

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

LIVIA FERREIRA GERK

PROVISÃO DE QOS EM REDES EM MALHA SEM FIO BASEADA NO PADRÃO
IEEE 802.11E

NITERÓI
2010

LIVIA FERREIRA GERK

PROVISÃO DE QOS EM REDES EM MALHA SEM FIO BASEADA NO PADRÃO
IEEE 802.11E

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação “Stricto Sensu” em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientadora: Profa. Dra. DÉBORA CHRISTINA MUCHALUAT SAADE

Niterói
2010

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

G369 Gerk, Livia Ferreira.
Provisão de QOS em redes em malha sem fio baseada no padrão
IEEE 802.11e / Livia Ferreira Gerk. – Niterói, RJ : [s.n.], 2010.
155 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) -
Universidade Federal Fluminense, 2010.
Orientador: Débora Christina Muchaluat Saade.

1. Rede de telecomunicações. 2. Rede em malha sem fio. 3.
Qualidade de serviço. 4. IEEE 802.11e. I. Título.

CDD 621.382

PROVISÃO DE QOS EM REDES EM MALHA SEM FIO BASEADA NO PADRÃO
IEEE 802.11E

LIVIA FERREIRA GERK

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação "Stricto Sensu" em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de concentração: Processamento de Sinais e Comunicação de Dados Multimídia.

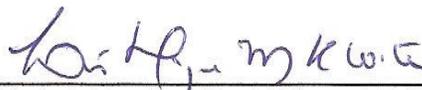
Aprovada em Agosto/2010:



Prof. Dra. Débora Christina Muchaluat Saade
Universidade Federal Fluminense
(Orientadora)



Prof. Dr. Célio Vinicius Neves de Albuquerque
Universidade Federal Fluminense



Prof. Dr. Luis Henrique Maciel Kosmalski Costa
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dedicatória

Dedico esta dissertação aos meus pais, ao meu irmão e à minha avó.

Agradecimentos

Agradeço a Deus em primeiro lugar pelas escolhas feitas ao longo do meu caminho e pela força em me manter firme nelas nos momentos de dúvida ou desânimo.

Agradeço ao meu pai pelo interesse, pela torcida, pelas loucas conversas sobre gráficos e estatísticas, pela compreensão. Agradeço à minha mãe pelo carinho, pela preocupação, pelo incentivo, mesmo desejando que “esse mestrado acabasse logo” para que eu voltasse ao convívio da família. Agradeço a ambos pelo apoio, sempre, em todas as minhas escolhas, e pelo suporte na concretização de todas elas.

Agradeço à minha avó pela torcida incondicional pelo meu sucesso e pela minha felicidade. Agradeço as orações toda noite, o carinho e a preocupação. Agradeço ao meu irmão por estar ao meu lado. Agradeço aos meus padrinhos, Silvio e Cori, pelo carinho, e em especial à minha madrinha de Crisma, Sandra, que valoriza essa formação acadêmica e tão orgulhosa ficou da afilhada que estava fazendo mestrado.

Agradeço aos meus chefes da Oi, Ricardo Ceara e Eduardo Ázara, sem o apoio e o incentivo dos quais eu não poderia estar realizando esta conquista. Ceara, que aprova e incentiva a busca pelo conhecimento e desenvolvimento profissional, e Eduardo, que compreende e me orienta nessa minha tendência de querer “abraçar o mundo com as pernas”.

Agradeço aos meus amigos Débora, Bruno e Michelle, que, apesar de não entenderem essa minha área tecnológica, estão sempre ao meu lado, me ouvindo, me ajudando a relaxar e torcendo por mim. Agradeço ao amigo Sauer por me ouvir por longas horas na Oi e pelas preciosas dicas de programação. Agradeço ao Diego pela enorme paciência com as minhas dúvidas, pela atenção e ajuda fundamentais no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ao Marcos, Bruno, Arthur, Rafael, novos amigos da UFF que conheci ao longo do mestrado, pelo papo e pela amizade.

Agradeço ao Professor Célio e em especial à Professora Débora, pela orientação, pela busca pelo melhor sempre, pelas correções criteriosas, pelo interesse real e concreto pelos trabalhos sendo desenvolvidos.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	3
1.2. OBJETIVO	5
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	6
2. PADRÃO IEEE 802.11E.....	8
2.1. HCF.....	11
2.1.1. EDCA.....	11
2.1.2. HCCA.....	16
2.2. TRANSMISSÃO DE MÚLTIPLOS QUADROS (CFB – CONTENTION FREE BURST)	19
2.3. MODOS DE RECONHECIMENTO	19
2.4. CONTROLE DE ADMISSÃO	22
3. TRABALHOS RELACIONADOS	24
3.1. DESAFIOS DE IMPLEMENTAÇÃO DE QOS EM REDES EM MALHA SEM FIO	24
3.1.1. INTERDEPENDÊNCIA ENTRE OS MECANISMOS DA CAMADA MAC E DE SELEÇÃO DE ROTAS.....	25
3.1.2. COMPETIÇÃO INTRARROTEADOR E INTERROTEADOR.....	26
3.1.3. CAPACIDADE DA REDE.....	27
3.1.4. CONTROLE DE ADMISSÃO DE CHAMADAS (CAC)	28
3.1.5. QOS FIM-A-FIM.....	29
3.1.6. MECANISMOS DE NEGOCIAÇÃO DE NÍVEIS DE SERVIÇO (SERVICE LEVEL AGREEMENT – SLA)	29
3.1.7. DIFERENCIAÇÃO ENTRE TRÁFEGO DE ACESSO E TRÁFEGO DE BACKBONE.....	30
3.1.8. BALANCEAMENTO DE CARGA	30
3.1.9. POSICIONAMENTO MÍNIMO DE GATEWAYS NA REDE.....	30
3.1.10. ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA	30
3.1.11. AMBIENTES DE MÚLTIPLOS CANAIS.....	31
3.2. ABORDAGENS DE IMPLEMENTAÇÃO DE QOS.....	31
3.2.1. OTIMIZAÇÃO DA SUB-CAMADA MAC.....	31
3.2.2. EXTENSÕES / ALTERAÇÕES DOS PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO AD HOC TRADICIONAIS	32

3.2.3. ABORDAGEM CROSS-LAYER	35
3.3. ADAPTAÇÕES DO PADRÃO IEEE 802.11E AOS DIFERENTES CENÁRIOS DE REDE	36
4. PROPOSTA PARA ANÁLISE DOS PARÂMETROS IEEE 802.11e.....	45
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	55
5.1. AVALIAÇÃO DAS PROPOSTAS	86
5.2. AVALIAÇÃO DA ESCALABILIDADE	87
5.3. AVALIAÇÃO DE UM FLUXO DE VÍDEO REAL	94
6. CONCLUSÃO	99
6.1. CONTRIBUIÇÕES	99
6.2. TRABALHOS FUTUROS	101
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXO A – CONFIGURAÇÕES DO SIMULADOR NS2	109
A.1. SCRIPTS TCL DE CONFIGURAÇÃO DO SIMULADOR	109
A.1.1. CONFIGURAÇÃO SEM QOS	109
A.1.2. CONFIGURAÇÃO COM QOS	113
A.1.3. CONFIGURAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE VÍDEO (FERRAMENTA EVALVID) SEM QOS.....	117
A.1.4. CONFIGURAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE VÍDEO (FERRAMENTA EVALVID) COM QOS	122
A.2. SCRIPTS TCL DE GERAÇÃO DE TRÁFEGO.....	128
A.2.1. CENÁRIO DE GERAÇÃO CONTÍNUA DE TRÁFEGO.....	128
A.2.2. CENÁRIO COM INTERRUPTÃO DO TRÁFEGO DE VOZ	129
A.2.3. CENÁRIO DE AVALIAÇÃO DE VÍDEO (FERRAMENTA EVALVID)	131
A.3. ALTERAÇÃO DO CÓDIGO DO MÉTODO CFB PARA ADAPTAÇÃO DINÂMICA DE TXOPLIMIT	133

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Arquitetura de Referência dos métodos de acesso definidos pelo padrão IEEE 802.11e	9
Figura 2: Formato Geral de um Quadro 802.11	9
Figura 3: Relação entre os IFS's.	12
Figura 4: Arquitetura de Referência das EDCAFs.....	13
Figura 5: Formato do Elemento EDCA Parameter Set.....	14
Figura 6: Formato do Campo QoS Info quando enviado por um AP.....	14
Figura 7: Formato do Campo QoS Info quando enviado por uma estação que não exerce a função de AP.....	15
Figura 8: Esquema de acesso ao meio do modo HCCA.....	17
Figura 9: Formato do Elemento TSPEC.....	17
Figura 10: Formato do Campo TS Info.....	18
Figura 11: Formato do Quadro Block Ack Request.....	20
Figura 12: Formato do Quadro Block Ack.....	21
Figura 13: Sequência de Mensagens trocadas para estabelecimento, utilização e encerramento de um mecanismo de Block Ack (Immediate).....	21
Figura 14: Seleção de rota baseada nos requisitos de QoS do tráfego.....	26
Figura 15: Problemas causados pelo modelo de interferência e características do padrão IEEE 802.11.....	28
Figura 16: Duas situações em que o mecanismo de CAC se faz necessário.....	29
Figura 17: Dinâmica do Protocolo RM-AODV.....	34
Figura 18: Classificação de tráfego e gerenciamento de filas.....	36
Figura 19: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários sem configuração de QoS (802.11g) e com configuração de QoS padrão (EDCA).....	37
Figura 20: Arquitetura do conjunto de ferramentas Evalvid.....	52
Figura 21: Comparação da vazão média de todas as categorias entre cenários sem configuração de QoS (802.11g) e com configuração de QoS padrão (EDCA).....	56
Figura 22: Comparação da taxa de colisão de todas as categorias entre cenários sem configuração de QoS (802.11g) e com configuração de QoS padrão (EDCA).....	57
Figura 23: Comparação da taxa de colisão da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada onde aCWmin assume os valores 15, 31 e 63.....	58
Figura 24: Comparação da taxa de colisão de todas as categorias entre cenários sem configuração de QoS e com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada onde aCWmin assume os valores 31 e 63.....	59
Figura 25: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada onde aCWmin assume os valores 15, 31 e 63.....	60
Figura 26: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada onde aCWmin assume os valores 15 e 63.....	61
Figura 27: Comparação da taxa de colisão da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as	

propostas 2 (AP) e 4 (VozAP) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.....	61
Figura 28: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as propostas 2 (AP) e 4 (VozAP) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.....	62
Figura 29: Comparação das causas das perdas de pacotes da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as propostas 2 (AP) e 4 (VozAP) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.	62
Figura 30: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada onde aCWmin assume os valores 15 e 63.	63
Figura 31: Comparação da vazão média da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada onde aCWmin assume os valores 15 e 63.	63
Figura 32: Comparação da vazão média da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 2 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e desabilitada.	64
Figura 33: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as propostas 2 (AP) e 1 (estação) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.....	65
Figura 34: Comparação da vazão média da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as propostas 2 (AP) e 1 (estação) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.....	65
Figura 35: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre a proposta 2 da Tabela 8 (AP) de garantia de serviço para o tráfego de voz e valores padrão.	66
Figura 36: Comparação da vazão média da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre a proposta 2 da Tabela 8 (AP) de garantia de serviço para o tráfego de voz e valores padrão.	67
Figura 37: Comparação da taxa de colisão da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as propostas 2 (AP) e 3 (CWminPadrao) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.	68
Figura 38: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as propostas 2 (AP) e 3 (CWminPadrao) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.	68
Figura 39: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_BK (<i>background</i>) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as propostas 2 (AP) e 3 (CWminPadrao) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.	69
Figura 40: Comparação da vazão média da categoria AC_VI (vídeo) em cenário com a proposta 3 da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz com a funcionalidade CFB habilitada e desabilitada.....	69

Figura 41: Comparação da vazão média da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada entre as propostas 2 (AP) e 3 (CWminPadrao) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.....	70
Figura 42: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o tráfego de voz é interrompido entre os instantes 100 e 200s e não é mais incrementado a partir de 200s (interrupção) e no padrão de tráfego contínuo (original).	71
Figura 43: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o tráfego de voz é interrompido entre os instantes 100 e 200s e não é mais incrementado a partir de 200s (interrupção) e no padrão de tráfego contínuo (original).	72
Figura 44: Comparação da vazão média da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde todas as categorias estão ativas (CWminPadrao) e onde apenas o tráfego de vídeo está ativo (vídeo).....	73
Figura 45: Comparação das causas de perda de pacotes da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e desabilitada.	74
Figura 46: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS padrão com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado (AdaptAIFSPadrao) e onde ele não é realizado (padrão).	75
Figura 47: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é aplicado à configuração padrão (AdaptAIFSPadrao) e onde apenas a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 (CWminPadrao) é implementada.	75
Figura 48: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS padrão com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado (AdaptAIFSPadrao) e onde ele não é realizado (padrão).	76
Figura 49: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS padrão com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado (AdaptAIFSPadrao) e onde ele não é realizado (padrão).	77
Figura 50: Comparação das causas de perda de pacotes da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS padrão com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado (AdaptAIFSPadrao) e onde ele não é realizado (padrão).	77
Figura 51: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é aplicado à configuração padrão (AdaptAIFSPadrao) e onde apenas a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 (CWminPadrao) é implementada.	78
Figura 52: Comparação das causas de perda de pacotes da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada	

- onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é aplicado à configuração padrão (AdaptAIFSPadrao) e onde apenas a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 (CWminPadrao) é implementada..... 79
- Figura 53: Comparação da vazão média da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é aplicado à configuração padrão (AdaptAIFSPadrao) e onde apenas a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 (CWminPadrao) é implementada. 79
- Figura 54: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado apenas para AC_VI (AdaptVideo) e onde não é realizado (CwminPadrao). 80
- Figura 55: Comparação da taxa de perda da categoria AC_BE (melhor esforço) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado apenas para AC_VI (AdaptVideo) e onde não é realizado (CwminPadrao). 81
- Figura 56: Comparação das causas de perda de pacotes da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado apenas para AC_VI (AdaptVideo) e onde não é realizado (CwminPadrao). 81
- Figura 57: Comparação da vazão média da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado apenas para AC_VI (AdaptVideo) e onde não é realizado (CwminPadrao). 82
- Figura 58: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e com ajuste dinâmico de TXOPLimit para AC_VO e AC_VI onde o limite de TXOPLimit é o mesmo para voz e vídeo (AdaptPadrao) e onde o limite de TXOPLimit para voz é metade do para vídeo (AdaptVozMetade). 83
- Figura 59: Comparação da taxa de perda da categoria AC_BK (*background*) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e com ajuste dinâmico de TXOPLimit para AC_VO e AC_VI onde o limite de TXOPLimit é o mesmo para voz e vídeo (AdaptPadrao) e onde o limite de TXOPLimit para voz é metade do para vídeo (AdaptVozMetade). 83
- Figura 60: Comparação da vazão média da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e com ajuste dinâmico de TXOPLimit para AC_VO e AC_VI onde o limite de TXOPLimit é o mesmo para voz e vídeo (AdaptPadrao) e onde o limite de TXOPLimit para voz é metade do para vídeo (AdaptVozMetade). 84
- Figura 61: Comparação da vazão média da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e com ajuste dinâmico de TXOPLimit para AC_VO e AC_VI onde o limite de TXOPLimit é o mesmo para

- voz e vídeo (AdaptPadrao) e onde o limite de TXOPLimit para voz é metade do para vídeo (AdaptVozMetade). 84
- Figura 62: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado para AC_VO e AC_VI com o valor máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (AdaptVozMetade) e onde não é realizado (CwminPadrao). 85
- Figura 63: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado para AC_VO e AC_VI com o valor máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (AdaptVozMetade) e onde não é realizado (CwminPadrao). 85
- Figura 64: Comparação da taxa de perda da categoria AC_BE (melhor esforço) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado para AC_VO e AC_VI com o valor máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (AdaptVozMetade) e onde não é realizado (CwminPadrao). 86
- Figura 65: Comparação da taxa de colisão da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada entre topologias de 10 e 50 nós. 88
- Figura 66: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada entre topologias de 10 e 50 nós. 89
- Figura 67: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e ajuste dinâmico de TXOPLimit realizado para AC_VO e AC_VI com o valor máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (AdaptVozMetade) entre topologias de 10 e 50 nós. 89
- Figura 68: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada entre topologias de 10 e 50 nós. 90
- Figura 69: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e ajuste dinâmico de TXOPLimit realizado para AC_VO e AC_VI com o valor máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (AdaptVozMetade) entre topologias de 10 e 50 nós. 90
- Figura 70: Comparação das causas de perda de pacotes da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada entre topologias de 10 e 50 nós. 91
- Figura 71: Comparação da vazão média da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3

da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e ajuste dinâmico de TXOPLimit realizado para AC_VO e AC_VI com o valor máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (AdaptVozMetade) entre topologias de 10 e 50 nós.	91
Figura 72: Vazão média em cenário com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada.	92
Figura 73: Taxa de perda em cenário com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada.....	93
Figura 74: Atraso fim-a-fim em cenário com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e ajuste dinâmico de TXOPLimit realizado para AC_VO e AC_VI com o valor máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (AdaptVozMetade).	93
Figura 75: Vazão média em cenário com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e ajuste dinâmico de TXOPLimit realizado para AC_VO e AC_VI com o valor máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (AdaptVozMetade).	94
Figura 76: PSNR quadro a quadro.	95
Figura 77: Percentual de quadros de acordo com a escala MOS e MOS médio de cada cenário.....	96
Figura 78: PDF do atraso fim-a-fim.	96
Figura 79: CDF do atraso fim-a-fim.	97
Figura 80: Amostras do vídeo recebido nos cenários (por linha): IEEE 802.11g (sem QoS), EDCA (com QoS utilizando valores padrão), CwminPadrao (proposta 3 da Tabela 8) e AdaptVozMetade (ajuste dinâmico de TXOPLimit), respectivamente.	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Significado dos subcampos do campo QoS Control do Quadro 802.11....	10
Tabela 2: Mapeamento dos Níveis de Prioridade de Tráfego em Categorias de Acesso.	11
Tabela 3: Valores Padrão dos Parâmetros de Acesso ao Meio.	15
Tabela 4: Parâmetros propostos para as estações e o AP em [Lee et al., 2007].....	42
Tabela 5: Parâmetros propostos para as estações e o AP em [Lee et al., 2009], respectivamente.	43
Tabela 6: Parâmetros Definidos no padrão IEEE 802.11e.	47
Tabela 7: Parâmetros quando aCWmin assume os valores 31 e 63.....	48
Tabela 8: Parâmetros para Garantia de Serviço.	49
Tabela 9: Escala MOS.	53
Tabela 10: Conversão de PSNR para a escala MOS.....	53
Tabela 11: Parâmetros das propostas mais adequadas.	87

LISTA DE ACRÔNIMOS

AC	Access Category
AC_BE	Access Category Best Effort
AC_BK	Access Category Background
AC_VI	Access Category Video
AC_VO	Access Category Voice
ACI	Access Category Index
ACL	Access List
ACM	Admission Control Mandatory
AEDCA	Adaptive Enhance Distributed Channel Access
AEDCF	Adaptive Enhanced Distributed Channel Function
AFEDCF	Adaptive Fair Enhanced Distributed Channel Function
AIFS	Arbitration Interframe Space
AIFSN	Arbitration Interframe Space Number
AODV	Ad Hoc On Demand Distance Vector
AP	Access Point
APSD	Automatic Power-Save Delivery
ARC	Automatic Rate Control
BSS	Basic Service Set
CAC	Call Admission Control
CAP	Controlled Access Phase
CBR	Constant Bit Rate
CFB	Contention Free Burst
ChaPLet	Channel-dependent Packet Level Tuning
CTS	Clear to Send

CW	Contention Window
DCF	Distributed Coordination Function
DFS	Distributed Fair Scheduling
DIFS	Distributed Coordination Function Interframe Space
DiffServ	Differentiated Services
DLS	Direct Link Setup
DS-EDCA	Differentiated Service Enhance Distributed Channel Access
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
EDCAF	Enhanced Distributed Channel Access Function
EIFS	Extended Interframe Space
EOSP	End of Service Period
ETT	Expected Transmission Time
ETX	Expected Transmission Count
ETXOP	Enhanced Transmission Opportunity
FTP	File Transfer Protocol
GOP	Group of Pictures
HC	Hybrid Coordinator
HCCA	Hybrid Coordination Function Controlled Channel Access
HCF	Hybrid Coordination Function
IEEE	Institute of Electrical and Eletronics Engineers
IFS	Interframe Space
IP	Internet Protocol
MAC	Medium Access Control
ML	Minimum Loss
MOS	Mean Opinion Score

MPEG	Moving Picture Experts Group
MSDU	Medium Access Control Service Data Unit
NS	Network Simulator
OLSR	Optimized Link State Routing
OSI	Open Systems Interconnection
PC	Point Coordinator
PCF	Point Coordination Function
PF	Persistence Factor
PIFS	Point Coordination Function Interframe Space
PS	Power Save
PSNR	Peak Signal-to-Noise Ratio
QAP	Quality of Service Access Point
QBSS	Quality of Service Basic Service Set
QCIF	Quarter Common Intermediate Format
QOLSR	Quality of Service Optimized Link State Routing
QoS	Quality of Service
RIO	Random Early Detection In and Out
RM-AODV	Radio Metric Ad Hoc On Demand Distance Vector
RTS	Request to Send
SI	Service Interval
SIFS	Short Interframe Space
SIP	Session Initiation Protocol
SLA	Service Level Agreement
SNMP	Simple Network Management Protocol
SNR	Signal-to-Noise Ratio

SP	Service Period
TCP	Transmission Control Protocol
TID	Traffic Identifier
ToS	Type of Service
TS	Traffic Stream
TSPEC	Traffic Specification
TXOP	Transmission Opportunity
TXOPLimit	Transmission Opportunity Limit
UDP	User Datagram Protocol
UP	User Priority
VBR	Variable Bit Rate
VoIP	Voice over Internet Protocol
WFA	WiFi Alliance
WME	Wireless Multimedia Extensions
WMM	WiFi Multimedia

RESUMO

Esta dissertação analisa a influência dos parâmetros que provêm Qualidade de Serviço (QoS) definidos no padrão IEEE 802.11e em métricas, como vazão média, atraso médio fim-a-fim, taxa de perda e taxa de colisão, no contexto de redes em malha sem fio. A partir dessa análise, são propostas diversas configurações desses parâmetros com o objetivo de atender aos requisitos das classes de serviço de maior prioridade sem causar *starvation* nas de menor prioridade. As configurações propostas são avaliadas e eleitas as mais adequadas para a topologia de testes definida.

Palavras-chaves: Qualidade de Serviço (QoS), redes em malha sem fio, IEEE 802.11e.

ABSTRACT

This work analyzes the influence of the parameters that provide Quality of Service (QoS) defined in the IEEE 802.11e standard in metrics, such as average throughput, average end-to-end delay, packet loss rate and frame collision rate, in the context of wireless mesh networks. Using this analysis, different parameter configurations are proposed aiming at providing the quality requirements of the access categories of higher priority without causing starvation in the lower priority ones. The proposed configurations are evaluated and the most suited ones to the test defined topology are elected.

Keywords: Quality of Service (QoS), wireless mesh networks, IEEE 802.11e.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem-se observado um interesse crescente em tecnologias que oferecem mobilidade, altas taxas de transmissão, alta disponibilidade e que não requerem uma infraestrutura cabeada. A evolução das operadoras de telefonia celular e a queda na receita das operadoras de telefonia fixa exemplificam essa tendência. Além disso, a expansão do número de *hot spots* em *shoppings*, livrarias, aeroportos, hotéis, dentre outros, demonstram a demanda cada vez maior existente por serviços de dados sem fio. As redes sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11 [IEEE P802.11, 2007] se popularizaram, chegando também ao mercado residencial, pelo menor custo e maior facilidade de implementação, além das vantagens de flexibilidade observadas pelos usuários.

A maioria das redes sem fio implementadas ainda se baseia no modo infraestruturado do padrão IEEE 802.11, que requer um *backbone* cabeado interligando os pontos de acesso. Recentemente, tem sido alvo de estudo de grandes empresas fornecedoras de equipamentos de rede e operadoras de telecomunicações e de instituições acadêmicas um tipo de rede sem fio que elimina a necessidade dos cabos na interconexão destes pontos de acesso, criando, além do acesso sem fio, também um *backbone* sem fio. Estas redes, onde os nós sem fio operam no modo *ad hoc*, são chamadas de redes em malha ou *mesh*.

Redes sem fio em malha ou redes *mesh* são redes com topologia dinâmica, constituídas por nós cuja comunicação, no nível físico, é feita através de uma das variantes dos padrões IEEE 802.11 e 802.16 e cujo roteamento é dinâmico. Ao contrário das redes em modo *ad hoc* do padrão IEEE 802.11, onde os nós também se comunicam diretamente uns com os outros sem o intermédio de um ponto de acesso, não enfrentam restrições referentes à mobilidade e ao consumo de energia, pois normalmente os nós que implementam o *backbone* sem fio têm localização fixa e podem ser facilmente alimentados, tornando-os capazes de prover maior largura de banda, confiabilidade e redundância.

A ausência da necessidade de cabeamento entre os pontos de acesso oferece baixo custo e rapidez de implantação. Através da troca de informações entre os nós, a rede descobre seus elementos e rotas e se configura automaticamente, reduzindo também os custos e esforços de administração e manutenção da rede.

A característica fundamental das redes em malha é o encaminhamento através de múltiplos saltos [Aoun et al., 2006]. Os nós intermediários não só regeneram o sinal como também tomam decisões de encaminhamento baseadas no conhecimento da rede. Com isso, aumenta-se a área de cobertura e a eficiência no uso do espectro com a possibilidade de reuso de frequências.

A topologia em malha, em oposição à topologia em estrela das redes infraestruturadas, oferece maior robustez devido aos múltiplos caminhos para cada destino e à recuperação automática de falhas nesses caminhos com auxílio dos protocolos de roteamento *ad hoc*.

Os nós *mesh* são pontos de acesso (*AP – access point*) que incorporam as funções de roteamento, segurança, dentre outros, e alguns deles funcionam como *gateways* para interconexão com outras redes. Normalmente, o tráfego flui de e para estes *gateways*.

Existem duas abordagens para a implementação de redes em malha sem fio: através de protocolos de roteamento *ad hoc* nível 3 e através de encaminhamento em múltiplos saltos nível 2 como uma extensão das funcionalidades da camada MAC (*Medium Access Control*).

A primeira abordagem tem sido utilizada nas diversas implementações em universidades, como a Universidade Federal Fluminense (UFF) [Saade et al., 2007] e Massachusetts Institute of Technology (MIT) [Bicket et al., 2005], e nas chamadas cidades digitais, como as desenvolvidas em Philadelphia (USA) [Wireless Philadelphia, 2009], Dublin (Irlanda) [Weber et al., 2003], Tiradentes (Brasil) [Tiradentes Digital, 2010] e em alguns bairros na cidade do Rio de Janeiro. A implementação do encaminhamento em múltiplos saltos se baseia nos protocolos de roteamento *ad hoc*, porém através de novas métricas, além do número mínimo de saltos, mais adequadas às características das redes em malha.

A segunda abordagem está sendo padronizada pelo IEEE (*Institute of Electrical and Eletronic Engineers*) no padrão IEEE 802.11s [IEEE P802.11s, 2009] e propõe novos mecanismos para o encaminhamento em múltiplos saltos no nível 2, além de outras possibilidades para controle de acesso ao meio.

Outra tendência marcante que se pode observar atualmente é a convergência de mídias, onde dados, voz e vídeo trafegam sobre a mesma infraestrutura, reduzindo investimento inicial, custos de manutenção e tempo de oferta dos serviços. O protocolo que cria o caminho para esse tráfego convergente é o IP (*Internet*

Protocol) que se baseia em um serviço de melhor esforço (*best effort*), sem nenhum tipo de garantia de entrega.

No início, a simples disponibilidade do serviço e a acessibilidade a partir dos mais variados dispositivos eram suficientes para atrair o interesse dos usuários. Com o amadurecimento do mercado, a experiência destes usuários e a proliferação de novos serviços baseados em voz e vídeo, uma rede baseada em melhor esforço não atende mais a suas expectativas. Os usuários tendem a comparar os novos serviços providos sobre a rede IP com os serviços tradicionais sobre circuitos dedicados. Para alcançar esse objetivo, faz-se necessária a implementação de mecanismos de qualidade de serviço (QoS) que garantam os requisitos de desempenho de cada tipo de aplicação.

A implementação destes mecanismos através da Internet já é uma tarefa desafiadora pelos requisitos restritos de retardo e variação do retardo dessas aplicações multimídia, como voz sobre IP (VoIP) e *streaming* de vídeo, dentre outras, além do caráter descentralizado da rede. Considerando o ambiente sem fio, os desafios se tornam ainda maiores, em função da banda limitada, canais de rádio mais suscetíveis a erros e afetados por multipercurso, áreas de sombra, interferências de sinal e climáticas, dentre outros fatores. Com isso, o fornecimento de QoS em redes sem fio se tornou uma área de grande interesse dos pesquisadores, resultando em padrões como o IEEE 802.11e [IEEE P802.11, 2007] e o *WiFi Multimedia (WMM)* da *WiFi Alliance* [Da Conceição, 2006], que constitui um subconjunto do padrão IEEE 802.11e lançado antes da conclusão deste.

Os desafios para implementação de QoS em redes sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11 vão desde qualidade dos enlaces e interferências até características do próprio padrão. Na literatura, existem diversas abordagens para tratar esses desafios, classificadas em função da camada do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) em que atuam.

1.1. MOTIVAÇÃO

As redes em malha sem fio possuem características exclusivas que as distinguem das redes sem fio tradicionalmente implantadas, o que constitui um novo desafio na implementação de QoS e na oferta de serviços com o nível de qualidade requerido. Os roteadores sem fio disponíveis no mercado implementam mecanismos para oferta de QoS baseados no WMM da WiFi Alliance ou no padrão IEEE 802.11e,

que introduzem novos mecanismos e parâmetros de acesso ao meio para diferenciar e priorizar os diversos tipos de tráfego.

O padrão IEEE 802.11e define quatro parâmetros para prover diferenciação no acesso ao meio e recomenda valores padrões de acordo com a camada física implementada (IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, etc). Os fluxos são classificados em categorias de acesso, às quais são atribuídos os conjuntos de parâmetros. Tais parâmetros estão relacionados ao tempo em que o meio deve ser considerado livre antes da transmissão de um quadro ou do início do processo de *backoff* (AIFS), à faixa de escolha do valor de *backoff* (CW_{min} e CW_{max}) e à possibilidade de transmissão de rajadas de quadros (TXOPLimit). Os mecanismos introduzidos pelo padrão serão melhor detalhados no Capítulo 2.

No entanto, a utilização direta dos valores padrões não é adequada a todo cenário de rede, pois o padrão não define como os parâmetros se relacionam às características da rede, como padrão de tráfego, carga na rede, padrão de mobilidade, dentre outros, de modo a utilizar de forma eficiente os recursos do canal ou prover compartilhamento justo desses recursos entre as classes ou oferecer garantia de serviço para as classes com requisitos restritos de retardo e variação do retardo, como o tráfego de voz.

É previsto que os parâmetros possam ser alterados dinamicamente de acordo com as características da rede. O AP seria o responsável pelo cálculo e anúncio dos novos parâmetros em função de critérios ou algoritmos a serem definidos em cada implementação. Essa solução, contudo, não é aplicável ao ambiente distribuído de uma rede em malha sem fio.

O padrão estabelece toda a responsabilidade pela aplicação das políticas de QoS sobre o AP focando em redes sem fio infraestruturadas de único salto, onde a topologia em estrela torna o padrão de tráfego mais simples. As topologias em múltiplos saltos são mais suscetíveis aos problemas do “terminal escondido” e do “terminal exposto” [Xu e Saadawl, 2001], que degradam o desempenho da rede pelo aumento da taxa de colisão e pelo desperdício de recursos, respectivamente. O padrão IEEE 802.11e não se propõe a mitigar esse tipo de problema, sendo pouco efetivo na provisão de QoS em redes com encaminhamento em múltiplos saltos.

A classificação e priorização do tráfego em redes *ad hoc* é prevista, mas está fora do escopo do padrão. Os nós *mesh* não possuem visibilidade completa da rede, necessitando de uma coordenação distribuída.

Além disso, a prioridade de acesso ao meio é estatística, não sendo oferecido nenhum tipo de garantia de serviço. O padrão recomenda um mecanismo de controle de admissão, implementado no AP, e sugere um algoritmo.

Essa adaptação de forma dinâmica dos parâmetros definidos pelo padrão de acordo com os cenários específicos de implementação, além de oferecer garantia de serviço e compartilhar de forma justa os recursos, é foco de diversas linhas de pesquisa. A maioria desses trabalhos, contudo, se baseia em redes infraestruturadas. Muitos deles requerem alterações na camada MAC, tornando sua implementação prática complexa.

1.2. OBJETIVO

O objetivo desta dissertação é propor uma solução de QoS para a camada MAC dos nós que compõem o *backbone* de uma rede em malha sem fio, que ofereça garantia de serviço ao tráfego de voz, sem degradar significativamente o desempenho das demais categorias. A solução deve ser compatível com o padrão IEEE 802.11e, requerendo pouca ou nenhuma intervenção nos mecanismos de acesso ao meio e priorização estabelecidos no padrão, o que facilita sua implementação prática em redes reais. Algumas propostas de configurações serão testadas com diversos cenários de carga de uma rede em malha sem fio, e será verificada sua escalabilidade em termos do número de fluxos concorrentes em um ambiente multimídia com diversos tipos de tráfego e em termos da quantidade de nós na rede.

A solução apresentada se baseia em um mecanismo de garantia de serviço, proposto em outros trabalhos da literatura [Lee et al., 2009], que não requer uma coordenação centralizada entre os nós. Como pré-requisito para definição da proposta, foi feita uma análise da influência da variação dos parâmetros configuráveis definidos no padrão IEEE 802.11e em algumas métricas de QoS, como vazão, retardo, perda de pacotes e taxa de colisão, em vários cenários através de simulação. A partir dessas análises, esta dissertação propõe uma combinação do mecanismo de garantia de serviço para o tráfego de voz apresentado em [Lee et al., 2009] com um ajuste das janelas de contenção para todas as categorias de acesso e com uma nova proposta de ajuste dinâmico do parâmetro definido no padrão para limitar o tráfego em rajada (TXOPLimit) baseada no trabalho de [Adlen et al., 2005].

O escopo deste estudo se restringe ao oferecimento de QoS na camada MAC ao chamado tráfego de *backbone* conforme será explicado no Capítulo 3, assumindo que o tráfego de acesso tenha sido previamente classificado nas classes de serviço apropriadas, de acordo com a tecnologia de acesso utilizada. O mapeamento das classes de serviço do tráfego de acesso nas classes de serviço do tráfego de *backbone* não será discutido neste trabalho. O objetivo das análises foi obter um conjunto de parâmetros de acesso ao meio que oferecesse a QoS requerida por cada classe de serviço. Sendo assim, foi considerado que a categoria de voz é mais sensível ao atraso fim-a-fim, devendo este ser inferior a 150ms, e à perda de pacotes, que deve se manter entre 1% e 3% [Kawata e Yamada, 2007]. A categoria de vídeo requer baixa taxa de perda de pacotes e uma vazão média consistente. Dependendo da codificação de vídeo utilizada na prática, a taxa de transferência é variável e a importância de cada pacote é relativa ao tipo de quadro de vídeo transportado, porém para simplificação, a taxa foi considerada constante e todos os pacotes possuem igual importância. Os conjuntos de parâmetros devem garantir também que as categorias de menor prioridade não sofram *starvation* e devem impedir que elas consumam todos os recursos do canal, degradando a qualidade das categorias de maior prioridade.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada da seguinte forma. O Capítulo 2 explica os mecanismos de QoS introduzidos pelo padrão IEEE 802.11e, contemplando o mapeamento do tráfego nas categorias de acesso, os modos de acesso ao meio e seus respectivos parâmetros, novos esquemas de reconhecimento dos quadros e controle de admissão.

O Capítulo 3 apresenta os desafios envolvidos na implementação de QoS em redes em malha sem fio e alguns trabalhos relacionados que visam a tratar alguns desses desafios.

O Capítulo 4 descreve a metodologia utilizada na análise realizada nesta dissertação, as soluções propostas, os cenários de simulação utilizados para avaliá-las e as ferramentas que deram suporte a estas análises.

O Capítulo 5 analisa os resultados obtidos a partir das simulações dos cenários apresentados no Capítulo 4 e aponta as soluções mais adequadas.

Finalmente, o Capítulo 6 conclui a dissertação, destacando as principais contribuições e indicando os trabalhos futuros.

2. PADRÃO IEEE 802.11E

O padrão IEEE 802.11e [IEEE P802.11, 2007] foi concluído em julho de 2005 como uma extensão do padrão IEEE 802.11 para prover QoS para as transmissões no meio compartilhado em redes locais sem fio.

As principais funcionalidades introduzidas para alcançar este objetivo foram:

- Definição de 8 níveis de prioridade de tráfego (baseados naqueles definidos no padrão IEEE 802.1D/802.1Q) e 8 fluxos de tráfego (*traffic stream – TS*) atribuídos pelas camadas superiores;
- Mapeamento dos níveis de prioridade em 4 categorias de acesso (*access categories – AC*), que compõem filas com diferentes probabilidades de acesso ao meio definidas por parâmetros como intervalos de *backoff*, intervalos entre quadros, dentre outros;
- Oportunidades de transmissão sem contenção limitadas a um determinado intervalo de tempo por classe (*TXOPLimit*);
- Definição de dois modos de operação, com contenção (*Enhanced Distributed Channel Access – EDCA*) e sem contenção (*Hybrid Coordination Function Controlled Channel Access – HCCA*).

O padrão define funcionalidades opcionais que podem ser implementadas para melhorar o desempenho da rede:

- Definição de um serviço de sincronismo de camadas superiores para aplicações de áudio ou vídeo que requeiram uma maior precisão de sincronismo que aquela fornecida pela função de sincronismo da BSS (*Basic Service Set*);
- Definição dos modos de reconhecimento *BlockACK* e *NoACK*;
- Definição do estabelecimento de um enlace direto entre estações para tráfego de dados sem intermédio do AP denominado *Direct Link Setup – DLS*;
- Definição do modo automático de entrega de quadros para economia de energia (*Automatic Power-Save Delivery – APSD*).

A arquitetura proposta mantém a base no modo de acesso ao meio DCF (*Distributed Coordination Function*) conforme a Figura 1.

Tabela 1: Significado dos subcampos do campo QoS Control do Quadro 802.11.

Applicable frame (sub) types	Bits 0–3	Bit 4	Bit 5-6	Bit 7	Bits 8–15
QoS (+)CF-Poll frames sent by HC	TID	EOSP	Ack Policy	Reserved	TXOP Limit
QoS Data, QoS Null, and QoS Data+CF-Ack frames sent by HC	TID	EOSP	Ack Policy	Reserved	QAP PS Buffer State
QoS data frames sent by non-AP QSTAs	TID	0	Ack Policy	Reserved	TXOP Duration Requested
	TID	1	Ack Policy	Reserved	Queue Size

Fonte [IEEE P802.11, 2007]

O subcampo TID (*Traffic Identifier*) indica a prioridade da AC ou TS a que o quadro pertence ou para a qual se está solicitando uma oportunidade de transmissão (TXOP).

O subcampo EOSP (*End of Service Period*) é definido como 1 pelo *Hybrid Coordinator* (HC) colocalizado no AP para indicar o fim do período de serviço (*Service Period – SP*) agendado ou não-agendado.

O subcampo *Ack Policy* identifica o modo de reconhecimento que o quadro usará. Dentre os valores possíveis, estão *Normal Ack*, *Block Ack* e *No Ack*.

TXOP Limit é o tempo em múltiplos de 32 microssegundos atribuído pelo HC à estação endereçada para a transmissão do tráfego indicado por TID. Essa informação é usada no modo de acesso controlado quando o HC faz o *polling* das estações.

Os subcampos *TXOP Duration Requested* e *Queue Size* são utilizados pelas estações para indicar sua necessidade de tempo de transmissão para o tráfego identificado por TID e pelo HC para calcular o TXOP que será atribuído a cada estação.

O subcampo *QAP PS Buffer State* indica o estado do *buffer* de armazenamento de quadros para a estação endereçada que esteja operando em modo de economia de energia.

As estações e o AP indicam no subcampo QoS do campo *Capability Information* dos quadros de controle sua capacidade de implementar QoS, indicando também sua capacidade de implementar o mecanismo de economia de energia APSD no subcampo APSD e o mecanismo de *Block Ack* utilizado atualizando o subcampo *Immediate Block Ack* ou *Delayed Block Ack* de acordo.

2.1. HCF

O *Hybrid Coordination Function* (HCF) é um modo de acesso ao meio definido pelo padrão que deve ser implementado por todas as estações que provêm QoS e que combina funções dos modos DCF e PCF (*Point Coordination Function*) com mecanismos e subtipos de quadros específicos para a implementação de QoS durante os períodos com e sem contenção.

O HCF usa um método baseado em contenção denominado EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) e um método de acesso controlado chamado HCCA (*HCF Controlled Channel Access*). As estações podem obter TXOP's tanto através de um método quanto do outro. Uma TXOP é determinada por um início e uma duração máxima definida. Esta duração não pode ultrapassar o intervalo de *beacons* de modo a evitar atrasos no estabelecimento do período sem contenção proposto para aplicações periódicas com restrições de atraso.

2.1.1. EDCA

O mecanismo *Enhanced Distributed Channel Access* (EDCA) provê acesso diferenciado ao meio usando oito níveis de prioridade mapeados em quatro categorias de acesso conforme Tabela 2.

Tabela 2: Mapeamento dos Níveis de Prioridade de Tráfego em Categorias de Acesso.

Priority	UP (Same as 802.1D user priority)	802.1D designation	AC	Designation (informative)
Lowest ↓ Highest	1	BK	AC_BK	Background
	2	—	AC_BK	Background
	0	BE	AC_BE	Best Effort
	3	EE	AC_BE	Best Effort
	4	CL	AC_VI	Video
	5	VI	AC_VI	Video
	6	VO	AC_VO	Voice
	7	NC	AC_VO	Voice

Fonte [IEEE P802.11, 2007]

Para cada AC, o modo distribuído DCF é estendido através da introdução de uma instância própria de *backoff* utilizando os seguintes parâmetros de acesso ao meio [Mangold et al., 2003]:

- *AIFS – Arbitration Interframe Space*: período de tempo durante o qual uma instância de *backoff* deve verificar o meio como livre antes de iniciar a transmissão ou de iniciar o processo de *backoff*. Seu cálculo é feito através da fórmula (1)

$$AIFS[AC] = aSIFSTime + AIFSN[AC] * \delta \quad (1),$$

onde *aSIFSTime* é o *Short Interframe Space*, *AIFSN[AC]* é um inteiro positivo maior ou igual a 2 para estações que não exercem a função de AP e maior ou igual a 1 para AP's e δ é um *slot* de tempo. Categorias de acesso com maior prioridade possuem um AIFS menor. Para $AIFSN = 2$, $AIFS[AC] = DIFS$ (*DCF Interframe Space*). A Figura 3 ilustra a relação entre os IFS's (*Interframe Spaces*);

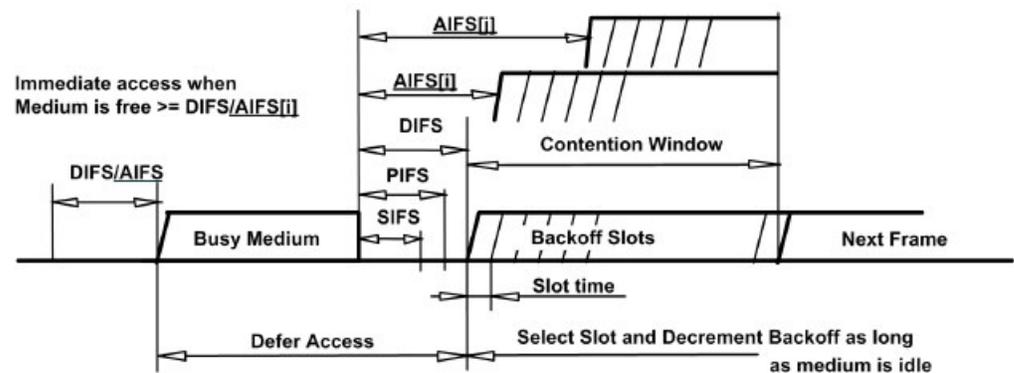


Figura 3: Relação entre os IFS's.

Fonte [IEEE P802.11, 2007]

- Tamanhos mínimo (CW_{min}) e máximo (CW_{max}) da janela de contenção: faixa de incremento da janela de contenção mediante o não reconhecimento de quadros enviados. AC's de maior prioridade possuem menores valores de CW_{min} e CW_{max} ;
- Limite da oportunidade de transmissão (TXOPLimit): período de tempo no qual uma AC pode transmitir quadros em sequência separados por SIFS sem ter que disputar o acesso ao meio a cada quadro. O limite é definido por AC.

A Figura 4 ilustra a arquitetura de referência das instâncias de EDCAF's (*EDCA Function*) por AC e o mapeamento dos quadros em suas AC's correspondentes.

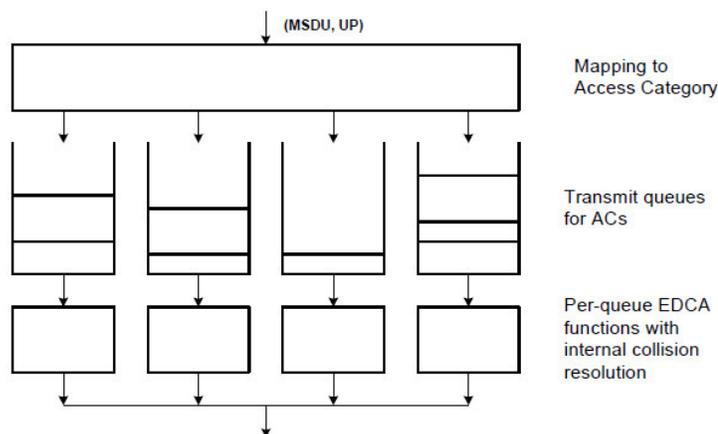


Figura 4: Arquitetura de Referência das EDCAFs.

Fonte [IEEE P802.11, 2007]

Cada instância de EDCAF compete pelo acesso ao meio de forma independente, inclusive com estações que não suportem QoS. Estas estações que não suportam QoS se posicionam na “priorização” pelo acesso ao meio aproximadamente entre as AC’s de maior prioridade (AC_VO e AC_VI) e as de menor prioridade (AC_BE e AC_BK). Segundo a definição do padrão, o intervalo DIFS equivale ao intervalo AIFS para as AC’s de maior prioridade, porém estas possuem janelas de contenção mínima e máxima menores, e os valores de CW_{min} e CW_{max} das estações sem QoS são os mesmos das de menor prioridade, que apresentam AIFS’s maiores. De qualquer forma, isso é apenas uma tendência de prioridade de acesso, visto que todo o processo é aleatório.

É possível que mais de uma AC dentro de uma mesma estação escolha o mesmo *slot* de tempo para iniciar a sua transmissão. Nesse caso, ocorre uma “colisão virtual” e a AC de maior prioridade transmite enquanto que as demais agem como se houvesse uma colisão externa, incrementando o contador de retentativas correspondente, duplicando sua janela de contenção e iniciando novo processo de *backoff*. A exceção é que no caso de uma colisão virtual o *bit* de retentativa não é ativado no campo *Frame Control* do quadro.

A cada EDCAF, só é permitida uma das seguintes ações em cada fronteira de *slot* de tempo:

- Iniciar a transmissão de uma sequência de troca de quadros;
- Decrementar o contador de *backoff*;
- Iniciar o processo de *backoff* devido a uma colisão interna;
- Nenhuma ação.

Essa definição implica que a transmissão do quadro só pode ocorrer no *slot* de tempo seguinte ao decremento do contador de *backoff* para zero, diferentemente do previsto no mecanismo de acesso ao meio DCF.

O padrão especifica a utilização dos parâmetros EDCA em redes infraestruturadas, onde o AP é responsável por divulgar tais valores nos quadros de *beacons* [Choi et al., 2003], de (re)associação e em todos os *Probe Responses*, de modo que todas as estações utilizem os mesmos valores e permitindo que o AP os altere em função de algum critério, como carga da rede, porém sem determinar de que forma seria feita a adaptação. O AP pode usar parâmetros EDCA diferentes daqueles que anuncia. Para o modo *ad hoc* ou caso a estação não receba o elemento *EDCA Parameter Set* nestes quadros, devem ser utilizados os valores padrão.

A Figura 5 ilustra o elemento *EDCA Parameter Set*. Os campos de *Parameter Record* de cada AC contêm as informações de AIFSN, ACM (*Admission Control Mandatory* – identifica se o controle de admissão é obrigatório para esta AC), ACI (*AC Index* – referencia a qual AC se aplicam os parâmetros), CW_{min} , CW_{max} e TXOP Limit.

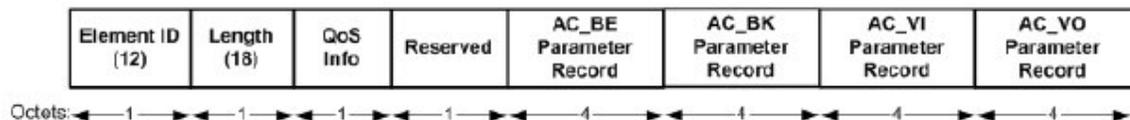


Figura 5: Formato do Elemento EDCA Parameter Set.

Fonte [IEEE P802.11, 2007]

O campo de *QoS Info*, quando enviado por um AP, possui o formato ilustrado na Figura 6, onde *EDCA Parameter Set Update Count* permite que as estações verifiquem se estão usando a versão mais atual dos parâmetros EDCA anunciados pelo AP, *Q-Ack* indica se a BSS suporta o envio de um reconhecimento (ACK) para uma estação “de carona” em um quadro de dados para outra estação, e *Queue Request* e *TXOP Request* indicam se esses tipos de requisição são suportados na BSS, respectivamente.

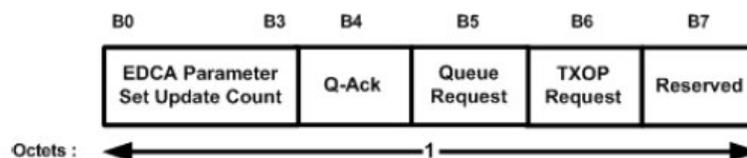


Figura 6: Formato do Campo QoS Info quando enviado por um AP.

Fonte [IEEE P802.11, 2007]

Já o campo de *QoS Info* enviado por uma estação que não exerce a função de AP é ilustrado na Figura 7, onde cada subcampo *U-APSD Flag* indica qual o modo de economia de energia para cada AC, *Q-Ack* indica o suporte ao recebimento de reconhecimento enviado “de carona” no quadro de dados endereçado a outra estação e os dois últimos campos se relacionam com a forma de entrega de quadros para estações que estejam utilizando o mecanismo de economia de energia APSD.

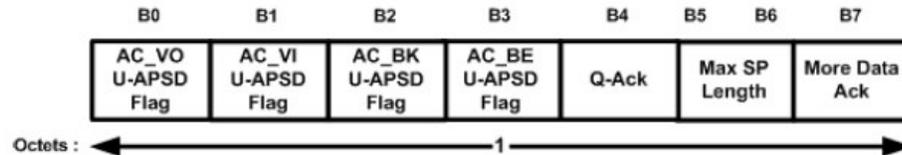


Figura 7: Formato do Campo QoS Info quando enviado por uma estação que não exerce a função de AP.

Fonte [IEEE P802.11, 2007]

Além dos valores dos parâmetros mapeados no campo *EDCA Parameter Set*, os *beacons* também carregam informações para o algoritmo de controle de admissão (dependente de implementação de cada fabricante) no campo de *QBSS Load*, como quantidade de estações na BSS, utilização do meio (percepção do AP sobre a ocupação do canal em função de *physical* ou *virtual carrier sense*) e tempo disponível de acesso ao meio após o controle de admissão explícito, e de funcionalidades implementadas de QoS no campo *QoS Capability* (este último apenas quando o campo *EDCA Parameter Set* não é enviado), que também contém o subcampo *QoS Info*.

Os valores padrão dos parâmetros EDCA de cada AC são calculados conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Valores Padrão dos Parâmetros de Acesso ao Meio.

AC	CWmin	CWmax	AIFSN	TXOP limit		
				For PHYs defined in Clause 15 and Clause 18	For PHYs defined in Clause 17 and Clause 19	Other PHYs
AC_BK	aCWmin	aCWmax	7	0	0	0
AC_BE	aCWmin	aCWmax	3	0	0	0
AC_VI	$(aCWmin+1)/2 - 1$	aCWmin	2	6.016 ms	3.008 ms	0
AC_VO	$(aCWmin+1)/4 - 1$	$(aCWmin+1)/2 - 1$	2	3.264 ms	1.504 ms	0

Fonte [IEEE P802.11, 2007]

Os quadros de controle devem ser enviados através da categoria AC_VO sem controle de admissão, com exceção dos quadros de *Block Ack Request*, *Block Ack* e

RTS/CTS (*Request-to-Send/Clear-to-Send*), que devem ser enviados com a mesma categoria que os quadros de dados a que se referem.

Quando uma estação detecta um quadro com erro, ela passa a esperar EIFS-DIFS+AIFS[AC] para garantir que as estações envolvidas nesta comunicação completem a sequência de troca de quadros, ao invés de EIFS como no modo de acesso DCF. Caso a estação receba um quadro sem erros, ela se considera resincronizada e pode retornar aos mecanismos padrões de acesso ao meio, utilizando AIFS[AC] e *backoff*, conforme necessário.

O processo de *backoff* e de ajuste da janela de contenção não sofreu alteração. Dessa forma, caso haja uma colisão, a janela de contenção corrente CW[AC] é duplicada até atingir o valor máximo $CW_{max}[AC]$ e quando a transmissão de um quadro é bem-sucedida, CW[AC] é reiniciada com o valor mínimo $CW_{min}[AC]$.

O número aleatório é escolhido na faixa $[0, CW[AC]]$, inclusive. Cada AC tem seus próprios contadores de tentativas, além dos contadores relacionados a cada MSDU (*MAC Service Data Unit*) ou quadro de controle.

2.1.2. HCCA

No mecanismo *Hybrid Coordination Function Controlled Channel Access* (HCCA), o AP exerce o papel de HC (*Hybrid Coordinator*) e utiliza regras diferentes do PC (*Point Coordinator*) do PCF. Ele é responsável por prover a fase de acesso controlado (*Controlled Access Phase – CAP*) para transferência de dados sem contenção, receber as reservas de transmissões das estações, calcular as oportunidades de transmissão para cada reserva solicitada e fazer o *polling* das AC's que reservaram TXOP's.

O HC pode atender também estações que não implementem QoS agindo como se fosse um PC, porém isso torna todo o mecanismo mais complexo e tende a degradar o desempenho da rede como um todo.

O HC ganha o controle do acesso ao meio por utilizar um tempo menor de verificação do meio como livre que as demais estações, PIFS (*PCF Interframe Space*), da mesma forma que o PC no PCF. Ele pode atribuir TXOP's através de quadros de *polling* tanto nos períodos de contenção quanto nos períodos sem contenção.

Um SP (*service period*) é um período submúltiplo do intervalo entre *beacons* que equivale ao *superframe* definido no padrão 802.11. O período de contenção

controlada é iniciado por um quadro específico, emitido pelo HC, que contém uma máscara indicando quais as AC's permitidas durante esse período. As estações, então, enviam requisições de reserva de TXOP nos campos de *QoS Control* de quadros de dados dessas AC's endereçados ao HC, contendo as especificações dos fluxos de tráfego no elemento TSPEC. A Figura 8, retirada de [Ramos et al., 2005], ilustra o esquema de acesso ao meio do modo HCCA.

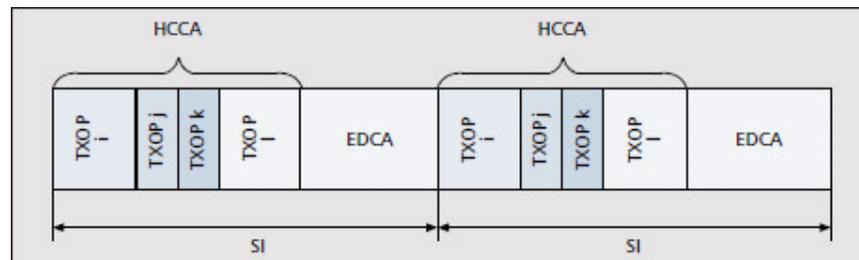


Figura 8: Esquema de acesso ao meio do modo HCCA.

Fonte [Ramos et al., 2005]

O formato do elemento TSPEC, utilizado na negociação do estabelecimento de um TS, é apresentado na Figura 9. Os campos após *TS Info* podem ser nulos caso não sejam especificados e podem ser modificados pelo HC como sugestão de parâmetros viáveis.

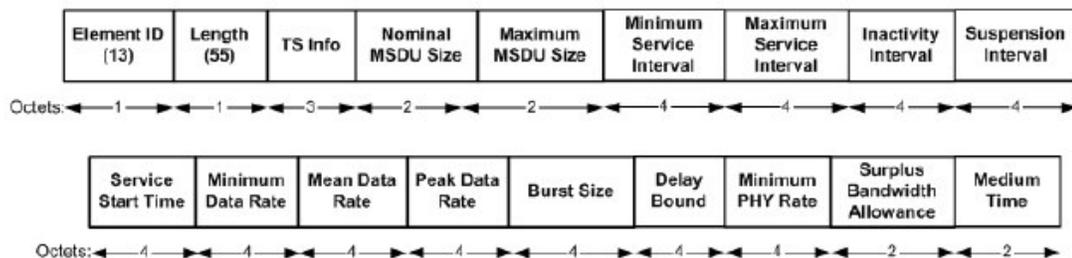


Figura 9: Formato do Elemento TSPEC.

Fonte [IEEE P802.11, 2007]

A estrutura do campo *TS Info* é mostrada na Figura 10 e identifica, nesta ordem:

- se o tráfego é periódico ou assíncrono/não especificado;
- o ID do TS sendo estabelecido;
- a direção do tráfego (*uplink*, *downlink*, *direct link* ou bidirecional);
- o mecanismo de acesso (EDCA, HCCA ou misto);
- a utilização ou não de um agendamento agregado de entrega das AC's quando a estação implementa o mecanismo de economia de energia APSD;
- o uso do mecanismo de economia de energia APSD;

- a prioridade do tráfego;
- a política de reconhecimento;
- o tipo de agendamento da entrega de quadros quando a estação implementa o mecanismo de economia de energia APSD.

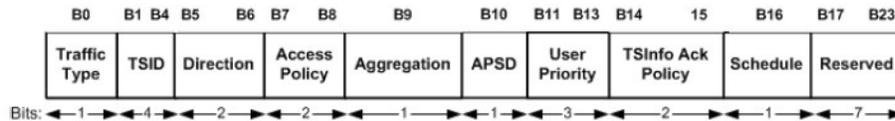


Figura 10: Formato do Campo TS Info.

Fonte [IEEE P802.11, 2007]

Os demais campos de TSPEC definem:

- o tamanho nominal da MSDU, indicando se esse tamanho é fixo ou variável;
- o tamanho máximo da MSDU;
- a duração mínima e máxima do *Service Interval* (SI), que é o tempo entre dois períodos de serviço (SP) consecutivos;
- o tempo de inatividade depois do qual, caso não haja tráfego, o HC pode encerrar o TS;
- o tempo de suspensão, menor que o de inatividade, depois do qual o HC para de enviar quadros de *polling* para este TS;
- o início do período de serviço;
- a taxa de dados mínima, média e de pico (que não incluem os *overheads* das camadas física e MAC);
- o tamanho máximo do excesso de quadros que é enviado na taxa de pico;
- o atraso máximo tolerado desde o envio do quadro até o recebimento do seu reconhecimento;
- a taxa mínima da camada física;
- o excesso de quadros que se permite transmitir além da taxa solicitada, para que a probabilidade de quadros bem-sucedidos transmitidos dentro do atraso máximo tolerado esteja dentro de determinado valor pré-definido;
- o tempo de acesso ao meio atribuído pelo HC a esse TS após efetuar o controle de admissão.

O elemento TCLAS contém as informações necessárias para classificar determinado quadro com um TS estabelecido, incluindo a prioridade e parâmetros Ethernet ou IP TCP/UDP ou IEEE 802.1Q/D.

A estação só pode enviar quadros de um TS estabelecido no período com contenção caso a política de acesso negociada seja a mista (HCCA e EDCA) e haja mais quadros a serem transmitidos após a conclusão do período sem contenção.

2.2. TRANSMISSÃO DE MÚLTIPLOS QUADROS (*CFB – CONTENTION FREE BURST*)

A transmissão de múltiplos quadros dentro de uma mesma TXOP é permitida desde que os quadros pertençam à mesma AC. Essa intenção deve ser indicada pela estação especificando adequadamente o campo de *Duration/ID* dos quadros de modo a considerar a transmissão da rajada de quadros, seus respectivos reconhecimentos e os intervalos SIFS entre cada um. Cada sequência de troca de quadros é separada por SIFS e é restrita ao valor de *TXOP Limit* em uso para cada AC na BSS.

O limite de uma TXOP é anunciado pelo AP no elemento *EDCA Parameter Set* dos *beacons* e *Probe Responses*. Um valor igual a 0 implica na transmissão de uma única sequência de troca de quadros, que inclui a possível transmissão de um RTS/CTS, a transmissão do quadro em qualquer taxa e do reconhecimento.

Desde que respeitado o limite da TXOP, uma transmissão mal sucedida pode ser recuperada (retransmissão) dentro dessa mesma TXOP. Caso contrário, deve ser iniciado um processo de *backoff*.

Após uma rajada de quadros transmitidos com sucesso, deve ser iniciado o processo de *post-backoff*.

No método HCCA, uma estação que tenha recebido uma TXOP através de *polling* também pode transmitir múltiplos quadros separados por SIFS dentro do limite atribuído pelo HC para a AC/TS que requisitou acesso ao meio.

2.3. MODOS DE RECONHECIMENTO

O padrão prevê dois modos de reconhecimento além do modo já previsto nas versões anteriores (*Normal Ack*): *Block Ack* e *No Ack*. Este último consiste no envio de quadros sem solicitar reconhecimento. É recomendado o uso de algum

mecanismo de proteção (HCCA, RTS/CTS, etc) para reduzir a probabilidade de que outras estações transmitam simultaneamente causando colisão.

O mecanismo de *Block Ack* se propõe a melhorar a eficiência do canal agregando múltiplos reconhecimentos em um único quadro, independente se a funcionalidade de transmissão de múltiplos quadros em rajada (CFB – *Content Free Burst*) foi implementada ou não. São definidos dois métodos: imediato (*Immediate*) e atrasado (*Delayed*). O primeiro é proposto para tráfego de alta taxa e sensível a atraso e o último, para tráfego que tolera um atraso moderado.

Este mecanismo requer uma fase de estabelecimento através da troca dos quadros *ADDBA Request/Response*. Após isso, o reconhecimento dos quadros é solicitado através de um quadro *Block Ack Request* e feito através de um quadro *Block Ack*. Caso o método utilizado seja imediato, o quadro de *Block Ack* é enviado em resposta ao quadro de *Block Ack Request*. Caso seja atrasado, o quadro de *Block Ack Request* é reconhecido com um ACK e o quadro de *Block Ack* é enviado na próxima TXOP obtida usando a mais alta prioridade e também reconhecido por um ACK.

O quadro *ADDBA Request* indica o TID (*Traffic Identifier*) para o qual se está solicitando o mecanismo de *Block Ack*, o método a ser usado (*Immediate* ou *Delayed*) e o tamanho do *buffer* disponível na origem para armazenar os quadros a espera de reconhecimento. O destino pode acatar os valores propostos ou alterá-los de acordo com as suas capacidades, aceitando ou rejeitando o estabelecimento do mecanismo através do envio de um quadro *ADDBA Response*.

A Figura 11 ilustra o formato do quadro de *Block Ack Request*.

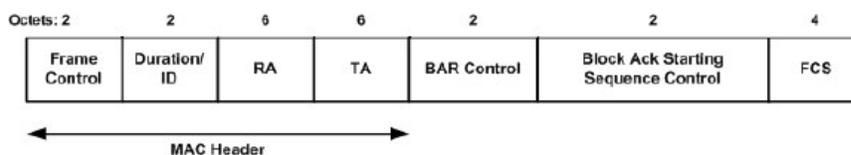


Figura 11: Formato do Quadro Block Ack Request.

Fonte [IEEE P802.11, 2007]

O campo de *BAR Control* contém o TID para o qual se está solicitando um *Block Ack* e o campo *Block Ack Starting Sequence Control*, o número de sequência da primeira MSDU para o qual se está solicitando reconhecimento.

A resposta a esta requisição é o quadro *Block Ack* ilustrado na Figura 12. O campo *BA Control* contém o TID para o qual se está enviando o reconhecimento e o campo *Block Ack Starting Sequence Control*, o número de sequência da primeira

MSDU para o qual se está informando o status de reconhecimento. Cada *bit* i do campo *Block Ack Bitmap* informa se o quadro de número de sequência (*Block Ack Starting Sequence Control* + i) foi recebido com sucesso ($bit = 1$) ou não ($bit = 0$). Os quadros não reconhecidos podem ser retransmitidos como um novo bloco ou individualmente.

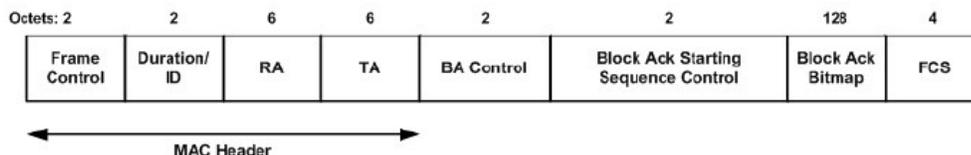


Figura 12: Formato do Quadro Block Ack.

Fonte [IEEE P802.11, 2007]

Os quadros são transmitidos separados por SIFS respeitando o tamanho de *buffer* acordado. O quadro *Block Ack* pode reconhecer quadros de um mesmo TID transmitidos em diferentes TXOP's.

Os quadros transmitidos sob este mecanismo não estão sujeitos aos limites de tentativas, mas apenas ao tempo de vida dos próprios quadros.

A qualquer momento, o mecanismo pode ser encerrado por qualquer das estações envolvidas através do envio de um quadro *DELBA Request*. Ao receber o ACK correspondente, a estação que o enviou considera o mecanismo encerrado.

As estações podem intercalar o envio de quadros com diferentes mecanismos de reconhecimento. No entanto, existe um valor de *timeout*, depois do qual, caso a estação não receba nenhum quadro com o mecanismo *Block Ack* habilitado, o mesmo é encerrado através do envio do quadro *DELBA Request*.

Uma sequência de mensagens trocadas através do mecanismo *Block Ack* é ilustrada na Figura 13.

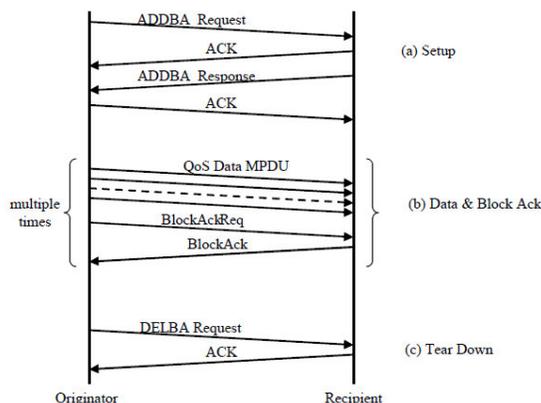


Figura 13: Sequência de Mensagens trocadas para estabelecimento, utilização e encerramento de um mecanismo de Block Ack (Immediate).

Fonte [IEEE P802.11, 2007]

2.4. CONTROLE DE ADMISSÃO

O HC localizado no AP é quem administra o controle de admissão com objetivo de implementar políticas e gerenciar os recursos disponíveis na rede. Existe um mecanismo de controle de admissão para acesso baseado em contenção e outro para acesso controlado.

O padrão especifica a dinâmica de negociação do controle de admissão e as informações que podem ser utilizadas para implementar as políticas porém o algoritmo de controle de admissão propriamente dito é dependente de implementação.

As AC's com controle de admissão especificado como obrigatório não podem transmitir quadros sem utilizar este mecanismo. Caso haja a necessidade de fazê-lo, os quadros devem ser transmitidos utilizando os parâmetros de uma AC de menor prioridade que não exija controle de admissão.

A solicitação de admissão de um fluxo (TS) é feita através do quadro *ADDTS Request*, usado na negociação do estabelecimento de um TS. Neste quadro, indica-se a política de acesso solicitada através do elemento TSPEC. O HC responde aceitando ou negando a solicitação com um quadro *ADDTS Response*. Neste quadro, ele deve indicar o tempo de acesso ao meio atribuído ao solicitante, caso o fluxo seja admitido.

A estação armazena este tempo atribuído pelo HC à variável *admitted_time*. A variável *used_time* controla o tempo gasto para transmissão dos quadros. Caso *used_time* se equipare ou ultrapasse *admitted_time*, a EDCAF não deve enviar mais quadros desta AC. A estação pode solicitar uma nova admissão e, enquanto aguarda o retorno do HC, enviar os quadros utilizando parâmetros de uma AC de menor prioridade que não exija controle de admissão.

No modo controlado (HCCA), o HC é responsável por admitir TS's e agendar seu acesso ao meio em função da especificação enviada na solicitação. O HC não pode alterar ou encerrar um TS a não ser que tenha sido solicitado pela estação que o estabeleceu ou que tenha expirado o tempo de inatividade deste TS. O agendamento do acesso ao meio é informado à estação através do elemento *Schedule* do quadro *ADDTS Response*.

Os parâmetros usados no cálculo do agendamento do acesso ao meio não são definidos pelo padrão, ficando a cargo de cada implementação. Uma proposta de algoritmo é apresentada no Anexo K do padrão [IEEE P802.11, 2007].

3. TRABALHOS RELACIONADOS

3.1. DESAFIOS DE IMPLEMENTAÇÃO DE QOS EM REDES EM MALHA SEM FIO

A qualidade do serviço oferecido por uma rede em malha sem fio depende fundamentalmente da qualidade dos enlaces sem fio, do nível de interferência e da taxa de utilização dos recursos de rádio [Aoki et al., 2006].

Essas redes têm diversos aspectos que tornam sua análise de desempenho mais complexa que as redes sem fio tradicionais. Dentre eles, podemos destacar a competição entre tráfego originado no nó *mesh* e encaminhado pelo nó *mesh*, o decréscimo da banda efetiva com o aumento do número de saltos até o destino e a disputa pelo acesso ao meio de pacotes de um mesmo fluxo entre nós vizinhos.

Características intrínsecas do padrão IEEE 802.11 trazem limitações para os protocolos de camadas superiores identificarem e tratarem o congestionamento. Por exemplo, antes que a perda de um pacote seja notificada a um protocolo de nível superior, o quadro correspondente já foi retransmitido pelo menos quatro vezes (*Short Retry Limit*), segundo valor sugerido do padrão IEEE 802.11. Com isso, a taxa de perda de pacotes não pode ser usada como um parâmetro determinante na análise de desempenho para aplicação de políticas de QoS, pois quando o congestionamento é percebido, a rede já está degradada [Da Conceição, 2006].

Outro exemplo é o mecanismo de Controle Automático de Taxa de Transmissão (*Automatic Rate Control – ARC*), que determina a modulação utilizada em função das condições do canal com o objetivo de explorar o compromisso entre a taxa de erros e a capacidade de transmissão. Muitos dos parâmetros utilizados na determinação da qualidade do enlace sem fio dependem da taxa de transmissão utilizada. O algoritmo de ARC não é definido no padrão, tendo cada fabricante implementado de forma independente [Da Conceição, 2006].

Alguns dos desafios para a implementação de QoS em redes em malha sem fio são detalhados a seguir.

3.1.1. INTERDEPENDÊNCIA ENTRE OS MECANISMOS DA CAMADA MAC E DE SELEÇÃO DE ROTAS

Existem protocolos de roteamento reativos, proativos ou híbridos [Abelém et al., 2007]. Em redes em malha sem fio, o uso de protocolos híbridos pode ser mais adequado [Abelém et al., 2007], pois oferece flexibilidade dependendo da abrangência da rede ou número de nós ativos. Os protocolos proativos, que mantêm rotas para todos os destinos da rede, costumam ser mais vantajosos para redes com menor número de nós ativos, em função do volume necessário de troca de informações de controle entre os nós, enquanto que os protocolos reativos, que descobrem rotas para os destinos apenas de acordo com a demanda de tráfego, costumam se adaptar melhor a redes com maior número de nós.

Como a qualidade de uma rede em malha está intimamente ligada à disponibilidade dos recursos de rádio e à qualidade dos enlaces sem fio, as métricas tradicionais de contagem de saltos precisam ser estendidas para métricas multidimensionais capazes de capturar informações de cada enlace, como potência, qualidade do sinal, dentre outras.

A camada de enlace pode prover a equidade de oportunidades de acesso a nível local, porém, para uma garantia fim-a-fim, é necessário o controle através da camada de rede com protocolos de roteamento que considerem parâmetros de QoS na seleção do melhor caminho para cada tipo de tráfego. Um exemplo de roteamento em que este critério é considerado é ilustrado na Figura 14.

O roteamento é baseado nas classes de tráfego (AF e EF, no exemplo) e não nos fluxos individuais, considerando que o destino é sempre um dos *gateways* para a Internet. O caminho que atender aos requisitos de cada classe, com relação a banda e atraso, é selecionado para rotear o tráfego.

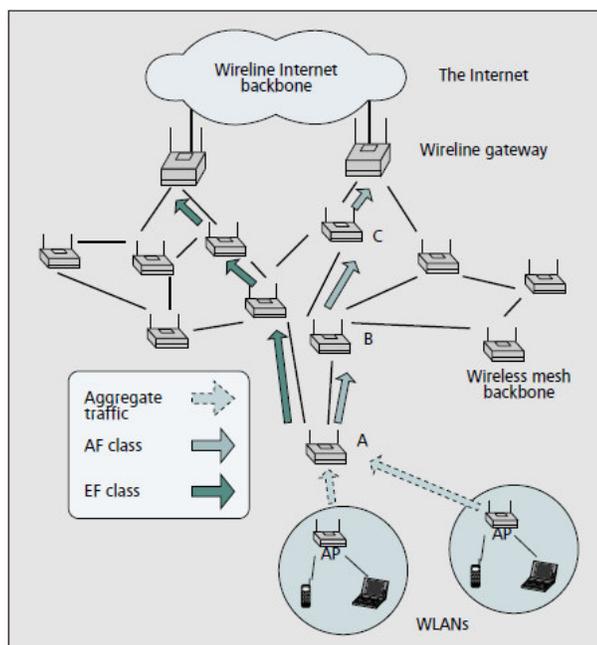


Figura 14: Seleção de rota baseada nos requisitos de QoS do tráfego.

Fonte [Jiang et al., 2006]

Dependendo das informações utilizadas no cálculo da métrica de roteamento, faz-se necessária uma integração entre as funcionalidades das camadas 2 e 3 do modelo OSI, conceito conhecido na literatura como *cross-layer*, o que constitui um grande desafio por estar fora do escopo de padronização tanto do IETF (*Internet Engineering Task Force*) quanto do IEEE [Abelém et al., 2007].

3.1.2. COMPETIÇÃO INTRARROTEADOR E INTERROTEADOR

O meio sem fio é um meio compartilhado com capacidade de difusão (*broadcast*). Dessa forma, para garantir os requisitos de QoS de um pacote, não basta a diferenciação das classes de serviço dentro do próprio nó, através do gerenciamento de filas e de algoritmos de escalonamento, como ocorre nos meios com fio.

Para chegar ao seu destino, o pacote precisa disputar a saída do nó através do esquema de prioridades de filas e escalonamento de serviço das filas apropriados (competição intrarroteador), porém deve disputar também o acesso ao meio a cada salto (competição interroteador), muitas vezes contra pacotes do mesmo fluxo [Acharya et al., 2002], impactando na QoS fim-a-fim da aplicação de forma geral. Um exemplo de competição entre quadros de um mesmo fluxo é ilustrado na Figura 15, considerando um fluxo originado no Nó0 com destino no Nó3.

3.1.3. CAPACIDADE DA REDE

Vários parâmetros da topologia de uma rede em malha podem influenciar em sua capacidade, considerando que a grande maioria dos fluxos de dados converge para o *gateway*. Dentre eles, podemos citar [Gallego, 2005]:

- Número total de nós da rede: a soma das vazões por nó não deve exceder a capacidade do *gateway*. A tendência é que a carga na rede cresça com a quantidade de nós ativos e, com ela, a disputa pelo acesso ao meio;
- Interferência [Nandiraju et al., 2005]: dependendo do modelo de alcance de interferência utilizado, sua influência é maior ou menor. Toda vez que uma estação “ouve” uma transmissão que não é capaz de decodificar, ela deve deixar de transmitir por um período EIFS (*Extended Inter-Frame Space*) de modo a não correr o risco de interferir em outra transmissão em curso. Este modelo faz sentido em uma rede sem fio tradicional em que nenhuma estação está a mais de dois saltos de distância de outra, porém em uma rede de múltiplos saltos, este comportamento afeta a capacidade da rede. Suponha uma rede em cadeia, conforme ilustrado na Figura 15, onde o Nó2 está fora do alcance de transmissão do Nó0 mas dentro de seu alcance de interferência. Cada vez que o Nó1 envia um quadro de dados ao Nó0, o ACK (*Acknowledgement*) enviado pelo Nó0 não é decodificado pelo Nó2 mas é “ouvido”. De acordo com as definições do padrão, o Nó2 deve deixar de transmitir por EIFS, que é o maior intervalo de tempo definido. Com isso, antes que o Nó2 tenha chances de tentar novo acesso ao meio, o Nó1 ou o Nó3 já adquiriram a oportunidade de transmissão;

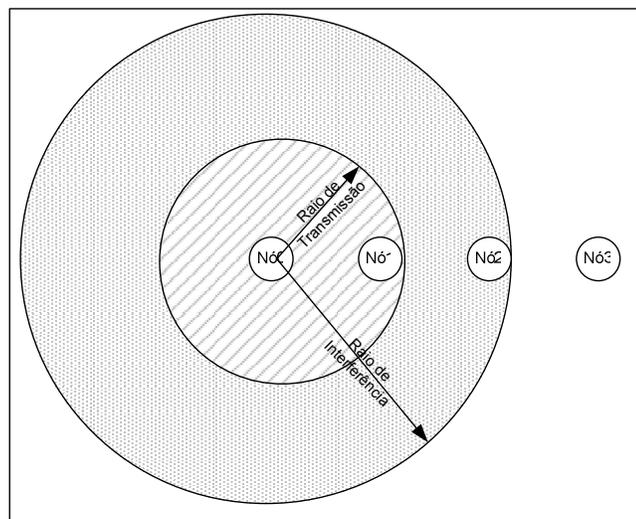


Figura 15: Problemas causados pelo modelo de interferência e características do padrão IEEE 802.11.

- Densidade de nós e sua variação ao longo da rede;
- Posição dos nós e carga oferecida pelos demais nós: os nós que sofrem menos interferência injetam mais tráfego na rede do que seus vizinhos são capazes de repassar;
- Localização e quantidade de *gateways*: parâmetros relacionados à escalabilidade da rede.

Em redes de múltiplos saltos, os problemas do “terminal escondido” e do “terminal exposto” são agravados, tornando o desempenho da rede muito ruim, pois, dependendo do modelo de interferência implementado, os nós não conseguem detectar a disponibilidade dos vizinhos e eventualmente são criados grandes *gaps* de transmissão.

3.1.4. CONTROLE DE ADMISSÃO DE CHAMADAS (CAC)

O mecanismo de controle de admissão de chamadas é necessário em duas situações [Abelém et al., 2007], conforme a Figura 16: no tráfego de acesso, de modo a balancear o tráfego de entrada na rede e o tráfego encaminhado pelo nó, e no tráfego de *backbone* entre os nós *mesh*, para controle da carga da rede.

Este mecanismo deve se basear na capacidade disponível da rede, no tipo de tráfego e nos requisitos de QoS do mesmo para determinar se a rede é capaz de aceitar o novo fluxo sem degradar aqueles em curso e garantindo-lhe uma QoS mínima.

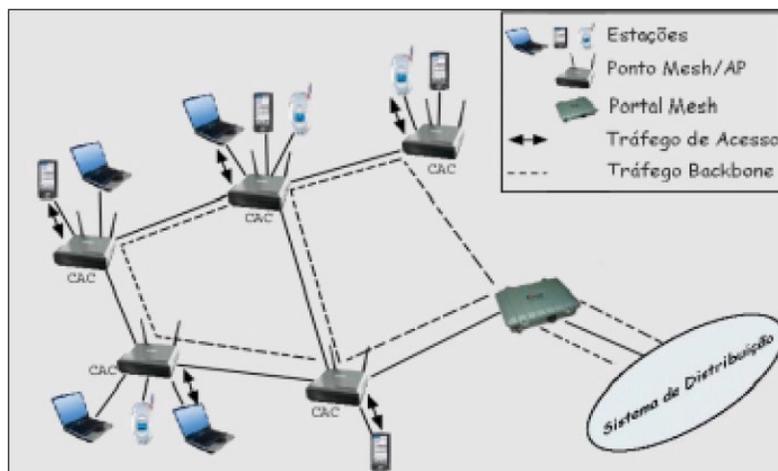


Figura 16: Duas situações em que o mecanismo de CAC se faz necessário.

Fonte [Abelém et al., 2007]

3.1.5. QOS FIM-A-FIM

Este item depende da capacidade de negociação e adaptação dos níveis de serviço oferecidos pelas diferentes redes ou domínios administrativos através dos quais uma conexão trafega.

Cada rede pode selecionar, modificar ou trocar seu mecanismo de gerenciamento de recursos para implementar seu nível de serviço com as redes vizinhas, de forma independente. A qualidade de serviço fim-a-fim será garantida com os níveis de serviço sendo atendidos em cada rede [Jiang et al., 2006] [Abelém et al., 2007].

3.1.6. MECANISMOS DE NEGOCIAÇÃO DE NÍVEIS DE SERVIÇO (SERVICE LEVEL AGREEMENT – SLA)

Em redes *DiffServ* cabeadas [Jiang et al., 2006] [Pedatella, 2003], muitas vezes existe a figura de um *Bandwidth Broker* que centraliza as políticas de QoS do domínio, as aplica nos nós e negocia os níveis de serviço com outros domínios.

Nas redes em malha sem fio, os mecanismos que regem a rede são essencialmente distribuídos, introduzindo um novo desafio para esta negociação de níveis de serviço entre domínios diferentes.

3.1.7. DIFERENCIAÇÃO ENTRE TRÁFEGO DE ACESSO E TRÁFEGO DE *BACKBONE*

Os nós de uma rede em malha podem exercer funções apenas de núcleo de rede ou associar a estas, funções de ponto de acesso. Com isso, existem dois tipos de tráfego concorrentes, que influenciam na capacidade da rede, no controle de fluxo, no gerenciamento das filas e do espaço em *buffer* e na diferenciação dos serviços: o tráfego de acesso, de único salto, e o de *backbone*, de múltiplos saltos, como ilustrado na Figura 16.

3.1.8. BALANCEAMENTO DE CARGA

A implementação de mecanismos de balanceamento de carga distribui melhor a carga na rede, evitando atrasos, descarte de pacotes ou sobrecarga de um determinado nó ou *gateway* [Abelém et al., 2007]. Isso pode ser obtido com protocolos de roteamento multicaminho, desde que haja algum mecanismo de evitar que o tráfego de um mesmo fluxo passando por caminhos diferentes compita entre si reduzindo a eficiência.

3.1.9. POSICIONAMENTO MÍNIMO DE *GATEWAYS* NA REDE

Quanto maior a distância em saltos de um nó ao destino de seu tráfego, maior a influência do conflito espacial e dos próprios mecanismos de acesso ao meio do padrão IEEE 802.11 na vazão alcançada pelo nó [Gallego, 2005].

Dessa forma, considerando-se que a maior parte do tráfego em uma rede em malha é direcionada a um *gateway*, a otimização de sua posição e de sua quantidade é de suma importância para maximizar a vazão dos nós e consequentemente a capacidade da rede.

3.1.10. ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA

A provisão de QoS em redes em malha deve considerar a escalabilidade visto que estas redes tendem a crescer e conter até centenas de equipamentos. Este ponto traz a consideração de que o aumento da potência e consequentemente do alcance de transmissão incrementa as perdas de forma quadrática pelo aumento do conflito espacial [Gallego, 2005]. Deve haver então um compromisso entre a

manutenção da conectividade e a redução do conflito espacial, aumentando a capacidade da rede.

Apesar do consumo de energia não ser um grande problema para redes em malha devido à maior facilidade de alimentação dos nós, a alocação de potência influencia na interferência causada nos nós vizinhos. A estratégia de alocação de potência pode ser feita de forma diferenciada de acordo com a classe de tráfego em função dos diferentes requisitos de QoS de cada classe [Jiang et al., 2006].

3.1.11. AMBIENTES DE MÚLTIPLOS CANAIS

O uso de múltiplas interfaces e múltiplos canais de frequência aumenta a capacidade da rede, na medida em que distribui melhor o tráfego e minimiza os problemas do “terminal escondido” e do “terminal exposto”. Porém estes ambientes oferecem uma maior complexidade na estimativa da disponibilidade da rede para cálculo de métricas de roteamento baseadas em QoS e para a própria implementação de uma arquitetura voltada para a qualidade de serviço.

3.2. ABORDAGENS DE IMPLEMENTAÇÃO DE QOS

As propostas de implementação de qualidade de serviço podem ser classificadas com base na pilha clássica de protocolos de rede [Abelém et al., 2007]:

- Subcamada MAC: extensões ao protocolo de acesso ao meio, como por exemplo, o padrão IEEE 802.11e, e novos esquemas;
- Camada de rede: extensões e otimizações dos protocolos de roteamento *ad hoc* tradicionais de modo a considerarem os parâmetros de QoS na seleção do melhor caminho;
- *Cross-layer*: soluções que permitem a troca de informações entre as camadas, consideradas as mais efetivas [Zhang e Zhang, 2008].

3.2.1. OTIMIZAÇÃO DA SUB-CAMADA MAC

O padrão IEEE 802.11e foi definido em julho de 2005 com o objetivo de diferenciar e priorizar as classes de tráfego em função de seus requisitos, no meio sem fio, conforme detalhado no Capítulo 2.

A *WiFi Alliance* (WFA) gerou uma especificação semelhante ao padrão IEEE 802.11e antes de sua conclusão, que constitui um perfil deste, chamado *Wireless*

Multimedia Extensions (WME) ou *WiFi Multimedia* (WMM) [Da Conceição, 2006]. É uma especificação mais simples, que define apenas o modo de acesso baseado em contenção (EDCA) com quatro classes de prioridade (voz, vídeo, melhor esforço e *background*), e foi implementada em diversos produtos comerciais.

Para tratar os problemas do “terminal escondido” e do “terminal exposto”, foram propostas diversas variações de protocolos baseados em tons de ocupado (*busy-tone based protocols*) [Jiang et al., 2006]. A idéia básica é adicionar um canal de controle separado do canal de dados para indicar que o receptor está recebendo dados, protegendo esta recepção. O transmissor verifica este canal de controle antes de transmitir seu RTS (*Request-to-Send*). Se o canal está “ocupado”, ele não inicia sua transmissão. Ao receber o RTS, o receptor começa a transmitir o tom de ocupado pelo canal de controle durante todo o período de recepção dos dados. A implementação pode utilizar antenas setorizadas com comutação de feixes, antenas de múltiplos feixes ou vetores de antenas adaptativos, predominantemente com antenas diretivas.

O método acima evita a colisão durante a transmissão dos dados, porém a colisão ainda pode ocorrer durante a transmissão do RTS. Uma solução é utilizar dois canais de controle, além do canal de dados, para transmissão dos tons de ocupado, um referente ao transmissor (BTt) para indicar a transmissão do RTS e outro referente ao receptor (BTr). O transmissor emite o tom de ocupado enquanto está transmitindo o RTS. O receptor, tanto de dados quanto de ACK's, emite o tom de ocupado durante a recepção do quadro. O canal BTt é definido com um alcance duas vezes maior que o alcance de transmissão dos dados e o canal BTr, com o mesmo alcance da transmissão dos dados.

3.2.2. EXTENSÕES / ALTERAÇÕES DOS PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO *AD HOC* TRADICIONAIS

A adoção dos protocolos tradicionais de redes *ad hoc* para redes em malha não é satisfatória em função de alguns fatores, como a grande quantidade de pacotes de controle utilizada em função da mobilidade das redes *ad hoc* e que não ocorre com tanta freqüência nas redes em malha, a variabilidade das taxas de transmissão, fazendo com que a capacidade de processamento de pacotes de cada nó varie ao longo do tempo, e a sensibilidade a interferências externas, ocasionando perdas de pacotes e o aumento do atraso fim-a-fim [Gerk et al., 2009].

Uma abordagem para tratar estes fatores é a escolha de uma métrica de roteamento que reflita melhor as características dos enlaces entre os nós. Exemplos dessas métricas de roteamento são:

- ETX (*Expected Transmission Count*), proposta em [De Couto et al., 2003], que tem por objetivo aumentar a vazão na rede. Para isto, a proposta é reduzir o número de transmissões no nível de enlace, ao longo do caminho;
- ETT (*Expected Transmission Time*) [Draves et al., 2004], que considera a taxa de transmissão na avaliação da qualidade dos enlaces. Seu objetivo é selecionar o caminho de menor atraso, combinando o ETX de cada enlace com a taxa de transmissão do nó;
- ML (*Minimum Loss*) [Campista et al., 2008], que também se baseia na ETX, porém considera o produto das probabilidades de sucesso na transmissão em cada enlace que compõe um caminho na seleção da melhor rota. Seu objetivo é minimizar a perda de pacotes.

Em [Aoki et al., 2006], é proposta uma variação do protocolo AODV [Perkins et al., 2003] chamada *Radio Metric AODV* (RM-AODV) que verifica periodicamente as condições de rádio com os vizinhos para selecionar rotas que minimizem e estabilizem a métrica de rádio. Ele prevê o uso de nós com múltiplas interfaces de rádio usadas em paralelo ou a escolha daquela com menor taxa de utilização dos recursos de rádio para cada destino, maximizando a capacidade do sistema em função da contínua variação das condições de rádio. A dinâmica do protocolo é ilustrada na Figura 17. As métricas de rádio são trocadas entre os nós e a rota que possui o menor valor total dessa métrica de rádio é selecionada.

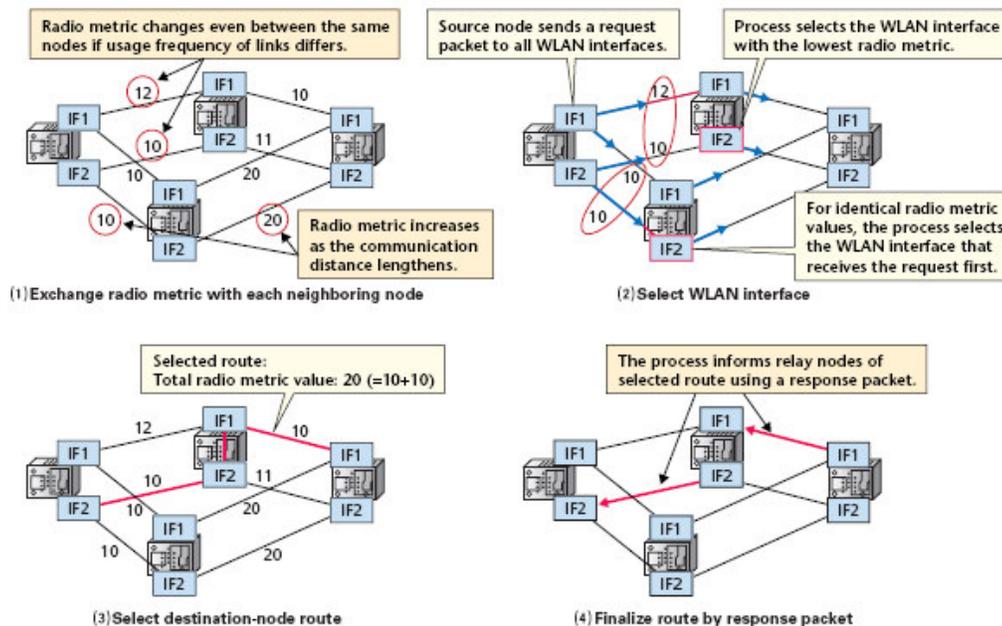


Figura 17: Dinâmica do Protocolo RM-AODV.

Fonte [Aoki et al., 2006]

Em [Badis e Al Agha, 2004], o protocolo proativo OLSR (*Optimized Link State Routing*) [Clausen e Jacquet, 2003] acrescido de métricas de QoS (QOLSR) baseadas em banda e atraso é associado a técnicas de múltiplos caminhos para aumentar a vazão fim-a-fim. Para evitar que os tráfegos em cada caminho compitam entre si, são calculados múltiplos caminhos sem *loop* e com correlação mínima entre os nós. Além destes, outro critério de seleção é uma diferença de tamanho pequena entre o caminho principal e os alternativos.

As métricas de banda e atraso são interessantes também para a seleção de rotas baseadas em QoS em redes sem fio de múltiplos saltos, porém o atraso é mais difícil de ser mensurado. Em [Da Conceição, 2006], é proposta a utilização de um mecanismo de par de pacotes (baseado no mecanismo de trem de pacotes) enviados sem intervalo entre eles e medida a diferença entre seus tempos de recebimento, para monitorar as taxas de transmissão e a capacidade da rede.

O critério de seleção do menor caminho associado a estas métricas também se aplica às redes *mesh* na medida em que o aumento no número de saltos diminui a vazão por nó e aumenta o atraso pelas múltiplas disputas de acesso ao meio.

3.2.3. ABORDAGEM *CROSS-LAYER*

Uma das abordagens que se baseia na interação entre as camadas do modelo OSI é o modelo de *Wireless DiffServ* [Jiang et al., 2006]. Ele introduz diferenças significativas ao modelo *DiffServ* tradicional das redes cabeadas, pelas seguintes razões:

- O nó *mesh* assume dois papéis: roteador de borda para os pontos de acesso e estações sob sua área de cobertura, classificando o tráfego e agregando os requisitos de serviço em um SLA único para o *backbone*, e roteador de núcleo, encaminhando o tráfego de acordo com sua classe. O papel de roteador de borda ainda mantém a escalabilidade, característica básica do *DiffServ*, pois a funcionalidade abrange apenas um número limitado de estações;
- Não existe a figura central de um *Bandwidth Broker* para coletar as condições de tráfego e gerenciar a alocação de recursos em uma rede *mesh*, pois ela é essencialmente distribuída;
- O SLA pode estar associado a qualquer dos *gateways* e a mais de um para balanceamento de carga;
- É necessário um SLA dinâmico em redes *mesh*, visto que o nível de agregação de tráfego é baixo por sua natureza distribuída, tornando a alocação de recursos bastante dinâmica;
- Existe a necessidade de troca de informações entre as camadas de rede, de enlace e física devido à banda de uma interface não ser fixa e variar dinamicamente conforme as condições de rádio.

Como em geral uma rede em malha apresenta baixa mobilidade, uma vez descoberta uma rota, a probabilidade de ela ser alterada é baixa desde que satisfaça os requisitos de QoS dos fluxos que carrega. A seleção de rotas é baseada nos requisitos de cada classe de tráfego e não baseada em fluxos, garantindo escalabilidade.

A proposta de [Jiang et al., 2006] pode ser implementada através de quatro componentes: um classificador de carga, um selecionador de rotas, uma rotina de CAC e uma rotina de reparo de rotas. Os pacotes são enfileirados de acordo com sua classe de serviço e seu próximo salto. Os mecanismos de gerenciamento de filas são as *priority queues* e *random early detection in and out* (RIO) [Malouch e Liu,

2002], garantindo diferenciação de serviço dentro de um mesmo nó, como apresentado na Figura 18. A diferenciação de tráfego no acesso ao meio se dá através do mecanismo EDCA do padrão IEEE 802.11e, que provê uma priorização estatística e não garantias de priorização.

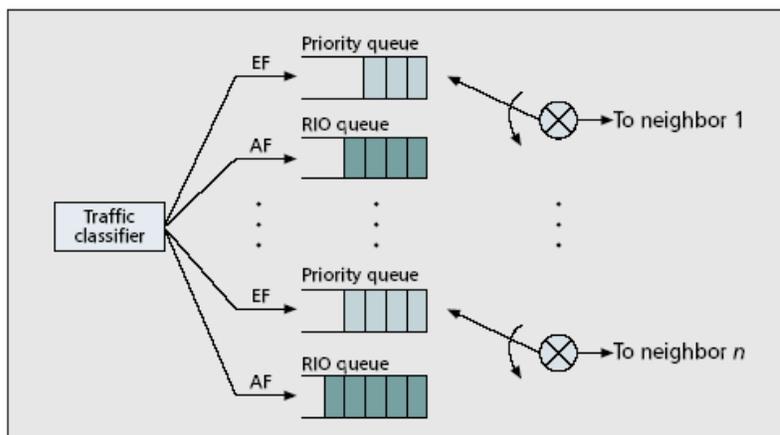


Figura 18: Classificação de tráfego e gerenciamento de filas.

Fonte [Jiang et al., 2006]

3.3. ADAPTAÇÕES DO PADRÃO IEEE 802.11E AOS DIFERENTES CENÁRIOS DE REDE

O padrão IEEE 802.11e efetivamente traz melhorias para os mecanismos de acesso ao meio do padrão IEEE 802.11, provendo diferenciação dos tipos de tráfego e priorização. A Figura 19 ilustra uma comparação do atraso médio fim-a-fim dos pacotes de voz na camada de aplicação entre configurações com (EDCA) e sem QoS (802.11g). A comparação foi feita sobre o mesmo cenário que as demais avaliações desta dissertação. Esse cenário é detalhado no Capítulo 4.

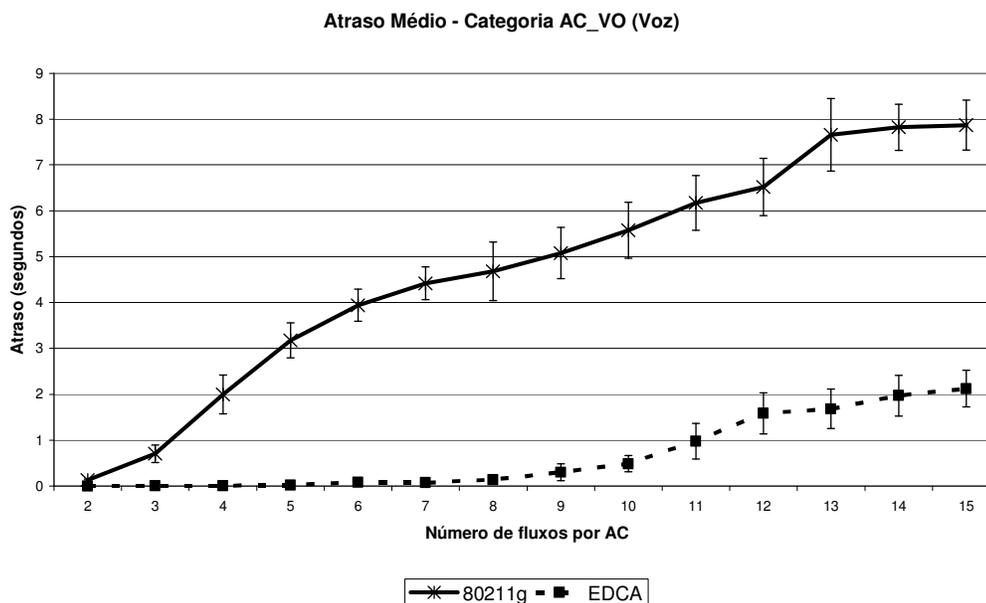


Figura 19: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários sem configuração de QoS (802.11g) e com configuração de QoS padrão (EDCA).

No entanto, ainda existem diversos desafios para o suporte a QoS em redes sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11, como as condições do meio variantes no tempo, os diferentes perfis de tráfego e a gerência dos recursos do canal [Ramos et al., 2005]. Sendo assim, existem diversos estudos na literatura para atender aos requisitos de cada aplicação nos mais variados cenários de rede. Esses trabalhos vão desde o ajuste dos parâmetros providos pelo padrão IEEE 802.11e para adequá-los ao cenário específico de uma dada rede até a sugestão de novas modificações na camada MAC.

Para tratar a variação das condições do meio ao longo do tempo, em virtude de perdas de propagação, efeitos multipercurso, interferência, quantidade de nós ou fluxos ativos na rede, localização e mobilidade dos nós, existem diversas propostas de adaptação dinâmica dos parâmetros de acesso ao meio do padrão de acordo com as características da rede, como mostra [Ramos et al., 2005]. Na maioria dos trabalhos, a taxa de colisão é usada como fator de adaptação, conforme descrito nas propostas a seguir. O foco das propostas apresentadas é na adaptação do modo EDCA devido à natureza distribuída das redes em malha sem fio, abordadas nesta dissertação.

O protocolo ChaPLeT (*Channel-dependent Packet Level Tuning*) [Ramos et al., 2003] se propõe a manter a diferenciação de serviços frente à variação das condições do canal, em redes IEEE 802.11b infraestruturadas. Para isso, trabalha

com o limite de fragmentação dos pacotes (tamanho máximo de quadro permitido na rede) visando a melhorar a vazão em cenários de condições ruins do canal, com o fator de persistência (PF) com o objetivo de combater a inversão de prioridade nesses cenários e com o decréscimo de tempo de *backoff* para evitar *starvation* das categorias de menor prioridade. Inversão de prioridade é uma situação decorrente de um meio sem fio com condições ruins do canal. Condições ruins do canal podem causar um número maior de retransmissões para os quadros dos fluxos de maior prioridade e o conseqüente aumento de sua janela de contenção, levando esse tráfego de maior prioridade a obter uma vazão menor que as dos fluxos de menor prioridade.

O parâmetro PF foi introduzido em *drafts* anteriores do IEEE 802.11e porém não foi mantido no padrão. Ele seria o fator de incremento da janela de contenção após o *timeout* do reconhecimento de um quadro. Na proposta, PF se baseia na taxa de colisões de modo a evitar um aumento desnecessário da janela de contenção quando a causa da retransmissão do quadro não foi uma colisão. Para reduzir o atraso no acesso ao meio, a taxa de decréscimo do contador de *backoff* é ajustada em função da quantidade de adiamentos do acesso ao meio (*deferral*) sofridos por aquela instância de *backoff*. Com tais modificações, a vazão média é incrementada e *starvation* das prioridades menores e inversão de prioridades são evitadas. O artigo, no entanto, não provê detalhes dos algoritmos de ajuste dos parâmetros usados nas simulações.

O *Adaptive EDCAF* (AEDCAF) [Romdhani et al., 2003] visa ao compartilhamento eficiente do meio de transmissão em redes *ad hoc* sem fio. Para isso, a proposta é reduzir o tamanho da janela de contenção de forma mais lenta após uma transmissão bem sucedida utilizando como referência o último valor de CW e a taxa de colisões. Além disso, o aumento da janela de contenção é feito de forma diferenciada para cada AC através de PF. Essa política aumenta a vazão útil (*goodput*) em 27% e a utilização do meio em 20%, em relação ao mecanismo definido no padrão IEEE 802.11e.

O AEDCAF se baseia em uma versão mais antiga do padrão e com isso, utiliza valores de CW_{min} e CW_{max} para as AC's de menor prioridade muito maiores que os demais, fazendo com que sua política de adaptação de CW cause uma degradação muito intensa nestas classes. O *Adaptive Fair EDCAF* (AFEDCAF) [Malli et al., 2004] se baseia em uma versão mais recente e tem o objetivo de diferenciação do tráfego

com “justiça” entre os fluxos de mesma prioridade, também em redes *ad hoc* sem fio. A proposta inclui um mecanismo de *fast backoff* adaptativo associado ao cálculo de um novo CW quando a contagem do *backoff* é suspensa devido à ocupação do meio. O *fast backoff* adaptativo utiliza um limite dinâmico do valor de *backoff*, onde valores de *backoff* acima deste limite são decrementados de forma linear (como no padrão IEEE 802.11) e abaixo deste limite, de forma exponencial. O limite é aumentado ou diminuído em função da competição mais baixa ou mais alta, respectivamente. A escolha de um novo CW quando o meio é ocupado durante o decréscimo do *backoff* possibilitaria a “justiça” entre os fluxos, pois todos utilizariam valores próximos de CW_{max} , e ainda manteria a diferenciação, pois os fluxos de maior prioridade possuem valores menores de CW_{max} . Segundo as avaliações, os mecanismos trazem um ganho de 33% na vazão útil em redes saturadas.

O artigo [Naoum-Sawaya et al., 2005] também propõe um novo esquema baseado no EDCA (*AEDCA - Adaptive EDCA*) ajustando o valor de CW de acordo com a utilização e desempenho da rede ao invés de estaticamente reduzir CW a CW_{min} após uma transmissão bem sucedida. O nível de congestionamento da rede é estimado em função da distância relativa da janela de contenção atual às janelas de contenção mínima e máxima. Assim, quanto mais próxima da janela de contenção mínima, menos congestionada a rede, e quanto mais próxima da janela de contenção máxima, mais congestionada ela está. Para calcular o valor ótimo de CW, o tempo entre o cálculo da estimativa e a última transmissão bem sucedida é considerado de modo a influir mais no cálculo um valor de CW de uma transmissão bem sucedida recente. A análise foi realizada através da simulação de uma rede *ad hoc* de oito nós com quatro fluxos, um de cada prioridade. Além das métricas de QoS (vazão, taxa de perda e atraso fim-a-fim), a ferramenta de avaliação de vídeo Evalvid [Evalvid, 2009] foi utilizada para demonstrar os ganhos de desempenho introduzidos pela proposta na transmissão de uma aplicação de tempo real em redes altamente congestionadas.

Com o objetivo de prover QoS para transmissões de vídeo VBR (*Variable Bit Rate*), [Liu e Zhao, 2006] propõe a adaptação dinâmica de TXOPLimit em função do tamanho estimado do próximo quadro de vídeo e do tamanho atual da fila de transmissão. Devido às taxas de transmissão mais agressivas, a classe de vídeo sofre com o estouro do *buffer* nos nós que não suportam o atraso no acesso ao meio. A avaliação foi realizada através da simulação de uma rede *ad hoc* com taxa de

11Mbps e com tráfego de voz e melhor esforço competindo com os fluxos de vídeo MPEG-1. Esse trabalho se baseou em [Adlen et al., 2005], que propõe o ajuste de TXOPLimit em função da prioridade da AC e do tamanho da fila (*Enhanced TXOP – ETXOP*). O trabalho estendeu o anterior com um mecanismo distribuído de controle de admissão que permite que cada nó aceite ou rejeite os novos fluxos de forma independente de acordo com a carga da rede e a taxa de transmissão requerida pela aplicação. Caso a quantidade de pacotes em trânsito que a rede suporta comporte a taxa requerida pelo novo fluxo, ele é aceito; caso contrário, o novo fluxo é rejeitado. Na proposta, apenas as AC's de maior prioridade (AC_VO e AC_VI) têm seus TXOPLimit's ajustados dinamicamente. As de menor prioridade (AC_BE e AC_BK) mantêm os valores estáticos definidos no padrão IEEE 802.11e. Como a categoria AC_VO representa o tráfego mais sensível, ela deve "perceber" um nível de QoS aproximadamente constante. Assim, o TXOPLimit da categoria AC_VO é ajustado para permitir a transmissão de todos os quadros presentes na fila. Por outro lado, o TXOPLimit da categoria AC_VI, que foi modelada para tráfego de vídeo que é mais sensível a perda de pacotes, é ajustado de modo a permitir a transmissão dos quadros que chegaram na fila no período de tempo entre duas aquisições do acesso ao meio, tentando assim garantir que não ocorra o estouro do *buffer*.

Segundo [Lee et al., 2005a], o AFEDCF alcança uma alocação justa de banda entre fluxos de uma mesma AC, porém não provê alocação proporcionalmente justa entre fluxos de diferentes categorias. Outros trabalhos [Naoum-Sawaya et al., 2005] [Lee et al., 2005a] [Lee et al., 2005b] têm por objetivo oferecer garantia de serviço para as categorias críticas, como a de voz e/ou a de vídeo, e uma alocação proporcionalmente justa de banda para as demais categorias.

As propostas de garantia de serviço se baseiam na alocação adequada do parâmetro AIFS. Por ser um valor fixo que a instância de *backoff* deve esperar antes de escolher o valor aleatório para seu contador, é um parâmetro determinante no atraso de acesso ao meio e, portanto, ideal para estabelecer a prioridade estrita para as classes mais críticas. Assim, para prover garantia de serviço a uma categoria de maior prioridade, o AIFS da categoria de menor prioridade deve ser maior ou igual ao AIFS da categoria de maior prioridade mais a sua janela de contenção máxima, conforme a expressão (2). Isso garante que, na competição pelo acesso ao meio, um quadro da categoria de maior prioridade sempre será transmitido antes dos quadros das de menor prioridade.

$$AIFS_N[j] \geq AIFS_N[i] + CW_{\max}[i], i > j \quad (2)$$

A escolha da janela de contenção máxima da categoria de maior prioridade deve ser criteriosa para evitar um atraso significativo no acesso ao meio das categorias de menor prioridade. Ao mesmo tempo, uma janela muito pequena aumenta a probabilidade de colisão entre fluxos da mesma categoria de maior prioridade.

O trabalho [Lee et al., 2005a] propõe um mecanismo chamado de *Differentiated Service – EDCA* (DS-EDCA) que combina uma escolha cuidadosa dos parâmetros das classes de menor prioridade com intervalos de *backoff* escolhidos a partir da disciplina de escalonamento distribuído DFS (*Distributed Fair Scheduling*) de modo a prover garantia de serviço para as classes de mais alta prioridade e uma alocação da banda restante proporcionalmente justa entre as classes de menor prioridade (*weighted fair service*). As classes de garantia estrita são configuradas com AIFS conforme a expressão (2) e com os valores definidos no padrão para as janelas de contenção mínima e máxima. As classes de menor prioridade seguem o esquema proposto a partir do DFS. A análise e a avaliação da proposta são feitas para redes infraestruturadas.

Os trabalhos em [Lee et al., 2007] e [Lee et al., 2009] se propõem a prover garantia de serviço para o tráfego de voz sobre IP (VoIP) através da definição adequada dos parâmetros do modo EDCA do padrão IEEE 802.11e sem que seja necessária alteração da camada MAC. Em [Lee et al., 2007], são definidos os mesmos parâmetros para as estações e para o AP. A janela de contenção mínima da categoria de voz é o menor valor possível (1), de modo a reduzir o tempo de acesso ao meio, e a janela de contenção máxima foi estabelecida de modo a permitir a capacidade máxima de fluxos de voz G.711 sem supressão de silêncio concorrentes em uma rede 802.11b (com taxa de 11Mbps). As estimativas da quantidade de fluxos e do valor ótimo de CW_{\max} para esta quantidade de fluxos foram obtidas por meio de simulação de modo a atender os requisitos de retardo (150ms) e perda de pacotes. Os parâmetros propostos são apresentados na Tabela 4, retirada de [Lee et al., 2007]. A proposta é avaliada através de simulações e experimentalmente com telefones WiFi.

Tabela 4: Parâmetros propostos para as estações e o AP em [Lee et al., 2007].

	AC_VO	AC_VI	AC_BE	AC_BK
AIFSN	2	10	11	15
<i>CW_{min}</i>	1	3	7	7
<i>CW_{max}</i>	8	7	511	511

Os trabalhos de [Lee et al., 2007] e [Lee et al., 2009] discutem brevemente a necessidade das camadas superiores marcarem adequadamente os pacotes para que os mecanismos de QoS tenham efeito. Os trabalhos sugerem que as estações móveis marquem o campo ToS (*Type of Service*) do cabeçalho IP dos pacotes VoIP ou que sejam enviadas mensagens de controle (por exemplo, *SNMP – Simple Network Management Protocol*) ao AP para que modifique suas listas de acesso (*ACL – access list*) de modo a contemplar o endereço IP e a porta UDP negociada via SIP (*Session Initiation Protocol*) do novo fluxo para mapeamento na categoria de voz da camada MAC (AC_VO).

O trabalho de [Lee et al., 2009] dá continuidade ao trabalho de [Lee et al., 2007] considerando que, por agregar o tráfego de todas as estações no *downlink*, o AP deve ter um conjunto de parâmetros de acesso ao meio mais agressivo que as demais estações, o que permite que uma chamada de voz experimente o mesmo desempenho tanto no *uplink* quanto no *downlink*. De certa forma, o cálculo dos parâmetros EDCA propostos é compatível com o padrão: o AIFS da categoria AC_BE é igual ao AIFS da categoria AC_VI acrescido de 1 e as janelas de contenção das categorias AC_BE e AC_BK são iguais. Segundo sua análise, um conjunto de parâmetros muito agressivo para o AP é necessário apenas quando as janelas de contenção mínima e máxima das estações são muito grandes. Sendo assim, os conjuntos de parâmetros EDCA propostos são apresentados na Tabela 5, retirada de [Lee et al., 2009]. A proposta é uma configuração que permita a garantia de serviço do tráfego de voz sem degradar significativamente o desempenho das demais classes de serviço ou reduzir dramaticamente a vazão agregada da rede.

Tabela 5: Parâmetros propostos para as estações e o AP em [Lee et al., 2009], respectivamente.

	AC_VO	AC_VI	AC_BE	AC_BK
Station				
AIFSN	2	10	11	15
CW_{min}	1	3	7	7
CW_{max}	8	7	511	511
AP				
AIFSN	2	7	8	12
CW_{min}	2	3	7	7
CW_{max}	5	7	511	511

O trabalho de [Lee et al., 2009] se baseia em [Qiao e Shin, 2002], anterior à conclusão do padrão IEEE 802.11e, no estudo do valor ótimo da janela de contenção mínima para maximizar a vazão agregada. Esse trabalho propõe um modelo analítico para a definição do valor ótimo de CW com o objetivo de atingir o máximo de utilização do canal com alocação justa de banda entre os fluxos de diferentes classes, considerando a prioridade de cada fluxo e a quantidade de estações disputando o acesso ao meio, em redes IEEE 802.11. Para simplificação, o mecanismo de *backoff* é uniforme e não exponencial. Considera que para haver justiça entre fluxos de mesma prioridade, eles devem usar a mesma janela de contenção. A avaliação da proposta é feita numericamente considerando uma rede de 50 nós distribuída, com e sem o uso do mecanismo de RTS/CTS, e também através da simulação de redes não-infraestruturadas de 5, 15 e 50 nós com uma única classe de serviço e de 50 nós com múltiplas classes de serviço, sem o uso de RTS/CTS. O ponto negativo do algoritmo é que as estações precisam monitorar o meio constantemente, mesmo quando não estão transmitindo, para determinar a ocupação dos *slots* de tempo.

A maioria das propostas requer modificações nos mecanismos de acesso ao meio da camada MAC, inclusive no processo de *backoff*, o que torna sua aplicação prática mais complexa. Seus esquemas são mais adequados a determinados cenários de padrão de tráfego e frequência de variação das condições da rede com relação a condições do canal, interferências e congestionamentos, dentre outros. Além disso, a grande maioria se baseia em redes infraestruturadas de único salto e quase sempre com uma topologia simples, de poucos nós e baixa carga na rede, não contemplando todas as classes de serviço simultaneamente nem modelando-as

de acordo com aplicações reais, reduzindo a influência do conflito espacial que degrada bastante o desempenho em uma rede em malha sem fio.

As adequações dos parâmetros de acesso ao meio implementadas pelos trabalhos normalmente se baseiam na taxa de colisão como forma de mapear o nível de congestionamento na rede. No entanto, nem sempre o excesso de retransmissões em função das colisões é a causa principal do descarte de pacotes para a camada de aplicação. Existem outros fatores, como a limitação do espaço em *buffer*, adequação dos protocolos de roteamento, dentre outros, que possuem grande influência no descarte de pacotes, tornando o ajuste baseado apenas na taxa de colisão pouco efetivo em determinados cenários.

Esta dissertação analisa a influência dos parâmetros de acesso ao meio do modo EDCA do padrão IEEE 802.11e nas métricas de QoS e a aplicação de algumas das propostas apresentadas neste capítulo em cenários de redes em malha sem fio, contrapondo ou validando sua utilização nestes ambientes em relação aos cenários de redes infraestruturadas como abordado na maioria dos trabalhos. Além disso, propõe mecanismos baseados na análise realizada e nas causas de perda identificadas para cada classe de tráfego nas simulações. Estes mecanismos utilizam a premissa de requerer pouca ou nenhuma intervenção na camada MAC do padrão, facilitando sua implementação em redes reais. A dissertação faz também uma análise inicial da escalabilidade dos mecanismos em termos de quantidade de nós e de carga na rede (quantidade de fluxos simultâneos).

4. PROPOSTA PARA ANÁLISE DOS PARÂMETROS IEEE 802.11e

A configuração dos parâmetros disponíveis no padrão IEEE 802.11e pode ser baseada nas características da rede (carga, padrão de tráfego e de mobilidade, etc) e nas características do meio sem fio para um nó específico (interferência, competição, posição relativa, etc). Isso requer uma modelagem mais precisa dos perfis de tráfego e de sua dinâmica e um mecanismo de adaptação dos parâmetros em função do comportamento da rede, dentre outros [Banchs et al., 2005].

O mecanismo para prover QoS definido pelo padrão para o modo EDCA se baseia na combinação de valores de quatro parâmetros para cada categoria de acesso: AIFS, CW_{min} , CW_{max} e TXOPLimit. Para determinar uma configuração ótima desses parâmetros com o objetivo de prover os requisitos de cada AC para o maior número de fluxos possível, é necessário inicialmente entender a influência de cada um nas métricas de QoS, como vazão média, atraso médio fim-a-fim, perda de pacotes e taxa de colisão.

A análise das métricas tem como objetivo identificar o desempenho dos tipos de tráfego modelados em cada categoria frente a diferentes níveis de carga da rede. Assim, foi definida uma topologia base sobre a qual as diversas configurações estudadas foram simuladas. A ferramenta de simulação utilizada foi o NS 2.31 [NS2, 2009] acrescido do módulo EDCA desenvolvido pela TKN [Wiethölter e Hoene, 2009] e adaptado para essa versão do simulador.

O módulo da TKN [Wiethölter et al., 2006] estende o modelo do IEEE 802.11 do NS2 introduzindo uma fila por prioridade entre as camadas de rede e MAC. A prioridade é identificada pelo campo de prioridade do cabeçalho IP de cada pacote. No entanto, é utilizada uma única instância de EDCAF que controla os *buffers* e as variáveis dos parâmetros de contenção de cada prioridade, respectivamente, facilitando a solução das colisões internas entre as diferentes AC's de uma mesma estação. O tamanho do *buffer* é o mesmo para todas as AC's.

O processo de *backoff* e as colisões internas são tratados através do agendamento apropriado dos eventos. Apenas o *backoff* da prioridade que expirará primeiro é agendado, assim como no caso de duas prioridades possuírem os mesmos tempos residuais de *backoff*, apenas o temporizador da AC de maior prioridade é agendado e as variáveis das demais AC's são atualizadas de acordo. Com isso, as colisões internas não são contabilizadas nos arquivos de *trace* como

descartes por colisão. Dependendo do tempo de espera na fila, eventualmente, esses pacotes serão descartados por estouro do *buffer*.

Os cenários foram construídos sobre uma topologia de 500m x 500m constituída de 10 e 50 nós *ad hoc* posicionados de forma aleatória e sem mobilidade, gerada através da ferramenta *setdest* do simulador NS2, com objetivo de realizar uma avaliação inicial da influência da densidade dos nós no desempenho da rede. A taxa de transmissão dos dados foi de 54Mbps de modo a implementar o padrão IEEE 802.11g na camada física. Foi utilizada uma única taxa de transmissão de modo a reduzir o número de variáveis atuando nos cenários e focar a análise na influência dos parâmetros de acesso ao meio providos pelo padrão IEEE 802.11e. Foram utilizadas antenas omnidirecionais e o modelo de propagação *Two-Ray Ground*.

O mecanismo de RTS/CTS não foi utilizado, pois reduz o desempenho da rede em função do maior *overhead* introduzido. Seu uso é justificado apenas em cenários específicos, não sendo o caso das redes em malha sem fio de um modo geral.

A comunicação em múltiplos saltos utilizou um padrão de tráfego aleatório através da escolha dos pares origem-destino a partir de uma distribuição aproximadamente uniforme. A carga na rede é incrementada a cada 20s de simulação através da inserção de novas fontes de tráfego. Cada novo par origem-destino gera quatro fluxos unidirecionais, cada um representando uma categoria de acesso.

Os tempos das simulações foram de 330s e 630s, gerando ao fim das mesmas 15 e 30 fluxos, respectivamente, de cada AC. O início dos fluxos foi definido para 30s após o início da simulação para permitir a convergência do protocolo de roteamento. Foi utilizado o protocolo OLSR [Clausen e Jacquet, 2003] com métrica de contagem de saltos. Não foi utilizada uma métrica que considerasse a qualidade de um enlace em seu cálculo (*quality-aware*) de modo a reduzir as variáveis na análise da QoS provida pela camada MAC. Os quadros do OLSR foram marcados com a prioridade mais alta (AC_VO), conforme sugerido no padrão.

Os tipos de tráfego modelados em cada classe de serviço tentam se aproximar ao máximo do objetivo para o qual as respectivas AC's foram pensadas. Assim, para modelar a classe de voz, foram implementadas fontes de tráfego CBR (*Constant Bit Rate*) com pacotes de 160 *bytes* enviados a cada 20ms resultando em

uma taxa de 64 Kbps simulando a voz codificada através do codificador G.711 sem supressão de silêncio. A classe de vídeo simula um *streaming* de vídeo com pacotes de 1280 *bytes* transmitidos a cada 10ms gerando uma taxa de transmissão de 1024 Kbps. As classes de melhor esforço e *background* foram modeladas com tráfego FTP sobre TCP com tamanhos de pacote iguais a 1300 *bytes* e 1500 *bytes*, respectivamente.

Os *scripts* em TCL de configuração do simulador e de geração de tráfego são apresentados nas seções A.1.1 (configuração sem QoS), A.1.2 (configuração com QoS) e A.2.1 do Anexo A, respectivamente.

Foi verificado que o código básico do simulador NS2 para o destino do tráfego TCP (*tcp-sink*) não aplicava a mesma prioridade do pacote TCP recebido ao seu respectivo reconhecimento (*ack*) enviado. Sendo assim, o campo de prioridade no cabeçalho IP do *ack* recebia o valor padrão (0) que corresponde à categoria AC_VO do módulo EDCA implementado pela TKN. Para que as simulações estivessem o mais próximo possível dos cenários reais, o código do *tcp-sink* foi alterado no NS2 de modo que, na construção do *ack*, seu campo de prioridade no cabeçalho IP fosse preenchido com o mesmo valor do pacote TCP ao qual ele estaria reconhecendo a entrega.

Inicialmente, foi feita uma comparação das configurações com e sem QoS, avaliando o grau de diferenciação de serviço provido pelo modo EDCA do padrão IEEE 802.11e e identificando situações em que o padrão não atinge um desempenho adequado.

Os valores padrão definidos no EDCA para camada física IEEE 802.11g bem como os de uma rede sem QoS com a mesma camada física são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros Definidos no padrão IEEE 802.11e.

AC	AIFSN	CW _{min}	CW _{max}	TXOPLimit
Voz	2	3	7	1504 μ s
Vídeo	2	7	15	3008 μ s
Best Effort	3	15	1023	0
Background	7	15	1023	0
Sem QoS	2 (DIFS)	15	1023	0

Fonte [IEEE P802.11, 2007]

Observa-se que os valores adotados pelo padrão para as janelas de contenção mínima e máxima, especialmente das categorias de maior prioridade, são baixos. Essa definição intuitivamente levaria a uma alta taxa de colisão quando a

rede estivesse mais congestionada. Com uma carga de tráfego menor, a menor probabilidade de atraso no acesso ao meio proporcionada por uma faixa mais estreita de escolha dos valores dos contadores de *backoff* poderia influir positivamente no desempenho das classes.

Para observar o efeito desses parâmetros nas métricas de QoS, foram feitas simulações variando seus valores, mantendo as fórmulas de cálculo para cada AC definidas no padrão (vide Tabela 3). A Tabela 7 mostra os valores calculados para todos os parâmetros quando *aCWmin* assume os valores 31 e 63, por exemplo. Nessas configurações, os demais parâmetros foram mantidos de acordo com o sugerido no padrão.

Tabela 7: Parâmetros quando *aCWmin* assume os valores 31 e 63.

aCWmin = 31				
AC	AIFSN	CW _{min}	CW _{max}	TXOPLimit
Voz	2	7	15	1504 μ s
Vídeo	2	15	31	3008 μ s
<i>Best Effort</i>	3	31	1023	0
<i>Background</i>	7	31	1023	0
aCWmin = 63				
Voz	2	15	31	1504 μ s
Vídeo	2	31	63	3008 μ s
<i>Best Effort</i>	3	63	1023	0
<i>Background</i>	7	63	1023	0

Para simular o efeito da transmissão de múltiplos quadros e a influência do parâmetro TXOPLimit, foram simulados cenários habilitando-se a variável CFB (*Contention Free Burst*). Conforme definido no padrão, esta funcionalidade permite o envio de múltiplos quadros apenas para as categorias de voz e vídeo. Nessa primeira análise, os valores definidos no padrão para o parâmetro TXOPLimit não foram alterados, apenas foram simulados cenários com e sem a funcionalidade habilitada.

O parâmetro AIFS é mais determinante no atraso no acesso ao meio e, portanto, seria o mais adequado à provisão de garantia de serviço, conforme sugerido nas propostas de [Lee et al., 2005a], [Lee et al., 2005b], [Lee et al., 2007] e [Lee et al., 2009]. Baseando-se em [Lee et al., 2009], foram simulados cenários com as configurações propostas para as estações e para o AP (propostas 1 e 2 da Tabela 8, respectivamente). Intuitivamente, um nó de uma rede em malha sem fio se assemelha mais a um AP, por agregar o tráfego de acesso (gerado por clientes do próprio nó) e o tráfego encaminhado de outros nós (gerados por clientes de outros nós).

Os valores propostos para as janelas de contenção visam a maximizar a vazão da rede e foram selecionados de modo a permitir determinada quantidade de fluxos simultâneos de voz. As redes em múltiplos saltos apresentam um nível de competição entre os nós e entre os fluxos significativamente maior que uma rede infraestruturada. Assim, com o objetivo de reduzir a taxa de colisão, foram avaliadas duas novas propostas baseadas na configuração para o AP [Gerk e Saade, 2009]. Na primeira nova proposta (proposta 3 da Tabela 8), as janelas de contenção mínima e máxima são as definidas no padrão para todas as classes, com valores de AIFSN calculados de acordo com a proposta de garantia estrita de [Lee et al., 2009]. Na segunda nova proposta (proposta 4 da Tabela 8), a configuração padrão para janela de contenção é aplicada a todas as classes, exceto para a categoria de voz, que mantém a configuração para o AP. Os valores de AIFSN também são calculados de acordo com a proposta de garantia estrita de [Lee et al., 2009].

As quatro propostas de configuração de garantia de serviço e os respectivos valores de todos os seus parâmetros são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros para Garantia de Serviço.

Proposta 1 - proposta para as estações [Lee et al., 2009]				
AC	AIFSN	CW _{min}	CW _{max}	TXOPLimit
Voz	2	1	8	1504 μs
Vídeo	10	3	7	3008 μs
Best Effort	11	7	511	0
Background	15	7	511	0
Proposta 2 - proposta para o AP [Lee et al., 2009]				
Voz	2	2	5	1504 μs
Vídeo	7	3	7	3008 μs
Best Effort	8	7	511	0
Background	12	7	511	0
Proposta 3 - proposta para o AP [Lee et al., 2009] com as janelas de contenção do padrão em todas as categorias				
AC	AIFSN	CW _{min}	CW _{max}	TXOPLimit
Voz	2	3	7	1504 μs
Vídeo	9	7	15	3008 μs
Best Effort	10	15	1023	0
Background	14	15	1023	0
Proposta 4 - proposta para o AP [Lee et al., 2009] com as janelas de contenção do padrão apenas nas categorias AC_VI, AC_BE e AC_BK				
AC	AIFSN	CW _{min}	CW _{max}	TXOPLimit
Voz	2	2	5	1504 μs
Vídeo	7	7	15	3008 μs
Best Effort	8	15	1023	0
Background	12	15	1023	0

Como esperado, a proteção dos fluxos de voz, provida pelas propostas de garantia de serviço descritas acima, degrada o desempenho das demais categorias. Dessa forma, foi investigada a capacidade máxima em termos de fluxos de vídeo

que a rede suporta, na ausência da categoria de voz, bem como os efeitos das interrupções no tráfego de garantia estrita em relação ao desempenho das demais categorias.

Conforme será detalhado no Capítulo 5, as análises das causas das perdas de pacotes na camada de aplicação revelaram que as categorias de menor prioridade são mais afetadas pelas colisões, tendo mais pacotes descartados pelo excesso de retransmissões. A classe de vídeo, no entanto, devido a sua taxa de transmissão mais agressiva, sofre maior descarte devido ao estouro do *buffer*.

Essa constatação, associada ao trabalho desenvolvido em [Adlen et al., 2005], levou a uma proposta de adaptação dinâmica do valor de TXOPLimit em função da quantidade de pacotes pendentes na fila. Assim, a proposta de ajuste de TXOPLimit de [Adlen et al., 2005] sem seu controle de admissão foi avaliada. Sem um mecanismo de controle de admissão, o limite do valor de TXOPLimit foi definido estaticamente. Duas configurações foram utilizadas. Na primeira configuração, ambas as categorias (AC_VO e AC_VI) tiveram o limite máximo definido de acordo com o valor máximo estabelecido para o parâmetro no padrão IEEE 802.11e, considerando a camada física do IEEE 802.11g, ou seja, 8160 microssegundos. Na segunda configuração, o limite máximo para a categoria AC_VO é metade daquele da categoria AC_VI (conforme valores padrão definidos no padrão IEEE 802.11e – vide Tabela 6), sendo 4080 microssegundos para AC_VO e 8160 microssegundos para AC_VI, considerando a camada física do IEEE 802.11g.

Assim como em [Adlen et al., 2005], TXOPLimit de AC_VO é ajustado para o tempo necessário para a transmissão de todos os quadros armazenados na fila no momento de aquisição do acesso ao meio e TXOPLimit de AC_VI é ajustado para o tempo necessário para a transmissão dos quadros que entraram na fila desde a última aquisição do acesso ao meio. TXOPLimit de AC_BE e AC_BK permanecem zero, permitindo o envio de apenas um quadro a cada aquisição do acesso ao meio, conforme estabelecido no padrão.

Segundo o padrão, o valor de TXOPLimit varia no intervalo de 32 microssegundos a 8160 microssegundos quando o nó utiliza o padrão IEEE 802.11g na camada física, sempre em múltiplos de 32 microssegundos. Assim, os valores calculados para o tempo de transmissão dos quadros conforme explicado no parágrafo anterior foram arredondados para o próximo múltiplo de 32

microssegundos e limitados, respectivamente, ao máximo de 8160 microssegundos e 4080 microssegundos.

O módulo de EDCA para o NS2 implementa o mecanismo de CFB através de um método chamado *cfb* que recebe a prioridade da AC como entrada. Este método verifica se a AC possui quadros pendentes na fila, remove o quadro do início da fila, o formata para transmissão e calcula o tempo necessário para sua transmissão, seu reconhecimento e os respectivos intervalos entre os quadros. A duração da transmissão desse quadro é acrescida ao tempo de transmissão já utilizado por essa AC (*cfb_dur*). Se esse tempo acumulado for inferior ao valor de TXOPLimit, a transmissão do quadro ocorre após SIFS. Caso contrário, a janela de contenção é reiniciada para CW_{min} , é iniciado novo *backoff* e o método *tx_resume()* é chamado para tratar os agendamentos de tempo (SIFS, *backoff*, *deferral*, etc) de acordo com o estado de cada AC.

Na proposta introduzida por esta dissertação, o mecanismo de CFB se mantém, apenas sendo atualizado o valor de TXOPLimit quando a AC adquire o acesso ao meio e existe um quadro pendente na fila. Para a categoria AC_VO, a quantidade atual de quadros na fila é considerada no cálculo do novo TXOPLimit. Para a categoria AC_VI, foi introduzido um novo atributo na classe *Dtail* com os respectivos métodos de atribuição e obtenção de seu valor para armazenar o tamanho da fila na última chamada do método *cfb*. Caso nenhum novo quadro tenha sido enfileirado, o valor de TXOPLimit permanece o mesmo da chamada anterior.

Foi utilizado como premissa, nesta adaptação, o fato de que todos os quadros de uma mesma categoria de acesso possuem o mesmo tamanho.

O método *cfb* alterado é apresentado na seção A.3 do Anexo A.

A adaptação dinâmica de TXOPLimit foi avaliada sem e com a configuração de garantia estrita da categoria de voz (proposta 3 da Tabela 8) e com o ajuste dinâmico apenas do TXOPLimit da categoria AC_VI (porém utilizando a configuração de garantia estrita para AC_VO).

As soluções que obtiveram um melhor desempenho tiveram sua escalabilidade avaliada através de uma rede mais densa (50 nós na mesma topologia de 500m x 500m) e de uma maior carga na rede (tempo de simulação de 630s com 30 fluxos de cada categoria de acesso ao final).

Para avaliar o desempenho de uma aplicação mais próxima de um ambiente real, o conjunto de ferramentas Evalvid, que avaliam a qualidade de um vídeo

transmitido através de uma rede real ou simulada, e sua integração com o simulador NS2 foram utilizados [Ke et al., 2008]. Esse conjunto de ferramentas foi construído de forma modular permitindo a substituição de componentes. Ele provê, além das métricas de QoS da rede em si, como atraso, perda de pacotes e variação do retardo ou *jitter*, uma avaliação subjetiva do vídeo recebido baseado no cálculo do PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*) quadro a quadro.

A arquitetura do Evalvid é ilustrada na Figura 20, retirada de [Evalvid, 2009], e as interações entre as ferramentas e os fluxos de dados, simbolizadas. Pode ser observada a completa transmissão de um vídeo desde sua codificação, empacotamento, transmissão pela rede, redução de *jitter* através de um *buffer* de reprodução (*play-out*) até sua decodificação e apresentação para o usuário.

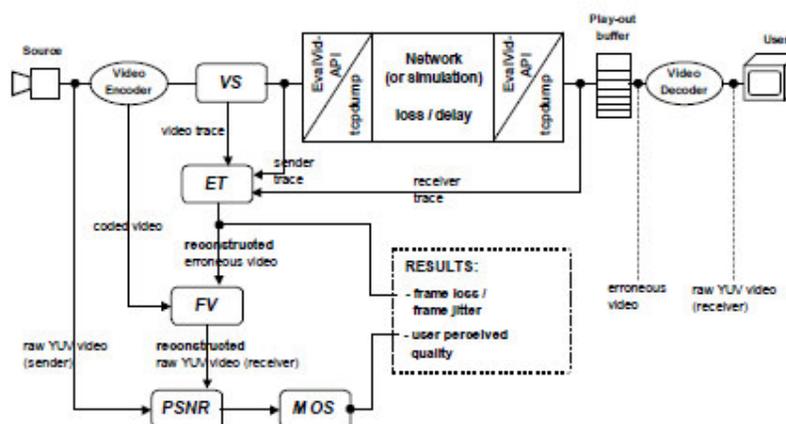


Figura 20: Arquitetura do conjunto de ferramentas Evalvid.

Fonte [Evalvid, 2009]

Para a avaliação da qualidade do vídeo, é necessário prover, do lado da fonte, o *timestamp* e tipo de cada quadro enviado e, do lado do destino, o *timestamp* e tipo de cada quadro recebido e o vídeo codificado reconstruído (possivelmente com erros). O conjunto de ferramentas provê uma forma de sincronização dos vídeos enviados e recebidos inserindo o último quadro apresentado no lugar dos quadros perdidos, permitindo a avaliação da qualidade de forma subjetiva pela decodificação do vídeo recebido e apresentação ao usuário.

As medidas de perda de pacotes (IP) e quadros (MAC) e de atraso e variação do atraso (*jitter*) entre pacotes (IP) e quadros (MAC) são feitas de acordo com o tipo do quadro de vídeo (*Intracoded – I, Predicted – P, Bidirectional – B*) e seus cabeçalhos. No caso de perda de pacotes ou quadros, um valor de tempo de chegada para o pacote ou quadro perdido é “sugerido” usando o valor esperado de tempo entre pacotes/quadros do transmissor. Em caso de perdas significativas de

pacotes/quadros, a recomendação é calcular apenas os pares de pacotes recebidos e contar os pacotes perdidos separadamente.

A avaliação da qualidade do vídeo é feita através da escala MOS (*Mean Opinion Score*) apresentada na Tabela 9 e do cálculo do PSNR imagem a imagem entre a componente de luminância (Y) da origem e do destino, usando a expressão (3), onde k é o número de bits por pixel da componente de luminância. O PSNR compara a energia máxima possível do sinal com a energia do ruído, o que resulta em uma maior correlação com a percepção subjetiva da qualidade do que a medida convencional SNR (*Signal-to-Noise Ratio*).

Tabela 9: Escala MOS.

Escala	Qualidade	Comprometimento
5	Excelente	Imperceptível
4	Bom	Perceptível, mas não irritante
3	Justo	Pouco irritante
2	Pobre	Irritante
1	Ruim	Muito irritante

$$PSNR(n)_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{peak}}{\sqrt{\frac{1}{N_{col} N_{row}} \sum_{i=0}^{N_{col}} \sum_{j=0}^{N_{row}} [Y_S(n, i, j) - Y_D(n, i, j)]^2}} \right)$$

$$V_{peak} = 2^k - 1 \quad (3)$$

Uma conversão de PSNR para a escala MOS é sugerida na Tabela 10, retirada de [Evalvid, 2009].

Tabela 10: Conversão de PSNR para a escala MOS.

PSNR [dB]	MOS
> 37	5 (Excelente)
31 – 37	4 (Bom)
25 – 31	3 (Justo)
20 – 25	2 (Pobre)
< 20	1 (Ruim)

Como o objetivo da avaliação neste trabalho é a influência da rede na qualidade do vídeo recebido, as comparações foram feitas em relação ao vídeo a ser transmitido já codificado. Para simular a transmissão do fluxo de vídeo sobre a rede, são oferecidos como entrada ao simulador NS2 arquivos de *trace* contendo as

características dos quadros (número, tipo, tamanho, número de segmentos UDP) e seus respectivos *timestamps*. O simulador gera os respectivos arquivos de *trace* no receptor contendo basicamente os *timestamps* de recepção de cada quadro enviado, permitindo também identificar as perdas.

No conjunto de ferramentas, encontram-se disponíveis os *scripts* de geração dos arquivos de *trace* a partir do vídeo codificado (*Video Sender - VS*) e de avaliação da qualidade do vídeo recebido em relação ao enviado (*Evaluate Traces - ET*). ET também gera o fluxo de vídeo corrompido pela rede através do vídeo enviado originalmente e das informações sobre atraso, *jitter* e perdas no receptor, para apresentação ao usuário.

Na análise realizada neste trabalho, foi utilizado um vídeo codificado em H.264 no formato QCIF (resolução 176 x 144), com 30 quadros por segundo e um GOP de 30 quadros utilizando quadros P e B. O fluxo de vídeo gerado difere do tráfego de vídeo modelado nas simulações anteriores, pois sua taxa é variável. O mesmo padrão de tráfego utilizado nas demais simulações concorreu pelo acesso ao meio com este fluxo de vídeo que foi iniciado aos 31s de simulação.

Os *scripts* de configuração do simulador e de geração de tráfego usados para esta análise são apresentados nas seções A.1.3 (configuração sem QoS), A.1.4 (configuração com QoS) e A.2.3 do Anexo A, respectivamente.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo discute os resultados de simulações realizadas com os *softwares* NS2 e Evalvid, comparando o desempenho das propostas apresentadas no Capítulo 4 para ajuste de parâmetros do padrão IEEE 802.11e em redes em malha sem fio, considerando diferentes métricas. As métricas analisadas nas simulações foram:

- a taxa média de colisão, correspondente à percentagem dos quadros enviados até cada instante de tempo de simulação que foram descartados no nível MAC por colisão;
- o atraso médio fim-a-fim, considerando a média do atraso fim-a-fim do ponto de vista da camada de aplicação sofrido pelos pacotes enviados até cada instante de tempo correspondente ao início de um novo fluxo de cada AC;
- a taxa média de perda de pacotes do ponto de vista das camadas superiores, que corresponde à percentagem dos pacotes enviados até cada instante de simulação que não foram recebidos no destino, e uma análise das causas desses descartes de pacotes;
- a vazão média, que corresponde à média de bits por segundo transmitidos em cada intervalo de tempo, ao longo da simulação.

Os resultados apresentados foram obtidos a partir da média de 30 simulações para cada cenário, com intervalo de confiança de 95%. Todos os resultados representam os valores agregados de todos os fluxos de uma mesma AC (voz, vídeo, melhor esforço e *background*). Os pontos indicados nos gráficos representam o início de um novo conjunto de 4 fluxos (1 de cada AC), permitindo observar a influência do aumento de carga na rede.

As simulações dos cenários sem QoS mostram uma pequena diferenciação nas métricas obtidas em função das características de cada tipo de tráfego, porém não há prioridade para nenhum fluxo em especial. Os fluxos TCP alcançam alguma vantagem sobre os fluxos UDP em relação ao atraso médio fim-a-fim e à taxa de perda de pacotes em função do próprio controle de fluxo do TCP, que reduz a taxa de envio quando julga a rede congestionada, com os fluxos de pacotes de menor tamanho obtendo melhores resultados. Os fluxos que simulam vídeo apresentam a

maior vazão média, ocupando o meio de forma mais acentuada em detrimento dos demais tipos de tráfego, conforme ilustrado na Figura 21 que mostra uma comparação da configuração com QoS, utilizando os valores padrão do modo EDCA, com a configuração sem QoS, utilizando os valores do padrão IEEE 802.11g no cenário com 10 nós.

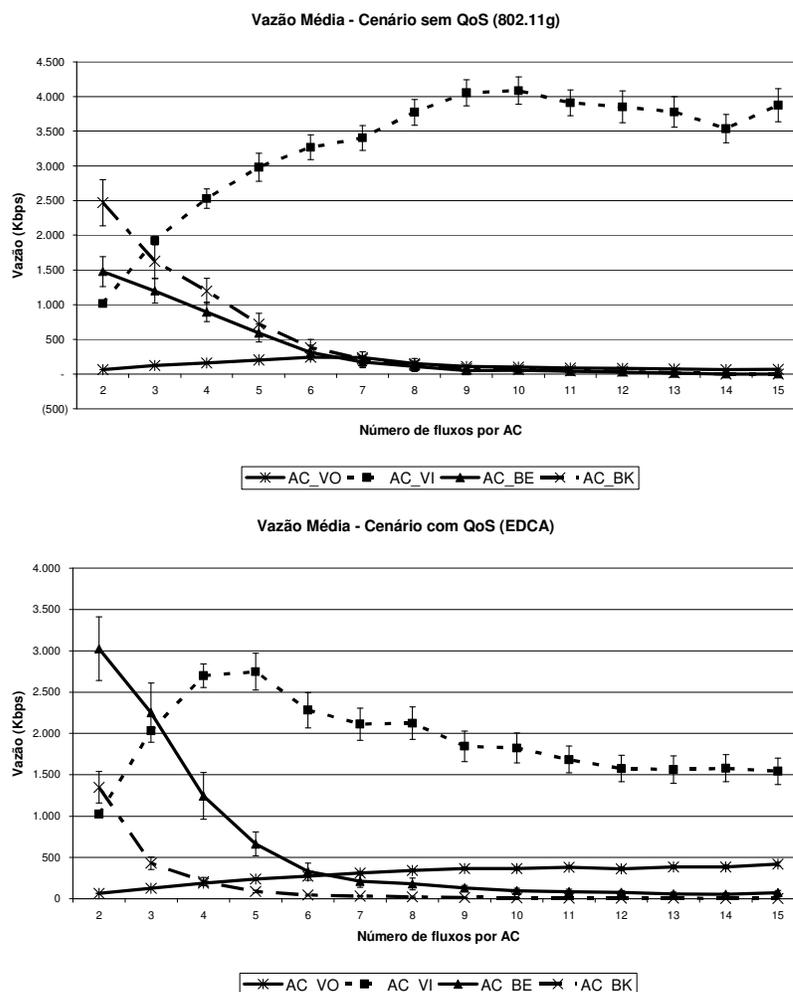


Figura 21: Comparação da vazão média de todas as categorias entre cenários sem configuração de QoS (802.11g) e com configuração de QoS padrão (EDCA).

À medida que o tempo de simulação aumenta, as métricas tendem a se degradar em função do aumento de carga na rede. Ainda assim, a configuração com QoS, utilizando os valores padrão para os parâmetros de acesso ao meio do EDCA, provê diferenciação do tráfego até o fim da simulação, conforme demonstra a Figura 22 através da comparação da taxa de colisão dos cenários com e sem QoS, na topologia com 50 nós. Na figura, observamos que as taxas de colisão de todas as

categorias, na configuração sem QoS, assumem aproximadamente os mesmos valores enquanto que, na com QoS, elas são marcadamente diferenciadas.

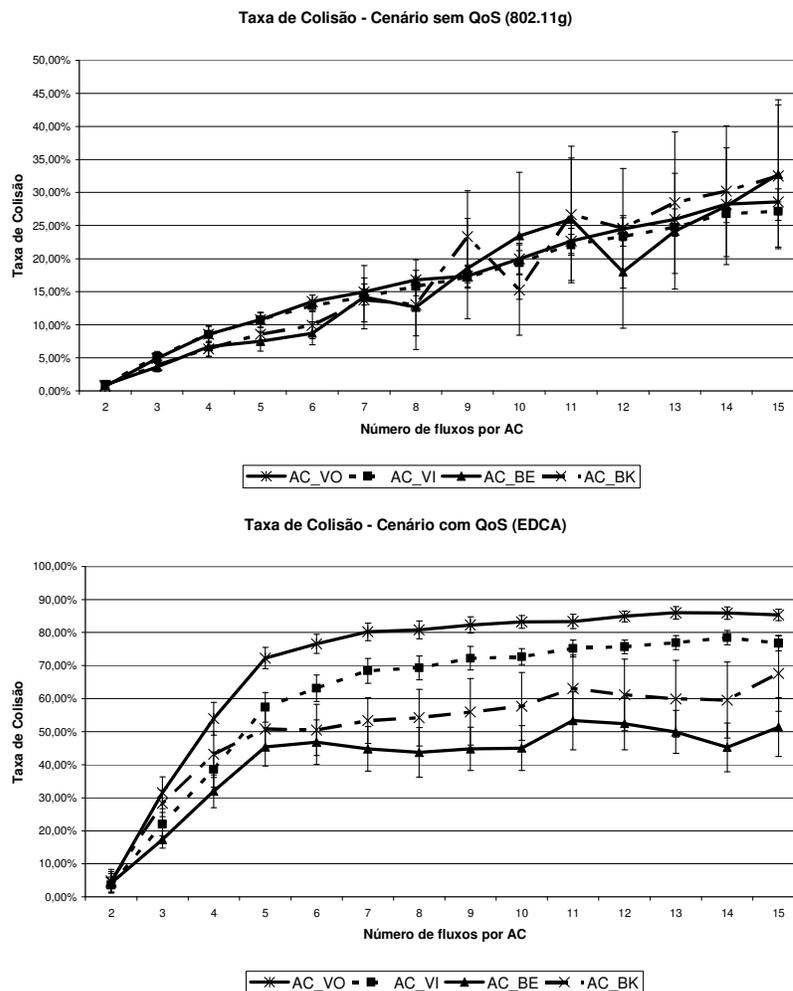


Figura 22: Comparação da taxa de colisão de todas as categorias entre cenários sem configuração de QoS (802.11g) e com configuração de QoS padrão (EDCA).

A verificação através das comparações dos cenários com e sem QoS de que as taxas de colisão de todas as categorias de acesso sob o EDCA são significativamente maiores motivou o estudo dos parâmetros CW_{min} e CW_{max} e sua influência no desempenho de cada classe de serviço e da rede como um todo.

O estudo da variação dos valores das janelas de contenção mínima e máxima mostra que sua influência é na redução da taxa de colisão à medida que a faixa de escolha do valor de *backoff* aumenta, conforme o esperado. A Figura 23 mostra a comparação da taxa de colisão dos cenários com $aCW_{min} = 15$, $aCW_{min} = 31$ e $aCW_{min} = 63$ (vide valores calculados para todos os parâmetros nas Tabelas 6 e 7 do Capítulo 4, respectivamente).

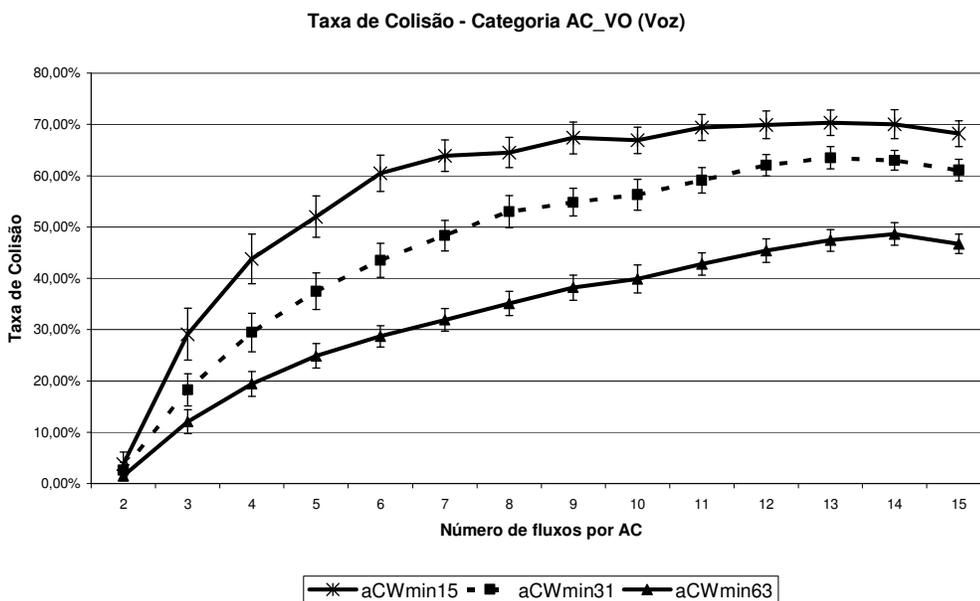
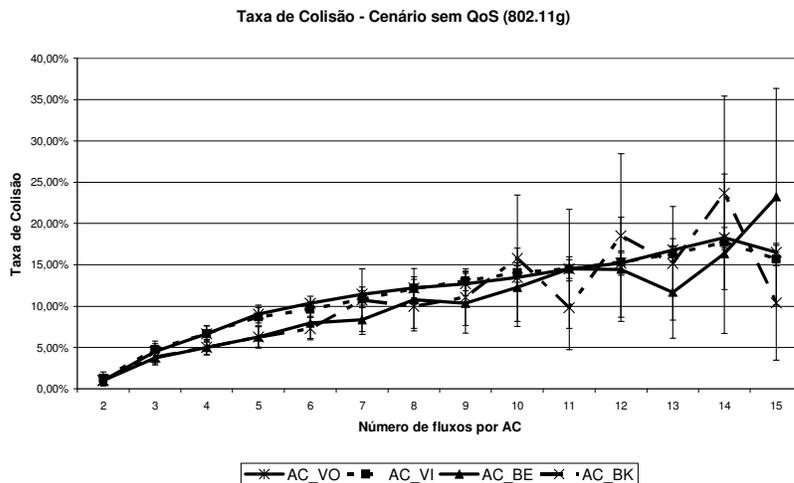


Figura 23: Comparação da taxa de colisão da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada onde aCWmin assume os valores 15, 31 e 63.

Com o aumento de aCWmin, a faixa de escolha do valor de *backoff* para as maiores prioridades aumenta, distribuindo melhor os números aleatórios e reduzindo a probabilidade de colisão. No entanto, as faixas de escolha do valor de *backoff* das categorias de maior prioridade nesses cenários com configuração de QoS com aCWmin igual a 31 e 63 ainda são significativamente menores que no cenário sem configuração de QoS, fazendo com que suas taxas de colisão continuem maiores que no cenário sem QoS, conforme apresentado na Figura 24, que compara os cenários sem QoS e com QoS com aCWmin = 31 e aCWmin = 63, na topologia com 10 nós.



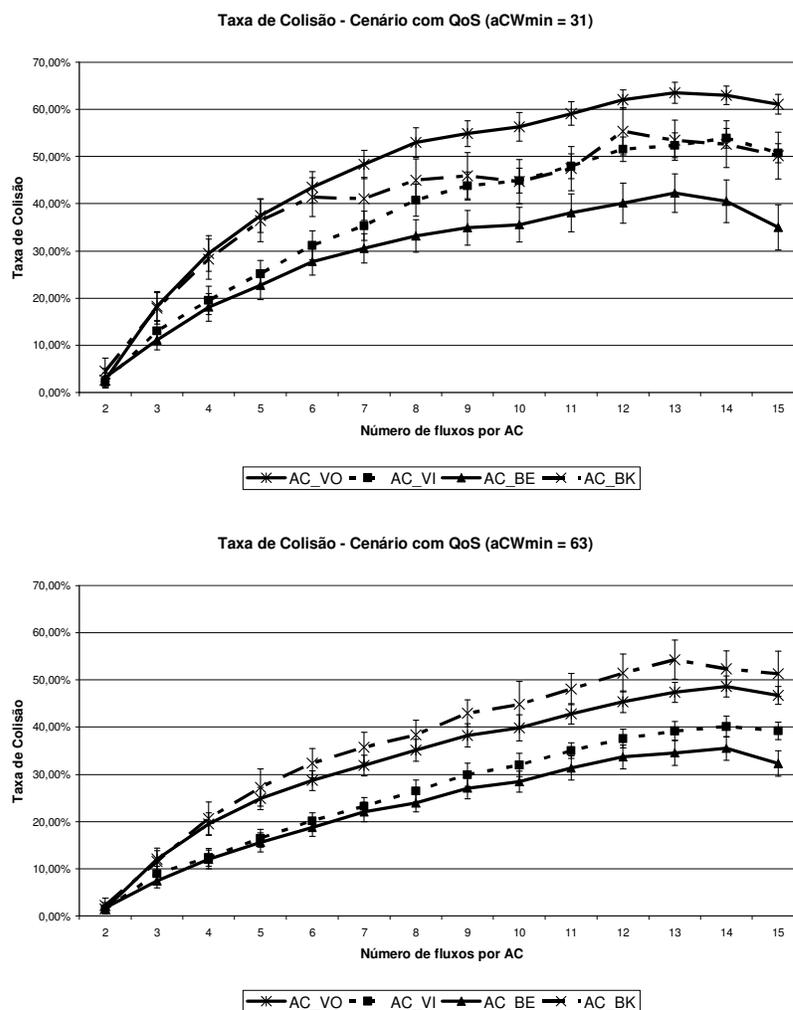


Figura 24: Comparação da taxa de colisão de todas as categorias entre cenários sem configuração de QoS e com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada onde aCWmin assume os valores 31 e 63.

O atraso médio fim-a-fim é de um modo geral maior devido à possibilidade de se escolher valores maiores de *backoff*, conforme pode ser observado na Figura 25 que compara os cenários com aCWmin = 15, aCWmin = 31 e aCWmin = 63.

O atraso médio dos fluxos em geral alcançou valores muito altos, em função das perdas e retransmissões com o aumento da carga na rede. Observou-se a influência da priorização do tráfego em conjunto com as próprias características de cada fluxo. As AC's de menor taxa e menor tamanho de pacote (classe AC_VO – voz e classe AC_BE – FTP/1300 bytes) obtêm resultados melhores comparativamente às de mesmo protocolo de transporte e maiores taxa e tamanho de pacote (classe AC_VI – vídeo e classe AC_BK – FTP/1500 bytes).

A Figura 25 mostra que, mesmo sem implementar a proposta de garantia estrita para a categoria de voz, o serviço é viável até o instante em que a carga na rede comporta 8 fluxos de voz competindo com o mesmo número de fluxos de cada uma das demais categorias e a partir do qual o atraso médio fim-a-fim supera os 150ms.

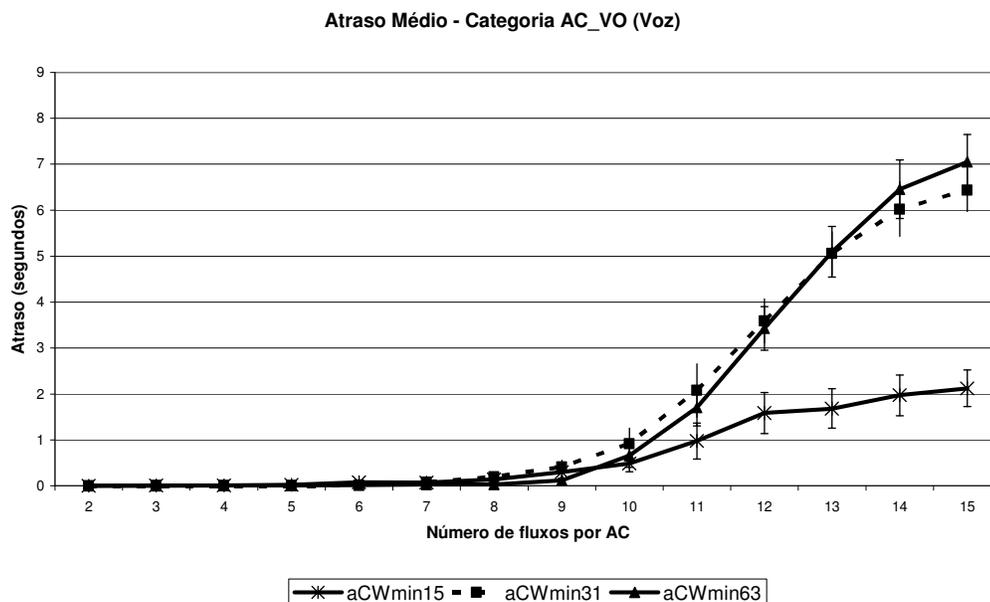


Figura 25: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada onde aCWmin assume os valores 15, 31 e 63.

À medida que o parâmetro aCWmin é incrementado (de acordo com os valores da Tabela 7 do Capítulo 4), a taxa de perda tende a se reduzir para todos os tipos de tráfego, com exceção daquele que modela a transmissão de vídeo, em que os resultados se mostram muito próximos e com uma diferença no comportamento em função da carga na rede. Estes resultados são apresentados na Figura 26. Esta análise mostra que a taxa de perda não está sempre diretamente relacionada à taxa de colisão para todas as categorias de tráfego. As Figuras 27 e 28 demonstram a redução da taxa de colisão para a categoria AC_VI (vídeo) e a manutenção de sua taxa de perda, respectivamente, com o aumento da faixa de escolha do valor de *backoff* pela manipulação dos parâmetros CW_{min} e CW_{max} (vide valores da Tabela 8). Neste caso da categoria AC_VI, a perda de pacotes se deve em sua maioria ao estouro do *buffer* nos roteadores, conforme o gráfico da Figura 29 que compara as causas das perdas dessa categoria nos mesmos cenários das Figuras 27 e 28. Na Figura, IFQ se refere ao estouro do *buffer*, NRTE ao descarte por falta de uma rota

válida, RET ao descarte por ultrapassar o limite de retransmissões e portanto diretamente ligado à taxa de colisão, e LOOP e TTL são autoexplicativos e também estão relacionados com instabilidades do protocolo de roteamento. Na implementação dos protocolos de roteamento no NS2, o LOOP é detectado antes que ocorra a expiração do TTL, verificando se o pacote recebido no agente de roteamento foi originado pelo próprio nó e já foi encaminhado a outros nós.

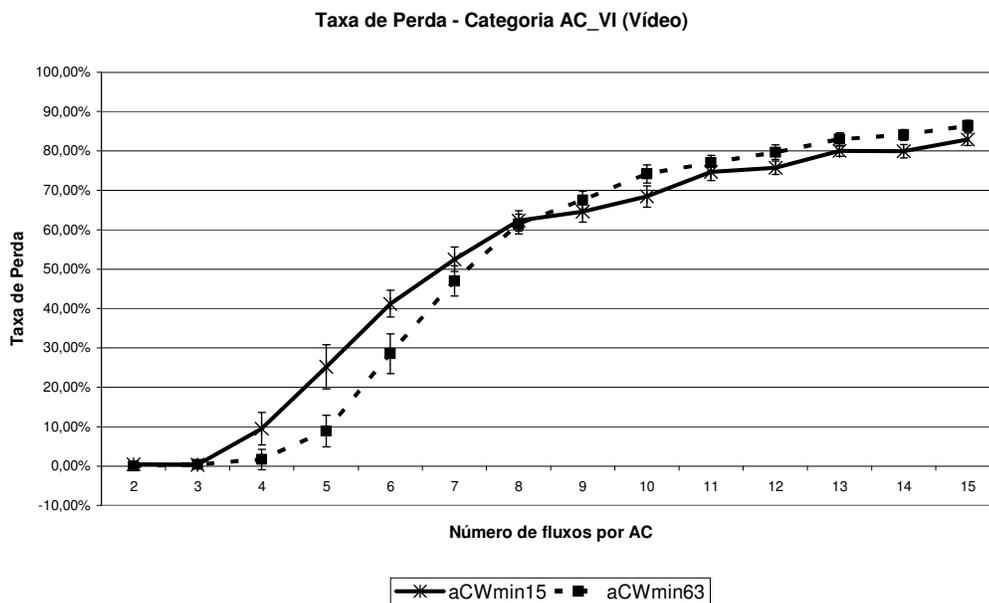


Figura 26: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada onde aCWmin assume os valores 15 e 63.

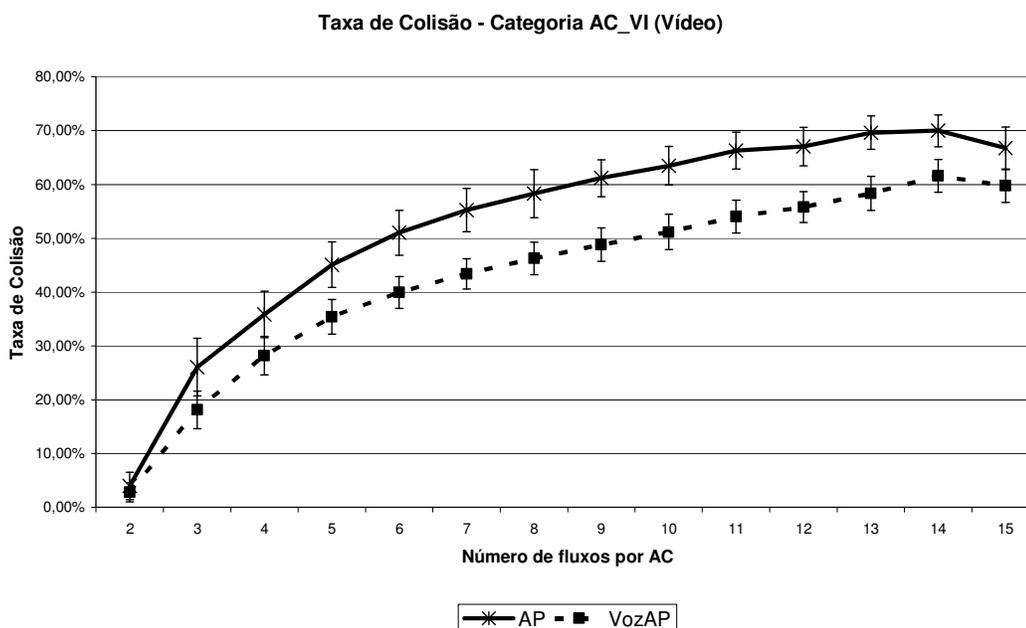


Figura 27: Comparação da taxa de colisão da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração

de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as propostas 2 (AP) e 4 (VozAP) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.

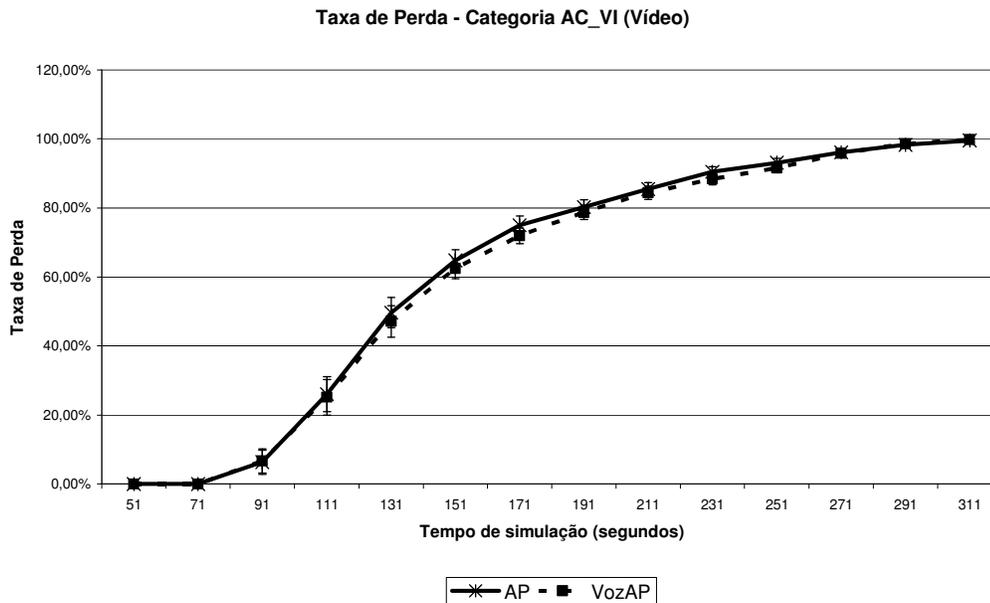


Figura 28: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as propostas 2 (AP) e 4 (VozAP) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.

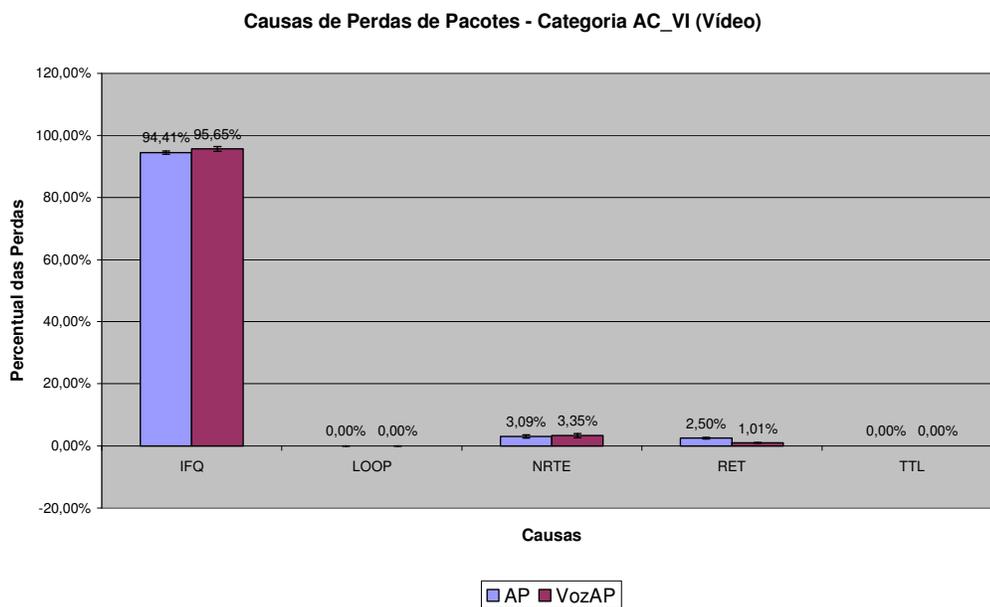


Figura 29: Comparação das causas das perdas de pacotes da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as propostas 2 (AP) e 4 (VozAP) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.

A vazão é inversamente proporcional à taxa de perda de pacotes. Quanto menor a taxa de perda, maior a vazão atingida, o que pode ser comprovado pelos

gráficos do tráfego de voz mostrados nas Figuras 30 e 31, que comparam a configuração padrão com uma configuração de maior janela de contenção.

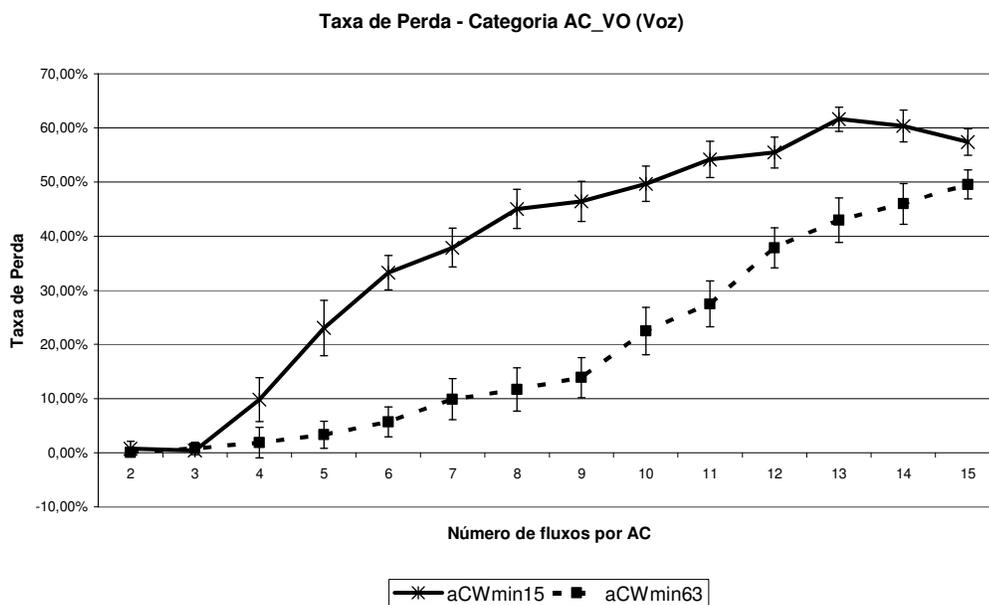


Figura 30: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada onde aCWmin assume os valores 15 e 63.

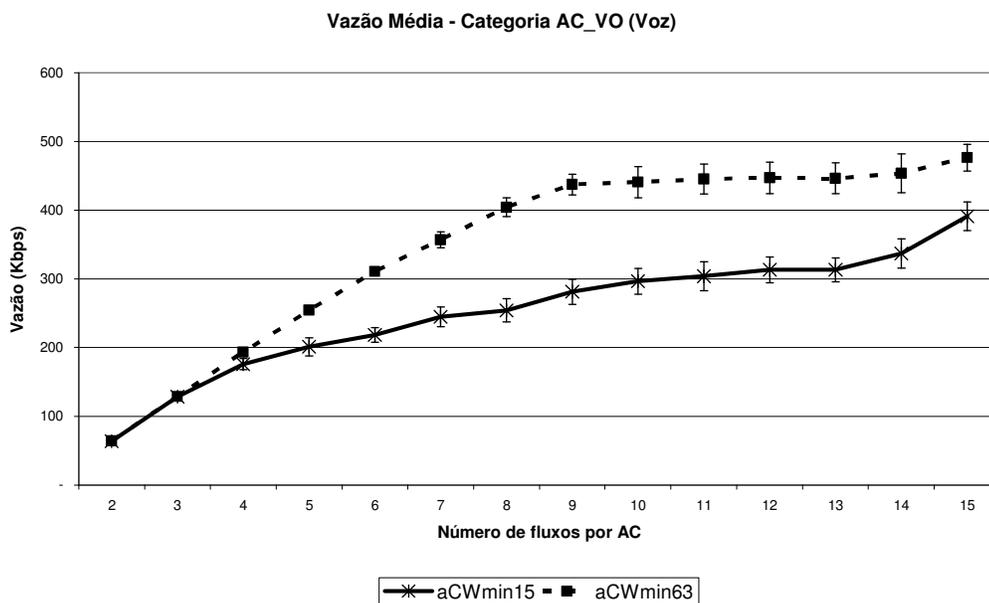


Figura 31: Comparação da vazão média da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada onde aCWmin assume os valores 15 e 63.

A funcionalidade de *Content Free Burst* (CFB) oferece vantagens mais significativas para categorias de maior taxa de transmissão, como a que modela o tráfego de vídeo, com qualquer conjunto de parâmetros, conforme pode ser

observado, por exemplo, na Figura 32, que utiliza a proposta de garantia de serviço para o AP (vide proposta 2 da Tabela 8). Isso era esperado pelo menor *overhead* de acesso ao meio entre os quadros. Com taxas maiores, o *buffer* é rapidamente saturado causando descarte dos quadros antes mesmo que se possa tentar a transmissão. Assim, o CFB beneficia essas categorias ajudando no escoamento do *buffer*.

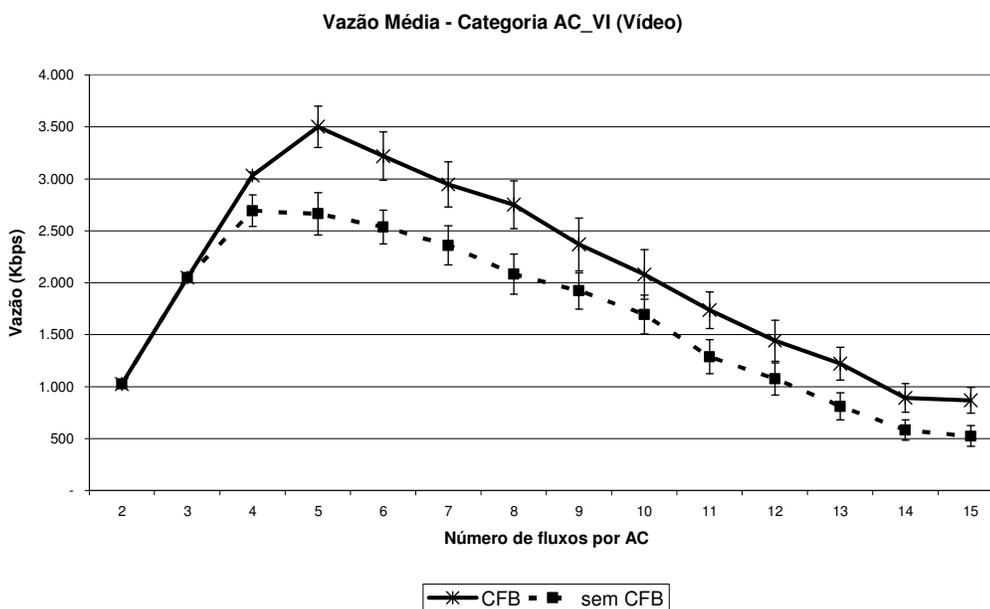


Figura 32: Comparação da vazão média da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 2 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e desabilitada.

Foram simulados quatro conjuntos de parâmetros buscando alcançar o objetivo de prover garantia de serviço para o tráfego de voz, de acordo com a Tabela 8. As simulações dos conjuntos de parâmetros para estações (proposta 1) e para o AP (proposta 2) oferecem resultados muito semelhantes para a categoria de voz. Para a categoria de vídeo, a média dos resultados da proposta 2 (AP) é ligeiramente melhor que a dos resultados da proposta 1 (estação), porém os intervalos de confiança se interceptam. A Figura 33 ilustra um desses resultados através da comparação entre as propostas 1 e 2 do atraso médio fim-a-fim para a categoria de vídeo. A configuração da proposta 1 obtém, em média, um atraso 12% maior que a configuração da proposta 2. A vazão média com a configuração da proposta 2 atinge um valor 14% maior que o da proposta 1 quando estão em curso 9 e 10 fluxos de cada AC, conforme ilustrado na Figura 34.

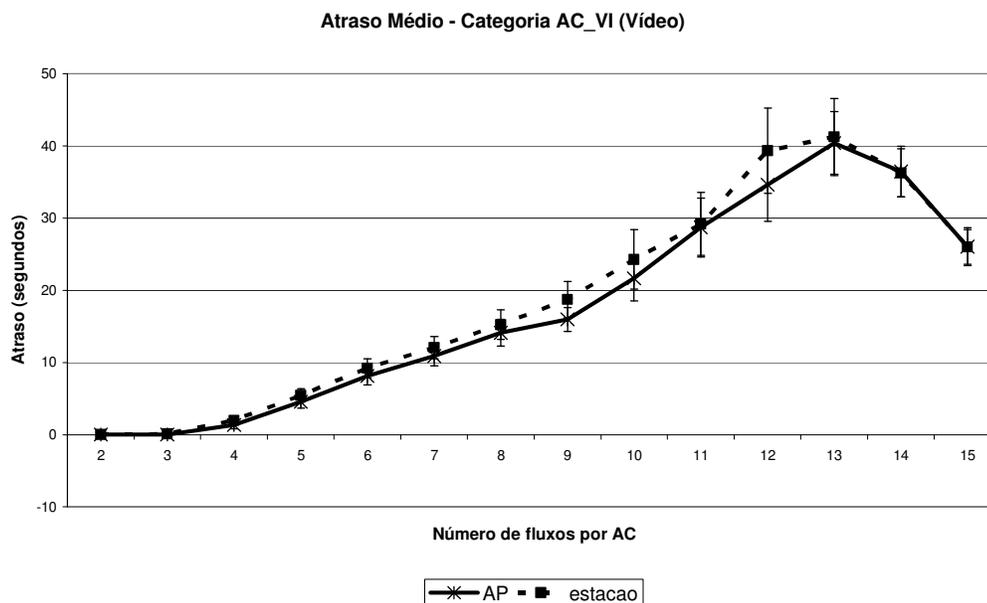


Figura 33: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as propostas 2 (AP) e 1 (estação) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.

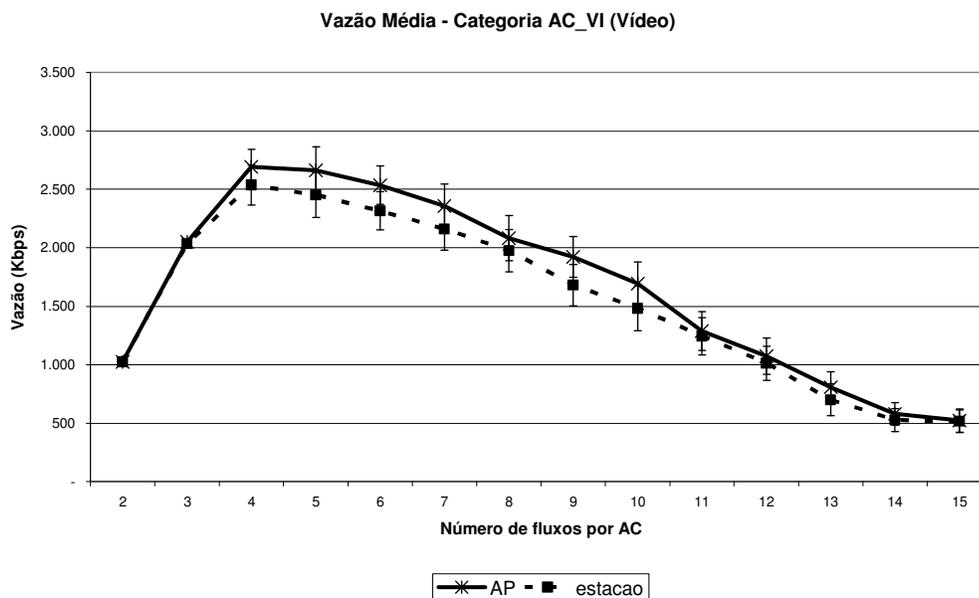


Figura 34: Comparação da vazão média da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as propostas 2 (AP) e 1 (estação) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz..

Considerando que a proposta 2 de garantia de serviço para o tráfego de voz apresenta uma pequena vantagem sobre a proposta 1, as Figuras 35 e 36 apresentam os resultados da categoria de voz com relação ao atraso médio fim-a-fim e à vazão média, respectivamente, comparando a proposta 2 de garantia estrita,

descrita na Tabela 8 do Capítulo 4, com os valores definidos no padrão IEEE 802.11e. No último ponto representado no gráfico, cada categoria possui 14 fluxos em curso. Caso não houvesse nenhuma perda, considerando a taxa de transmissão de 64 Kbps para os fluxos de voz, a vazão agregada final seria de 896 Kbps. A Figura 36 mostra que a vazão do tráfego de voz atinge 773 Kbps com a configuração de garantia estrita contra os 422 Kbps atingidos com a configuração padrão.

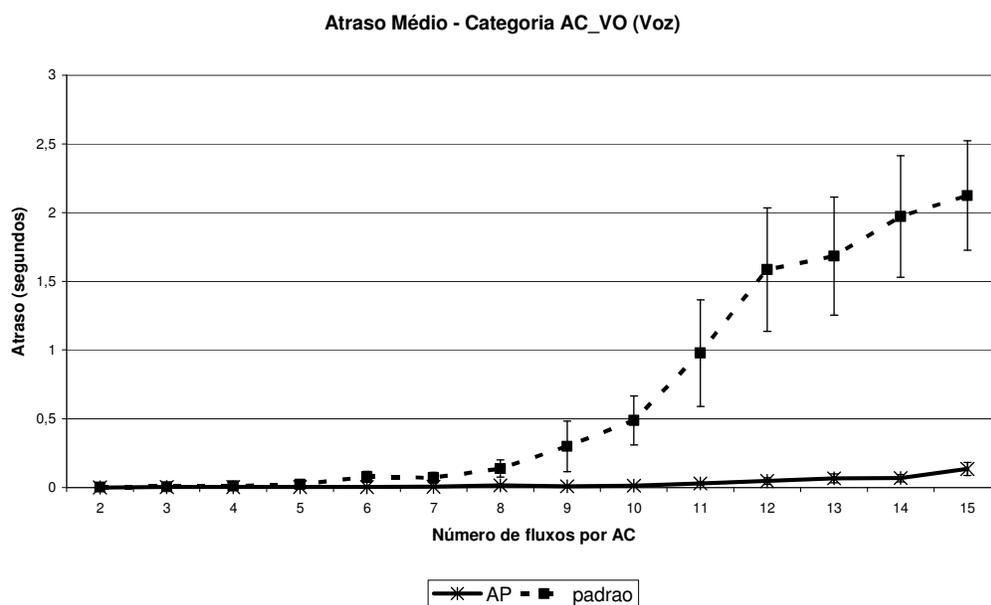


Figura 35: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre a proposta 2 da Tabela 8 (AP) de garantia de serviço para o tráfego de voz e valores padrão.

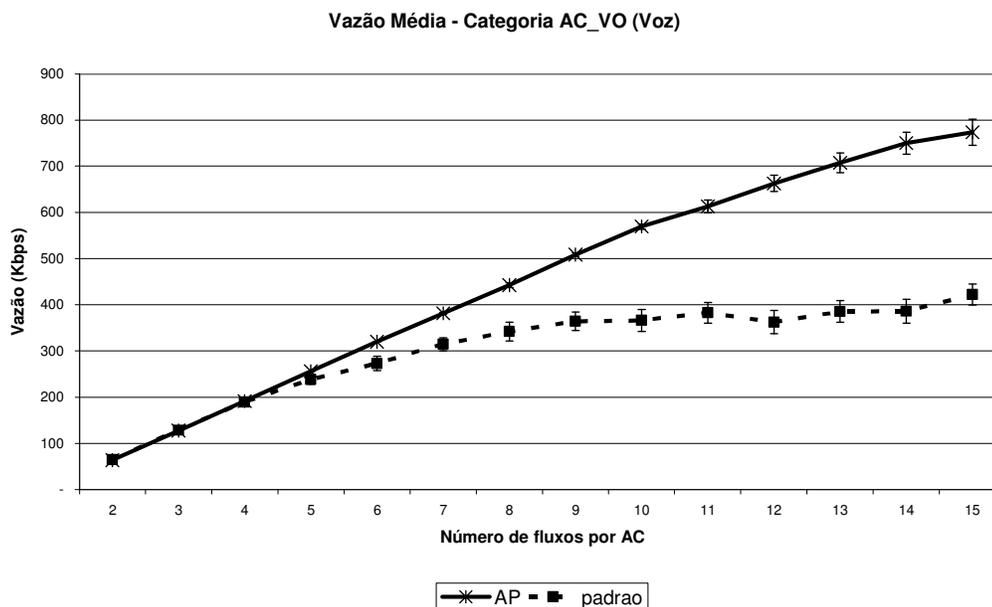


Figura 36: Comparação da vazão média da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre a proposta 2 da Tabela 8 (AP) de garantia de serviço para o tráfego de voz e valores padrão.

A garantia estrita oferecida à categoria de voz degrada o desempenho das demais categorias, como esperado. Assim, foram propostos os conjuntos de parâmetros das propostas 3 e 4, apresentadas na Tabela 8 do Capítulo 4, visando a reduzir a taxa de colisão em função de uma faixa de janela de contenção maior, sem aumentar significativamente o tempo de acesso ao meio.

A taxa de colisão foi efetivamente reduzida em ambos os casos, como mostram a Figura 27, com a comparação entre as propostas 2 e 4 para a categoria de vídeo, e a Figura 37, com a comparação entre as propostas 2 e 3 para a mesma categoria. A proposta 3, no entanto, alcançou resultados superiores em todas as métricas para todas as categorias, principalmente nos instantes de maior carga na rede, onde a competição entre os fluxos é maior, tendo sido bastante significativa essa melhora nas categorias de menor prioridade. A Figura 38 mostra a comparação da taxa de perda da categoria de voz entre as propostas 2 e 3 e a Figura 39, a do atraso médio da categoria de *background* entre essas mesmas propostas, exemplificando a extensão das vantagens da proposta 3 ao desempenho das categorias de menor prioridade também.

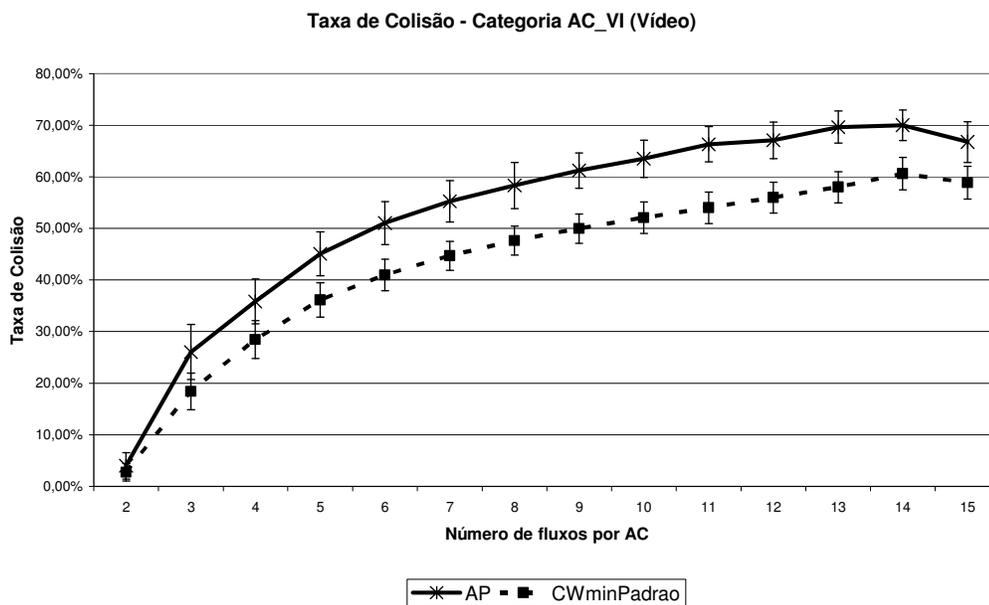


Figura 37: Comparação da taxa de colisão da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as propostas 2 (AP) e 3 (CWminPadrao) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.

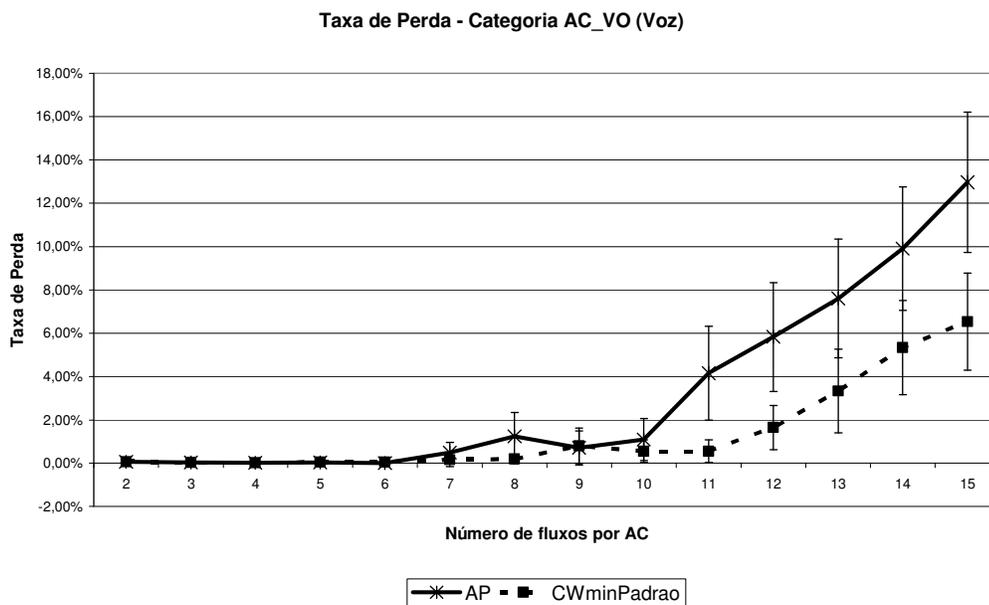


Figura 38: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as propostas 2 (AP) e 3 (CWminPadrao) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.

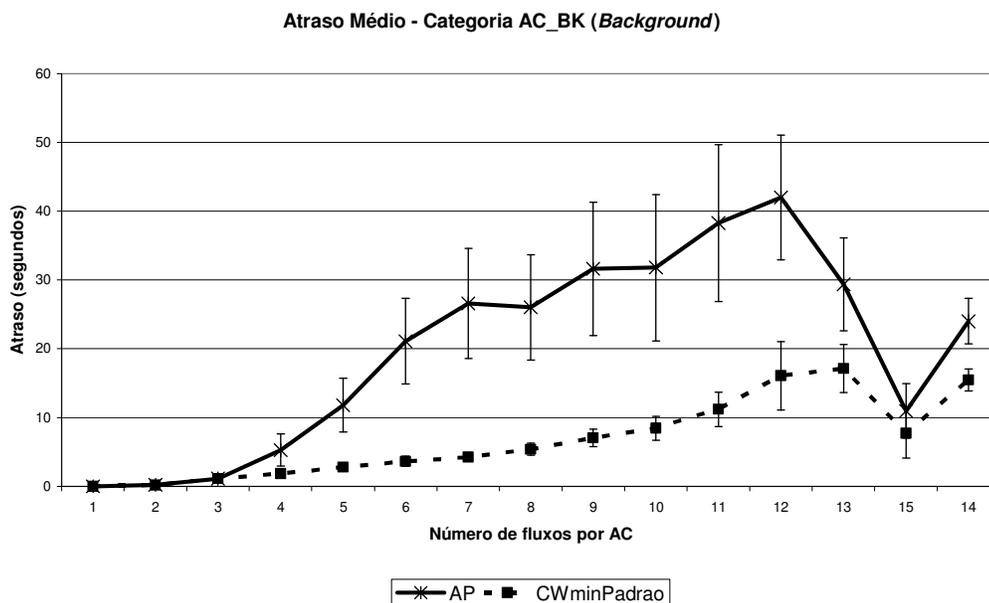


Figura 39: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_BK (*background*) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB desabilitada entre as propostas 2 (AP) e 3 (CWminPadrao) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.

Além disso, habilitando-se a funcionalidade de *Content Free Burst* (CFB), o desempenho da categoria de vídeo alcança uma melhora de 30% em média sem causar degradação significativa na categoria de voz. Esse fato pode ser observado na Figura 40, que mostra a vazão média da AC de vídeo em simulações que utilizam os valores da proposta 3, apresentada na Tabela 8 do Capítulo 4.

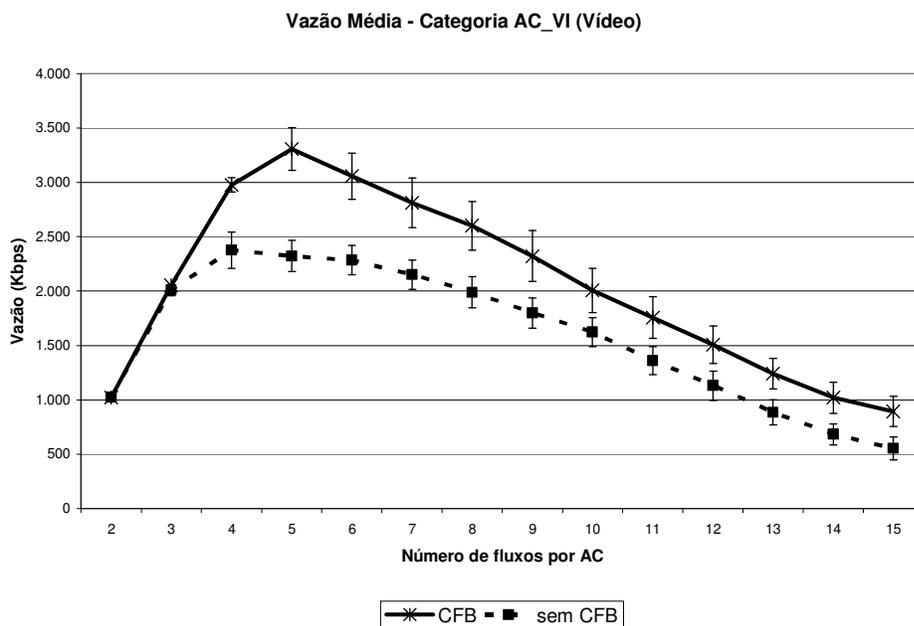


Figura 40: Comparação da vazão média da categoria AC_VI (vídeo) em cenário com a proposta 3 da

Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz com a funcionalidade CFB habilitada e desabilitada.

A proposta 3, portanto, mantém a garantia de serviço da categoria de voz mesmo em cenários de grande competição, inclusive melhorando seu desempenho nessas situações. Ao fim da simulação, a vazão média da categoria de voz atinge 824 Kbps, conforme ilustrado na Figura 41, e ainda reduz o impacto dessa garantia nas categorias de menor prioridade. Essa otimização do desempenho, com relação à categoria de vídeo, é maior com o uso do CFB. A melhoria do desempenho geral da rede é alcançada, assim, sem que seja necessária nenhuma alteração nos mecanismos da camada MAC introduzidos pelo padrão IEEE 802.11e, apenas requerendo a configuração adequada dos seus parâmetros, o que facilita sua implementação prática em redes reais.

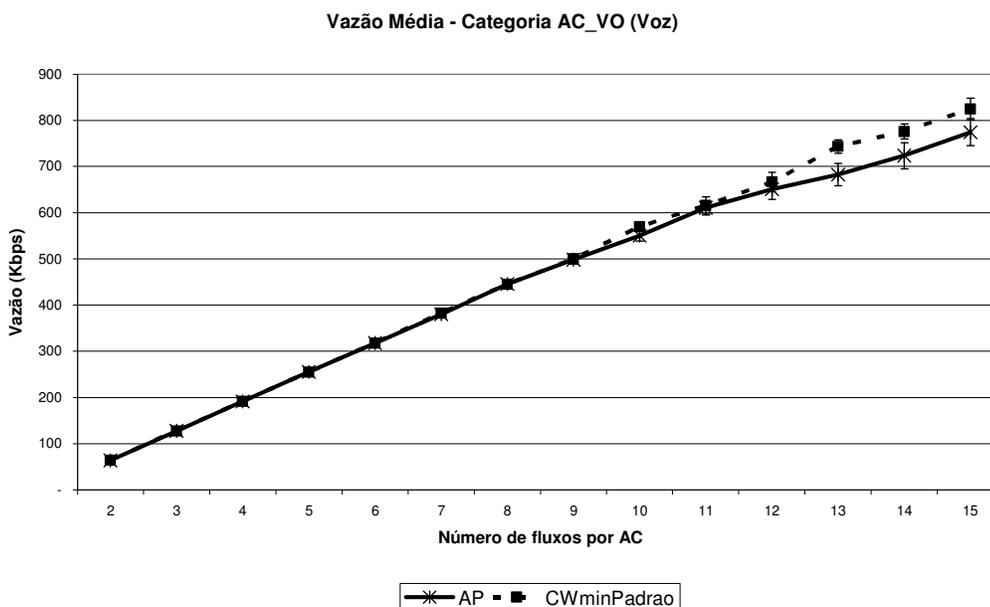


Figura 41: Comparação da vazão média da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada entre as propostas 2 (AP) e 3 (CWminPadrao) da Tabela 8 de garantia de serviço para o tráfego de voz.

É de se supor, contudo, que a implementação da garantia estrita da categoria de voz através da configuração estática dos parâmetros de acesso ao meio imponha uma limitação no desempenho das demais categorias. Isso acontece, pois os AIFS's das outras categorias dependem sempre do AIFS da categoria de voz mais sua janela de contenção máxima, independente da existência de fluxos ativos de voz ou não. No entanto, a análise dessa influência nas métricas de QoS mostra que a

limitação de desempenho está mais ligada à carga de tráfego de voz na rede do que à configuração estática dos parâmetros de acesso ao meio.

As Figuras 42 e 43 mostram a comparação da taxa de perda e do atraso médio para a categoria de vídeo, respectivamente, entre um cenário em que o tráfego de voz é totalmente interrompido entre os instantes 100s e 200s, quando estão em curso 4 e 9 fluxos de cada categoria, respectivamente, e a partir de 200s os fluxos de voz são reativados, porém sua carga (4 fluxos) não é mais incrementada até o fim da simulação, indicado no gráfico com a legenda “interrupção” (o *script* de geração de tráfego é apresentado na seção A.2.2 do Anexo A), e o cenário com o padrão de tráfego original. Pode-se observar que tanto a taxa de perda, como o atraso médio, são reduzidos no cenário em que a carga do tráfego de voz é menor (interrupção).

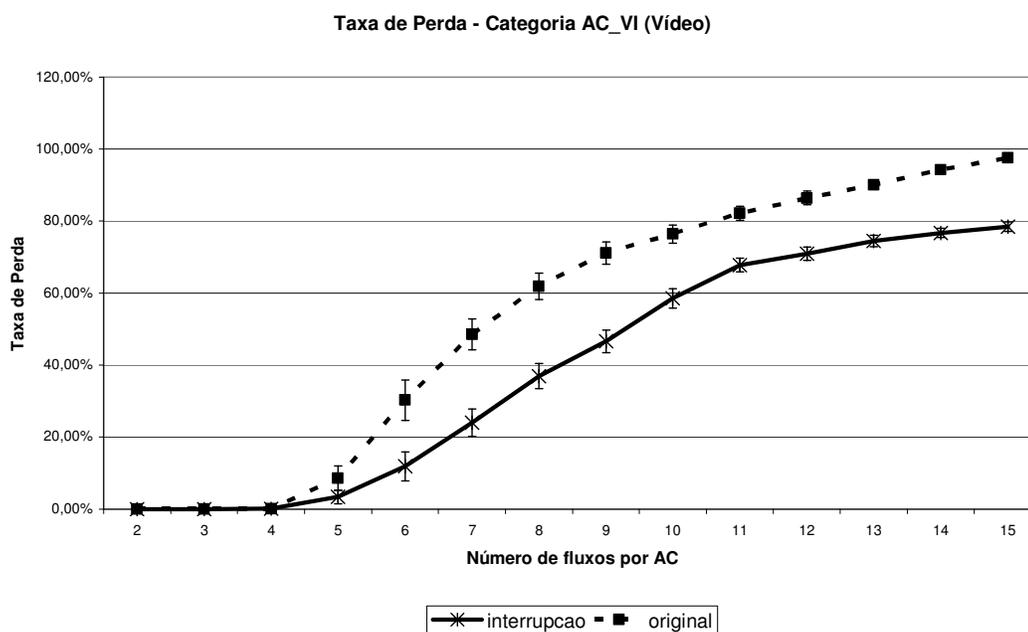


Figura 42: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o tráfego de voz é interrompido entre os instantes 100 e 200s e não é mais incrementado a partir de 200s (interrupção) e no padrão de tráfego contínuo (original).

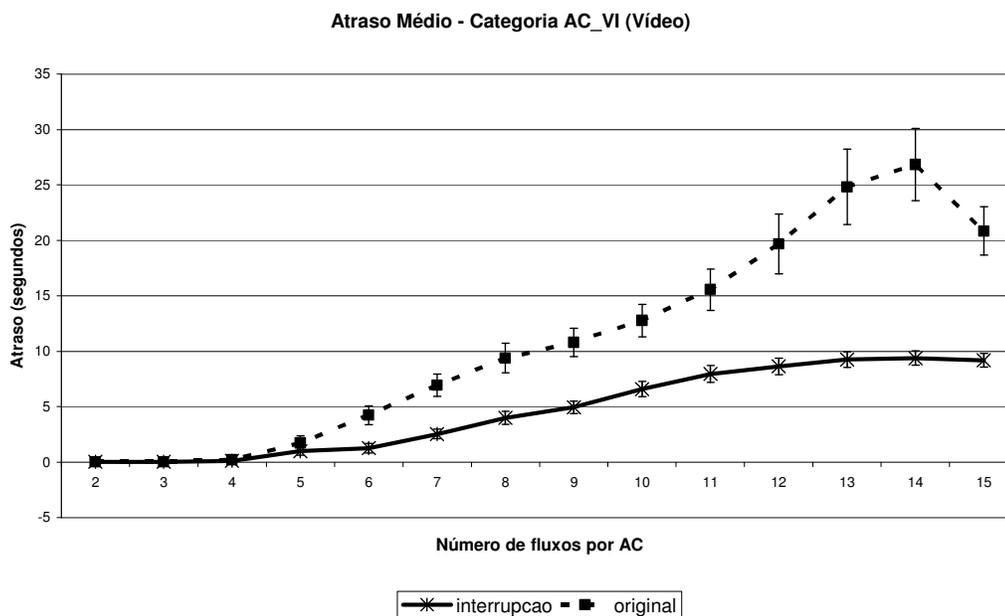


Figura 43: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o tráfego de voz é interrompido entre os instantes 100 e 200s e não é mais incrementado a partir de 200s (interrupção) e no padrão de tráfego contínuo (original).

Além disso, sem um mecanismo de controle de admissão, a competição entre os fluxos de uma mesma categoria já impõe um limite à sua capacidade. Isso pode ser observado na Figura 44, que mostra a comparação do cenário completo com todas as AC's com o cenário em que apenas o tráfego de vídeo é implementado, utilizando os mesmos parâmetros de acesso ao meio do cenário completo. Nela, observa-se que, com estas configurações de parâmetros e de padrão de tráfego, a capacidade da categoria de vídeo que a rede suporta é de no máximo 5 fluxos.

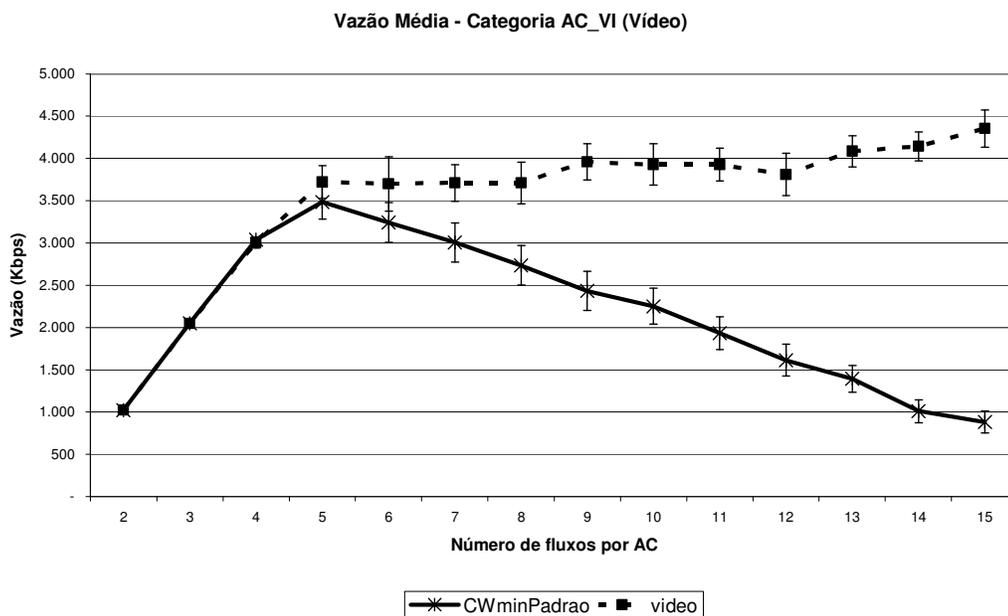


Figura 44: Comparação da vazão média da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde todas as categorias estão ativas (CWminPadrao) e onde apenas o tráfego de vídeo está ativo (vídeo).

Analisando as causas das perdas de pacotes na camada de aplicação, observa-se que, para os pacotes da categoria de voz, a maior razão de perda se deve a instabilidades do protocolo de roteamento, não havendo uma rota válida para encaminhamento no momento de sua transmissão. Para as categorias de menor prioridade, que rodam sobre TCP, a maior causa de descarte é o excesso de retransmissões no nível MAC, que está intimamente relacionado à taxa de colisão, não apenas dos pacotes da aplicação mas também dos respectivos reconhecimentos da camada de transporte e do nível MAC, daí seu desempenho apresentar ganho significativo com o aumento da janela de contenção. A categoria de vídeo, como já afirmado, sofre com o estouro do *buffer* devido a sua maior taxa de transmissão. No caso de estouro do *buffer*, também são contabilizados os pacotes que tiveram seu acesso ao meio deferido em relação a um pacote de voz, cujo *backoff* expirou no mesmo instante de tempo (colisão interna), o que aumenta o congestionamento da fila.

A Figura 45 ilustra a comparação das causas de perda nos cenários com a configuração de garantia estrita da proposta 3, apresentada na Tabela 8 do Capítulo 4, com e sem o uso de CFB. Vale ressaltar que os dados apresentados são a percentagem média do total de perdas do ponto de vista das camadas superiores ao

longo de toda a simulação, não sendo possível avaliar a influência da carga de tráfego nesse percentual. Como mencionado anteriormente, IFQ se refere ao estouro do *buffer*, NRTE ao descarte por falta de uma rota válida e RET ao descarte por ultrapassar o limite de retransmissões.

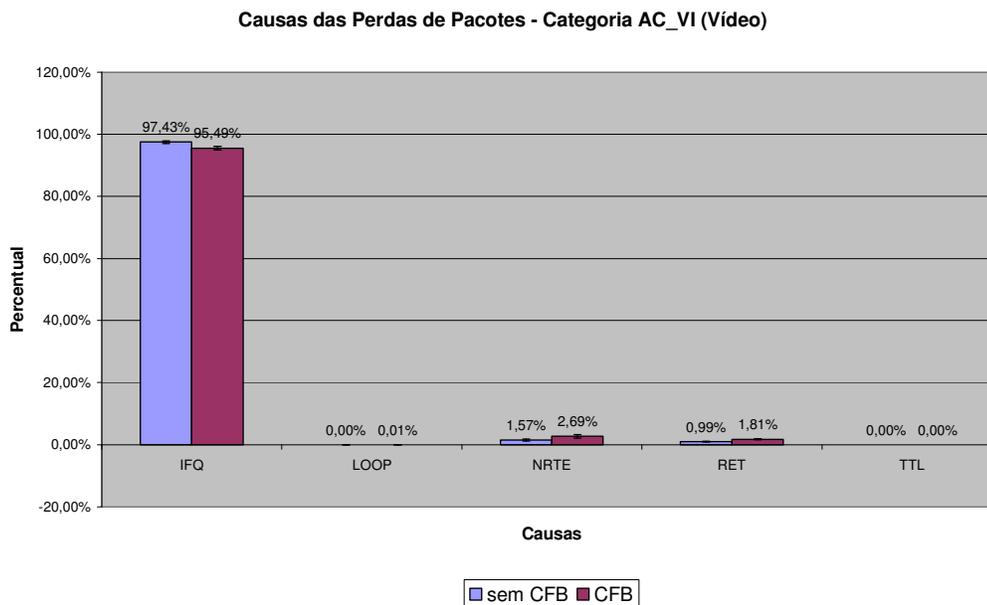


Figura 45: Comparação das causas de perda de pacotes da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e desabilitada.

A comparação das causas em cenários com e sem a funcionalidade CFB habilitada mostra uma redução no descarte por estouro do *buffer* para a categoria de vídeo em 2% na configuração com CFB, o que se reflete na melhora do desempenho dessa categoria nesse cenário. As perdas por falta de uma rota válida e por excesso de tentativas também sofreram um ligeiro aumento, o que mostra que mais pacotes tiveram acesso ao meio, ao invés de serem descartados por congestionamento da fila.

Essa verificação motivou o estudo da influência do parâmetro *TXOPLimit* no desempenho da categoria de vídeo através de seu ajuste dinâmico, conforme descrito no Capítulo 4.

Comparando a configuração de ajuste dinâmico de *TXOPLimit* com valor máximo para a categoria de voz limitado à metade do valor da categoria de vídeo, mesmo sem associar a configuração de garantia estrita, com os valores definidos no padrão utilizando a funcionalidade CFB, já é possível identificar uma melhora significativa no desempenho da categoria de voz. A Figura 46 mostra o atraso médio

para a categoria de voz, que fica abaixo dos 150ms até o fim da simulação. Esse ganho, contudo, não supera aquele introduzido pela configuração de garantia estrita, conforme pode ser observado na Figura 47.

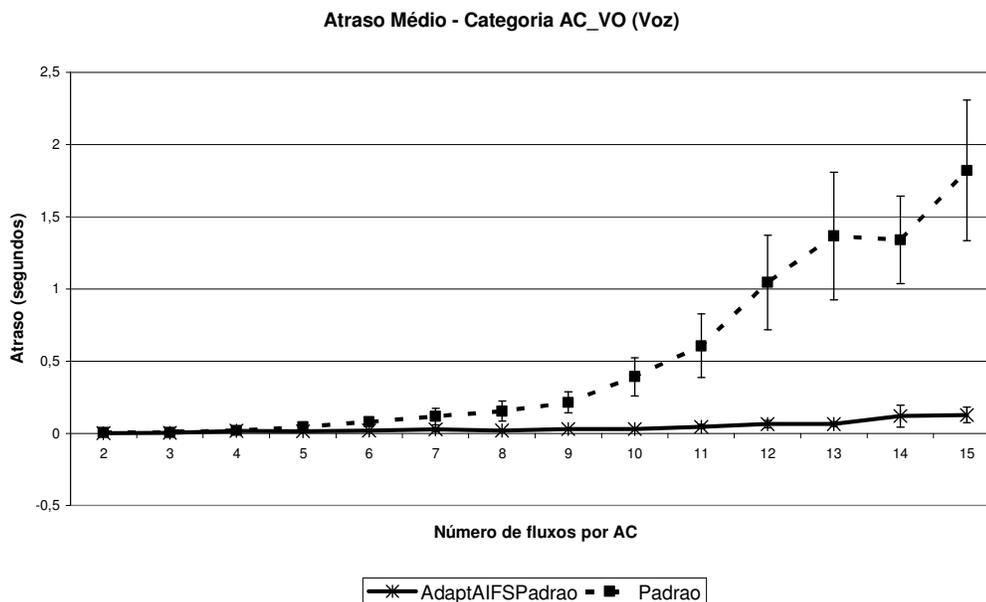


Figura 46: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS padrão com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado (AdaptAIFSPadrao) e onde ele não é realizado (padrão).

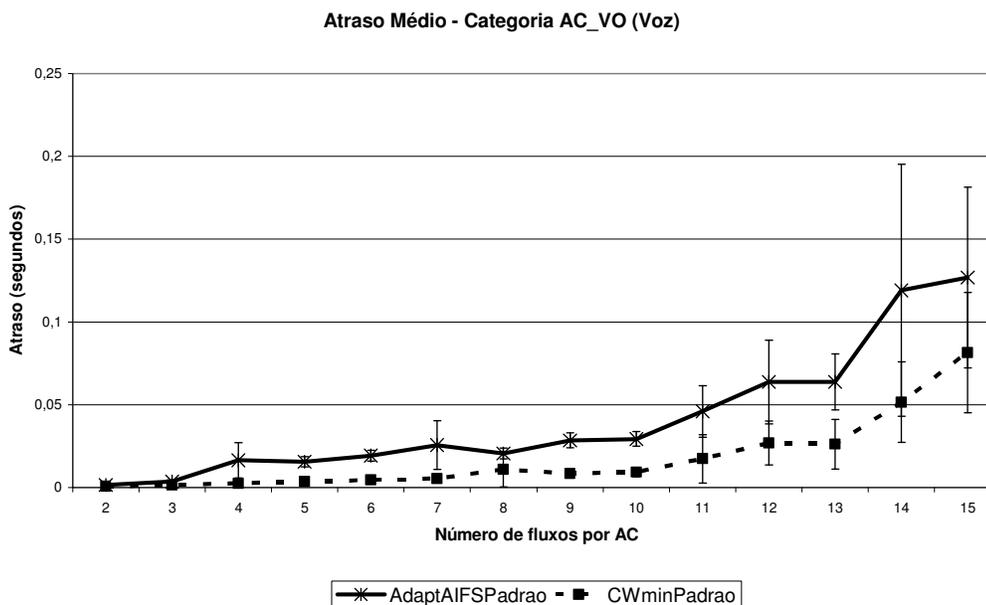


Figura 47: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é aplicado à configuração padrão (AdaptAIFSPadrao) e onde apenas a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 (CWminPadrao) é implementada.

A mesma melhora no desempenho, no entanto, não é observada para a categoria de vídeo, cujo atraso médio é significativamente maior na configuração com ajuste dinâmico de *TXOPLimit* em relação aos valores definidos no padrão utilizando CFB, conforme ilustrado na Figura 48.

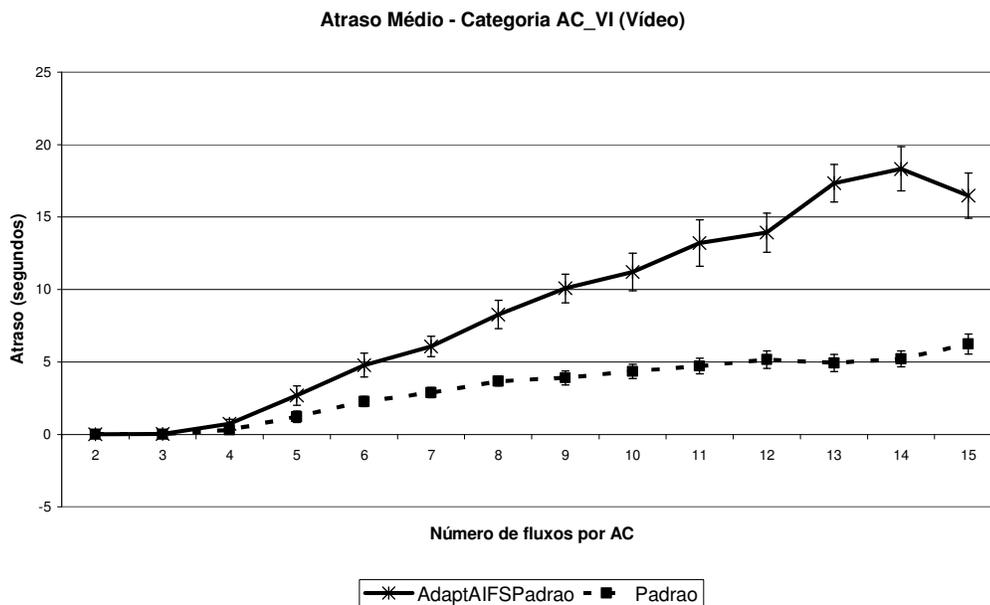


Figura 48: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS padrão com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de *TXOPLimit* é realizado (*AdaptAIFSPadrao*) e onde ele não é realizado (padrão).

A taxa de perda da AC de vídeo também foi maior com a configuração de ajuste dinâmico de *TXOPLimit* em relação à configuração padrão com CFB, principalmente com o aumento da carga na rede, conforme mostra a Figura 49. A Figura 50 mostra, inclusive, que o percentual dessas perdas causado por estouro do *buffer* é maior na configuração com ajuste dinâmico de *TXOPLimit*.

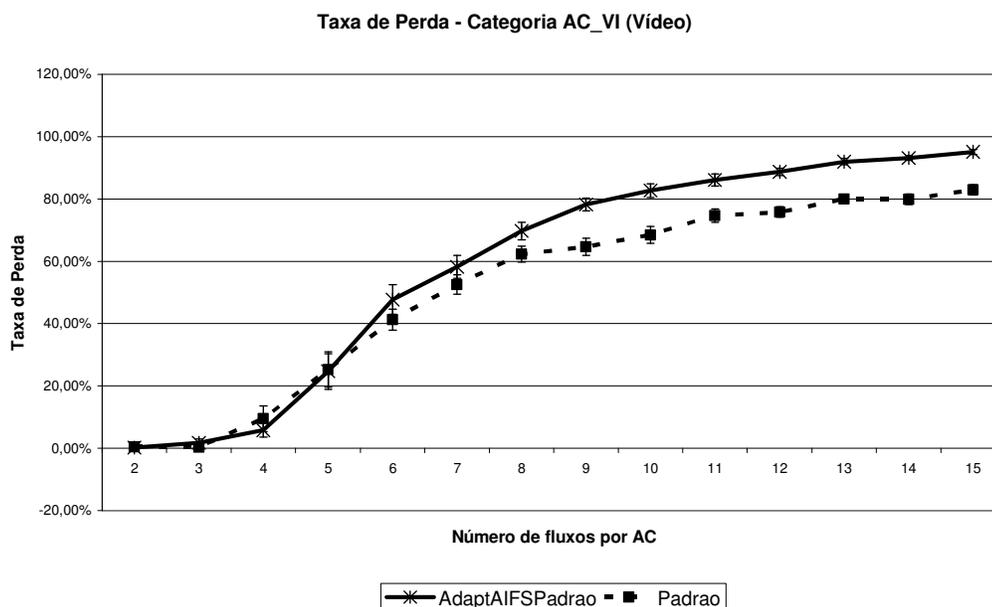


Figura 49: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS padrão com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado (AdaptAIFSPadrao) e onde ele não é realizado (padrão).

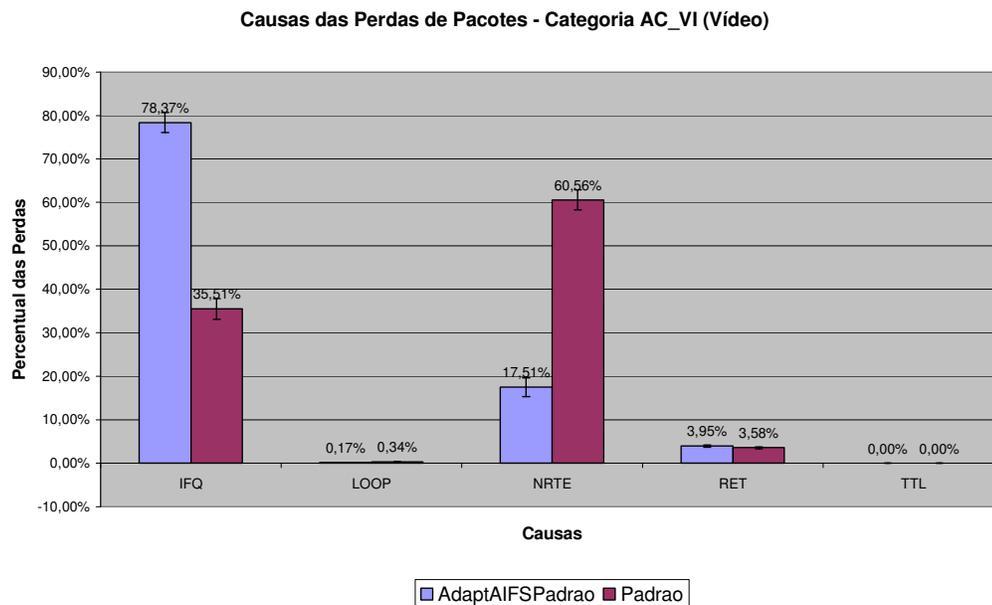


Figura 50: Comparação das causas de perda de pacotes da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS padrão com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado (AdaptAIFSPadrao) e onde ele não é realizado (padrão).

Isso pode ser explicado pela forma como o ajuste é feito para a categoria de voz (que já possui a maior prioridade dentre as AC's) contemplando todos os quadros da fila, o que importaria um retardo significativo no acesso ao meio para a categoria de vídeo, cujo ajuste dinâmico não seria capaz de compensar.

Comparando, no entanto, o desempenho da categoria de vídeo, na configuração com ajuste dinâmico de *TXOPLimit* mas sem garantia estrita para voz, com aquela em que apenas a garantia estrita para voz é implementada (proposta 3 da Tabela 8 do Capítulo 4), pode ser observada uma melhora no atraso médio, conforme demonstrado pela Figura 51. Nesse caso, a garantia estrita para voz impõe uma restrição ainda maior para as demais categorias e o ajuste do *TXOPLimit* contribui para a redução do atraso médio fim-a-fim através da redução do tempo de acesso ao meio dos quadros que compõem uma rajada.

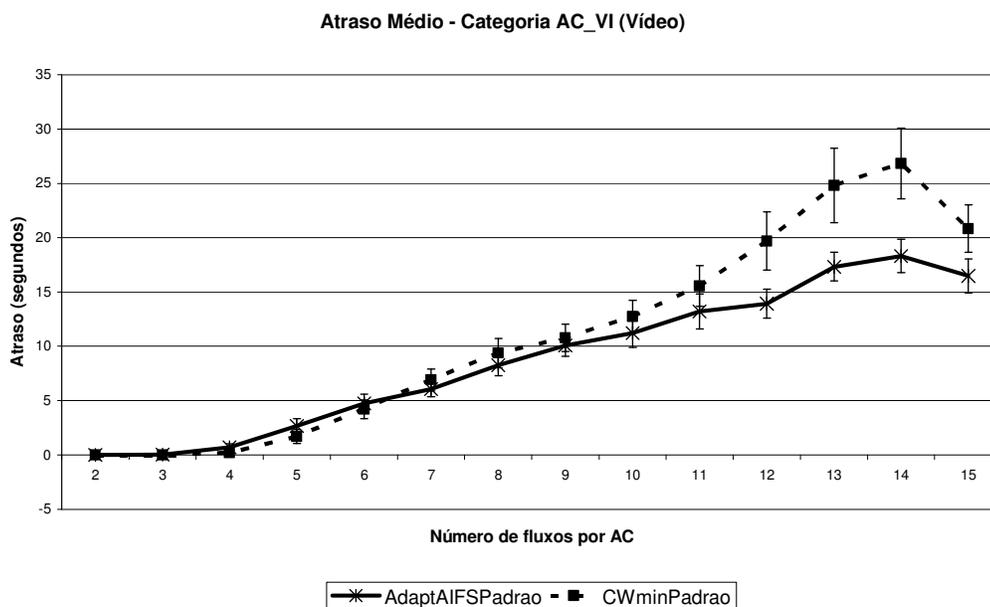


Figura 51: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de *TXOPLimit* é aplicado à configuração padrão (*AdaptAIFSPadrao*) e onde apenas a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 (*CWminPadrao*) é implementada.

Apesar de o percentual de pacotes de vídeo perdidos por descarte na fila ser efetivamente menor na configuração com ajuste dinâmico de *TXOPLimit*, conforme ilustra a Figura 52, a taxa de perda de pacotes é maior nessa configuração do que naquela com garantia estrita para voz. Como pode ser observado, a maior quantidade de pacotes inserida no meio aumenta o percentual de perdas por ausência de uma rota válida (NRTE) e por excesso de tentativas (RET). Além disso, pela ausência da proteção dos valores de AIFS adequados para impor uma garantia de serviço, a vazão do tráfego de voz é significativamente menor, conforme apresentado na Figura 53.

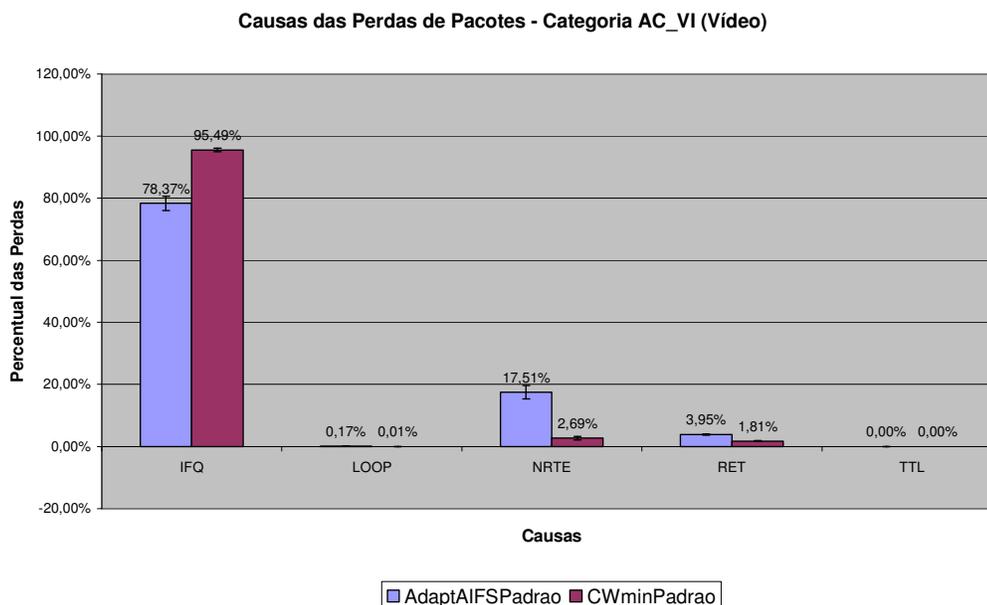


Figura 52: Comparação das causas de perda de pacotes da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é aplicado à configuração padrão (AdaptAIFSPadrao) e onde apenas a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 (CWminPadrao) é implementada.

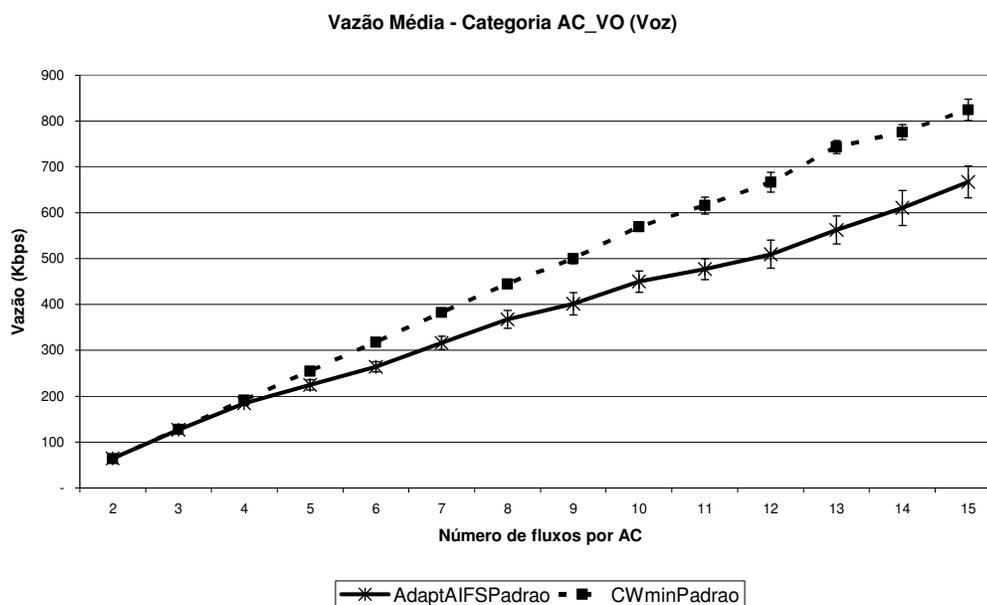


Figura 53: Comparação da vazão média da categoria AC_VO (voz) em cenários com configuração de QoS com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é aplicado à configuração padrão (AdaptAIFSPadrao) e onde apenas a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 (CWminPadrao) é implementada.

Com o objetivo de alcançar uma melhora no desempenho do tráfego de vídeo sem perder os ganhos alcançados para a categoria de voz com a garantia estrita, foi feita uma comparação do desempenho da categoria de vídeo na configuração de

garantia estrita da AC de voz (proposta 3 da Tabela 8 do Capítulo 4) com uma configuração de garantia estrita para a voz utilizando ajuste dinâmico de *TXOPLimit* apenas para a classe de vídeo (*AdaptVideo*).

Os resultados, no entanto, mostram que as métricas da categoria de vídeo são piores no cenário em que seu *TXOPLimit* é ajustado dinamicamente, inclusive com um maior percentual de descarte na fila. Uma possível explicação é que, ao impor uma restrição ao tempo de rajada dos quadros de vídeo, a configuração do ajuste dinâmico de *TXOPLimit* prejudica essa categoria na competição com uma categoria de maior prioridade e protegida por um mecanismo de garantia de serviço.

As demais categorias, provavelmente em função justamente do pior desempenho do vídeo, obtêm métricas melhores ao longo da simulação, principalmente com maior carga na rede. As Figuras 54 a 57 mostram, respectivamente, o atraso médio da categoria de vídeo, a taxa média de perda da categoria de melhor esforço, as causas de perda e a vazão da categoria de vídeo nos cenários acima discutidos.

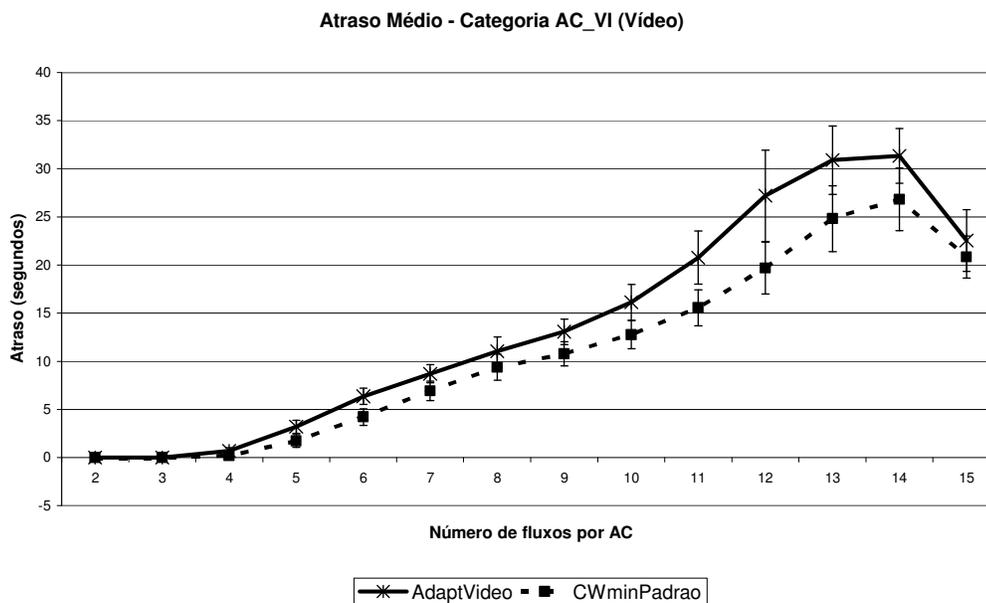


Figura 54: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de *TXOPLimit* é realizado apenas para AC_VI (*AdaptVideo*) e onde não é realizado (*CwminPadrao*).

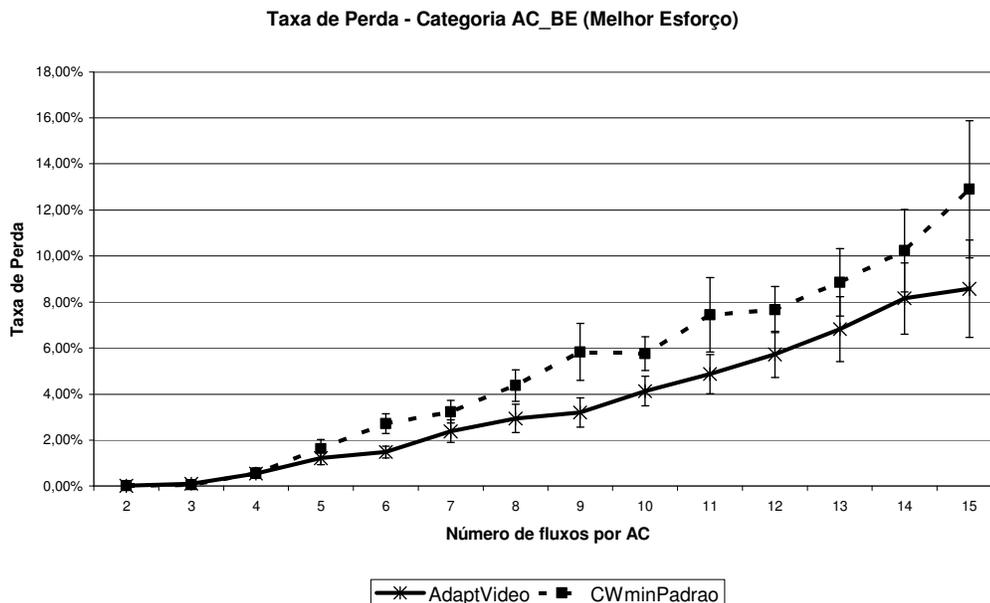


Figura 55: Comparação da taxa de perda da categoria AC_BE (melhor esforço) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado apenas para AC_VI (AdaptVideo) e onde não é realizado (CwminPadrao).

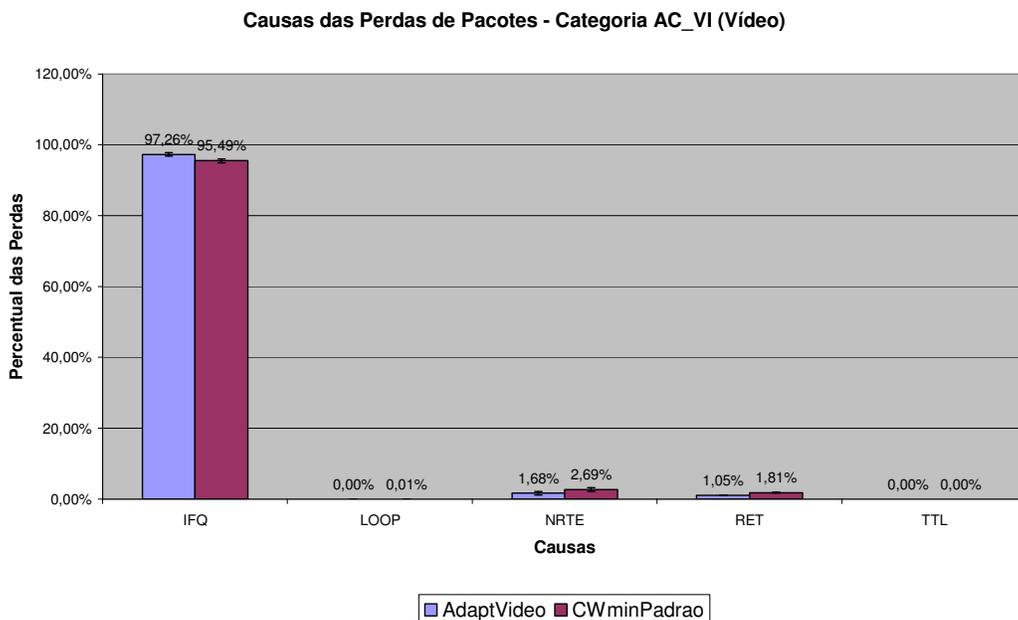


Figura 56: Comparação das causas de perda de pacotes da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de TXOPLimit é realizado apenas para AC_VI (AdaptVideo) e onde não é realizado (CwminPadrao).

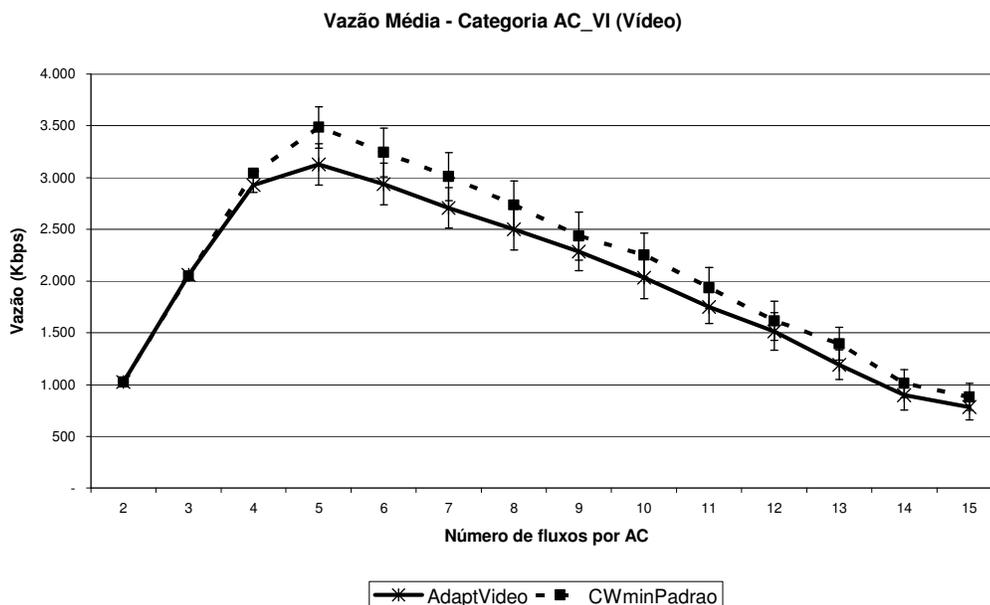


Figura 57: Comparação da vazão média da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de $TXOPLimit$ é realizado apenas para AC_VI (AdaptVideo) e onde não é realizado (CwminPadrao).

O estudo do ajuste dinâmico de $TXOPLimit$ não trouxe ganhos no desempenho da categoria de vídeo, porém tanto a categoria de voz quanto as de menor prioridade foram beneficiadas. Assim, foi avaliada a associação do ajuste dinâmico tanto para a categoria de vídeo quanto para a categoria de voz com a garantia estrita da categoria de voz.

O valor do limite máximo para o $TXOPLimit$ da AC_VO mostrou pouca influência nos resultados, apesar de o menor valor apresentar uma tendência de menor impacto nas demais categorias a longo prazo. As Figuras 58 a 61 mostram as comparações entre as configurações com limite máximo do $TXOPLimit$ da AC_VO igual ao da AC_VI (AdaptPadrao) e igual à metade do valor de AC_VI (AdaptVozMetade), com relação ao atraso médio da categoria de voz, à taxa média de perda da categoria de *background* e à vazão média das categorias de voz e vídeo, respectivamente.

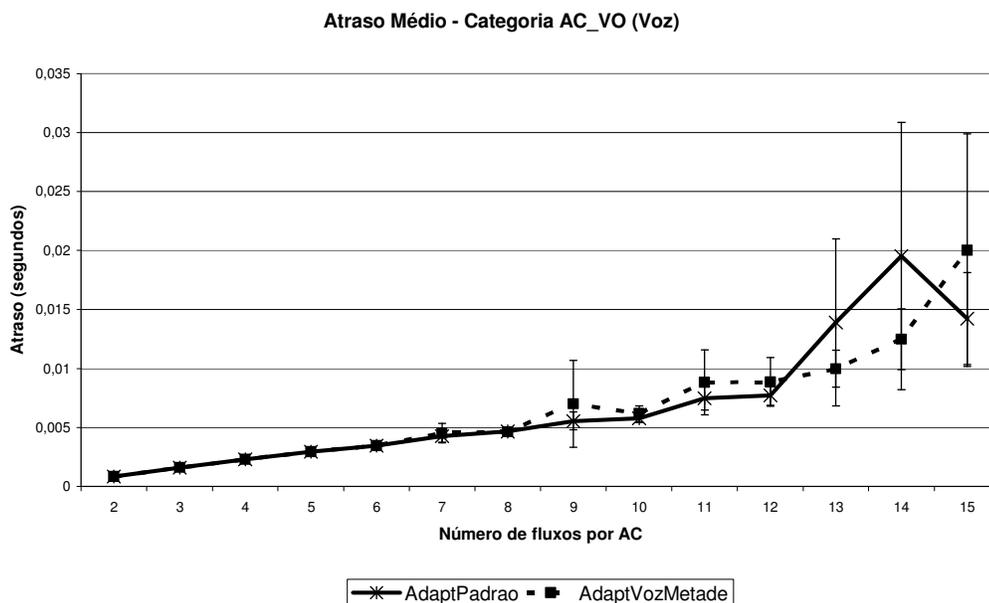


Figura 58: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e com ajuste dinâmico de TXOPLimit para AC_VO e AC_VI onde o limite de TXOPLimit é o mesmo para voz e vídeo (AdaptPadrao) e onde o limite de TXOPLimit para voz é metade do para vídeo (AdaptVozMetade).

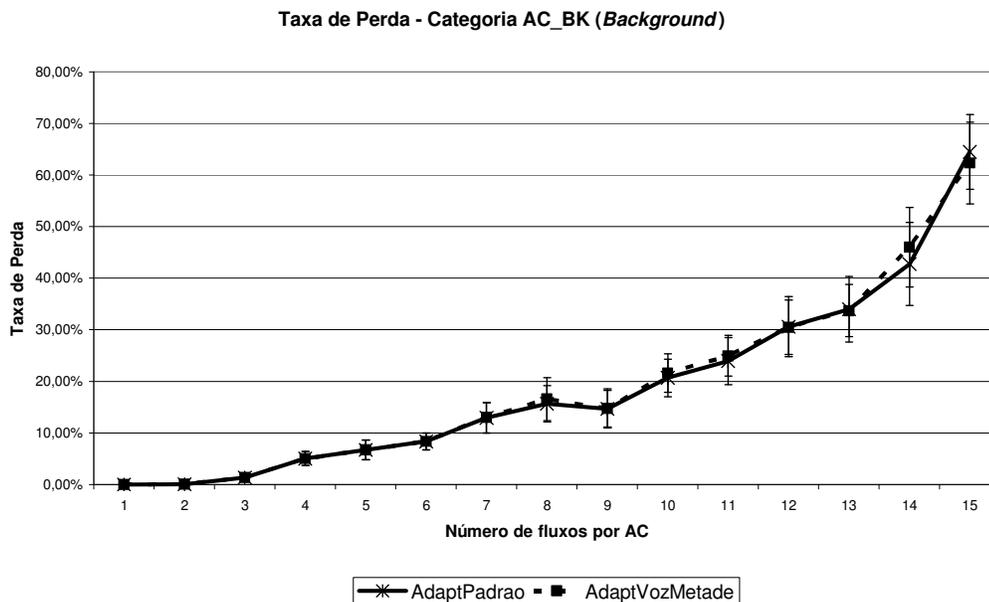


Figura 59: Comparação da taxa de perda da categoria AC_BK (background) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e com ajuste dinâmico de TXOPLimit para AC_VO e AC_VI onde o limite de TXOPLimit é o mesmo para voz e vídeo (AdaptPadrao) e onde o limite de TXOPLimit para voz é metade do para vídeo (AdaptVozMetade).

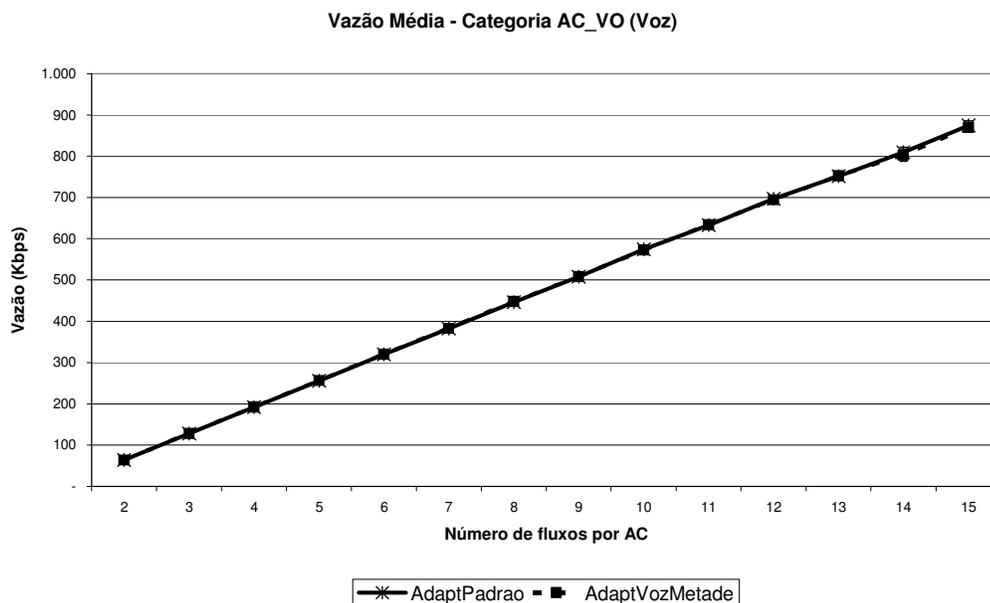


Figura 60: Comparação da vazão média da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e com ajuste dinâmico de TXOPLimit para AC_VO e AC_VI onde o limite de TXOPLimit é o mesmo para voz e vídeo (AdaptPadrao) e onde o limite de TXOPLimit para voz é metade do para vídeo (AdaptVozMetade).

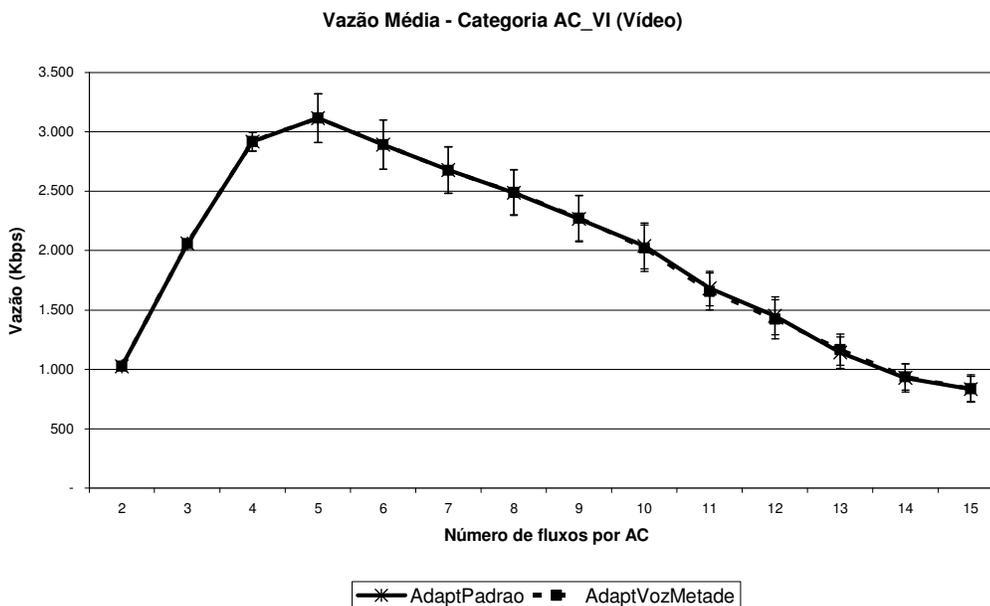


Figura 61: Comparação da vazão média da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e com ajuste dinâmico de TXOPLimit para AC_VO e AC_VI onde o limite de TXOPLimit é o mesmo para voz e vídeo (AdaptPadrao) e onde o limite de TXOPLimit para voz é metade do para vídeo (AdaptVozMetade).

A categoria de voz, como se poderia supor, obteve um desempenho ainda melhor associando-se a configuração de garantia estrita com o ajuste dinâmico de

TXOPLimit, independente do limite máximo imposto. As Figuras 62 e 63 ilustram essa constatação, apresentando os resultados do atraso médio e da taxa de perda, respectivamente.

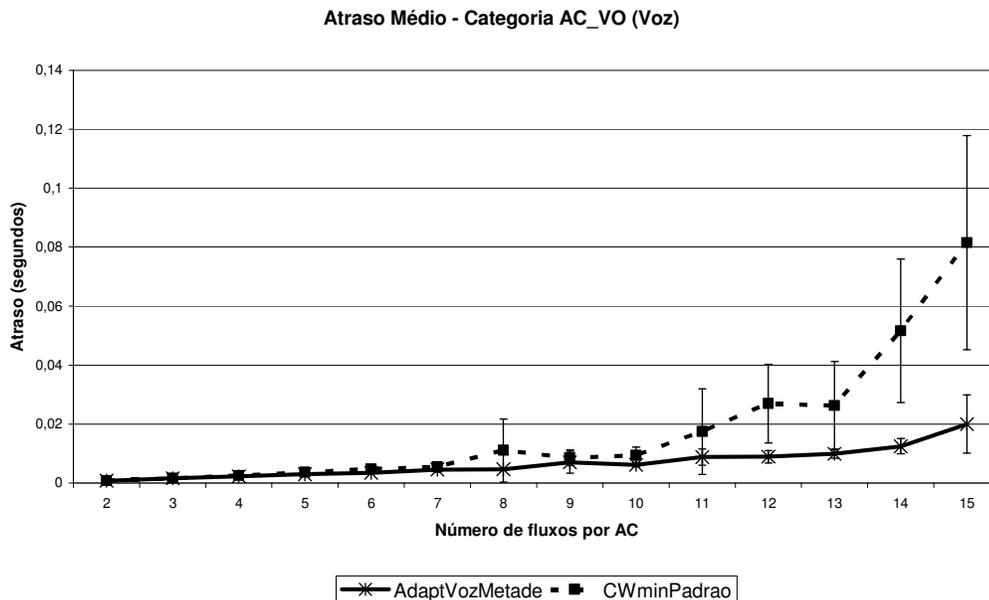


Figura 62: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de *TXOPLimit* é realizado para AC_VO e AC_VI com o valor máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (*AdaptVozMetade*) e onde não é realizado (*CwminPadrao*).

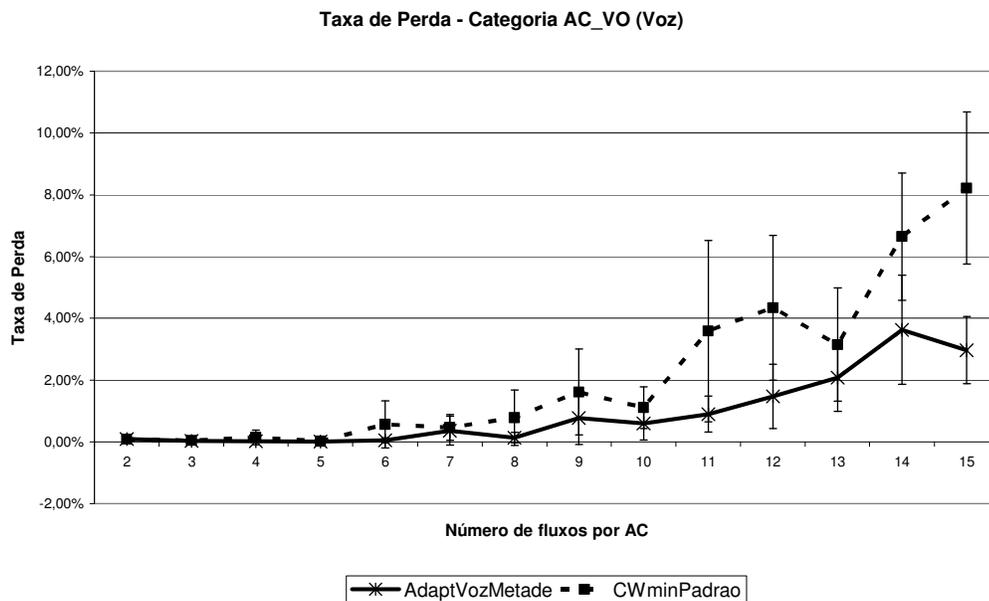


Figura 63: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de *TXOPLimit* é realizado para AC_VO e AC_VI com o valor

máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (AdaptVozMetade) e onde não é realizado (CwminPadrao).

As categorias de menor prioridade também se beneficiaram do ajuste dinâmico de *TXOPLimit* das categorias de maior prioridade, conforme ilustrado na Figura 64, que mostra a taxa de perda da categoria de melhor esforço.

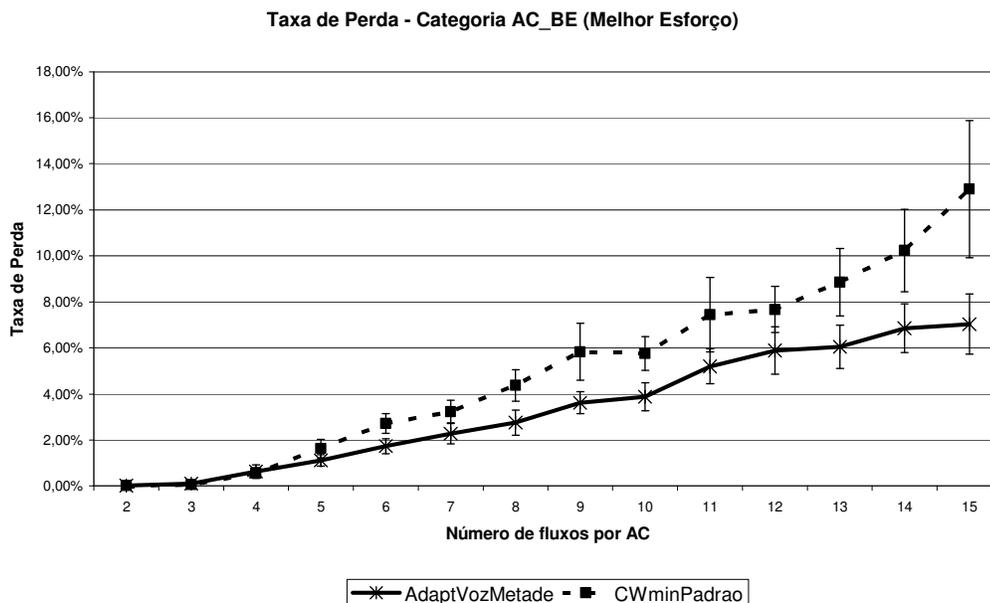


Figura 64: Comparação da taxa de perda da categoria AC_BE (melhor esforço) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada onde o ajuste dinâmico de *TXOPLimit* é realizado para AC_VO e AC_VI com o valor máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (AdaptVozMetade) e onde não é realizado (CwminPadrao).

5.1. AVALIAÇÃO DAS PROPOSTAS

De acordo com a análise realizada, duas propostas apresentaram os melhores resultados. Em comum, ambas se baseiam na configuração adequada do parâmetro AIFS para prover garantia de serviço para a categoria de voz.

A proposta 3 descrita na Tabela 8 do Capítulo 4 e referenciada nos gráficos como CWminPadrao utiliza os valores definidos no padrão IEEE 802.11e para as janelas de contenção mínima e máxima de todas as categorias e tem a funcionalidade CFB habilitada. É uma proposta que requer apenas a configuração apropriada dos parâmetros, sem qualquer intervenção nos mecanismos definidos no padrão.

Associando essa proposta com um mecanismo de ajuste dinâmico do parâmetro *TXOPLimit*, a proposta referenciada nos gráficos como AdaptVozMetade melhorou ainda mais o desempenho da categoria de voz e reduziu os impactos nas

categorias de menor prioridade, apesar de não ter apresentado ganhos significativos na categoria de vídeo. O mecanismo de ajuste introduzido é de implementação simples e o valor máximo para o parâmetro na categoria de voz é metade do valor na categoria de vídeo.

A Tabela 11 resume os parâmetros das propostas mais adequadas.

Tabela 11: Parâmetros das propostas mais adequadas.

Proposta de garantia estrita para AC_VO (CWminPadrao)				
AC	AIFSN	CW _{min}	CW _{max}	TXOPLimit
Voz	2	3	7	1504 μs
Vídeo	9	7	15	3008 μs
<i>Best Effort</i>	10	15	1023	0
<i>Background</i>	14	15	1023	0
Proposta de garantia estrita para AC_VO associada a ajuste dinâmico de TXOPLimit (AdaptVozMetade)				
AC	AIFSN	CW _{min}	CW _{max}	TXOPLimit
Voz	2	3	7	Valor inicial: 1504 μs Valor máximo: 4080 μs
Vídeo	9	7	15	Valor inicial: 3008 μs Valor máximo: 8160 μs
<i>Best Effort</i>	10	15	1023	0
<i>Background</i>	14	15	1023	0

5.2. AVALIAÇÃO DA ESCALABILIDADE

Ambas as propostas de melhor resultado, a de garantia estrita da categoria de voz (proposta 3 apresentada na Tabela 8 do Capítulo 4) e a que associa essa garantia ao ajuste dinâmico de *TXOPLimit* para voz e vídeo, com o limite máximo desse parâmetro para voz igual à metade daquele para vídeo, foram testadas em cenários de maior densidade de nós e em cenários de maior carga. Os resultados das comparações podem ser observados nas Figuras 65 a 75.

Como a área utilizada em todos os cenários foi a mesma, o acréscimo na quantidade de nós de 10 para 50 criou um ambiente com maior densidade de nós e portanto maior competição no acesso ao meio. A tendência é que cada fluxo utilize mais saltos entre origem e destino nos cenários com 50 nós que nos de 10, aumentando os efeitos do conflito espacial e fazendo com que a transmissão de quadros do mesmo fluxo interfira com a dos próximos quadros deste fluxo, degradando ainda mais as métricas.

A Figura 65 mostra uma vantagem na taxa de colisão para o cenário com 50 nós quando a carga ainda é baixa. Isso pode ser explicado pela possibilidade dos

fluxos estarem mais dispersos espacialmente, favorecendo as transmissões simultâneas. No entanto, quando a carga aumenta, os caminhos dos fluxos tendem a se cruzar e a taxa de colisão aumenta.

Como esperado, o atraso médio fim-a-fim, mesmo com a garantia estrita para o tráfego de voz, é maior no cenário com 50 nós, superando os 150ms ao fim da simulação no cenário utilizando a proposta 3 apresentada na Tabela 8 do Capítulo 4, como mostra a Figura 66. No cenário com ajuste dinâmico de *TXOPLimit*, o atraso também é maior na topologia com 50 nós, porém se mantém abaixo dos 150ms até o fim da simulação, conforme Figura 67.

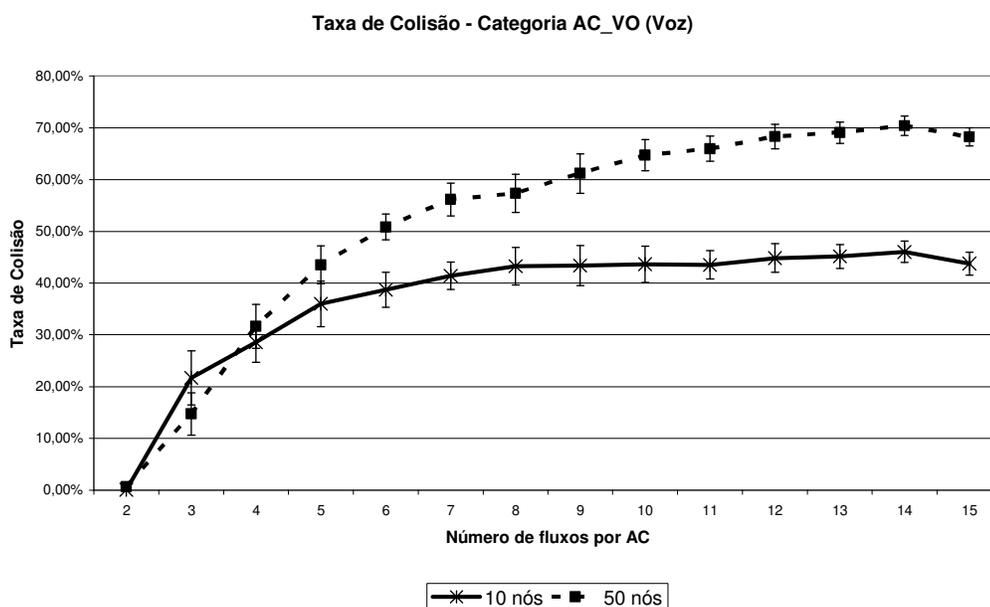


Figura 65: Comparação da taxa de colisão da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada entre topologias de 10 e 50 nós.

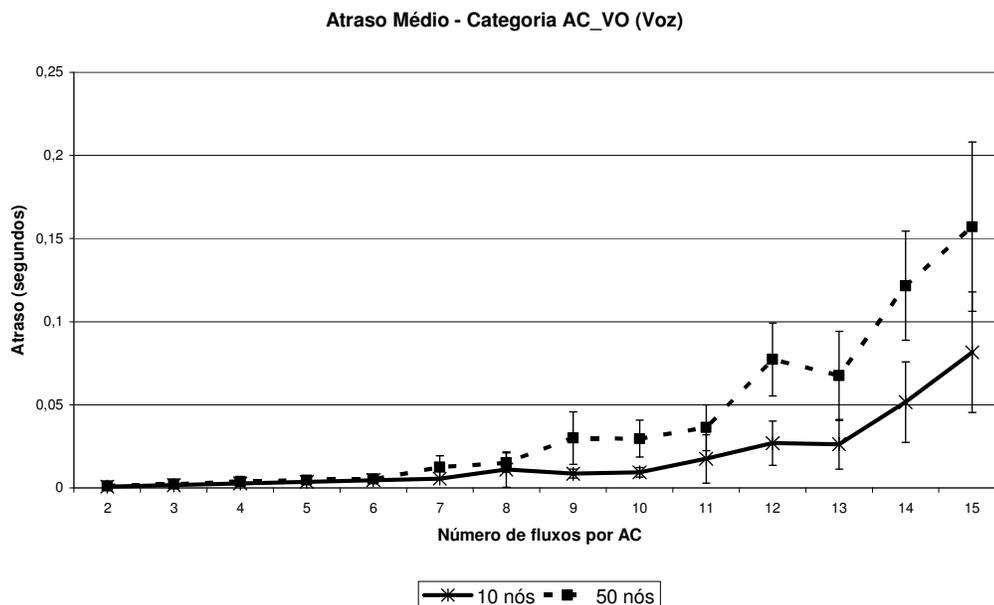


Figura 66: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada entre topologias de 10 e 50 nós.

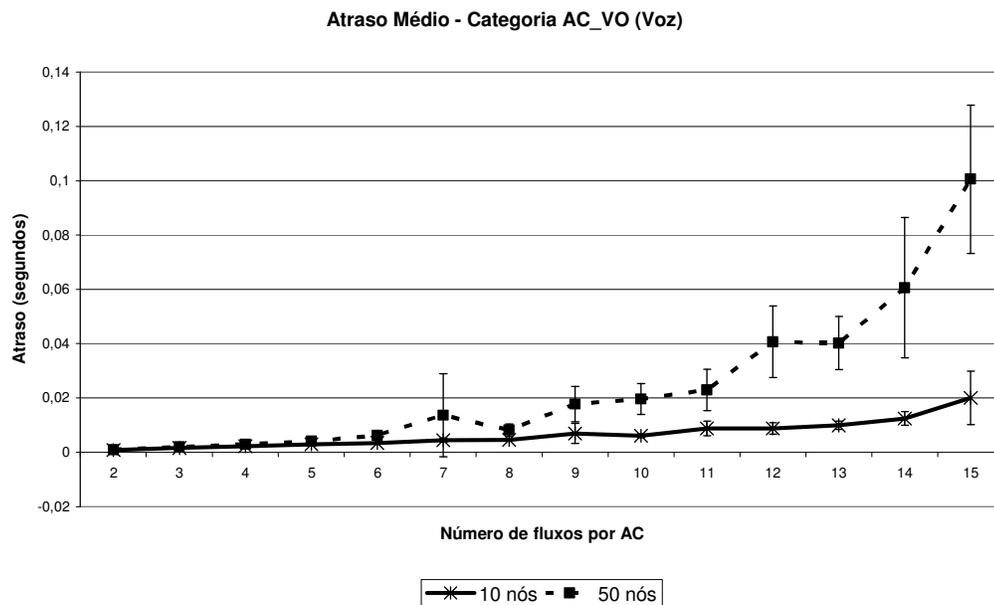


Figura 67: Comparação do atraso fim-a-fim da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e ajuste dinâmico de TXOPLimit realizado para AC_VO e AC_VI com o valor máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (AdaptVozMetade) entre topologias de 10 e 50 nós.

A taxa de perda é em média 10% maior no cenário com 50 nós para o tráfego de vídeo na configuração da proposta 3 apresentada na Tabela 8 do Capítulo 4, conforme a Figura 68, e atinge uma diferença de 36% ao fim da simulação para o

tráfego de voz no cenário com ajuste dinâmico de *TXOPLimit*, como se pode observar na Figura 69. As causas dessas perdas são predominantemente as mesmas, como ilustra a Figura 70, com uma redução no descarte por estouro do *buffer* no cenário com 50 nós, em função da possibilidade de transmissões simultâneas no início da simulação onde a carga da rede é menor.

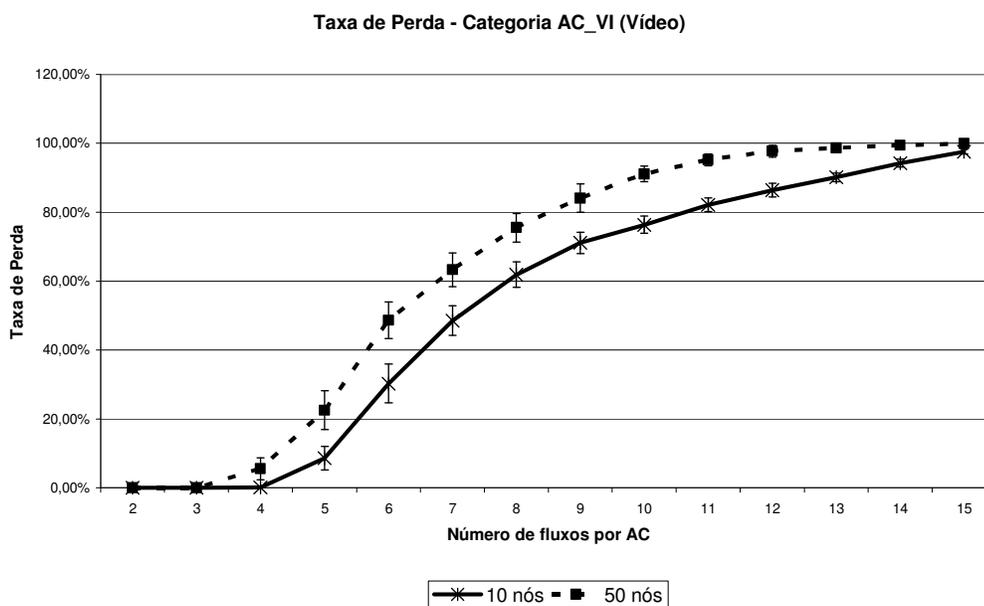


Figura 68: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada entre topologias de 10 e 50 nós.

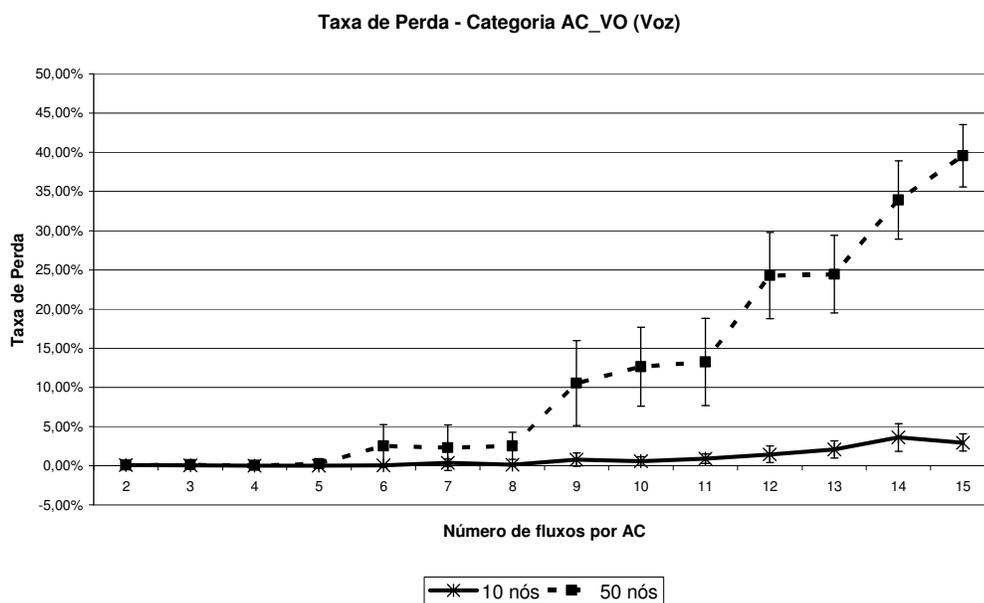


Figura 69: Comparação da taxa de perda da categoria AC_VO (voz) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB

habilitada e ajuste dinâmico de TXOPLimit realizado para AC_VO e AC_VI com o valor máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (AdaptVozMetade) entre topologias de 10 e 50 nós.

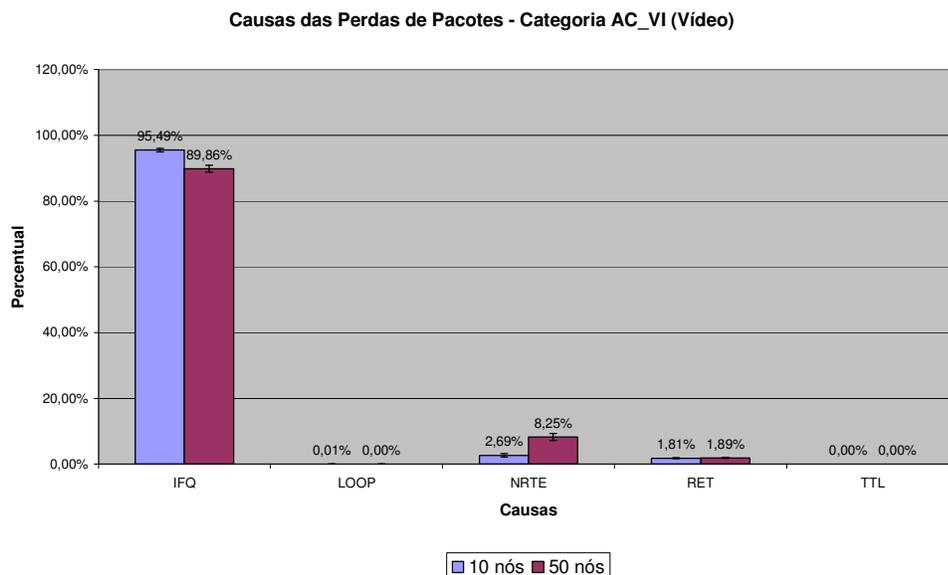


Figura 70: Comparação das causas de perda de pacotes da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada entre topologias de 10 e 50 nós.

A vazão, inversamente relacionada à taxa de perda, mantém os resultados já observados com um desempenho significativamente melhor no cenário menos denso, como ilustra a Figura 71, para o tráfego de vídeo.

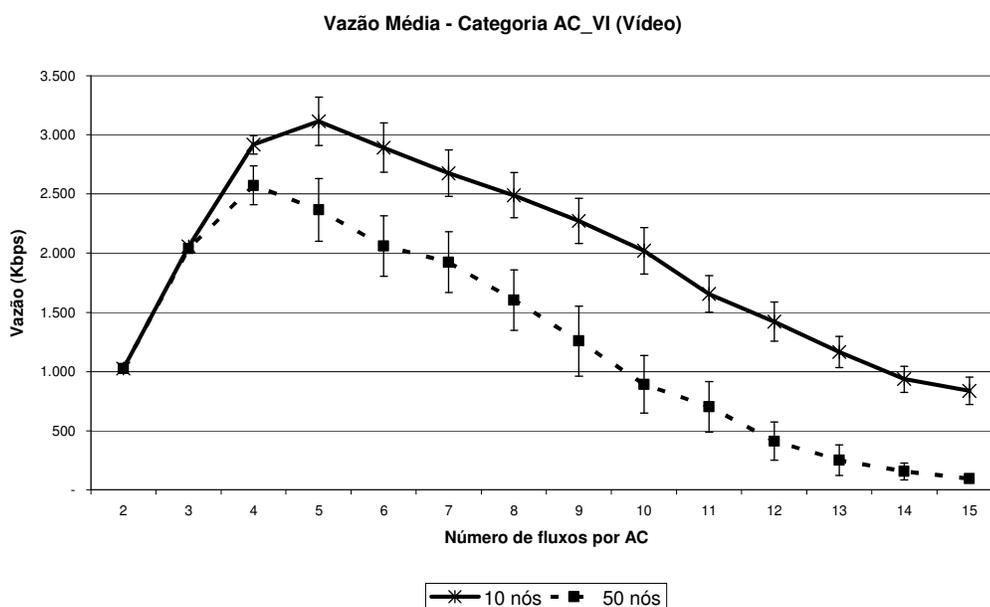


Figura 71: Comparação da vazão média da categoria AC_VI (vídeo) em cenários com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e ajuste dinâmico de TXOPLimit realizado para AC_VO e AC_VI com o valor máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (AdaptVozMetade) entre topologias de 10 e 50 nós.

As simulações de período mais longo permitem estimar um limite de capacidade da rede para cada AC considerando a competição com as demais categorias, independente dos respectivos requisitos de qualidade de serviço. A Figura 72 mostra a rede atingindo claramente esse limite quando estão em curso 18 fluxos de voz com vazão agregada de 1Mbps, na configuração da proposta 3 da Tabela 8 com CFB. Todos os resultados foram obtidos sobre a topologia de 10 nós.

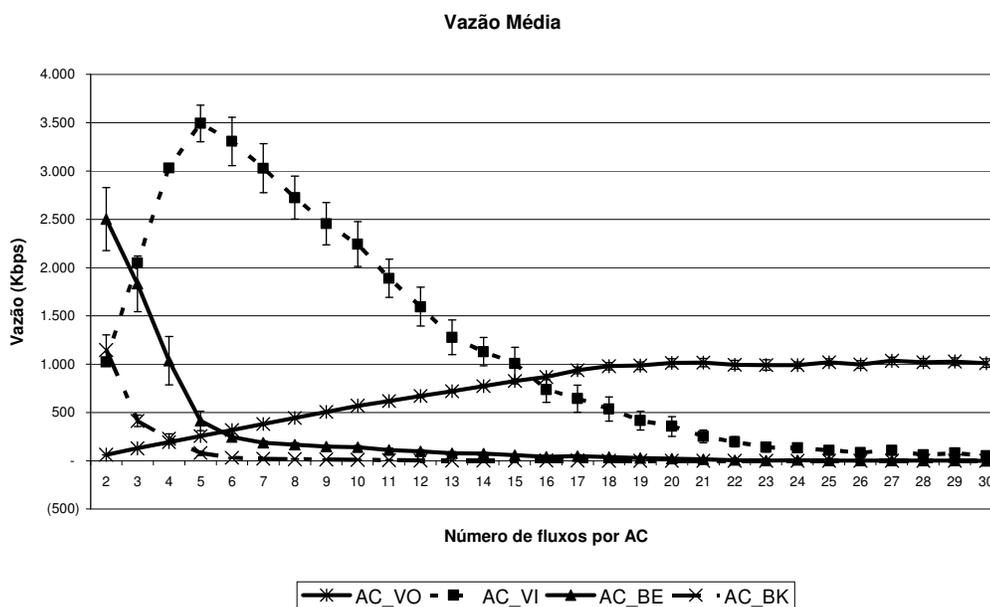


Figura 72: Vazão média em cenário com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada.

Considerando os requisitos de QoS para as categorias de voz, o cenário com a configuração da proposta 3, apresentada na Tabela 8 do Capítulo 4, com CFB, suporta 10 fluxos de voz, competindo com a mesma quantidade de fluxos das demais categorias. A partir dessa carga, a taxa de perda supera 3%, conforme a Figura 73. O atraso médio da categoria de voz, no entanto, se mantém abaixo de 150ms até o instante em que estão em curso 14 fluxos de cada categoria. No cenário com ajuste dinâmico de *TXOPLimit*, o atraso médio do tráfego de voz é menor que 150ms até o instante em que 20 fluxos competem com o mesmo número de fluxos das demais categorias, como apresentado na Figura 74.

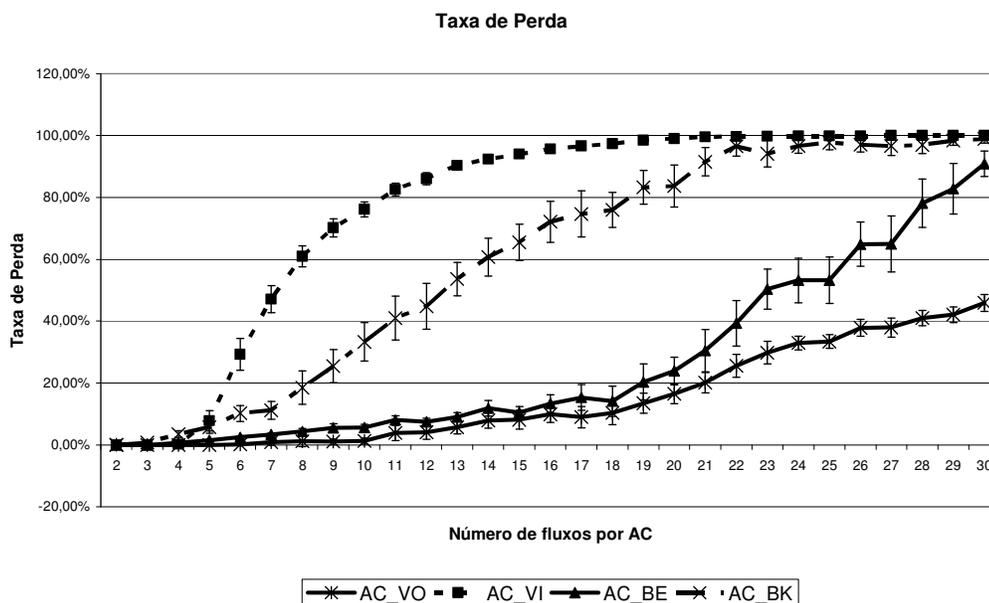


Figura 73: Taxa de perda em cenário com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada.

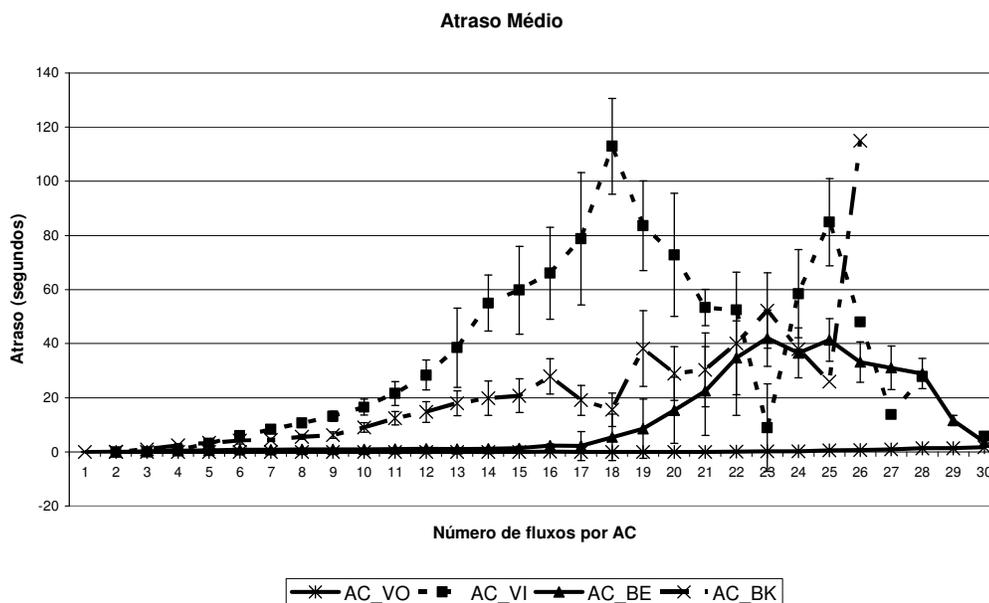


Figura 74: Atraso fim-a-fim em cenário com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e ajuste dinâmico de TXOPLimit realizado para AC_VO e AC_VI com o valor máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (AdaptVozMetade).

A configuração da proposta 3, apresentada na Tabela 8 do Capítulo 4, com CFB mantém a vazão da categoria de vídeo até 5 fluxos de seu tráfego concorrendo com as demais categorias. A partir dessa carga, a rede não suporta o acréscimo de tráfego. Esse comportamento, porém, também é observado quando os fluxos de

vídeo são o único tipo de tráfego na rede, conforme a Figura 44. A Figura 75 mostra esse comportamento para o cenário com ajuste dinâmico de *TXOPLimit*.

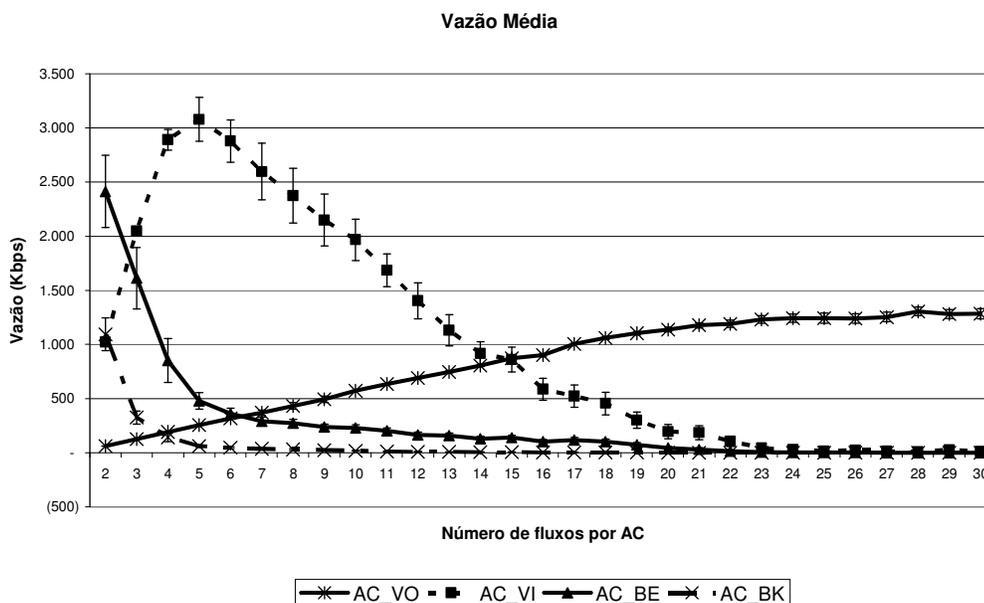


Figura 75: Vazão média em cenário com a configuração de garantia de serviço para o tráfego de voz da proposta 3 da Tabela 8 com a funcionalidade CFB habilitada e ajuste dinâmico de *TXOPLimit* realizado para AC_VO e AC_VI com o valor máximo para voz igual à metade do valor para vídeo (*AdaptVozMetade*).

5.3. AVALIAÇÃO DE UM FLUXO DE VÍDEO REAL

Como uma última avaliação e com o objetivo de se aproximar mais de um fluxo de vídeo real, foram feitas simulações utilizando o conjunto de ferramentas de avaliação de vídeo EvalVid. O vídeo *news* em YUV foi codificado em H.264 através da ferramenta x264 e a partir dele foi gerado um arquivo de *trace* utilizando as ferramentas MP4Box e mp4trace. O arquivo de *trace* alimentou as simulações que produziram os *traces* do ponto de vista da origem e do destino. Com estes arquivos, foi possível calcular a perda, o atraso, o PSNR quadro a quadro e a escala MOS. O desempenho desse fluxo de vídeo real foi avaliado nos cenários sem QoS (IEEE 802.11g), com QoS utilizando os valores padrões (EDCA), com a proposta 3 apresentada na Tabela 8 do Capítulo 4 (CwminPadrao) e com o ajuste dinâmico de *TXOPLimit* (*AdaptVozMetade*).

Os resultados são apresentados nas Figuras 76 a 80. A Figura 76 mostra, para cada cenário, o PSNR quadro a quadro. A Figura 77 exhibe a porcentagem de quadros em cada nível da escala MOS e seu MOS médio. A Figura 78 mostra a

função densidade de probabilidade (PDF) e a Figura 79, a função de distribuição cumulativa (CDF) do atraso fim-a-fim. A Figura 80 ilustra amostras de quadros. A taxa de perda verificada em todos os cenários foi a mesma, ou seja, 10% de quadros I e 0% de quadros P e B.

Os resultados de PSNR e, portanto, de MOS também, visto que, segundo as definições utilizadas pela ferramenta Evalvid, um valor é derivado do outro, foram iguais para os cenários sem QoS (80211g) e com garantia estrita para voz (CWminPadrao) e para os cenários com QoS padrão (EDCA) e com ajuste dinâmico de *TXOPLimit* (AdaptVozMetade). Isso pode ser verificado nas Figuras 76 e 77, respectivamente.

O MOS de referência compara os quadros do vídeo codificado com o vídeo original (*raw*). A ausência de um nível excelente (5) se refere à perda de qualidade introduzida já pelo processo de codificação.

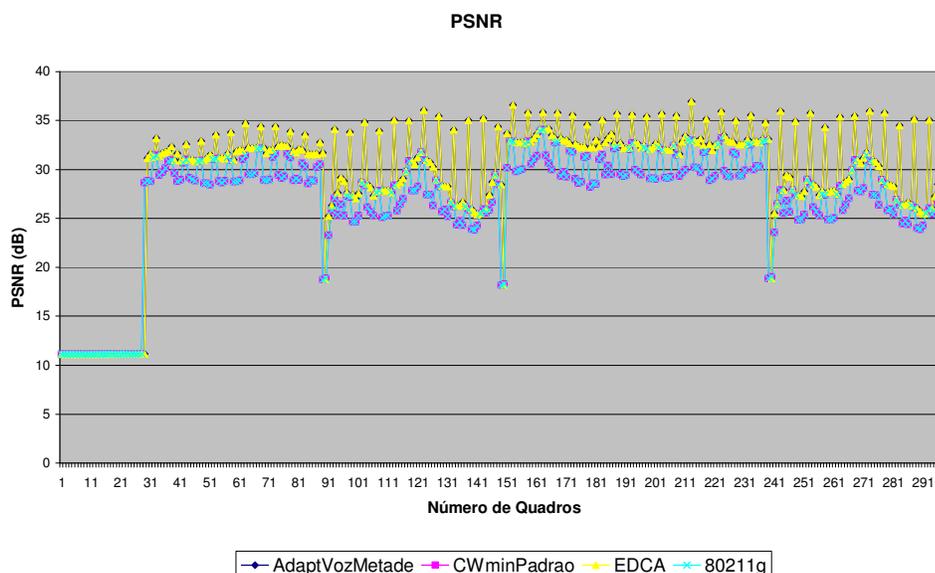


Figura 76: PSNR quadro a quadro.

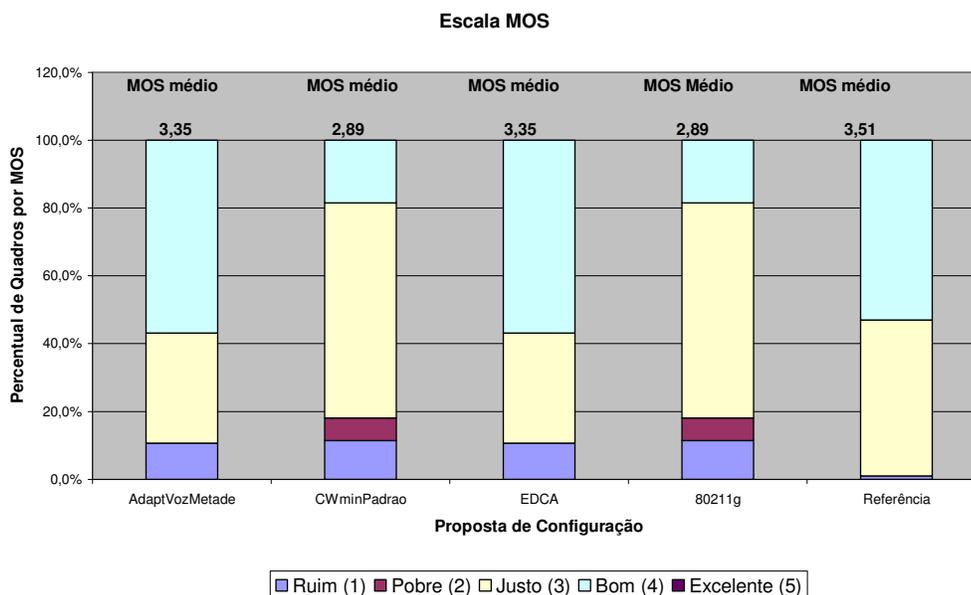


Figura 77: Percentual de quadros de acordo com a escala MOS e MOS médio de cada cenário.

Os gráficos que ilustram a PDF e a CDF do atraso fim-a-fim mostram o pior desempenho no cenário sem QoS (80211g), seguido do cenário com QoS padrão (EDCA) e daqueles com ajuste dinâmico de *TXOPLimit* (AdaptVozMetade) e garantia estrita (CWminPadrao), respectivamente. Esse resultado é compatível com a análise feita anteriormente utilizando o modelo de tráfego de vídeo das simulações realizadas através do NS2, considerando o período em que o fluxo de vídeo gerado dentro do *framework* Evalvid esteve ativo.

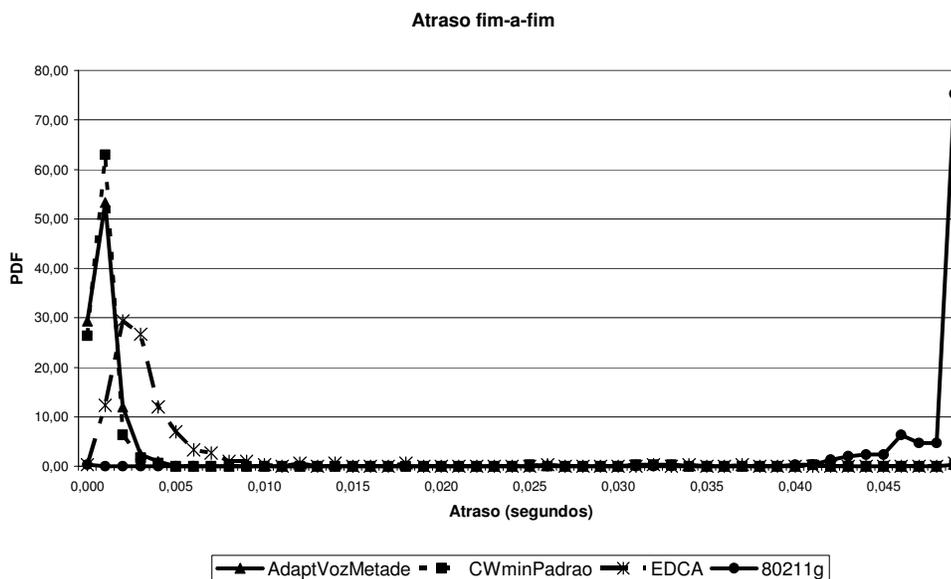


Figura 78: PDF do atraso fim-a-fim.

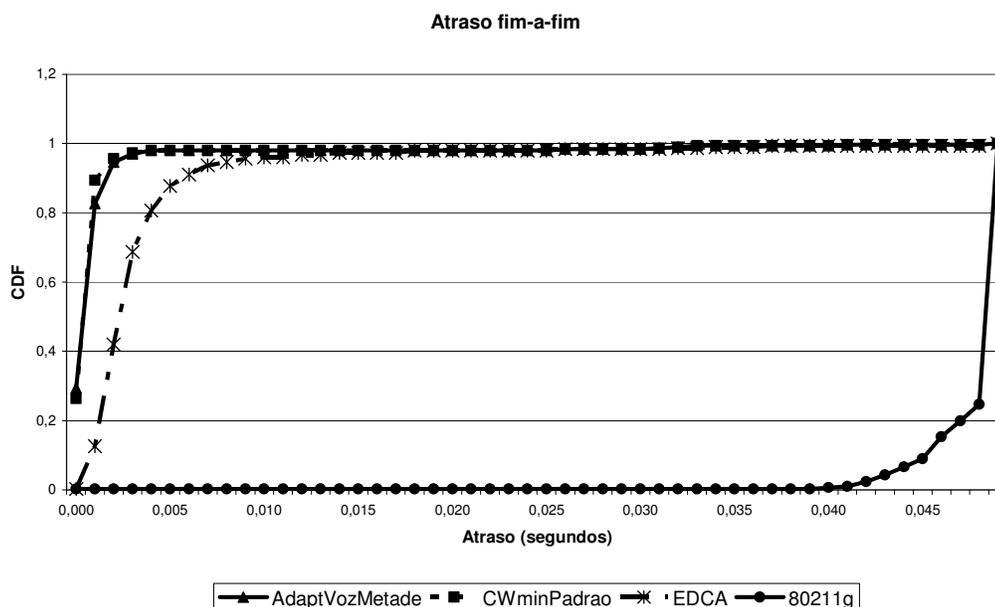


Figura 79: CDF do atraso fim-a-fim.

As amostras de vídeo apresentadas na Figura 80 foram retiradas do vídeo reconstruído a partir dos *traces* gerados no destino após o transporte pela rede. A perda de quadros foi observada de forma mais expressiva no início dos fluxos, porém sem diferenças significativas entre os cenários avaliados. As métricas de maior influência nos fluxos de vídeo recebidos em cada cenário foram o atraso fim-a-fim e a variação do atraso (*jitter*).

Os mesmos números de quadros de cada cenário foram selecionados na amostragem. A diferença das imagens entre os cenários é resultado da perda de quadros e do atraso acumulado. Assim como para os valores de PSNR e MOS, os cenários sem QoS (80211g) e com garantia estrita para voz (CWminPadrao) e os cenários com QoS padrão (EDCA) e com ajuste dinâmico de *TXOPLimit* (AdaptVozMetade), respectivamente, apresentam as mesmas amostras de quadros por número de sequência.

Cenário sem QoS (80211g)



Cenário com QoS padrão (EDCA)



Cenário com garantia estrita para o tráfego de voz (CWminPadrao)



Cenário com ajuste dinâmico de *TXOPLimit* (AdaptVozMetade)



Figura 80: Amostras do vídeo recebido nos cenários (por linha): IEEE 802.11g (sem QoS), EDCA (com QoS utilizando valores padrão), CwminPadrao (proposta 3 da Tabela 8) e AdaptVozMetade (ajuste dinâmico de *TXOPLimit*), respectivamente.

6. CONCLUSÃO

O padrão IEEE 802.11e atinge seu objetivo de oferecer diferenciação de QoS para as classes de serviço, porém não é capaz de prover os requisitos de atraso, perda de pacotes e vazão que cada tipo de tráfego necessita para um bom desempenho. Diversos têm sido os esforços em adaptar os parâmetros do padrão para que ele possa atender a esses requisitos nos vários cenários de rede, além de oferecer garantia de serviço e compartilhamento justo dos recursos. A maioria desses trabalhos, contudo, se concentra em redes sem fio infraestruturadas, de um único salto, e na taxa de colisão como métrica do estado geral da rede.

Esta dissertação avaliou diversas configurações de parâmetros possíveis para o padrão IEEE 802.11e, considerando diferentes classes de serviço em cenários de redes em malha sem fio de múltiplos saltos com nós no modo *ad hoc*. A análise da influência desses parâmetros nas métricas de QoS mostra que sua interação é complexa e que seu ajuste isolado não é suficiente para oferecer um melhor desempenho para as categorias de tráfego de acordo com seus requisitos. Os parâmetros de janela de contenção reduzem a taxa de colisão, porém isso nem sempre se reflete em uma redução da taxa de perda e em um aumento da vazão, além de introduzir um maior atraso. O parâmetro AIFS influi de forma mais expressiva no retardo de acesso ao meio e permite oferecer garantia estrita a uma categoria de tráfego se configurado adequadamente.

6.1. CONTRIBUIÇÕES

A partir da análise da dinâmica dos parâmetros de acesso ao meio providos pelo modo de acesso com contenção EDCA do padrão IEEE 802.11e e tomando por base as propostas de [Lee et al., 2009] e [Adlen et al., 2005], foram propostas novas configurações que permitiram alcançar o objetivo de prover garantia de serviço para a categoria de voz sem causar *starvation* nas categorias de menor prioridade. Além disso, foi possível estimar a escalabilidade das configurações em termos da quantidade de fluxos por AC e da quantidade de nós na rede.

Foram avaliados mecanismos de garantia de serviço, propostos em outros trabalhos da literatura para o tráfego de voz em redes infraestruturadas, aplicados a redes em malha sem fio, em cenários de carga de tráfego multimídia crescente. Foi

proposta uma configuração ótima dos parâmetros, ajustando-se as janelas de contenção de todas as categorias de acesso, e uma melhoria neste mecanismo para reduzir o impacto no desempenho da categoria de vídeo através do uso da funcionalidade de CFB. Essa configuração não depende de alteração da camada MAC e é simples de implementar através da configuração dos parâmetros nos dispositivos utilizados, indicando uma solução bastante adequada para uso prático.

Alternativamente, foi proposta uma solução que traz maior ganho para a categoria de voz e também beneficia as categorias de menor prioridade, porém que requer uma alteração em um dos mecanismos da camada MAC. A alteração, no entanto, é simples e não requer interação entre os nós para seu funcionamento. A proposta combinou o mecanismo de garantia de serviço proposto em [Lee et al., 2009], o ajuste das janelas de contenção proposto na configuração de garantia estrita avaliada por esta dissertação e uma nova proposta de ajuste dinâmico do parâmetro *TXOPLimit* baseada no mecanismo apresentado em [Adlen et al., 2005]. Cada nó toma suas decisões de forma independente, o que é fundamental em um ambiente distribuído. Essa proposta teve por base uma análise das causas de descarte de pacotes na camada de aplicação. Verificou-se que, nos cenários de redes em malha sem fio, a principal causa de perda de pacotes para a categoria de maior prioridade é a instabilidade do protocolo de roteamento e que, para as categorias de mais alta taxa de transmissão, o gerenciamento do *buffer* nos nós desempenha um papel fundamental.

Para avaliar essa proposta, foi realizada uma modificação no módulo EDCA desenvolvido pela TKN para o simulador NS2. O método *cfb* que avalia se é possível a transmissão de novo quadro de uma categoria de acesso dentro da mesma oportunidade de transmissão (TXOP) adquirida foi alterado, inserindo-se um ajuste do parâmetro *TXOPLimit*, que limita o tempo da oportunidade de transmissão, em função do tamanho da fila daquela categoria de acesso.

Esta dissertação também apresentou uma avaliação subjetiva e objetiva da qualidade de um *streaming* de vídeo em cenários utilizando as duas propostas que demonstraram melhores resultados e comparando com os cenários sem QoS e com os valores de QoS propostos no padrão IEEE 802.11e.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

O estudo realizado nesta dissertação mostra que ainda existem diversos desafios para prover uma QoS adequada a cada tipo de tráfego nos vários cenários de rede.

Para se obter os valores ótimos de configuração dos parâmetros e uma forma de adaptá-los dinamicamente em função da topologia e do padrão de tráfego da rede, visando a aumentar sua capacidade, é necessário desenvolver um modelo analítico de estimativa do estado da rede a cada instante e que relacione esse estado da rede aos parâmetros de acesso ao meio. Existem modelos propostos na literatura adotando diferentes premissas e simplificações. Mais uma vez, em sua maioria, consideram redes infraestruturadas de único salto.

No estudo realizado nesta dissertação, assumiu-se que todos os fluxos de uma mesma AC eram iguais, ou seja, mesma taxa de transmissão, mesmo tamanho de pacote, mesmos protocolos de aplicação e transporte, mesma codificação, etc. Em uma rede real, os fluxos podem ser heterogêneos e possuírem uma mesma prioridade de acesso. As características individuais dos fluxos influem no desempenho obtido, conforme observado nas simulações dos cenários sem QoS. A influência dessas características, associada aos mecanismos propostos, requer maior análise.

Os cenários analisados nessa dissertação consideraram uma topologia em que o tráfego está confinado ao próprio *backbone* sem fio. Avançando a análise para uma topologia típica de redes em malha sem fio, uma extensão do estudo deve ser feita utilizando um padrão de tráfego em que os destinos dos fluxos são *gateways* para a Internet. Nesse modelo, outras variáveis influenciam no desempenho da rede, como a quantidade e posição dos *gateways*, a carga que estes *gateways* suportam e o agravamento do conflito espacial pela competição dos fluxos em caminhos compartilhados.

Para simular cenários de rede mais próximos de redes reais, seria interessante introduzir modelos de interferência e mecanismos de adaptação das taxas de transmissão, já disponíveis no simulador NS2, que constituem novas variáveis que influenciam nas métricas de QoS.

A análise das causas de perda dos pacotes na camada de aplicação indicou influência da instabilidade do protocolo de roteamento através do descarte pela falta

de uma rota válida no momento de encaminhar pacotes da categoria de voz, talvez devido a inconsistências entre os tempos de convergência do protocolo de roteamento e a taxa de envio dos fluxos de voz. Como trabalho futuro, essa análise deve ser aprofundada para identificar os ajustes necessários nos tempos do protocolo de roteamento e a influência de outros tipos de protocolos de roteamento e de métricas que considerem qualidade em seus cálculos.

A proposta de garantia estrita associada ao ajuste do parâmetro *TXOPLimit* em função dos pacotes pendentes na fila utilizou como limite desse ajuste um valor estático definido como o valor máximo alcançável por essa variável no padrão. Esse valor está intimamente relacionado à capacidade de tráfego que a rede suporta e, portanto, pressupõe um mecanismo de controle de admissão, que não fez parte do escopo desta dissertação, mas que é um conceito de vital importância na provisão de QoS em redes com recursos finitos e escassos.

O próprio parâmetro *TXOPLimit* mostra um grande potencial de influência no desempenho, principalmente das categorias de maior prioridade. É necessário um estudo mais aprofundado sobre sua associação com outros mecanismos e o cálculo de seu ajuste dinâmico de forma mais adequada aos padrões de tráfego e características da rede.

Existem na literatura outras abordagens para prover os requisitos de qualidade que as aplicações demandam que requerem alterações nos mecanismos de acesso ao meio e que possivelmente trazem ganhos superiores no desempenho da rede em relação às abordagens que apenas manipulam os parâmetros existentes, como a que se utilizou neste trabalho. Muitas dessas propostas foram avaliadas através do simulador NS2 e seus módulos estão disponíveis, sendo possível, portanto, um trabalho comparativo entre essas duas linhas de pesquisa.

Por fim, uma continuação desse trabalho é a realização de experimentos práticos com o objetivo de validar as configurações de melhor desempenho propostas e avaliadas através de simulação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[Abelém et al., 2007] A. J. G. Abelém, C. V. N. Albuquerque, D. C. M. Saade, E. S. Aguiar, J. L. Duarte, J. E. M. Da Fonseca e L. C. S. Magalhães. Redes Mesh: Mobilidade, Qualidade de Serviço e Comunicação em Grupo. Minicurso apresentado no SBRC2007, Belém. 2007.

[Acharya et al., 2002] A. Acharya, A. Misra e S. Bansal. Challenges in high performance data forwarding in multi-hop wireless networks. IBM Research Report, Computer Science. Julho, 2002.

[Adlen et al., 2005] K. Adlen, G. Abdelhak e N. Mohamed. Adaptive transmission opportunity with admission control for IEEE 802.11e networks. Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, Montral, Quebec, Canada, pp. 234 – 241. 2005.

[Aoki et al., 2006] H. Aoki, S. Takeda, K. Yagyu e A. Yamada. IEEE 802.11s Wireless LAN Mesh Network Technology. NTT DoCoMo Technical Journal Vol.8 No 2. 2006.

[Aoun et al., 2006] B. Aoun, R. Boutaba, Y. Iraqi e G. Kenward. Gateway Placement Optimization in wireless mesh networks with QoS constraints. IEEE Journal of Selected Areas in Communications. Novembro, 2006.

[Badis e Al Agha, 2004] H. Badis e K. Al Agha. QOLSR multi-path routing for mobile ad hoc networks based on multiple metrics: bandwidth and delay. IEEE Vehicular Technology Conference. Maio, 2004.

[Banchs et al., 2005] A. Banchs, A. Azcorra, C. García e R. Cuevas. Applications and challenges of the 802.11 e EDCA mechanism: an experimental study. Network, IEEE. 2005.

[Bicket et al., 2005] J. Bicket, D. Aguayo, S. Biwas e R. Morris. Architecture and evaluation of an unplanned 802.11b mesh network. MobiCom '05: Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 31-42. 2005.

[Campista et al., 2008] M. E. M. Campista, P. M. Esposito, I. M. Moraes, L. H. M. K. Costa, O. C. M. B. Duarte, D. G. Passos, C. V. N. Albuquerque, D. C. M. Saade e M. G. Rubinstein. Routing Metrics and Protocols for Wireless Mesh Networks. IEEE Network Magazine, Vol. 22, No. 1. Janeiro/Fevereiro, 2008.

[Choi et al., 2003] S. Choi, J. Del Prado, S. S. N e S. Mangold. IEEE 802.11 e Contention-Based Channel Access (EDCF) Performance Evaluation. Communications, 2003. ICC '03. IEEE International Conference on. 2003.

[Clausen e Jacquet, 2003] T. Clausen e P. Jacquet. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC Experimental 3626, Internet Engineering Task Force. Outubro, 2003.

[Da Conceição, 2006] A. F. Da Conceição. Voz e Vídeo Sobre Redes Sem Fio IEEE 802.11. Dissertação de Doutorado – Instituto de Matemática e Estatística – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. Maio, 2006.

[De Couto et al., 2003] D. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket e R. Morris. A high-throughput path metric for multihop wireless routing. MobiCom '03: Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 134-146. 2003.

[Draves et al., 2004] R. Draves, J. Padhye e B. Zill. Routing in Multi-radio, Multi-hop Wireless Mesh Networks. MobiCom '04: Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 114-128. 2004.

[Evalvid, 2009] Evalvid simulation tool home page - http://hpds.ee.ncku.edu.tw/~smallko/ns2/Evalvid_in_NS2.htm, acessado em Novembro/2009.

[Gallego, 2005] D. A. M. Gallego. Estimação da Capacidade de redes sem fio do tipo Mesh. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP. Novembro, 2005.

[Gerk e Saade, 2009] L. F. Gerk e D. C. M. Saade. Solução de QoS para redes em malha sem fio baseada no padrão IEEE 802.11e. 8th International Information and Telecommunication Technologies Symposium. Dezembro, 2009.

[Gerk et al., 2009] L. F. Gerk, D. Passos, D. C. M. Saade e C. V. N. Albuquerque. Infraestrutura de comunicação em malha sem fio para supervisão e controle de sistemas de transmissão de energia. Revista Espaço e Energia, Número 10. Abril, 2009.

[IEEE P802.11, 2007] IEEE P802.11-2007 - IEEE Standard for Information Technology — Telecommunications and Information Exchange between Systems — Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements — Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Junho, 2007.

[IEEE P802.11s, 2009] IEEE P802.11s/D4.0 - IEEE Draft Standard for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 10: Mesh Networking. Dezembro, 2009.

[Jiang et al., 2006] H. Jiang, W. Zhuang, X. Shen, A. Abdrabou e P. Wang. Differentiated Services for Wireless Mesh Backbone. IEEE Communications Magazine. Julho, 2006.

[Kawata e Yamada, 2007] T. Kawata e H. Yamada. Impact of Multi-Rate VoIP on Quality of Service in IEEE 802.11e EDCA with Link Adaptation. ICC 2007 Proceedings. 2007.

[Ke et al., 2008] C. Ke, C. Shieh, W. Hwang e A. Ziviani. An Evaluation Framework for More Realistic Simulations of MPEG Video Transmission. Journal of Information Science and Engineering 24, p425-440. 2008.

[Lee et al., 2005a] J. F. Lee, W. Liao e M. C. Chen. A MAC-layer differentiated service model in IEEE 802.11e WLANs. Globecom, IEEE. 2005.

[Lee et al., 2005b] J. F. Lee, W. Liao e M. C. Chen. A per-class QoS service model in IEEE 802.11e WLANs. Proceedings of the 2nd Int'l Conf. on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks, IEEE. 2005.

[Lee et al., 2007] J. F. Lee, J. Chen, W. Liao, H. Lee e M. C. Chen. A practical cross-layer QoS mechanism for voice over IP in IEEE 802.11e WLANs. Int. Conference on Multimedia and Expo, ICME, IEEE. 2007.

[Lee et al., 2009] J. F. Lee, W. Liao, J. Chen e H. Lee. A practical QoS solution to voice over IP in IEEE 802.11e WLANs. Communications Magazine, IEEE. 2009.

[Liu e Zhao, 2006] H. Liu e Y. Zhao. Adaptive EDCA Algorithm Using Video Prediction for Multimedia IEEE 802.11e WLAN. International Conference on Wireless and Mobile Communications, Bucharest, Romênia. Julho, 2006.

[Malli et al., 2004] M. Malli, Q. Ni, T. Turletti e C. Barakat. Adaptive fair channel allocation for QoS enhancement in IEEE 802.11 wireless LANs. Communications, 2004 IEEE International Conference on. 2004.

[Malouch e Liu, 2002] N. Malouch e Z. Liu. Performance analysis of TCP with RIO routers. GLOBECOM, New York. 2002.

[Mangold et al., 2003] S. Mangold, S. Choi, G. R. Hiertz, O. Klein e B. Walke. Analysis of IEEE 802.11 e for QoS support in wireless LANs. Wireless Communications, IEEE. 2003.

[Nandiraju et al., 2005] N. S. Nandiraju, D. S. Nandiraju, D. Cavalcanti e D. P. Agrawal. A Novel Queue Management Mechanism for Improving Performance of Multihop Flows in IEEE 802.11s Based Mesh Networks. U.C. ECECS Technical Report 2005-04. Outubro, 2005.

[Naoum-Sawaya et al., 2005] J. Naoum-Sawaya, B. Ghaddar, S. Khawam, H. Safa, H. Artail e Z. Dawy. Adaptive Approach for QoS Support in IEEE 802.11e Wireless LAN. Proceedings of the IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, pp 167-173. 2005.

[NS2, 2009] NS2 - <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, acessado em Janeiro/2009.

[Pedatella, 2003] R. N. Pedatella. Um Modelo de Negociação entre Bandwidth Brokers para Oferta de QoS Fim-a-Fim. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Computação, Campinas, SP. Outubro, 2003.

[Perkins et al., 2003] C. Perkins, E. Belding-Royer e S. Das. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. Internet RFC 3561. Julho, 2003.

[Qiao e Shin, 2002] D. Qiao e K. G. Shin. Achieving Efficient Channel Utilization and Weighted Fairness for Data Communications in IEEE 802.11 WALN under the DCF. ACM IWQoS. 2002.

[Ramos et al., 2003] N. Ramos, D. Panigrahi e S. Dey. ChaPLeT: Channel-dependent Packet Level Tuning for Service Differentiation in IEEE 802.11e. Proc. Int'l. Symp. Wireless Pers. Multimedia Commun., Yokoshuka, Japão. 2003.

[Ramos et al., 2005] N. Ramos, D. Panigrahi e S. Dey. Quality of service provisioning in 802.11e networks: challenges, approaches, and future directions. Network, IEEE. 2005.

[Romdhani et al., 2003] L. Romdhani, Q. Ni e T. Turletti. Adaptive EDCF: enhanced service differentiation for IEEE 802.11 wireless ad-hoc networks. IEEE Wireless Communications and Networking. 2003.

[Saade et al., 2007] D. C. M. Saade, C. V. N. Albuquerque, L. C. M. Magalhães, D. Passos, J. Duarte e R. Valle. Redes em malha: solução de baixo custo para popularização do acesso à Internet no Brasil. SBrT 2007: Simpósio Brasileiro de Telecomunicações. 2007.

[Tiradentes Digital, 2010] Tiradentes Digital, <http://tiradentes.mg.gov.br>, acessado em Janeiro/2010.

[Weber et al., 2003] S. Weber, V. Cahill, S. Clarke e M. Haahr. Wireless ad hoc network for Dublin: a large-scale ad hoc network test-bed. ERCIM News, vol. 54. 2003.

[Wiethölter e Hoene, 2009] S. Wiethölter e C. Hoene. An IEEE 802.11e EDCA and CFB simulation model for NS2. TKN – Telecommunication Networks Group, Technical University of Berlin, Germany, http://www.tkn.tu-berlin.de/research/802.11e_ns2/, acessado em Janeiro/2009.

[Wiethölter et al., 2006] S. Wiethölter, M. Emmelmann, C. Hoene e A. Wolisz. TKN EDCA Model for ns-2. Technical Report TKN-06-003, Telecommunication Networks Group, Technische Universität Berlin. Junho, 2006.

[Wireless Philadelphia, 2009] Wireless Philadelphia, <http://www.wirelessphiladelphia.net>, acessado em Abril/2009.

[Xu e Saadawl, 2001] S. Xu e T. Saadawl. Does the IEEE 802.11 MAC protocol work well in multihop wireless ad hoc networks?. IEEE Communications Magazine. Junho, 2001.

[Zhang e Zhang, 2008] Q. Zhang e Y. Zhang. Cross-layer design for QoS support in multihop wireless networks. Proceedings of the IEEE, v.96, no. 1, p. 64-76. Janeiro, 2008.

ANEXO A – CONFIGURAÇÕES DO SIMULADOR NS2

A.1. SCRIPTS TCL DE CONFIGURAÇÃO DO SIMULADOR

A.1.1. CONFIGURAÇÃO SEM QOS

```
set AKAROA 0
```

```
Mac/802_11 set dataRate_ 54Mb
```

```
Mac/802_11 set RTSThreshold_ 3000
```

```
set val(chan)      Channel/WirelessChannel
set val(prop)      Propagation/TwoRayGround
set val(netif)     Phy/WirelessPhy
set val(mac)       Mac/802_11
set val(ifq)       Queue/DropTail/PriQueue
set val(ll)        LL
set val(ant)       Antenna/OmniAntenna
set val(x)         500      ;# coordenada X da topografia
set val(y)         500      ;# coordenada Y da topografia
set val(ifqlen)    1000     ;# max packet in ifq
set val(adhocRouting) OLSR
set val(stop)      330.0    ;# tempo de simulacao
set val(energyModel) EnergyModel ;# modelo de energia de cada no
set val(initialEnergy) 25.0  ;# energia inicial em Joules
set val(txPower)    0.0     ;# taxa de transmissao de dados em W
set val(rxPower)    0.0     ;# taxa de repecpcao de dados em W
set val(idle)       0.0     ;# taxa de escuta ociosa em W
```

```
# =====
# Programa principal
# =====
#
# Inicia as Variaveis globais
#
set run 1

for {set i 0} {$i < $argc} {incr i} {

    set opti [lindex $argv $i]

    if {$opti == "-cenario"} {

        set val(cenario) [lindex $argv [incr i]]

    } elseif {$opti == "-seed"} {

        set val(seed) [lindex $argv [incr i]]

    } elseif {$opti == "-run"} {

        set run [lindex $argv [incr i]]

    }

}
```

```

} elseif {$opti == "-n"} {
    set val(nn) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-trafego"} {
    set val(traf) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-cfb"} {
    set val(cfb) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-pf0"} {
    set val(pf0) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-aifs0"} {
    set val(aifs0) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-cwmin0"} {
    set val(cwmin0) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-cwmax0"} {
    set val(cwmax0) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-txopLimit0"} {
    set val(txop0) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-pf1"} {
    set val(pf1) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-aifs1"} {
    set val(aifs1) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-cwmin1"} {
    set val(cwmin1) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-cwmax1"} {
    set val(cwmax1) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-txopLimit1"} {
    set val(txop1) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-pf2"} {
    set val(pf2) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-aifs2"} {

```

```

        set val(aifs2) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmin2"} {
        set val(cwmin2) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmax2"} {
        set val(cwmax2) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-txopLimit2"} {
        set val(txop2) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-pf3"} {
        set val(pf3) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-aifs3"} {
        set val(aifs3) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmin3"} {
        set val(cwmin3) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmax3"} {
        set val(cwmax3) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-txopLimit3"} {
        set val(txop3) [lindex $argv [incr i]]
    } else {
        puts "Opcao invalida: \"$opti\""
        exit 1
    }
}

remove-all-packet-headers
add-packet-header IP ARP OLSR LL Mac

#set EDCA $val(edca)

set ns_ [new Simulator] ;# Cria instancia do simulador
$ns_ use-scheduler Heap
set topo [new Topography] ;# Seta o objeto topografia
set trace_file "80211g_$run-n$val(nn)-s$val(seed).tr"
set tracefd [open $trace_file w] ;# Cria o objeto trace para ns
$ns_ trace-all $tracefd

#Mac/802_11e set cfb_ $val(cfb)

$topo load_flatgrid $val(x) $val(y) ;# Define a topologia
set god_ [create-god $val(nn)] ;# Cria God

```

```

set chan_ [new $val(chan)]

# Define como os nos devem ser criados
#
# Configuracoes globais dos nos

$ns_ node-config -adhocRouting $val(adhocRouting) \
    -llType $val(ll) \
    -macType $val(mac) \
    -ifqType $val(ifq) \
    -ifqLen $val(ifqlen) \
    -antType $val(ant) \
    -propType $val(prop) \
    -phyType $val(netif) \
    -channel $chan_ \
    -topoInstance $topo \
    -energyModel $val(energyModel) \
    -rxPower $val(rxPower) \
    -txPower $val(txPower) \
    -idlePower $val(idle) \
    -initialEnergy $val(initialEnergy) \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace ON \
    -macTrace ON \
    -prio0PF $val(pf0) \
    -prio0Aifs $val(aifs0) \
    -prio0CWmin $val(cwmin0) \
    -prio0CWmax $val(cwmax0) \
    -prio0Txop $val(txop0) \
    -prio1PF $val(pf1) \
    -prio1Aifs $val(aifs1) \
    -prio1CWmin $val(cwmin1) \
    -prio1CWmax $val(cwmax1) \
    -prio1Txop $val(txop1) \
    -prio2PF $val(pf2) \
    -prio2Aifs $val(aifs2) \
    -prio2CWmin $val(cwmin2) \
    -prio2CWmax $val(cwmax2) \
    -prio2Txop $val(txop2) \
    -prio3PF $val(pf3) \
    -prio3Aifs $val(aifs3) \
    -prio3CWmin $val(cwmin3) \
    -prio3CWmax $val(cwmax3) \
    -prio3Txop $val(txop3) \

if { $AKAROA == 1 } {
    set ak [new Akaroa]
    $ak AkDeclareParameters 8
}
#
# Cria um especifico numero de nos [$val(nn)] e os associa aos canais

for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    set node_($i) [$ns_ node]
}

# Define a posicao dos nos

```

```

source $val(cenario)

#Define padrao de trafego

source $val(traf)

# Diz aos nos quando a simulacao termina
#
for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {
    $ns_ at $val(stop).0 "$node_($i) reset";
}

$ns_ at $val(stop).0002 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"

puts $tracefd "M 0.0 nn $val(nn) x $val(x) y $val(y) rp $val(adhocRouting)"
puts $tracefd "M 0.0 prop $val(prop) ant $val(ant)"

puts "Starting Simulation $run..."
$ns_ run

```

A.1.2. CONFIGURAÇÃO COM QOS

```
set AKAROA 0
```

```
Mac/802_11e set dataRate_ 54Mb
```

```

set val(chan)      Channel/WirelessChannel
set val(prop)      Propagation/TwoRayGround
set val(netif)     Phy/WirelessPhy
set val(mac)       Mac/802_11e
set val(ifq)       Queue/DTail/PriQ
set val(ll)        LL
set val(ant)       Antenna/OmniAntenna
set val(x)         500      ;# coordenada X da topografia
set val(y)         500      ;# coordenada Y da topografia
set val(ifqlen)    1000    ;# max packet in ifq
set val(adhocRouting) OLSR
set val(stop)      330.0    ;# tempo de simulacao
set val(energyModel) EnergyModel ;# modelo de energia de cada no
set val(initialEnergy) 25.0 ;# energia inicial em Joules
set val(txPower)   0.0      ;# taxa de transmissao de dados em W
set val(rxPower)   0.0      ;# taxa de recepcao de dados em W
set val(idle)      0.0      ;# taxa de escuta ociosa em W

```

```

# =====
# Programa principal
# =====
#
# Inicia as Variaveis globais
#
set run 1

for {set i 0} {$i < $argc } {incr i} {

```

```

set opti [lindex $argv $i]
if {$opti == "-cenario"} {
    set val(cenario) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-seed"} {
    set val(seed) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-run"} {
    set run [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-n"} {
    set val(nn) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-trafego"} {
    set val(traf) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-cfb"} {
    set val(cfb) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-cfb_adapt"} {
    set val(cfb_adapt) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-pf0"} {
    set val(pf0) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-aifs0"} {
    set val(aifs0) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-cwmin0"} {
    set val(cwmin0) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-cwmax0"} {
    set val(cwmax0) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-txopLimit0"} {
    set val(txop0) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-pf1"} {
    set val(pf1) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-aifs1"} {
    set val(aifs1) [lindex $argv [incr i]]
}

```

```

} elseif {$opti == "-cwmin1"} {
    set val(cwmin1) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-cwmax1"} {
    set val(cwmax1) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-txopLimit1"} {
    set val(txop1) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-pf2"} {
    set val(pf2) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-aifs2"} {
    set val(aifs2) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-cwmin2"} {
    set val(cwmin2) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-cwmax2"} {
    set val(cwmax2) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-txopLimit2"} {
    set val(txop2) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-pf3"} {
    set val(pf3) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-aifs3"} {
    set val(aifs3) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-cwmin3"} {
    set val(cwmin3) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-cwmax3"} {
    set val(cwmax3) [lindex $argv [incr i]]
} elseif {$opti == "-txopLimit3"} {
    set val(txop3) [lindex $argv [incr i]]
} else {
    puts "Opcao invalida: \"$opti\""
    exit 1
}

```

```

}

remove-all-packet-headers
add-packet-header IP ARP OLSR LL Mac

#set EDCA $val(edca)

set ns_ [new Simulator] ;# Cria instancia do simulador
$ns_ use-scheduler Heap
set topo [new Topography] ;# Seto o objeto topografia
set trace_file "EDCA_padrao_$run-n$val(nn)-s$val(seed)-cfb$val(cfb)-adapt$val(cfb_adapt)-
cwmin$val(cwmin3)-aifs3$val(aifs3).tr"
set tracefd [open $trace_file w] ;# Cria o objeto trace para ns

$ns_ trace-all $tracefd

Mac/802_11e set cfb_ $val(cfb)
Mac/802_11e set cfb_adapt_ $val(cfb_adapt)

$topo load_flatgrid $val(x) $val(y) ;# Define a topologia
set god_ [create-god $val(nn)] ;# Cria God

set chan_ [new $val(chan)]

# Define como os nos devem ser criados
#
# Configuracoes globais dos nos

$ns_ node-config -adhocRouting $val(adhocRouting) \
    -llType $val(ll) \
    -macType $val(mac) \
    -ifqType $val(ifq) \
    -ifqLen $val(ifqlen) \
    -antType $val(ant) \
    -propType $val(prop) \
    -phyType $val(netif) \
    -channel $chan_ \
    -topoInstance $topo \
    -energyModel $val(energyModel) \
    -rxPower $val(rxPower) \
    -txPower $val(txPower) \
    -idlePower $val(idle) \
    -initialEnergy $val(initialEnergy) \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace ON \
    -macTrace ON \
    -prio0PF $val(pf0) \
    -prio0Aifs $val(aifs0) \
    -prio0CWmin $val(cwmin0) \
    -prio0CWmax $val(cwmax0) \
    -prio0Txop $val(txop0) \
    -prio1PF $val(pf1) \
    -prio1Aifs $val(aifs1) \
    -prio1CWmin $val(cwmin1) \
    -prio1CWmax $val(cwmax1) \
    -prio1Txop $val(txop1) \
    -prio2PF $val(pf2) \
    -prio2Aifs $val(aifs2) \

```

```

        -prio2CWmin $val(cwmin2) \
        -prio2CWmax $val(cwmax2) \
        -prio2Txop $val(txop2) \
        -prio3PF $val(pf3) \
        -prio3Aifs $val(aifs3) \
        -prio3CWmin $val(cwmin3) \
        -prio3CWmax $val(cwmax3) \
        -prio3Txop $val(txop3) \

if { $AKAROA == 1 } {
    set ak [new Akaroa]
    $ak AkDeclareParameters 8
}
#
# Cria um especifico numero de nos [$val(nn)] e os associa aos canais

for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    set node_($i) [$ns_ node]
}

# Define a posicao dos nos

source $val(cenario)

#Define padrao de trafego

source $val(traf)

# Diz aos nos quando a simulacao termina
#
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns_ at $val(stop).0 "$node_($i) reset";
}

$ns_ at $val(stop).0002 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"

puts $tracefd "M 0.0 nn $val(nn) x $val(x) y $val(y) rp $val(adhocRouting)"
puts $tracefd "M 0.0 prop $val(prop) ant $val(ant)"

puts "Starting Simulation $run..."
$ns_ run

```

A.1.3. CONFIGURAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE VÍDEO (FERRAMENTA EVALVID) SEM QOS

```

set AKAROA 0

Mac/802_11 set dataRate_ 54Mb
Mac/802_11 set RTSThreshold_ 3000

set val(chan) Channel/WirelessChannel
set val(prop) Propagation/TwoRayGround
set val(netif) Phy/WirelessPhy
set val(mac) Mac/802_11
set val(ifq) Queue/DropTail/PriQueue
set val(ll) LL

```

```

set val(ant)                Antenna/OmniAntenna
set val(x)                  500                ;# coordenada X da topografia
set val(y)                  500                ;# coordenada Y da topografia
set val(ifqlen)             1000              ;# max packet in ifq
set val(adhocRouting)      OLSR
set val(stop)               330.0             ;# tempo de simulacao
set val(energyModel)       EnergyModel       ;# modelo de energia de cada no
set val(initialEnergy)     25.0               ;# energia inicial em Joules
set val(txPower)            0.0               ;# taxa de transmissao de dados
em W
set val(rxPower)            0.0               ;# taxa de repeccao de dados em
W
set val(idle)               0.0               ;# taxa de escuta ociosa em W

# =====
# Programa principal
# =====
#
# Inicia as Variaveis globais
#

set run 1

for {set i 0} {$i < $argc } {incr i} {
    set opti [lindex $argv $i]
    if {$opti == "-cenario"} {
        set val(cenario) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-seed"} {
        set val(seed) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-run"} {
        set run [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-n"} {
        set val(nn) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-trafego"} {
        set val(traf) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cfb"} {
        set val(cfb) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-pf0"} {
        set val(pf0) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-aifs0"} {
        set val(aifs0) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmin0"} {

```

```

        set val(cwmin0) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmmax0"} {
        set val(cwmax0) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-txopLimit0"} {
        set val(txop0) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-pf1"} {
        set val(pf1) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-aifs1"} {
        set val(aifs1) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmin1"} {
        set val(cwmin1) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmmax1"} {
        set val(cwmax1) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-txopLimit1"} {
        set val(txop1) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-pf2"} {
        set val(pf2) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-aifs2"} {
        set val(aifs2) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmin2"} {
        set val(cwmin2) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmmax2"} {
        set val(cwmax2) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-txopLimit2"} {
        set val(txop2) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-pf3"} {
        set val(pf3) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-aifs3"} {
        set val(aifs3) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmin3"} {

```

```

        set val(cwmin3) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmax3"} {
        set val(cwmax3) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-txopLimit3"} {
        set val(txop3) [lindex $argv [incr i]]
    } else {
        puts "Opcao invalida: \"$opti\""
        exit 1
    }
}

remove-all-packet-headers
add-packet-header IP ARP OLSR LL Mac

#set EDCA $val(edca)

set ns_          [new Simulator]          ;# Cria instancia do
simulador
$ns_ use-scheduler Heap
set topo        [new Topography]          ;# Seta o objeto topografia
set out "80211g_$run-n$val(nn)-s$val(seed).tr"
set tracefd [open $out w]                ;# Cria o objeto trace para ns

$ns_ trace-all $tracefd

set max_fragmented_size 1000
set packetSize 1028

set original_file_name "st_news_qcif_livia_sorted"
set trace_file_name "news_$run.dat"
set original_file_id [open $original_file_name r]
set trace_file_id [open $trace_file_name w]

set pre_time 0

while {[eof $original_file_id] == 0} {
    gets $original_file_id current_line
    scan $current_line "%d%s%d%d%f" no_ frametype_ length_ tmp1_ tmp2_
    set time [expr int(($tmp2_ - $pre_time)*1000000.0)]

    if { $frametype_ == "I" } {
        set type_v 1
        set prio_p 0
    }
    if { $frametype_ == "P" } {
        set type_v 2
        set prio_p 0
    }
    if { $frametype_ == "B" } {
        set type_v 3
        set prio_p 0
    }
    if { $frametype_ == "H" } {
        set type_v 1
        set prio_p 0
    }
}

```

```

    }

    puts $trace_file_id "$time $length_ $type_v $prio_p
$max_fragmented_size"
    set pre_time $tmp2_

}

close $original_file_id
close $trace_file_id

set start_video_time 31.0
set end_sim_time [expr $tmp2_ + $start_video_time]

puts "$end_sim_time"

#Mac/802_11e set cfb_ $val(cfb)

$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)           ;# Define a topologia
set god_ [create-god $val(nn)]               ;# Cria God

set chan_ [new $val(chan)]

# Define como os nos devem ser criados
#
# Configuracoes globais dos nos

$ns_ node-config -adhocRouting $val(adhocRouting) \
    -llType $val(ll) \
    -macType $val(mac) \
    -ifqType $val(ifq) \
    -ifqLen $val(ifqlen) \
    -antType $val(ant) \
    -propType $val(prop) \
    -phyType $val(netif) \
    -channel $chan_ \
    -topoInstance $topo \
    -energyModel $val(energyModel) \
    -rxPower $val(rxPower) \
    -txPower $val(txPower) \
    -idlePower $val(idle) \
    -initialEnergy $val(initialEnergy) \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace OFF \
    -macTrace ON \
    -prio0PF $val(pf0) \
    -prio0Aifs $val(aifs0) \
    -prio0CWmin $val(cwmin0) \
    -prio0CWmax $val(cwmax0) \
    -prio0Txop $val(txop0) \
    -prio1PF $val(pf1) \
    -prio1Aifs $val(aifs1) \
    -prio1CWmin $val(cwmin1) \
    -prio1CWmax $val(cwmax1) \
    -prio1Txop $val(txop1) \
    -prio2PF $val(pf2) \
    -prio2Aifs $val(aifs2) \
    -prio2CWmin $val(cwmin2) \
    -prio2CWmax $val(cwmax2) \
    -prio2Txop $val(txop2) \

```

```

        -prio3PF $val(pf3) \
        -prio3Aifs $val(aifs3) \
        -prio3CWmin $val(cwmin3) \
        -prio3CWmax $val(cwmax3) \
        -prio3Txop $val(txop3) \

if {$AKAROA == 1} {
    set ak [new Akaroa]
    $ak AkDeclareParameters 8
}
#
# Cria um especifico numero de nos [$val(nn)] e os associa aos canais

for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {
    set node_($i) [$ns_ node]
}

# Define a posicao dos nos

source $val(cenario)

#Define padrao de trafego

source $val(traf)

set trace_file [new Tracefile]
$trace_file filename $trace_file_name
set videol [new Application/Traffic/myEvalvid]
$videol attach-agent $udpl
$videol attach-tracefile $trace_file

$ns_ at $start_video_time "$videol start"
$ns_ at $end_sim_time "$videol stop"

# Diz aos nos quando a simulacao termina
#
for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {
    $ns_ at $val(stop).0 "$node_($i) reset";
}

$ns_ at $val(stop).0002 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"

puts $tracefd "M 0.0 nn $val(nn) x $val(x) y $val(y) rp $val(adhocRouting)"
puts $tracefd "M 0.0 prop $val(prop) ant $val(ant)"

puts "Starting Simulation $run..."
$ns_ run

```

A.1.4. CONFIGURAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE VÍDEO (FERRAMENTA EVALVID) COM QOS

```

set AKAROA 0

Mac/802_11e set dataRate_ 54Mb

set val(chan)          Channel/WirelessChannel
set val(prop)          Propagation/TwoRayGround
set val(netif)         Phy/WirelessPhy

```

```

set val(mac)                Mac/802_11e
set val(ifq)                Queue/DTail/PriQ
set val(ll)                 LL
set val(ant)                Antenna/OmniAntenna
set val(x)                  500          ;# coordenada X da topografia
set val(y)                  500          ;# coordenada Y da topografia
set val(ifqlen)             1000        ;# max packet in ifq
set val(adhocRouting)       OLSR
set val(stop)               330.0       ;# tempo de simulacao
set val(energyModel)        EnergyModel ;# modelo de energia de cada no
set val(initialEnergy)      25.0        ;# energia inicial em Joules
set val(txPower)             0.0         ;# taxa de transmissao de dados
em W
set val(rxPower)             0.0         ;# taxa de repecpcao de dados em
W
set val(idle)                0.0         ;# taxa de escuta ociosa em W

```

```

# =====
# Programa principal
# =====
#
# Inicia as Variaveis globais
#

set run 1

for {set i 0} {$i < $argc } {incr i} {
    set opti [lindex $argv $i]
    if {$opti == "-cenario"} {
        set val(cenario) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-seed"} {
        set val(seed) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-run"} {
        set run [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-n"} {
        set val(nn) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-trafego"} {
        set val(traf) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cfb"} {
        set val(cfb) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cfb_adapt"} {
        set val(cfb_adapt) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-pf0"} {

```

```
        set val(pf0) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-aifs0"} {
        set val(aifs0) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmin0"} {
        set val(cwmin0) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmax0"} {
        set val(cwmax0) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-txopLimit0"} {
        set val(txop0) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-pf1"} {
        set val(pf1) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-aifs1"} {
        set val(aifs1) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmin1"} {
        set val(cwmin1) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmax1"} {
        set val(cwmax1) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-txopLimit1"} {
        set val(txop1) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-pf2"} {
        set val(pf2) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-aifs2"} {
        set val(aifs2) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmin2"} {
        set val(cwmin2) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmax2"} {
        set val(cwmax2) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-txopLimit2"} {
        set val(txop2) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-pf3"} {
        set val(pf3) [lindex $argv [incr i]]
    }
```

```

    } elseif {$opti == "-aifs3"} {
        set val(aifs3) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmin3"} {
        set val(cwmin3) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-cwmax3"} {
        set val(cwmax3) [lindex $argv [incr i]]
    } elseif {$opti == "-txopLimit3"} {
        set val(txop3) [lindex $argv [incr i]]
    } else {
        puts "Opcao invalida: \"$opti\""
        exit 1
    }
}

remove-all-packet-headers
add-packet-header IP ARP OLSR LL Mac

#set EDCA $val(edca)

set ns_ [new Simulator] ;# Cria instancia do
simulador
$ns_ use-scheduler Heap
set topo [new Topography] ;# Seta o objeto topografia
set out "EDCA_padrao_$run-n$val(nn)-s$val(seed)-cfb$val(cfb)-
adapt$val(cfb_adapt)-cwmin$val(cwmin3)-aifs3$val(aifs3).tr"
set tracefd [open $out w] ;# Cria o objeto trace para ns

$ns_ trace-all $tracefd

set max_fragmented_size 1000

set packetSize 1028

Mac/802_11e set cfb_ $val(cfb)
Mac/802_11e set cfb_adapt_ $val(cfb_adapt)

$topo load_flatgrid $val(x) $val(y) ;# Define a topologia
set god_ [create-god $val(nn)] ;# Cria God

set chan_ [new $val(chan)]

# Define como os nos devem ser criados
#
# Configuracoes globais dos nos

$ns_ node-config -adhocRouting $val(adhocRouting) \
                -llType $val(ll) \
                -macType $val(mac) \
                -ifqType $val(ifq) \
                -ifqLen $val(ifqlen) \

```

```

        -antType $val(ant) \
        -propType $val(prop) \
        -phyType $val(netif) \
        -channel $chan_ \
        -topoInstance $topo \
    -energyModel $val(energyModel) \
        -rxPower $val(rxPower) \
        -txPower $val(txPower) \
        -idlePower $val(idle) \
    -initialEnergy $val(initialEnergy) \
        -agentTrace ON \
        -routerTrace OFF \
        -macTrace ON \
    -prio0PF $val(pf0) \
        -prio0Aifs $val(aifs0) \
        -prio0CWmin $val(cwmin0) \
        -prio0CWmax $val(cwmax0) \
        -prio0Txop $val(txop0) \
        -prio1PF $val(pf1) \
        -prio1Aifs $val(aifs1) \
        -prio1CWmin $val(cwmin1) \
        -prio1CWmax $val(cwmax1) \
        -prio1Txop $val(txop1) \
        -prio2PF $val(pf2) \
        -prio2Aifs $val(aifs2) \
        -prio2CWmin $val(cwmin2) \
        -prio2CWmax $val(cwmax2) \
        -prio2Txop $val(txop2) \
        -prio3PF $val(pf3) \
        -prio3Aifs $val(aifs3) \
        -prio3CWmin $val(cwmin3) \
        -prio3CWmax $val(cwmax3) \
        -prio3Txop $val(txop3) \

if {$SAKAROA == 1} {
    set ak [new Akaroa]
    $ak AkDeclareParameters 8
}
#
# Cria um especifico numero de nos [$val(nn)] e os associa aos canais

for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {
    set node_($i) [$ns_ node]
}

# Define a posicao dos nos

source $val(cenario)

#Define padrao de trafego

source $val(traf)

set original_file_name st_news_qcif_livia_sorted

set trace_file_name "news_$run.dat"

set original_file_id [open $original_file_name r]

set trace_file_id [open $trace_file_name w]

```

```

#set frame_count 0
#set last_time 0
set pre_time 0

while {[eof $original_file_id] == 0} {
    gets $original_file_id current_line
    scan $current_line "%d%s%d%d%f" no_ frametype_ length_ tmp1_ tmp2_
    #puts "$no_\t$frametype_\t$length_\t$tmp1_\t$tmp2_"
    set time [expr int(($tmp2_ - $pre_time)*1000000.0)]
    if {$frametype_ == "I"} {
        set type_v 1
        set prio_p 0
    }
    if {$frametype_ == "P"} {
        set type_v 2
        set prio_p 0
    }
    if {$frametype_ == "B"} {
        set type_v 3
        set prio_p 0
    }
    if {$frametype_ == "H"} {
        set type_v 1
        set prio_p 0
    }
    puts $trace_file_id "$time $length_ $type_v $prio_p
$max_fragmented_size"
    #incr frame_count
    set pre_time $tmp2_
}

close $original_file_id

close $trace_file_id

set start_video_time 31.0
set end_sim_time [expr $tmp2_ + $start_video_time]

puts "$end_sim_time"

set trace_file [new Tracefile]
$trace_file filename $trace_file_name
set videol [new Application/Traffic/myEvalvid]
$videol attach-agent $sudpl
$videol attach-tracefile $trace_file

#proc finish {} {
#    global ns_ out
#    $ns_ flush-trace
#    close $out
#    exit 0
#}

$ns_ at $start_video_time "$videol start"
$ns_ at $end_sim_time "$videol stop"

$ns_ at $val(stop).0 "$null1 closefile"
#$ns_ at [expr $val(stop).0 + 1.0] "finish"

# Diz aos nos quando a simulacao termina

```

```

#
for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {
    $ns_ at $val(stop).0 "$node_($i) reset";
}

$ns_ at $val(stop).0002 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"

puts $tracefd "M 0.0 nn $val(nn) x $val(x) y $val(y) rp $val(adhocRouting)"
puts $tracefd "M 0.0 prop $val(prop) ant $val(ant)"

puts "Starting Simulation $run..."
$ns_ run

```

A.2. SCRIPTS TCL DE GERAÇÃO DE TRÁFEGO

A.2.1. CENÁRIO DE GERAÇÃO CONTÍNUA DE TRÁFEGO

```

#global defaultRNG
#$defaultRNG seed 9999

# create the RNGs and set them to the correct substream
set sourceRNG [new RNG]
set destRNG [new RNG]
$sourceRNG seed $val(seed)
$destRNG seed $val(seed)

set source_ [new RandomVariable/Uniform]
$source_ set min_ 0
$source_ set max_ [expr $val(nn) - 1]
$source_ use-rng $sourceRNG

set dest_ [new RandomVariable/Uniform]
$dest_ set min_ 0
$dest_ set max_ [expr $val(nn) - 1]
$dest_ use-rng $destRNG

for {set t 1} {$t < $val(stop)} {incr t 20} {

set s_ [expr round([$source_ value])]

set d_ [expr round([$dest_ value])]
while {$d_ == $s_} {
    set d_ [expr round([$dest_ value])]
}

# Trafego de prioridade 0 = Voz

set udp_($t) [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_($s_) $udp_($t)
$udp_($t) set class_ 0
$udp_($t) set prio_ 0
set null_($t) [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_($d_) $null_($t)
set cbr_($t) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_($t) set packetSize_ 160
$cbr_($t) set interval_ 20e-3

```

```

$nbr_($t) attach-agent $udp_($t)
$ns_ connect $udp_($t) $null_($t)
$ns_ at [expr $t + 30.0] "$nbr_($t) start"

# Trafego de prioridade 1 = Video

set udp_([expr $t + 1]) [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_($s_) $udp_([expr $t + 1])
$udp_([expr $t + 1]) set class_ 1
$udp_([expr $t + 1]) set prio_ 1
set null_([expr $t + 1]) [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_($d_) $null_([expr $t + 1])
set cbr_([expr $t + 1]) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_([expr $t + 1]) set packetSize_ 1280
$cbr_([expr $t + 1]) set interval_ 10e-3
$cbr_([expr $t + 1]) attach-agent $udp_([expr $t + 1])
$ns_ connect $udp_([expr $t + 1]) $null_([expr $t + 1])
$ns_ at [expr $t + 30.0] "$cbr_([expr $t + 1]) start"

# Trafego de prioridade 2 = Melhor Esforço

set tcp_($t) [new Agent/TCP]
$ns_ attach-agent $node_($s_) $tcp_($t)
$tcp_($t) set class_ 2
$tcp_($t) set prio_ 2
set sink_($t) [new Agent/TCPSink]
$ns_ attach-agent $node_($d_) $sink_($t)
set ftp_($t) [new Application/FTP]
$tcp_($t) set packetSize_ 1300
$ftp_($t) attach-agent $tcp_($t)
$ns_ connect $tcp_($t) $sink_($t)
$ns_ at [expr $t + 30.0] "$ftp_($t) start"

# Trafego de prioridade 3 = Background

set tcp_([expr $t + 1]) [new Agent/TCP]
$ns_ attach-agent $node_($s_) $tcp_([expr $t + 1])
$tcp_([expr $t + 1]) set class_ 3
$tcp_([expr $t + 1]) set prio_ 3
set sink_([expr $t + 1]) [new Agent/TCPSink]
$ns_ attach-agent $node_($d_) $sink_([expr $t + 1])
set ftp_([expr $t + 1]) [new Application/FTP]
$tcp_([expr $t + 1]) set packetSize_ 1500
$ftp_([expr $t + 1]) attach-agent $tcp_([expr $t + 1])
$ns_ connect $tcp_([expr $t + 1]) $sink_([expr $t + 1])
$ns_ at [expr $t + 30.0] "$ftp_([expr $t + 1]) start"

}

```

A.2.2. CENÁRIO COM INTERRUPTÃO DO TRÁFEGO DE VOZ

```

#global defaultRNG
#$defaultRNG seed 9999

# create the RNGs and set them to the correct substream
set sourceRNG [new RNG]

```

```

set destRNG [new RNG]
$sourceRNG seed $val(seed)
$destRNG seed $val(seed)

set source_ [new RandomVariable/Uniform]
$source_ set min_ 0
$source_ set max_ [expr $val(nn) - 1]
$source_ use-rng $sourceRNG

set dest_ [new RandomVariable/Uniform]
$dest_ set min_ 0
$dest_ set max_ [expr $val(nn) - 1]
$dest_ use-rng $destRNG

for {set t 1} {$t < $val(stop)} {incr t 20} {

set s_ [expr round([$source_ value])]

set d_ [expr round([$dest_ value])]
while {$d_ == $s_} {
    set d_ [expr round([$dest_ value])]
}

# Trafego de prioridade 0 = Voz

set udp_($t) [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_($s_) $udp_($t)
$udp_($t) set class_ 0
$udp_($t) set prio_ 0
set null_($t) [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_($d_) $null_($t)
set cbr_($t) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_($t) set packetSize_ 160
$cbr_($t) set interval_ 20e-3
$cbr_($t) attach-agent $udp_($t)
$ns_ connect $udp_($t) $null_($t)
if {$t + 30.0 < 100.0} {
    $ns_ at [expr $t + 30.0] "$cbr_($t) start"
    $ns_ at 100.0 "$cbr_($t) stop"
    $ns_ at 200.0 "$cbr_($t) start"
}

# Trafego de prioridade 1 = Video

set udp_([expr $t + 1]) [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_($s_) $udp_([expr $t + 1])
$udp_([expr $t + 1]) set class_ 1
$udp_([expr $t + 1]) set prio_ 1
set null_([expr $t + 1]) [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_($d_) $null_([expr $t + 1])
set cbr_([expr $t + 1]) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_([expr $t + 1]) set packetSize_ 1280
$cbr_([expr $t + 1]) set interval_ 10e-3
$cbr_([expr $t + 1]) attach-agent $udp_([expr $t + 1])
$ns_ connect $udp_([expr $t + 1]) $null_([expr $t + 1])
$ns_ at [expr $t + 30.0] "$cbr_([expr $t + 1]) start"

# Trafego de prioridade 2

```

```

set tcp_($t) [new Agent/TCP]
$ns_ attach-agent $node_($s_) $tcp_($t)
$tcp_($t) set class_ 2
$tcp_($t) set prio_ 2
set sink_($t) [new Agent/TCPSink]
$ns_ attach-agent $node_($d_) $sink_($t)
set ftp_($t) [new Application/FTP]
$tcp_($t) set packetSize_ 1300
$ftp_($t) attach-agent $tcp_($t)
$ns_ connect $tcp_($t) $sink_($t)
$ns_ at [expr $t + 30.0] "$ftp_($t) start"

# Trafego de prioridade 3

set tcp_([expr $t + 1]) [new Agent/TCP]
$ns_ attach-agent $node_($s_) $tcp_([expr $t + 1])
$tcp_([expr $t + 1]) set class_ 3
$tcp_([expr $t + 1]) set prio_ 3
set sink_([expr $t + 1]) [new Agent/TCPSink]
$ns_ attach-agent $node_($d_) $sink_([expr $t + 1])
set ftp_([expr $t + 1]) [new Application/FTP]
$tcp_([expr $t + 1]) set packetSize_ 1500
$ftp_([expr $t + 1]) attach-agent $tcp_([expr $t + 1])
$ns_ connect $tcp_([expr $t + 1]) $sink_([expr $t + 1])
$ns_ at [expr $t + 30.0] "$ftp_([expr $t + 1]) start"

}

```

A.2.3. CENÁRIO DE AVALIAÇÃO DE VÍDEO (FERRAMENTA EVALVID)

```

#global defaultRNG
#$defaultRNG seed 9999

# create the RNGs and set them to the correct substream
set sourceRNG [new RNG]
set destRNG [new RNG]
$sourceRNG seed $val(seed)
$destRNG seed $val(seed)

set source_ [new RandomVariable/Uniform]
$source_ set min_ 0
$source_ set max_ [expr $val(nn) - 1]
$source_ use-rng $sourceRNG

set dest_ [new RandomVariable/Uniform]
$dest_ set min_ 0
$dest_ set max_ [expr $val(nn) - 1]
$dest_ use-rng $destRNG

set s_ [expr round([$source_ value])]

set d_ [expr round([$dest_ value])]
while {$d_ == $s_} {
    set d_ [expr round([$dest_ value])]
}

set udp1 [new Agent/myUDP]

```

```

$ns_ attach-agent $node_($s_) $udpl
$udpl set packetSize_ $packetSize
$udpl set_filename sd_news_$run
$udpl set class_ 1
$udpl set prio_ 1
set null1 [new Agent/myEvalvid_Sink]
$ns_ attach-agent $node_($d_) $null1
$ns_ connect $udpl $null1
$null1 set_filename rd_news_$run

for {set t 1} {$t < $val(stop)} {incr t 20} {

set s_ [expr round([$source_ value])]

set d_ [expr round([$dest_ value])]
while {$d_ == $s_} {
    set d_ [expr round([$dest_ value])]
}

# Trafego de prioridade 0 = Voz

set udp_($t) [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_($s_) $udp_($t)
$udp_($t) set class_ 0
$udp_($t) set prio_ 0
set null_($t) [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_($d_) $null_($t)
set cbr_($t) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_($t) set packetSize_ 160
$cbr_($t) set interval_ 20e-3
$cbr_($t) attach-agent $udp_($t)
$ns_ connect $udp_($t) $null_($t)
$ns_ at [expr $t + 30.0] "$cbr_($t) start"

# Trafego de prioridade 1 = Video

set udp_([expr $t + 1]) [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_($s_) $udp_([expr $t + 1])
$udp_([expr $t + 1]) set class_ 1
$udp_([expr $t + 1]) set prio_ 1
set null_([expr $t + 1]) [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_($d_) $null_([expr $t + 1])
set cbr_([expr $t + 1]) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_([expr $t + 1]) set packetSize_ 1280
$cbr_([expr $t + 1]) set interval_ 10e-3
$cbr_([expr $t + 1]) attach-agent $udp_([expr $t + 1])
$ns_ connect $udp_([expr $t + 1]) $null_([expr $t + 1])
$ns_ at [expr $t + 30.0] "$cbr_([expr $t + 1]) start"

# Trafego de prioridade 2

set tcp_($t) [new Agent/TCP]
$ns_ attach-agent $node_($s_) $tcp_($t)
$tcp_($t) set class_ 2
$tcp_($t) set prio_ 2
set sink_($t) [new Agent/TCPSink]
$ns_ attach-agent $node_($d_) $sink_($t)
set ftp_($t) [new Application/FTP]
$tcp_($t) set packetSize_ 1300
$ftp_($t) attach-agent $tcp_($t)
$ns_ connect $tcp_($t) $sink_($t)

```

```

$ns_ at [expr $t + 30.0] "$ftp_($t) start"

# Trafego de prioridade 3

set tcp_([expr $t + 1]) [new Agent/TCP]
$ns_ attach-agent $node_($s_) $tcp_([expr $t + 1])
$tcp_([expr $t + 1]) set class_ 3
$tcp_([expr $t + 1]) set prio_ 3
set sink_([expr $t + 1]) [new Agent/TCPSink]
$ns_ attach-agent $node_($d_) $sink_([expr $t + 1])
set ftp_([expr $t + 1]) [new Application/FTP]
$tcp_([expr $t + 1]) set packetSize_ 1500
$ftp_([expr $t + 1]) attach-agent $tcp_([expr $t + 1])
$ns_ connect $tcp_([expr $t + 1]) $sink_([expr $t + 1])
$ns_ at [expr $t + 30.0] "$ftp_([expr $t + 1]) start"

}

```

A.3. ALTERAÇÃO DO CÓDIGO DO MÉTODO CFB PARA ADAPTAÇÃO DINÂMICA DE TXOPLIMIT

```

void Mac802_11e::cfb(int pri)
{
    double timeout;
    struct hdr_mac802_11e *mh;
    int new_pkt_queue, tamanho;

    // next packet out of queue
    //cout<<"packets in queue:"<<queue->pri_[pri].getLen()<<"\n";
    if(queue->pri_[pri].getLen() > 0) {
        tamanho = queue->pri_[pri].getLen();
        Packet* p = queue->pri_[pri].deque();
        // framing
        sendDATA(pri, p);
        //hdr_cmn *ch = HDR_CMN(pktTx_[pri]);
        mh = HDR_MAC802_11E(pktTx_[pri]);
        //cout<<"Mac "<<index<<" in cfb(), pri "<<pri<<," cfb_bytes "<<cfb_bytes<<" + "<<ch->size()<<,"
        cfb_maxbytes "<<cfb_maxbytes<<"\n";
        if((u_int32_t)ETHER_ADDR(mh->dh_da) != MAC_BROADCAST) {
            cfb_dur += sifs_
                + txtime(pktTx_[pri])
                + sifs_
                + txtime(phymib_.getACKlen(), basicRate_);
            cfb_broadcast = 0;
        } else {
            cfb_dur += sifs_
                + txtime(pktTx_[pri]);
            cfb_broadcast = 1;
        }
    }

    //Atualizando TXOPLimit
    if(cfb_adapt_){
        if(pri == 0){
            txop_limit_[pri] = MIN(ceil((double)(tamanho*(sifs_ + txtime(pktTx_[pri]) + sifs_ +
            txtime(phymib_.getACKlen(),
            basicRate_)/TXOPLIMIT_MIN))*TXOPLIMIT_MIN,TXOPLIMIT_ACVO_MAX);
        } else if(pri == 1){

```

```

        new_pkt_queue = tamanho - queue_->pri_[pri].getLenAnt();
        if(new_pkt_queue > 0) txop_limit_[pri] = MIN(ceil((double)(new_pkt_queue*(sifs_ +
txtime(pktTx_[pri]) + sifs_ + txtime(phymib_.getACKlen(),
basicRate_)/TXOPLIMIT_MIN))*TXOPLIMIT_MIN, TXOPLIMIT_ACVI_MAX);
        queue_->pri_[pri].setLenAnt(tamanho);
    }
} else cfb_dur = txop_limit_[pri] + 1;

if(cfb_dur <= txop_limit_[pri]) {
    // send
    if((u_int32_t)ETHER_ADDR(mh->dh_da) != MAC_BROADCAST)
        timeout = txtime(pktTx_[pri])
            + DSSS_EDCA_MaxPropagationDelay
            + sifs_
            + txtime(phymib_.getACKlen(), basicRate_)
            + DSSS_EDCA_MaxPropagationDelay;

    else
        timeout = txtime(pktTx_[pri]);
    cfb_active = 1;
    mhSifs_.start(pri, sifs_);
}
else {
    cfb_dur = 0;
    cfb_broadcast = 0;
    assert(mhBackoff_.backoff(pri) == 0);
    rst_cw(pri);
    mhBackoff_.start(pri, getCW(pri), is_idle());
    //assert(pktTx_[pri]);
    //Packet::free(pktTx_[pri]); pktTx_[pri] = 0;
    tx_resume();
}
}
}

```