE, F.ROUSSEAU, G.BERGER-SABBATEL, AND DUDA, A. Performance Anomaly of 802.11b. In *IEEE INFOCOM'2003* (San Francisco, USA, março de 2003).
- [4] FILHO, J. C. M., DE REZENDE, J. F., AND PIRMEZ, L. Seleção Dinâmica de Parâmetros de Controle de Qualidade de Serviço em Redes IEEE 802.11 Infra-Estruturadas. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores(SBRC'03)* (Natal, Brasil, maio de 2003).
- [5] P.CHATZIMISIOS, V.VITSAS, AND A.C.BOUCOUVALAS. Throughput and Delay Analysis of IEEE 802.11 Protocol. In *IEEE International workshop on network Appliances (IWNA)* (Liverpool, England, 2002).
- [6] BIANCHI, G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. *Journal on Selected Areas in Communications (JSAC'00)* 18 (março de 2000), 535–547.
- [7] XIAO, Y., AND ROSDAHL, J. Throughput and Delay Limits of IEEE 802.11. *IEEE Communications Letters* 6, 8 (agosto de 2002), 355–357.



- [8] F.CALI, M.CONTI, AND E.GREGORY. IEEE 802.11 Wireless LAN: Capacity Analysis and Protocol Enhancement. In *IEEE INFOCOM 1998* (março de 1998).
- [9] FREITAG, J., DA FONSECA, N. L. S., AND BRANQUINHO, O. C. Diferenciação de Serviços em Redes 802.11 sob Degradação da Taxa de Transmissão. In *V Workshop de Comunicações sem Fio e Computação Móvel (WCSF)* (São Lourenço, Brasil, outubro de 2003).
- [10] S.MANGOLD, S.CHOI, AND ET AL., P. M. IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service, european wireless. In *European Wireless* (Florence, Italy, fevereiro de 2002).
- [11] A.GRILO, AND NUNES, M. Performance Evaluation of IEEE 802.11e. In *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications* (Lisbon, Portugal, setembro de 2002).
- [12] D.HE, AND C.Q.SHEN. Simulation Study of IEEE 802.11e EDCF. In *The 57th Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC'03)* (Jeju, Korea, abril de 2003).
- [13] GU, D., AND ZHANG, J. QoS Enhancement in IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks. *IEEE Communications Magazine* 41, 6 (jun 2003), 120–124.
- [14] MANGOLD, S., CHOI, S., HIERTZ, G. R., AND WALKE, B. Analysis of IEEE 802.11e for QoS Support in Wireless LANs. *IEEE Wireless Communications* 10, 6 (dezembro de 2003).
- [15] CARVALHO, C. B., AND DE REZENDE, J. F. Seleção Dinâmica de Parâmetros de QoS na Resolução da Anomalia de Performance do IEEE 802.11b. In *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBT'04* (Belém, Brasil, setembro de 2004).
- [16] R.JAIN, HAWKES, W., AND D.CHIU. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems. In *DEC-TR-301* (setembro de 1984).

- [17] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Standard 802.11, 1999.
- [18] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band. IEEE Standard 802.11b, 1999.
- [19] JUNIOR, A. A. Esquemas de Modulação do IEEE 802.11 - [http://www.gta.ufrj.br/seminarios/semin2003\\_1/aurelio/](http://www.gta.ufrj.br/seminarios/semin2003_1/aurelio/). Página Web consultada em 19/04/05, setembro de 2004.
- [20] Draft Supplement to IEEE 802.11: Medium Access Control (mac) Enhancements for Quality of Service(QoS). IEEE Standard 802.11e/D3.0, 1999.
- [21] BRENNER, P. A Technical Tutorial on the IEEE 802.11 Protocol - [http://www.sss-mag.com/pdf/802\\_11tut.pdf](http://www.sss-mag.com/pdf/802_11tut.pdf). Página Web consultada em 19/04/05, 1997.
- [22] TANENBAUM, A. S. *Computer Networks*. Editora Prentice Hall, 1996.
- [23] HEUSSE, M., STARZETS, P., ROUSSEAU, F., BERGER-SABBATEL, G., AND DUDA, A. Scheduling Time-Sensitive Traffic on 802.11 Wireless LANs. In *Quality for All, 4th COST 263 International Workshop on Quality of Future Internet Services (QoFIS'03)* (Stockholm, Sweden, outubro de 2003).
- [24] The Network Simulator NS-2 - <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Página Web consultada em 19/04/05, janeiro de 2003.
- [25] Extensions to the ns network simulator - <http://www.icsi.berkeley.edu/~widmer/mnav/ns-extension/>. Página Web consultada em 19/04/05, setembro de 2003.
- [26] DE MELO FILHO, J. C. *Mecanismo de Controle de Qualidade de Serviço em Redes IEEE 802.11*. Dissertação de Mestrado - Instituto de Matemática/Núcleo de Computação Eletrônica, UFRJ, 2003.

- [27] KAUR, J., AND VIN, H. M. Effect of Higher Priority EF Traffic on TCP Throughput and Fairness. Relatório técnico, Departamento de Ciência da Computação, Universidade do Texas em Austin, EUA, 2000.
- [28] KOKSAL, C. E., KASSAB, H., AND BALAKRISHNAN, H. An Analysis of Short-Term Fairness in Wireless Media Access Protocols. In *ACM Sigmetrics* (Santa Clara, USA, junho de 2000).
- [29] GORINSKY, S., AND VIN, H. Additive Increase Appears Inferior. Relatório técnico, Departamento de Ciência da Computação, Universidade do Texas em Austin, EUA, 2000.
- [30] WARE, C., CHICHARO, J., AND WYSOCKI, T. Modelling Capture Behaviour in IEEE 802.11 Radio Modems. In *Vehicular Technology Conference (VCT'01)* (Atlantic City, USA, 2001).
- [31] DE ALMEIDA ALVES, I. B. H., DE REZENDE, J. F., AND DE MORAES, L. F. M. Avaliando a Justiça na Marcação de Tráfegos Agregados. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'00)* (Belo Horizonte, Brasil, maio de 2000).
- [32] BOTTIGLIENGO, M., CASSETI, C., CHIASSERINI, C.-F., AND MEO, M. Smart Traffic Scheduling in 802.11 WLANs with Access Point. In *Vehicular Technology Conference (VCT'03)* (Orlando, USA, outubro de 2003).
- [33] WU, H., PENG, Y., LONG, K., CHENG, S., AND MA, J. Performance of Reliable Transport Protocol over IEEE 802.11 Wireless LAN: Analysis and Enhancement. In *IEEE Infocom'02* (New York, USA, 2002).
- [34] FALL, K., AND VARADHAN, K. Ns Notes and Documentation. Relatório técnico, The VINT Project, oct 1998.
- [35] WELCH, B. Pratical programming in TCL and TK - <http://www.beedub.com/book/>. Página Web consultada em 19/04/05, junho de 2003.

- 
- [36] Curso de Programação TCL/TK - *ftp* :  
*//ftp.dct.ufms.br/windows/graphlet/tutorial\_tcl.doc.* Página Web  
consultada em 19/04/05, julho de 2003.